



KamLAND2実験に向けた 大型低放射能バルーンの開発研究

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻
ニュートリノ科学研究センター
小幡 捺

学術変革「地下稀事象」若手研究会 2026/3/4 (水)

KamLAND実験

KamLAND1実験 (KL1) (2002年～2024年)

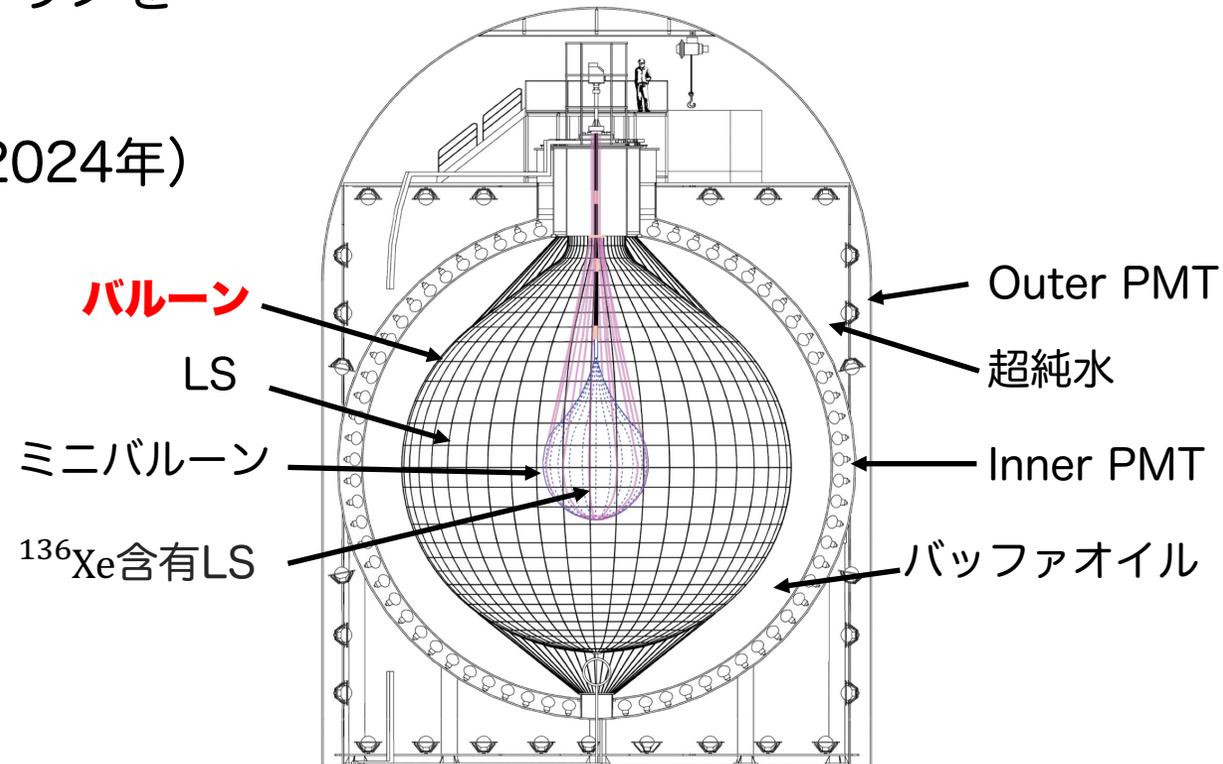
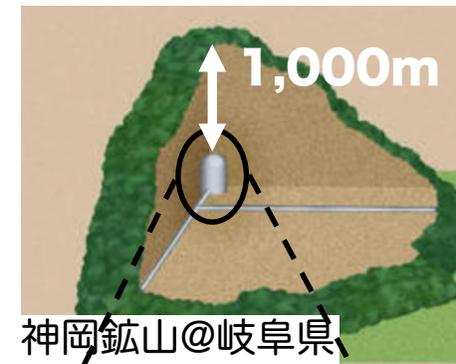
- 岐阜県神岡鉱山の地下1,000mに位置する、1kトンの液体シンチレータ (LS) を用いた低放射能ニュートリノ検出器
- 原子炉、太陽、地球、天体などからくるニュートリノを観測

KamLAND-Zen実験 (KL-Zen) (2011年～2024年)

- KL1検出器中央に ^{136}Xe 入りLSを内包したミニバルーンを設置
- ^{136}Xe のニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) の観測を目指す

KamLAND2実験 (KL2) (2027年度～)

- KL1実験をアップデート
 - 高量子効率PMTの導入 →集光量1.9倍
 - PMT集光ミラー取り付け →集光量1.8倍
 - **低放射能バルーンの作成**



KamLAND-Zen検出器

KL1バルーン

フィルム

独自の5層ラミネートフィルム

ナイロン EVOH ※ エチレン・ビニル
アルコール共重合体

◎ 強度

◎ 低ガス透過性

◎ 高誘電損失

△ 吸湿性

EVOH

乾いた 水につけた

バルーン

13m

役割

- LSの保持
- 外部からの放射性不純物の遮断

紐

- スーパー繊維のケブラー29
- 原糸→組紐→ネット構造



KL1バルーンの成功点

- EVOHの低ガス透過性→Rnを通しにくい
- EVOHの高い誘電損失→高周波溶着が可能
- LS→BOへの漏れが許容量以下

KL1バルーンの問題点

- ^{210}Bi がバルーン内部に付着し、 ^7Be 太陽 ν の主要な背景事象となった
- 紐に含まれる ^{40}K が多かった

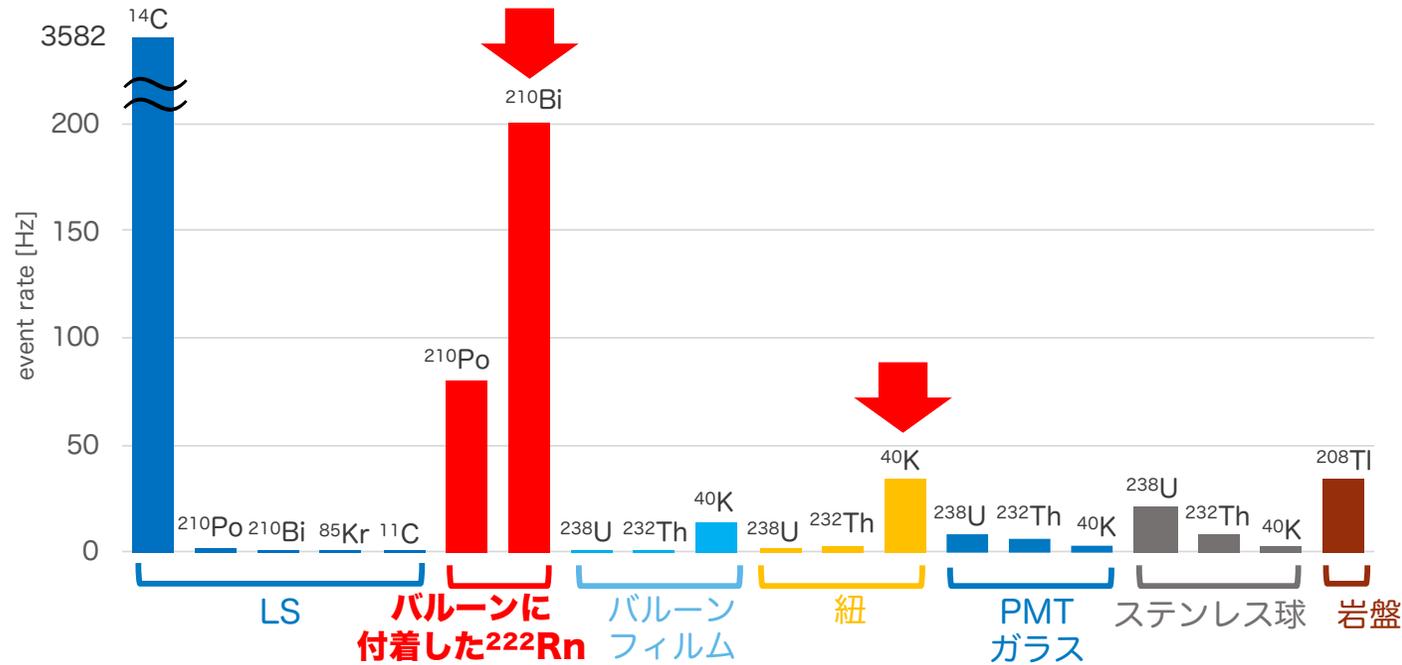
➡ KamLAND2でも同素材・同設計

バルーン由来の背景事象の影響

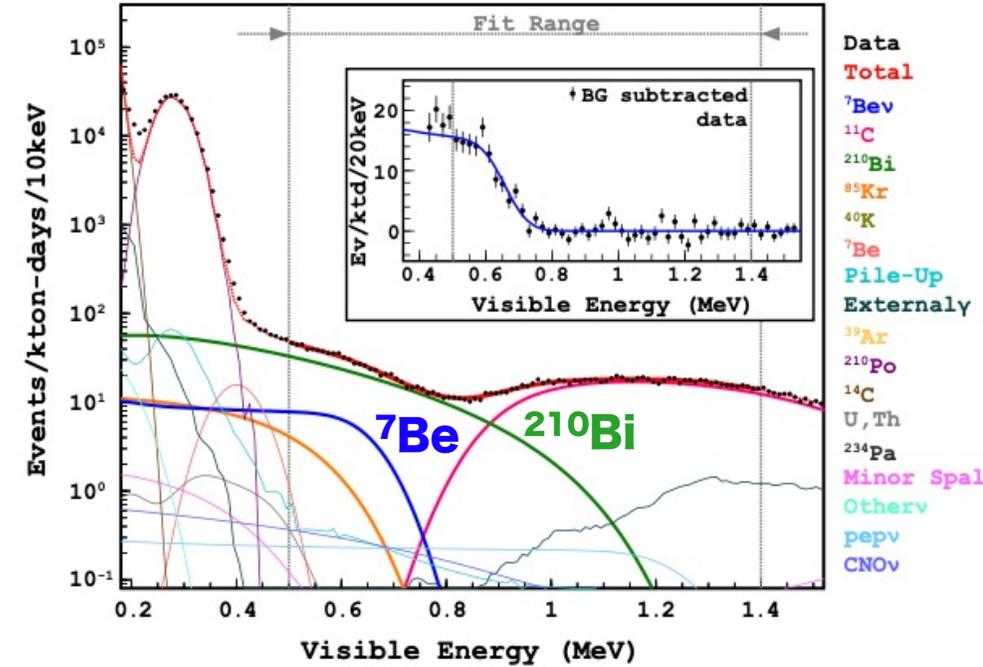
■ 放射性不純物

KL1では ^{222}Rn 娘核の ^{210}Bi がバルーン表面に多く付着した【原因】

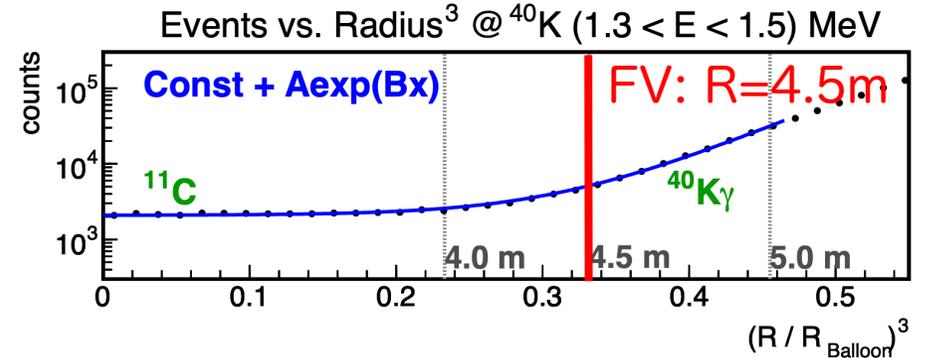
- ^{222}Rn 濃度の高い坑内空気ではバルーンを膨らませた → 主要な要因
- 製作時の簡易的な環境 → 切り分けは困難なものの一因



■ ^{210}Bi による ^7Be 太陽 ν 観測への影響



■ ^{40}K による ^7Be 太陽 ν の有効体積の制限



バルーン製作環境の変遷

2000年：KL1 (135 μ m厚, 直径13m)

大型バルーン製作方法の確立

- 簡易的な製作環境
- 湿度・静電気は無管理



KL-Zen



2011, 2015, 2018年：KL-Zen (25 μ m厚, 直径3.08 & 3.80m)

低放射能環境技術の確立

- 徹底した清浄度管理 (例：クラス1のスーパークリーンルーム)
- **カバーフィルム**の導入
- 湿度管理 (65%以上)、除電の徹底



知見の集約

2026年：KL2 (135 μ m厚, 直径13m)

- 清浄度の向上
- フィルム製作直後に**カバーフィルム**を設置
- 湿度管理 (65%以上)、除電の徹底

- 製作時の埃、傷防止
- 膨らませる際の²¹⁰Biの付着防止

- 静電気による
 - フィルムのスパーク防止
 - 埃の巻き込み防止

KL2での取り組み：

- バルーンを膨らませる空気にRn濃度の低い空気を使用
 - **製作環境の最適化**
 - **紐の低放射能化**
- 本研究の目的**

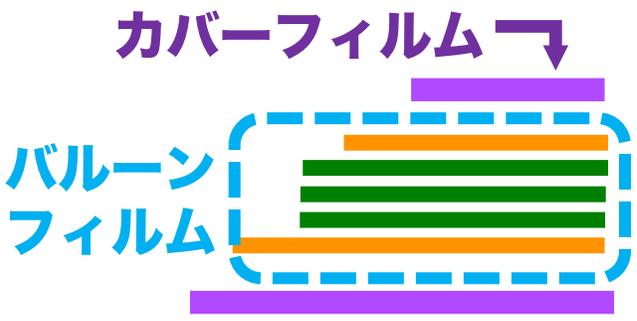
フィルムと製造過程

KL2から
新たに導入！

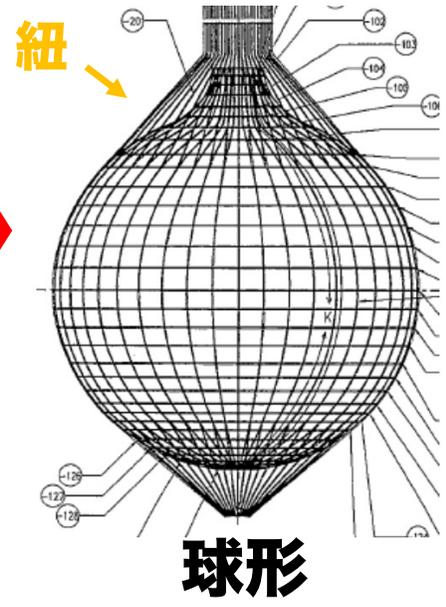
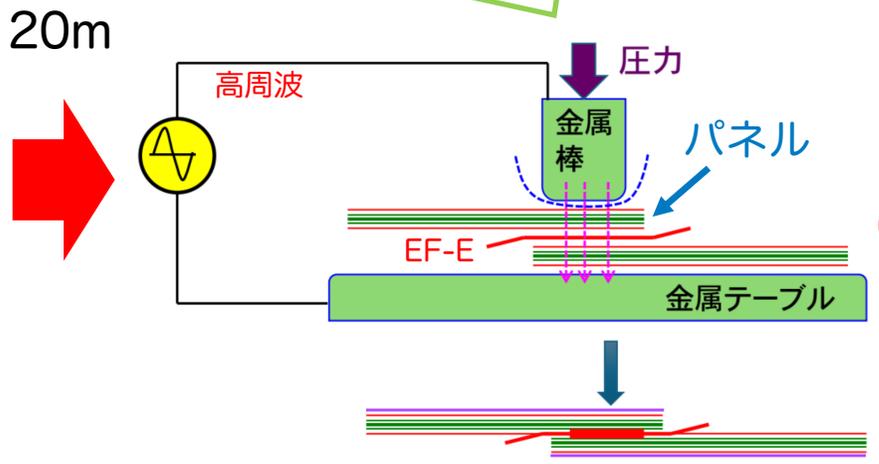
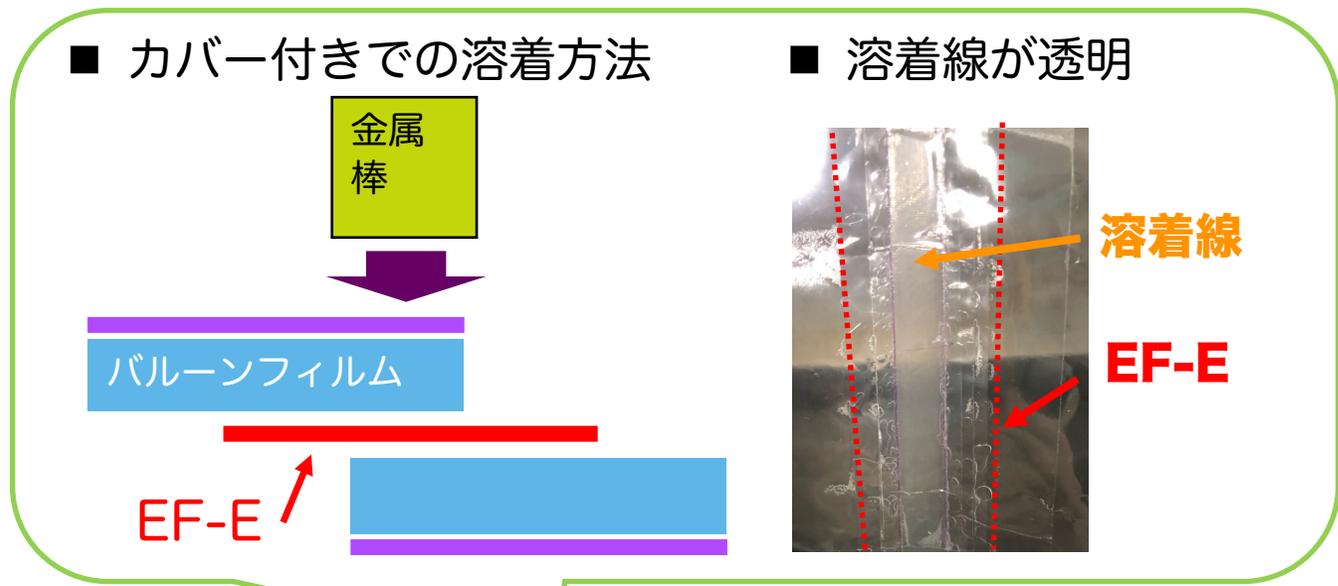
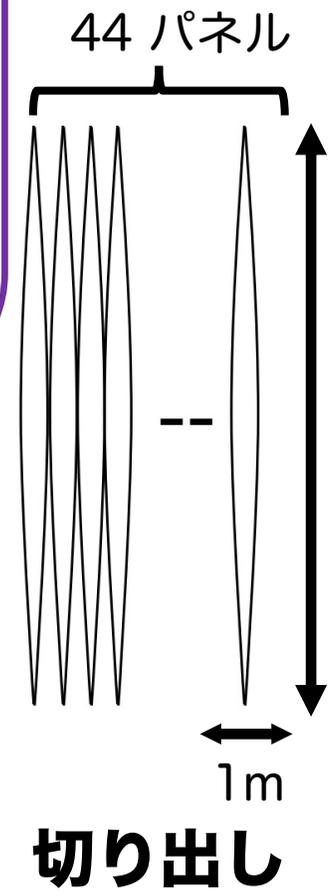


- ・自己粘着フィルム
- ・剥がしても糊残りなし

ラミネートフィルム製作直後に貼り付け、バルーン製作後に剥がす
→製作時の埃、汚れ、傷を防ぐ



フィルム



本研究の全体像

フィルム

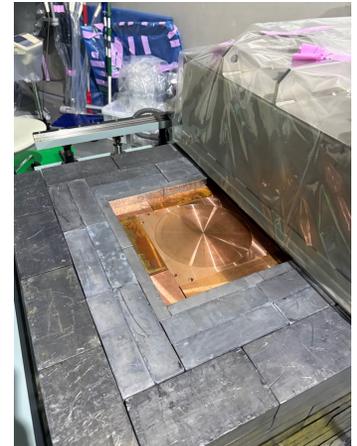
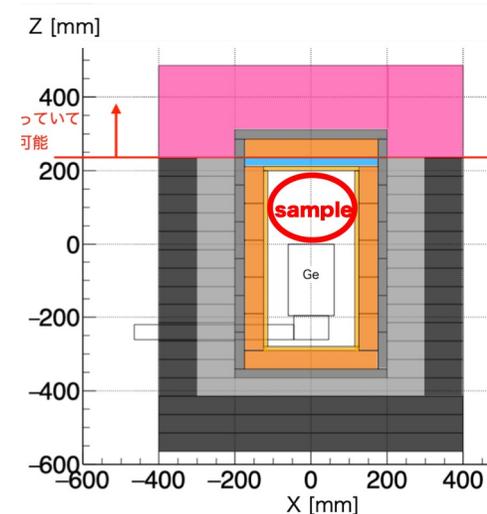
- 製作過程でカバーフィルム付きで溶着が行えると嬉しい。
→カバーあり溶着で溶着強度を確認
- 溶着の糊として使うEF-E (EVOH) には吸湿性がある
→高湿度環境で溶着強度に影響がないかを確認
- 高周波溶着機では最適なパラメータをチューニング
→カバー付きフィルム溶着の最適パラメータ探索

紐

- **低放射能な素材**の選定
 - ケブラー29, **ケブラー129**, シベラス
 - 高純度Ge検出器とICP-MSを用いて放射性不純物を測定
 - 太さの**細径化**
 - KL2での要求強度は**16kN**
 - 9000lbs(40kN)@KL1 → **4000lbs(20kN)**@KL2
- ✓ 紐を試作して引っ張り強度を確認

➡ ${}^7\text{Be}$ 太陽 ν 観測への影響を可能な範囲で評価

Ge検出器

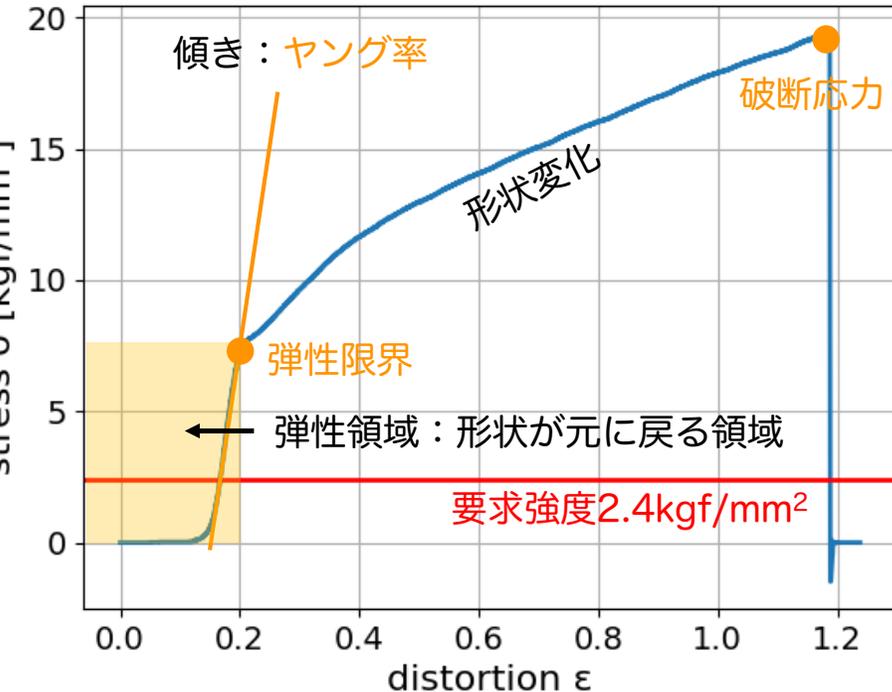


@神岡

機械的特性とフィルムの要求強度

■ 機械的特性

引張試験によって以下の特性を確認



■ 要求強度

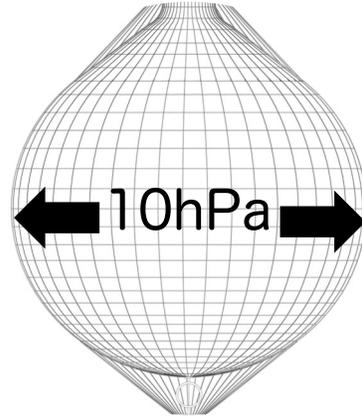
気圧変化やバルーン内外の密度差などで最大10hPaの圧力が生じた時にバルーン赤道部にかかる力

P: 圧力, S: 面積, R: バルーン半径

$$F = \frac{PS}{2\pi R} = \frac{P\pi R^2}{2\pi R} = \frac{1}{2}PR = \frac{1}{2} \left(10^3 \text{ [N/m}^2\text{]} \times \frac{1}{9.81} \text{ [kgf/N]} \times 650 \text{ [cm]} \right) = 3.3 \text{ [kgf/cm]}$$

3.3 [kgf/cm] 溶着部

$$\frac{3.3}{135 \text{ [}\mu\text{m}]} = 2.4 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \text{ バルーンフィルム}$$



バルーンフィルム	形状変化が起きない限界	> 2.4 kgf/mm ² 弾性限界の下限值
溶着部	破断しない限界	> 3.3 kgf/cm 破断応力の下限值

+ 溶着規格も補助的に確認

- バルーンフィルムの7割の強度
- 引っ張り試験によって14.83kgf/cmに設定
- 本番バルーン製作で定期的に確認

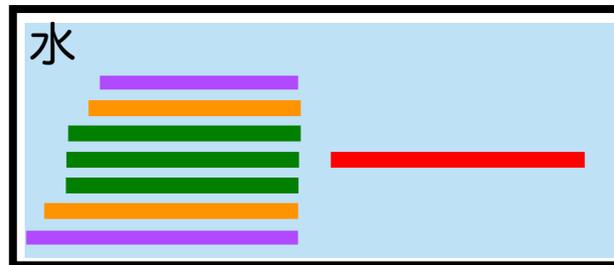
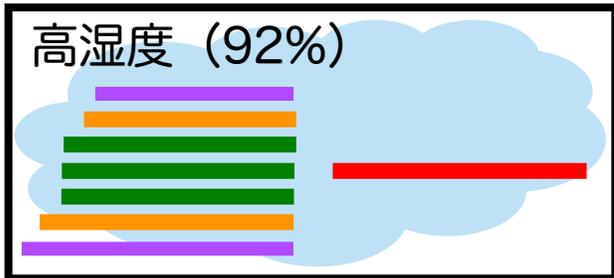
カバー付きでの溶着とバルーン製作環境の湿度条件

■ 目的

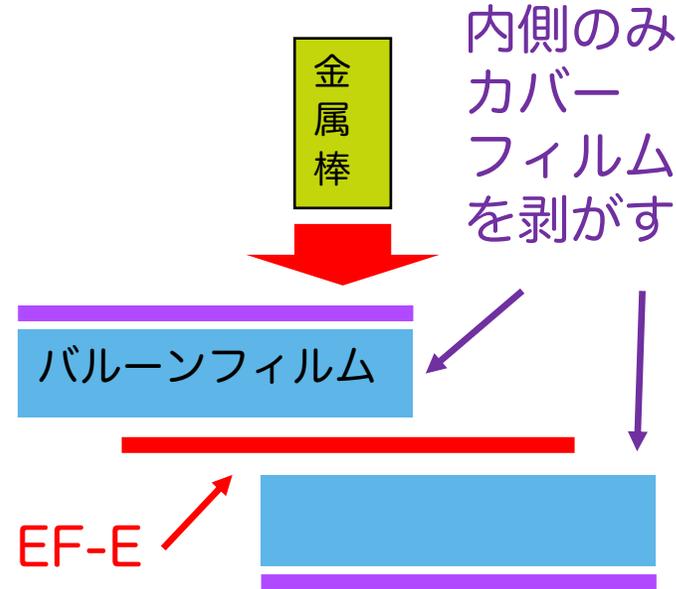
- カバーフィルム付きでの溶着強度が要求強度を満たすかの確認
- EF-Eの吸湿性が溶着強度に影響するかの確認

■ 手順

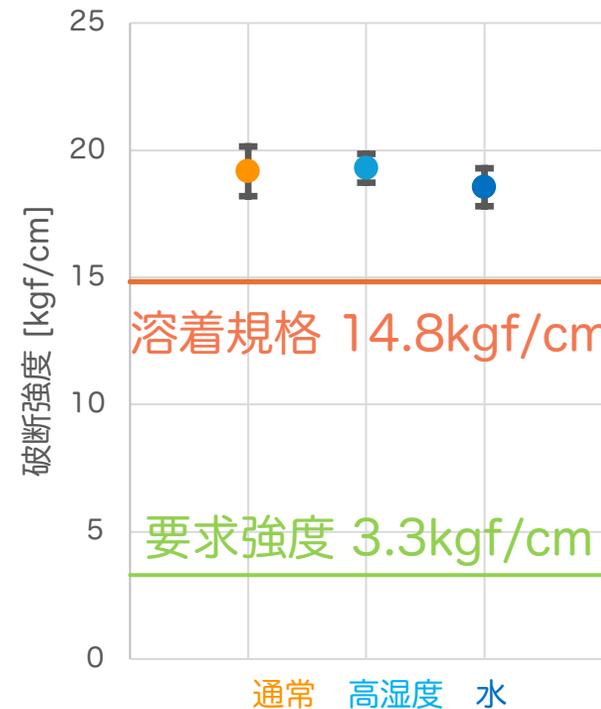
カバー付き
フィルム EF-E (EVOH)



それぞれ溶着



■ 引っ張り試験結果



● カバーフィルム
ありで溶着可能！

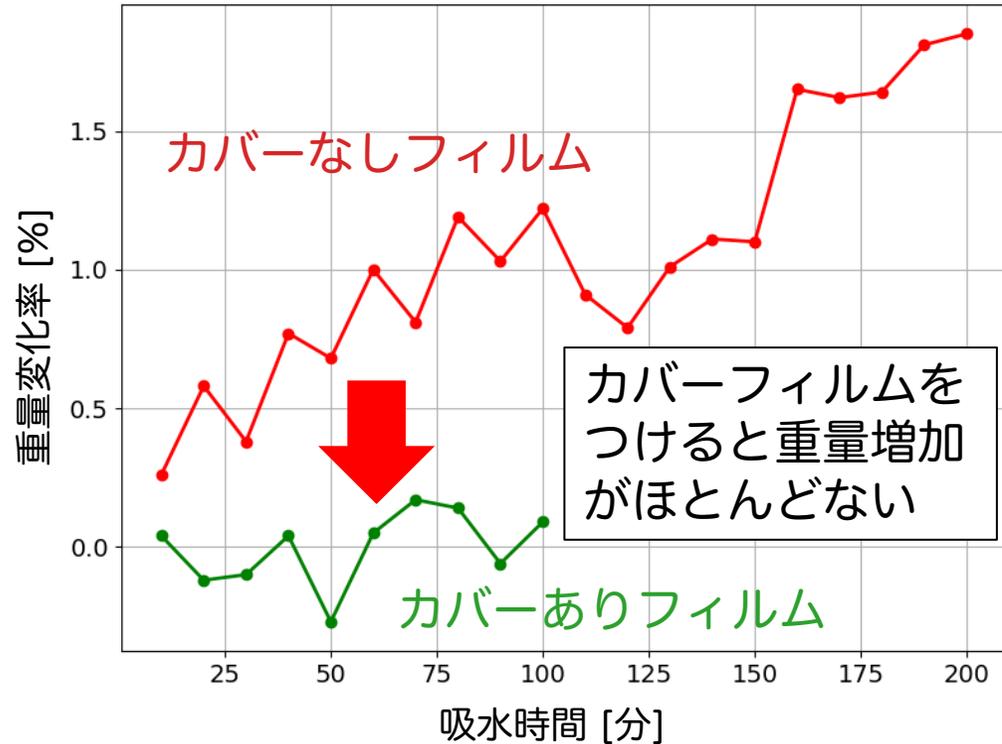
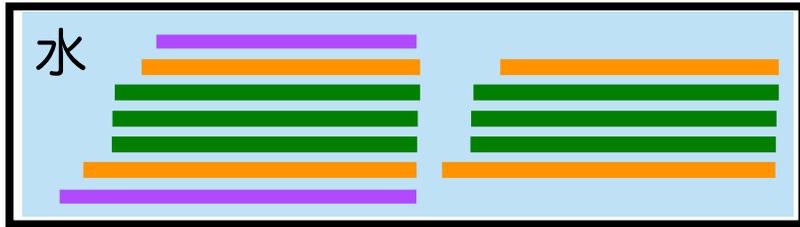
●● 製作は湿度の
上限に制限なく作
業を行える！

カバー有無で水分がフィルムに与える影響

カバーフィルムの性質理解として、水に浸けて吸湿防止性を確認

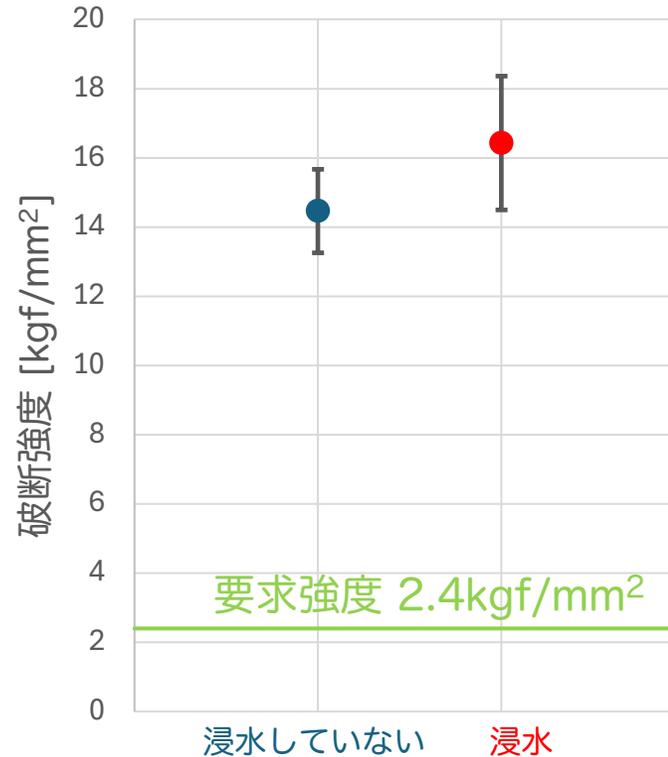
1. 水分がフィルム重量に与える影響

カバー付きフィルム カバーなしフィルム



2. 水分がフィルム強度に与える影響

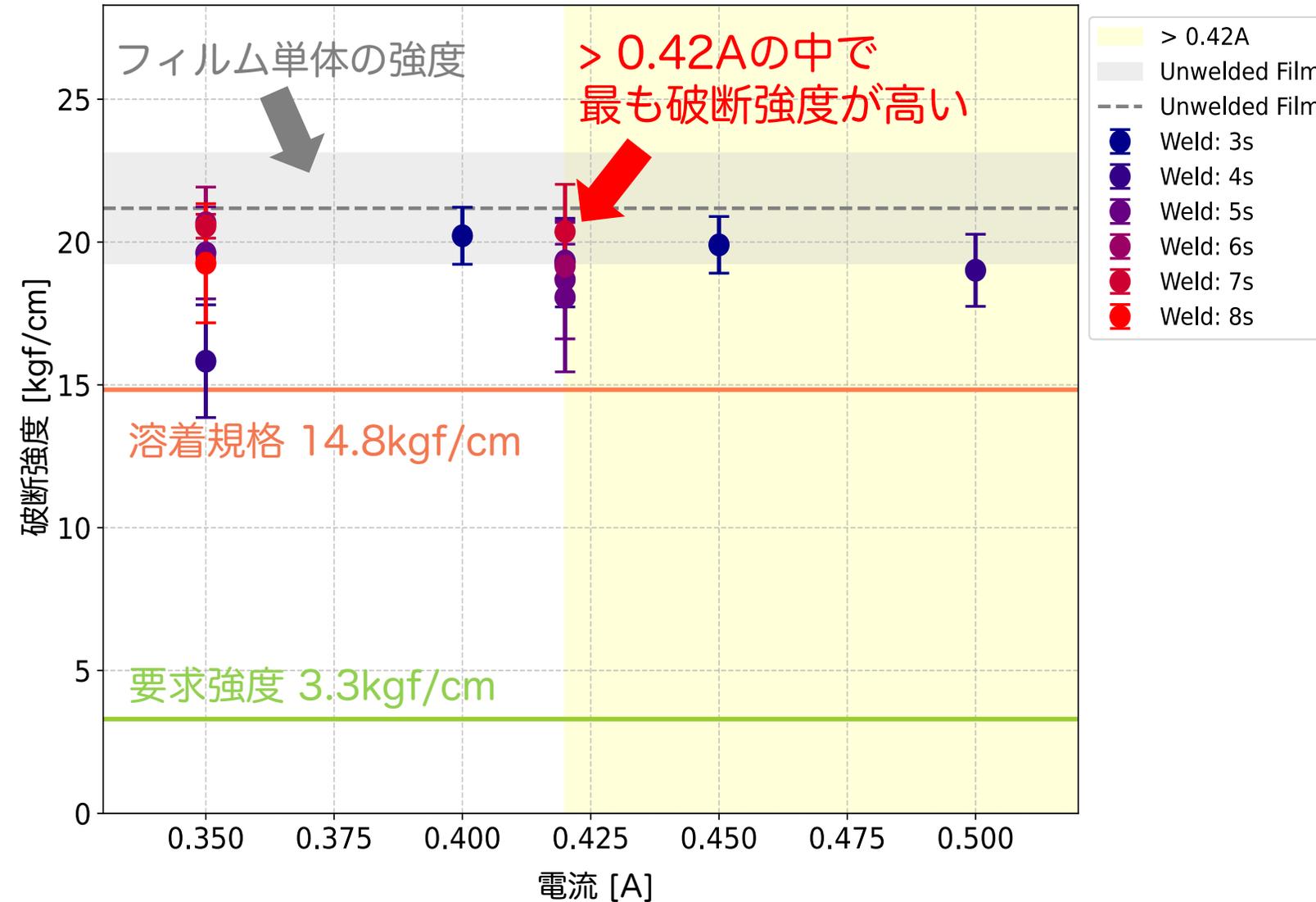
カバー付きフィルムが変質しないかを引張試験によって確認



濡らしていない
フィルムと破断強
度が変わらない
→変質しない

カバーフィルムは
吸水、吸湿を防ぐ！

カバーありでの溶着条件最適化



カバー付きバルーンフィルムで最適な溶着パラメータ（電流値、溶着時間、冷却時間）を決定

最適なパラメータの条件

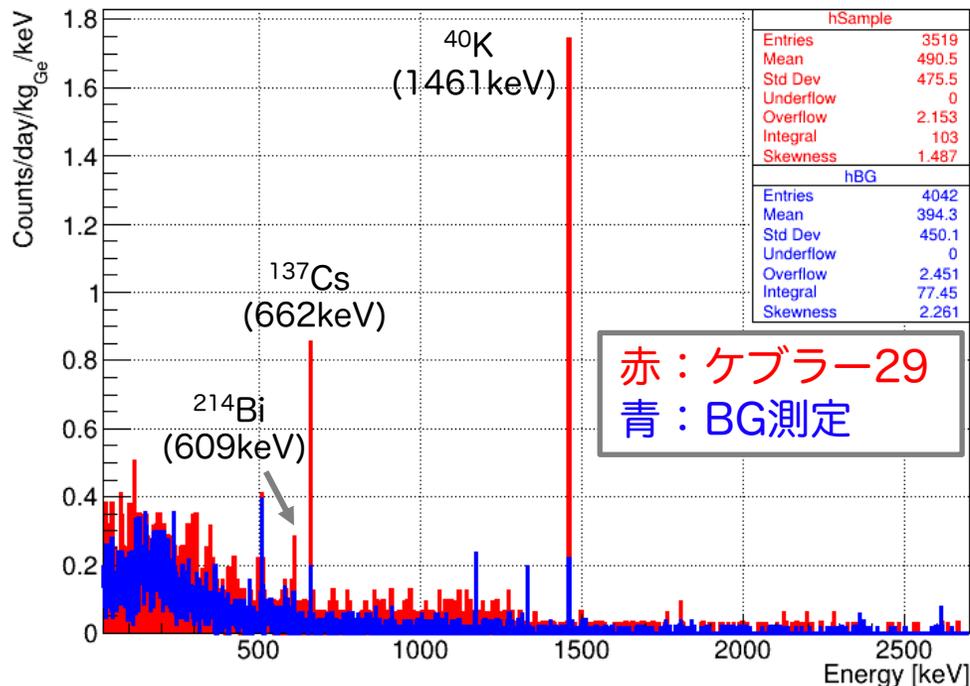
- 溶着線の中までしっかり溶着が行われている
→剥離試験により0.42A以上
- 破断強度が高い

0.42A以上の範囲で最も溶着強度が高いパラメータは

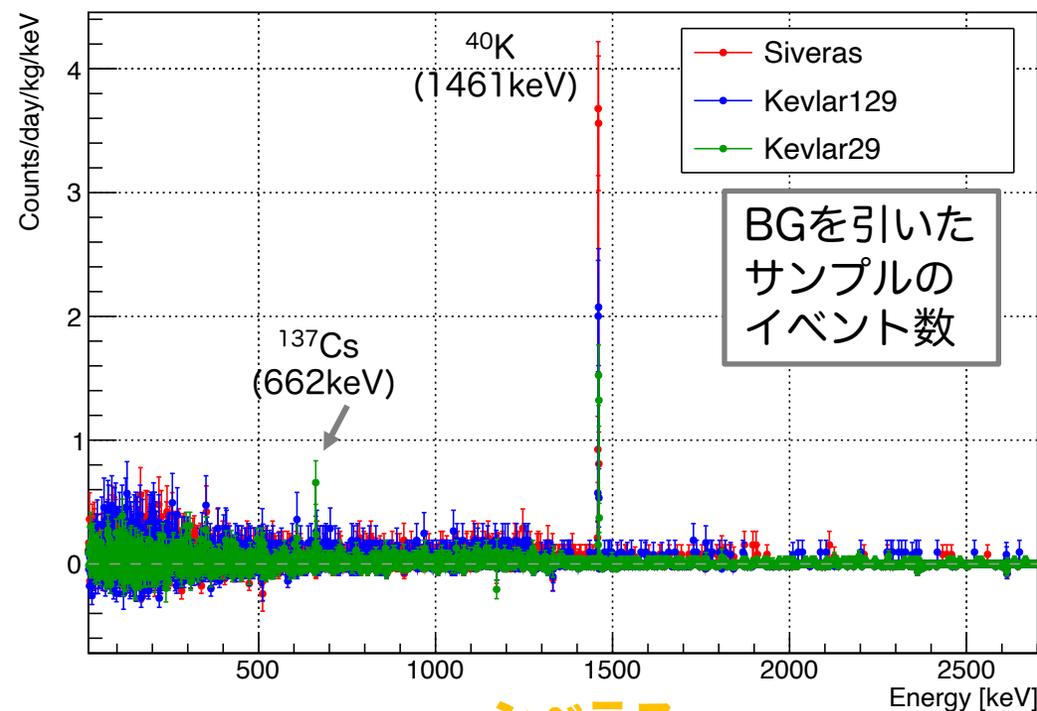
- 電流値：0.42A
- 溶着時間：7秒
- 冷却時間：9秒

紐素材候補のGe検出器、ICP-MSの測定結果

ケブラー29のガンマ線イベント数



ケブラー29、ケブラー129、シベラスの比較



ケブラー29

核種	ICP-MS [ng/g]	Ge [ng/g]
^{238}U	<1	<2.3
^{232}Th	<1	<1.0
^{40}K	1.3	1.3

ケブラー129

核種	ICP-MS [ng/g]	Ge [ng/g]
^{238}U	<1	<5.0
^{232}Th	<1	<1.9
^{40}K	2.9	2.7

ケブラー29の×2.3

シベラス

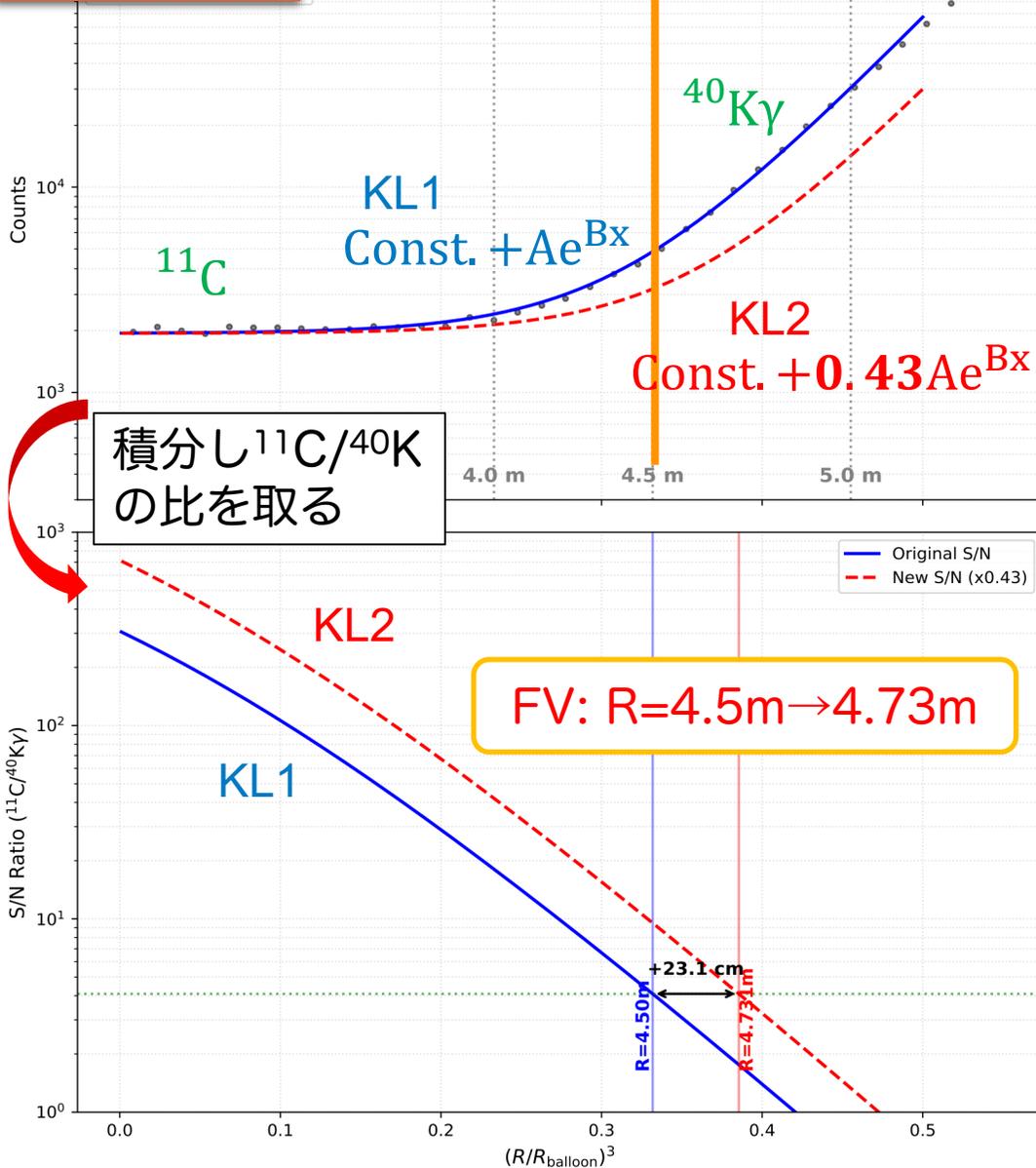
核種	ICP-MS [ng/g]	Ge [ng/g]
^{238}U	<1	<6.2
^{232}Th	<1	<1.5
^{40}K	5.1	6.3

ケブラー29の×3.9

KamLAND2ではKamLAND1と同じくケブラー29を用いる

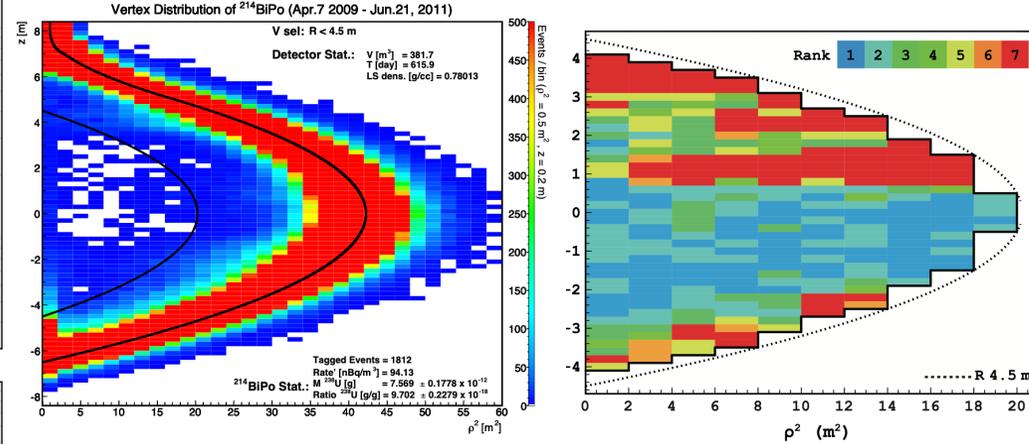
${}^7\text{Be}$ ν 観測精度の議論

■ 紐の改善



■ カバーフィルムの改善

検出器にバルーンを導入後、内側のカバーフィルムを剥ぐことで ${}^{210}\text{Bi}$ の付着を防ぐ



KL1の解析:
 ${}^{210}\text{Bi}$ 濃度によってランク分け

ランク分けを無視できると..

FV 1.29倍

➤ FVの計算

exposure livetime

KL1: $\frac{165.4[\text{kt/d}] \times 615.9[\text{d}]}{1} = 0.268[\text{kt}]$

KL2: $R=4.73[\text{m}], d=0.78[\text{g/cm}^3] \rightarrow 0.346[\text{kt}]$

結論と今後の展望

結論

- KL2では新たに自己粘着性カバールフィルムを導入
 - 溶着に影響なし
 - 吸水・吸湿を防ぐ
- バルーン製作環境の湿度を65%以上とし、上限の制限なしで製作可能
- 紐の素材と太さを見直し、KL2ではケブラー29を使用した4000lbs強度品を使用
- 紐の重量低減やカバールフィルムの導入により、 ${}^7\text{Be}$ 太陽ニュートリノ観測の背景事象削減と有効体積の増加ができる見込みを得た

今後の展望

本番バルーン製作は今年秋頃を予定しており、それまでに製作の準備を進め、要求を満たす高品質・低放射能なバルーンを製作する

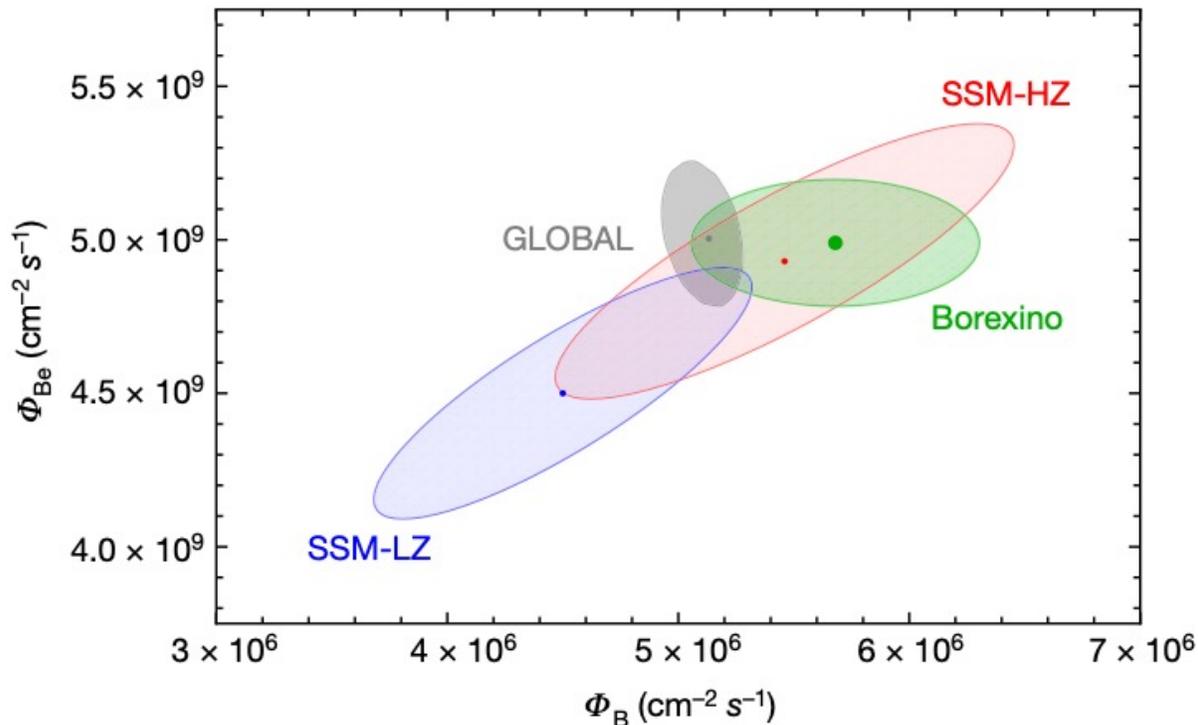
Back up

太陽組成問題

太陽標準模型(SSM)：太陽の内部構造と進化を記述する理論

SSMの中で、太陽組成の低金属モデル(Low-Z) vs 高金属モデル(High-Z)の矛盾が問題

金属量が多いと核融合の進むスピードが上がり、 ν フラックスが増える

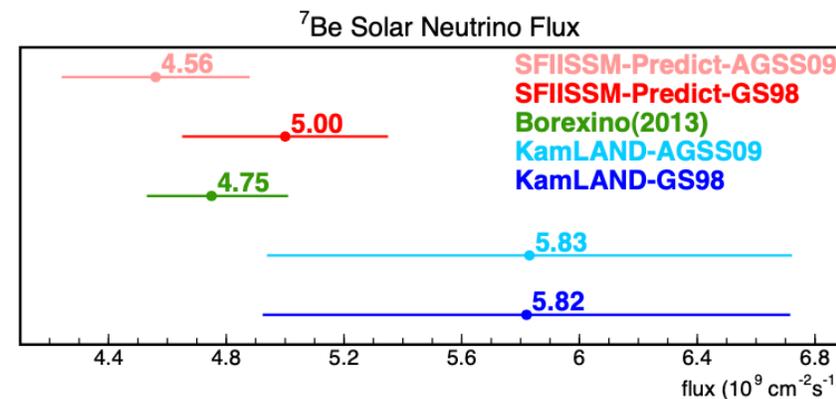


Borexino(2018)

太陽組成問題の検証には ^8B の観測がより効くが、 ^7Be は生成フラックス量が ^8B の 10^3 倍多い+理論不定性が1/2なので、 ^8B に比べ大統計+高精度観測が可能

→小さい測定誤差によりモデルの区別に貢献

KL1での観測結果



系統誤差	9.1 %
統計誤差	12.4 %
Total	15.4 %

Takemoto(2014)

引張試験

■ 試験方法

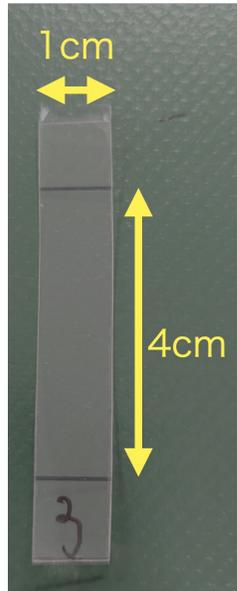
引張試験



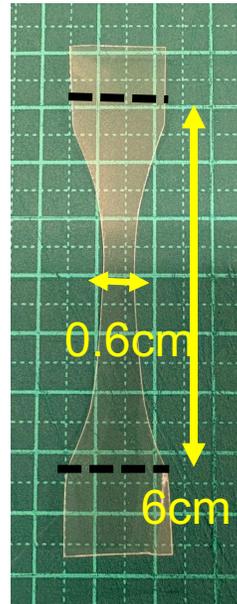
■ サンプル形状

バルーンフィルム

矩形型
ヤング率
弾性限界



ダンベル型
破断応力



溶着フィルム

矩形型
破断応力



■ 溶着部分の試験方法



溶着部分の両側で
違うフィルムを挟む

吸水実験

1.水分がフィルム重量に与える影響

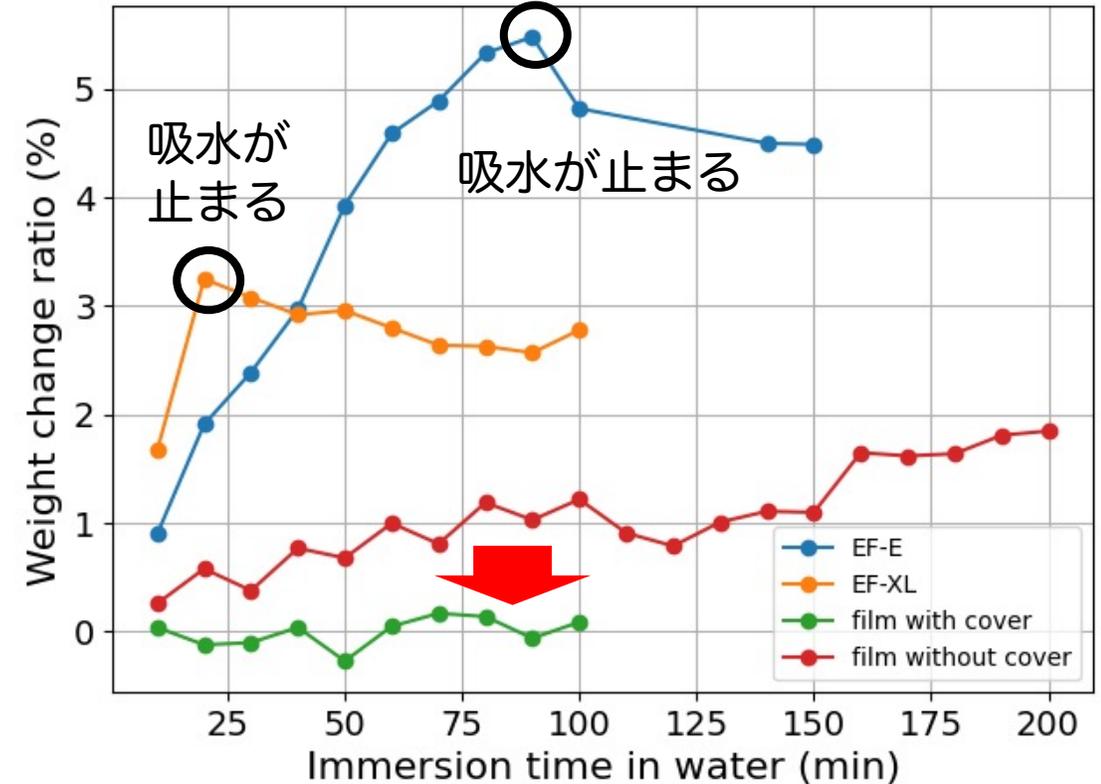
1. フィルムを30×30cmに切り出す
2. 除電・ローラーで埃を取り除いて重量測定
3. 水につけて10分ごとに取り出す。変化がなくなる時間まで測定。
4. 取り出して2.と同様に埃を取り除いて重量測定
5. 水につける前のフィルムとの重量増加比をプロット



試験に使うサンプル：EVOHが使われている4種類のフィルム

- EF-E: 溶着の糊
- EF-XL: バルーンフィルム5層の最外層
- カバーフィルムありバルーンフィルム
- カバーフィルムなしバルーンフィルム

結果



溶着パラメータと試験方法

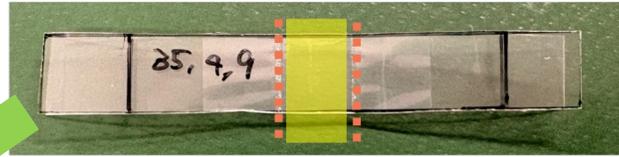
高周波溶着機には電流値、溶着時間、冷却時間のパラメータがある
溶着する対象によって毎回パラメータを決めている
→バルーン製作で最適なパラメータを決定する

最適なパラメータの条件

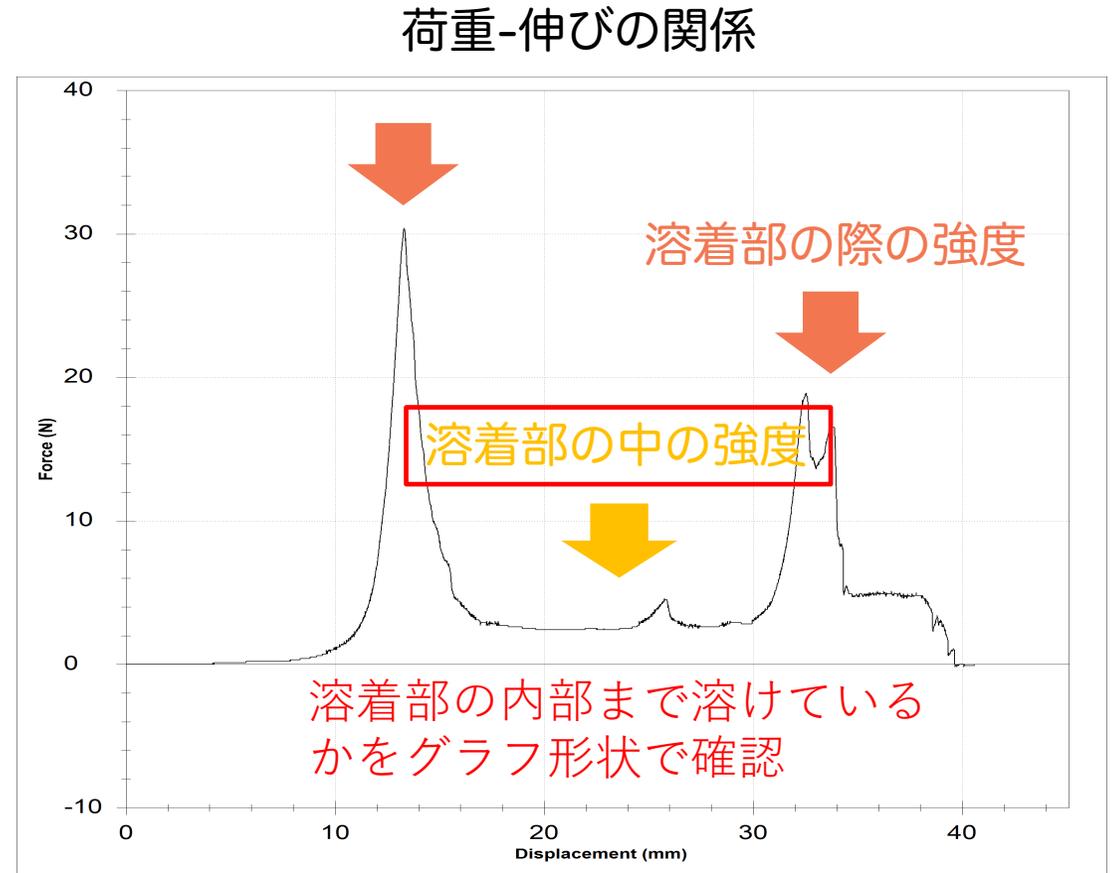
- しっかり溶着がされている（中が溶けている）
- 破断強度が高い

確認方法
→剥離強度
→破断強度

剥離強度の測定方法



溶着部の片側の1枚目と2枚目を掴む

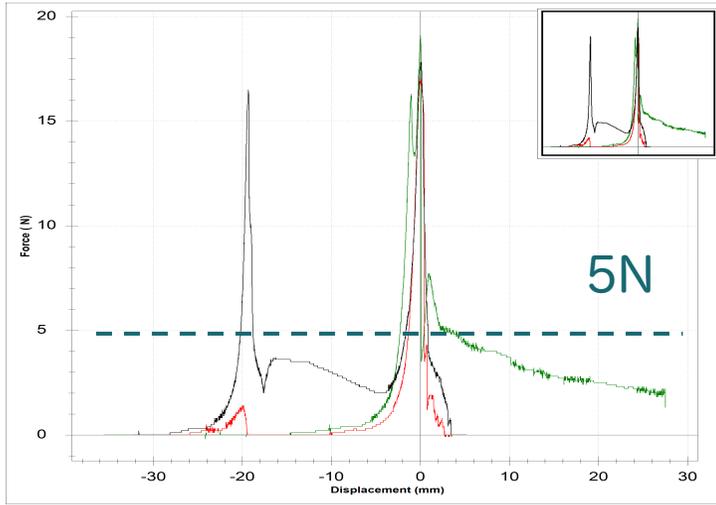


溶着パラメータ：剥離強度

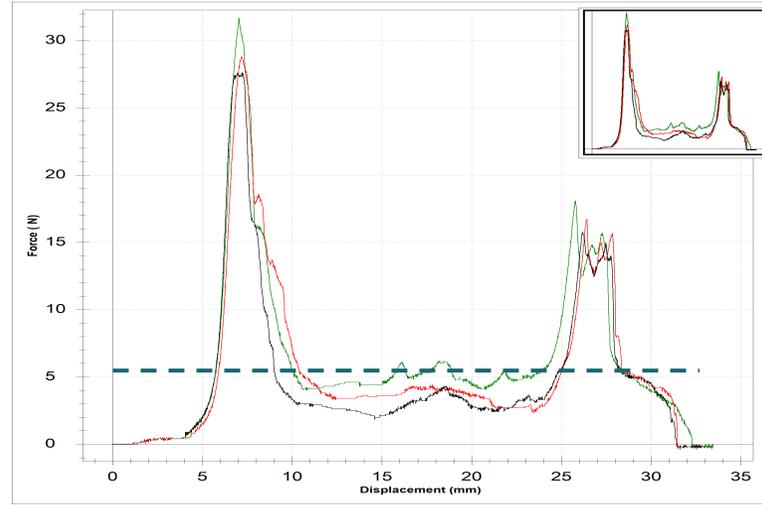
3回測定した結果を重ねて表示

電流値比較@溶着4秒

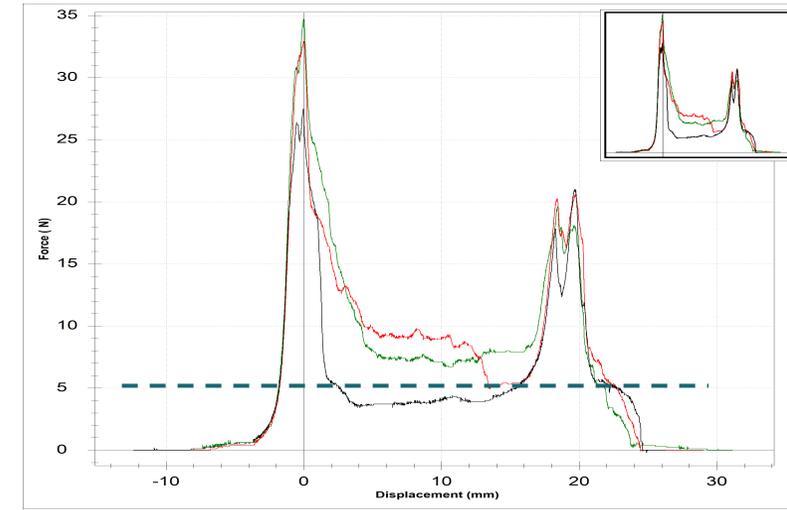
電流0.35A, 溶着4秒



電流0.42A, 溶着4秒

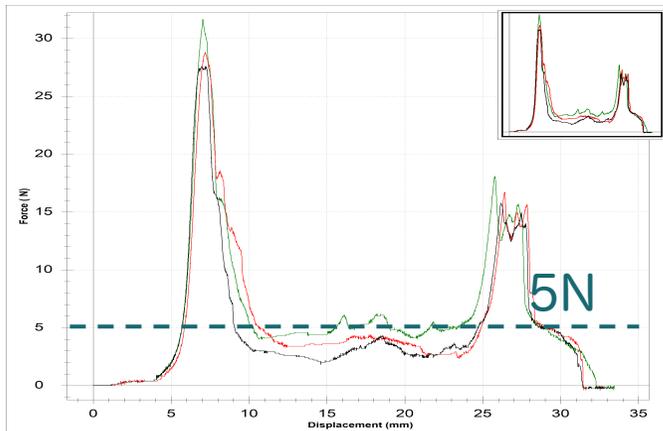


電流0.50A, 溶着4秒

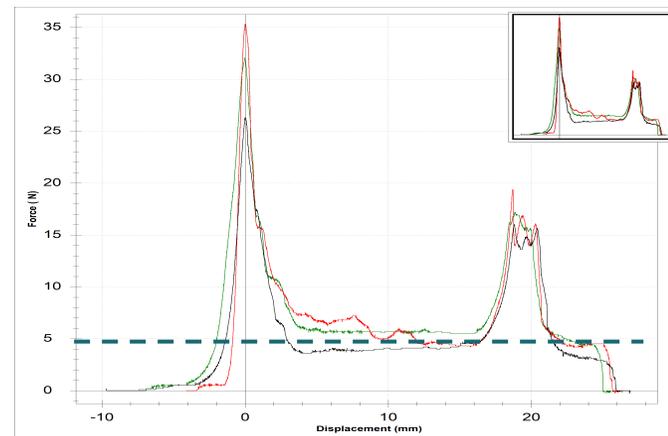


溶着時間比較@0.42A

電流0.42A, 溶着4秒



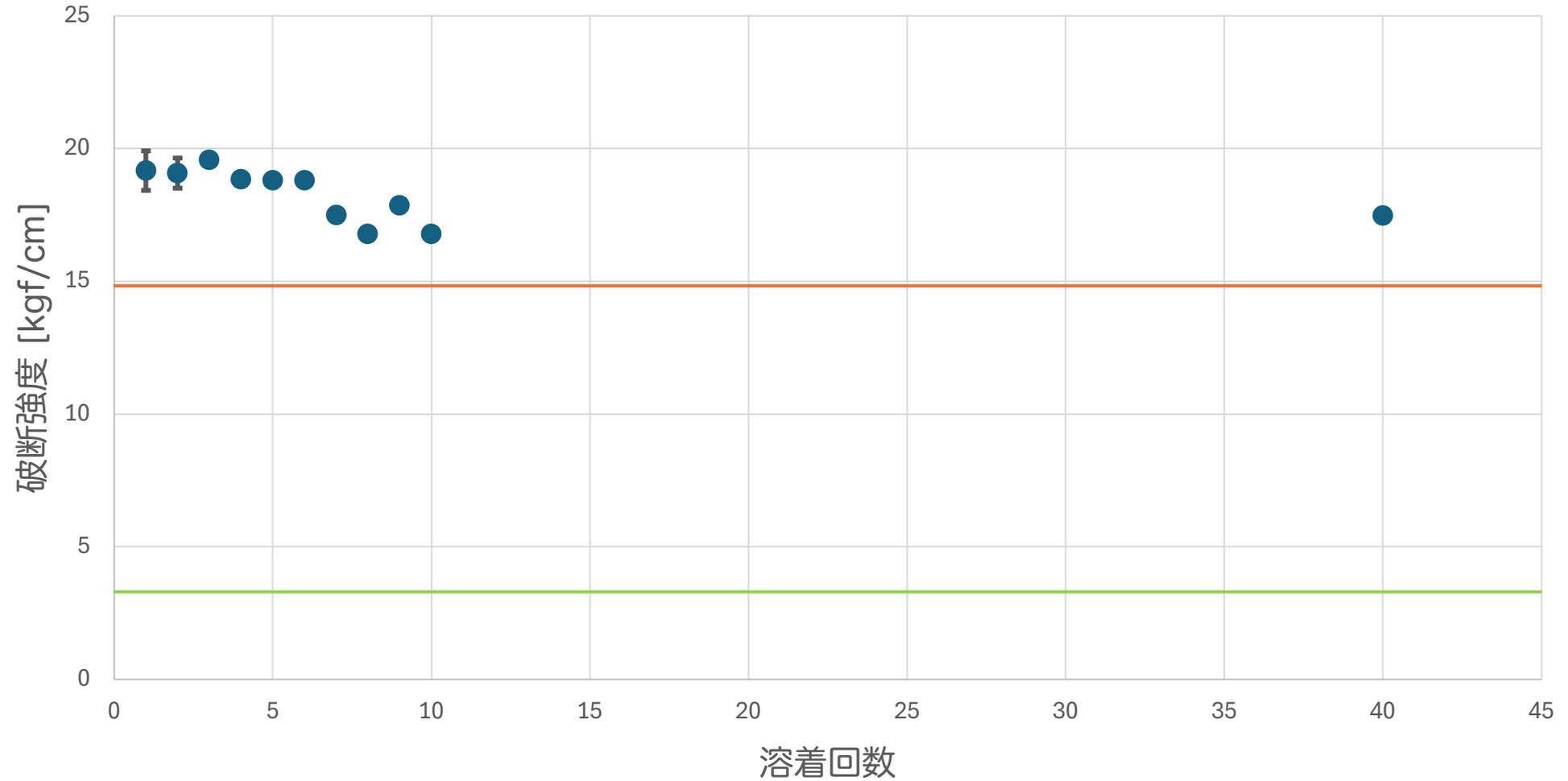
電流0.42A, 溶着7秒



電流値が0.42A以上であれば溶着時間に関係なく溶着部の中がくっついている
→電流値が0.42A以上を要求

複数回溶着

複数回溶着 破断強度



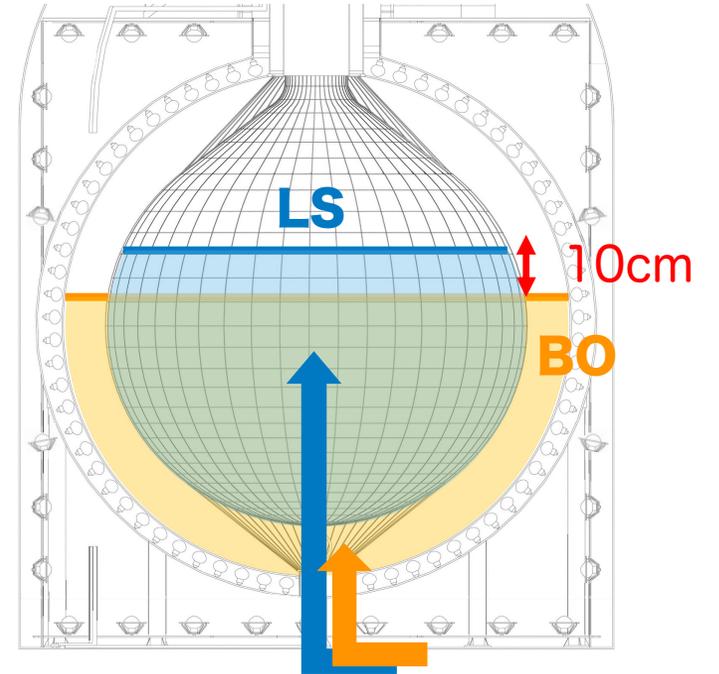
紐の要求強度

考慮すべき項目

- (a) KL2建設時の液入れで10cmの液面差(目標<1cm): 240kgf
- (b) LSとBOの密度差が0.1%: 23kgf

安全率を5と定め、長期使用時の強度低減率0.8を考慮すると
→後に導出

$$\frac{(240+23) \times 5}{0.8} \approx \mathbf{16kN} : \text{要求強度}$$



紐の素材候補と測定の流れ

- KamLAND1ではスーパー繊維であるケブラー29が用いられた
- 今回素材候補として**ケブラー129**、**シベラス**と比較
 - **ケブラー129**：パラ系アラミド繊維($C_{14}H_{10}N_2O_2$)
 - ケブラー29とフィラメントのタイプが異なる
 - ケブラー29より高強度
 - **シベラス**：液晶ポリエステル繊維(HOC_6H_4COOH)
 - 低吸湿性が特徴
 - ケブラー29より高強度



■ 素材選定の流れ

- KL1と同じ手法で洗浄
- 高純度Ge検出器とICP-MSで放射性不純物の測定

■ 洗浄

純水、IPAを用いた加熱と脱水を繰り返す



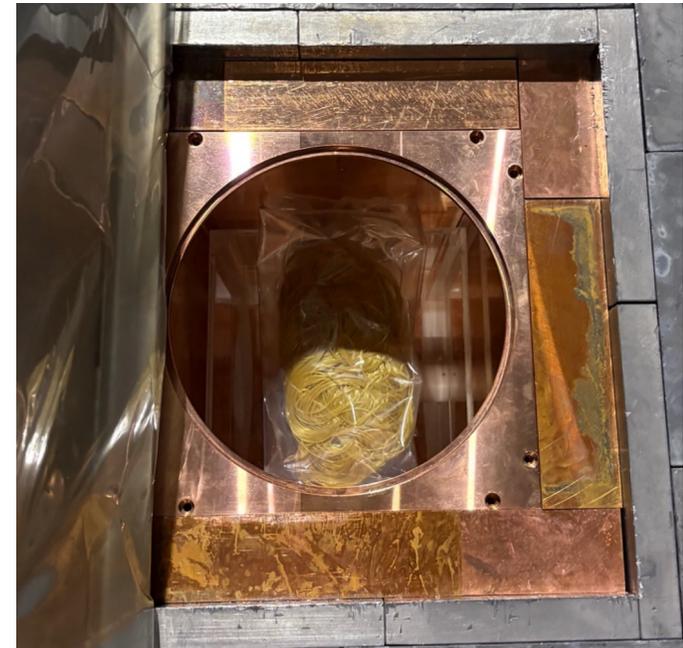
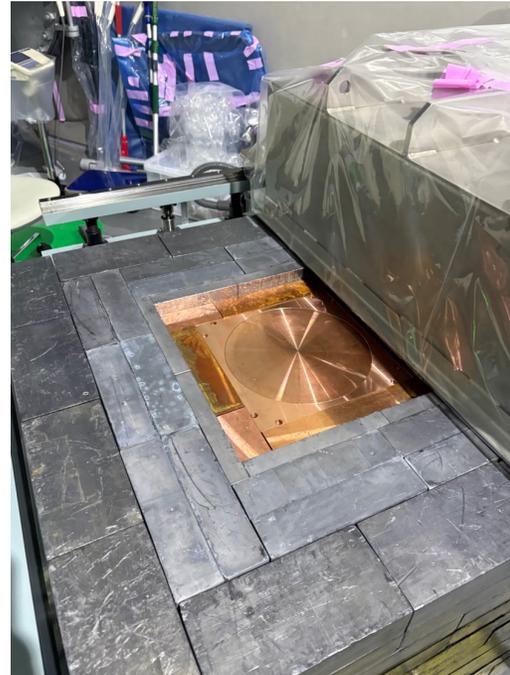
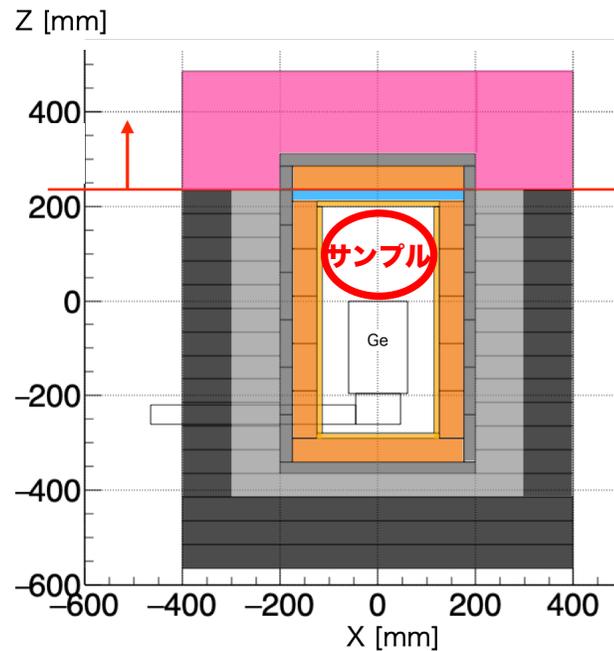
加熱



洗浄により汚れが見える

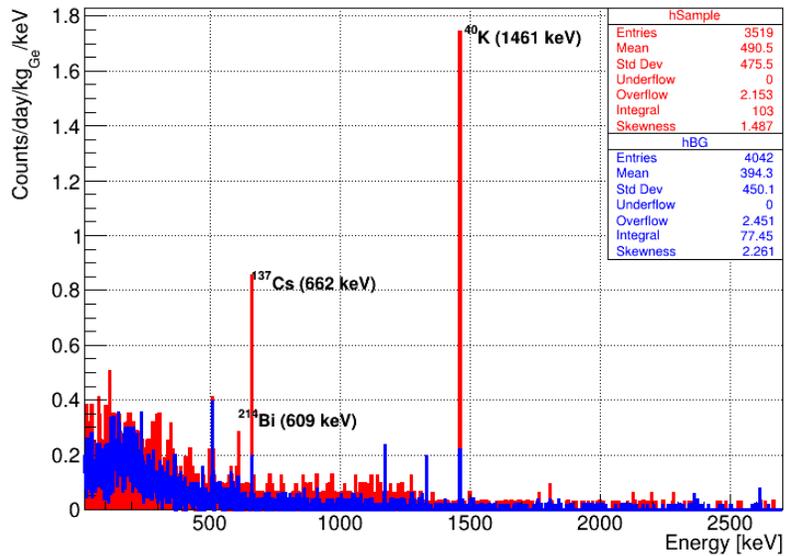
高純度Ge検出器

- 高純度Ge結晶を用いた半導体検出器
- KamLANDと同じく神岡鉱山内に位置
- Geにエネルギーを落としたガンマ線を検出
- O(1keV)の高いエネルギー分解能

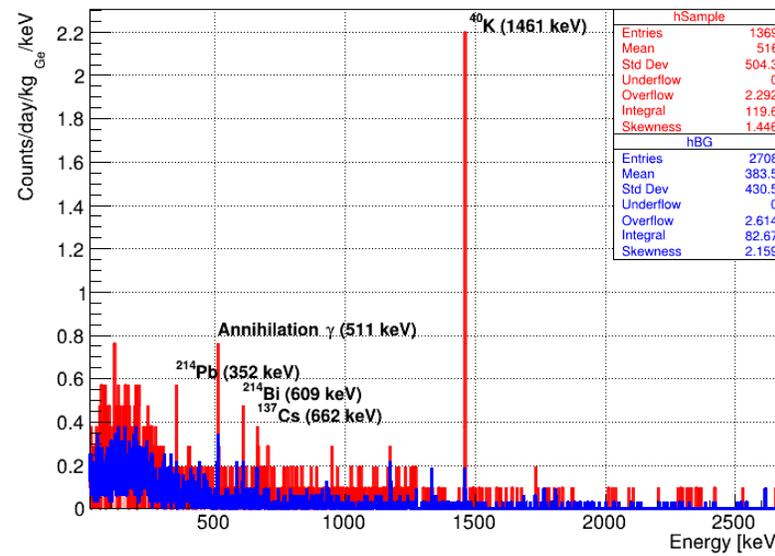


Ge検出器測定のエネルギースペクトル

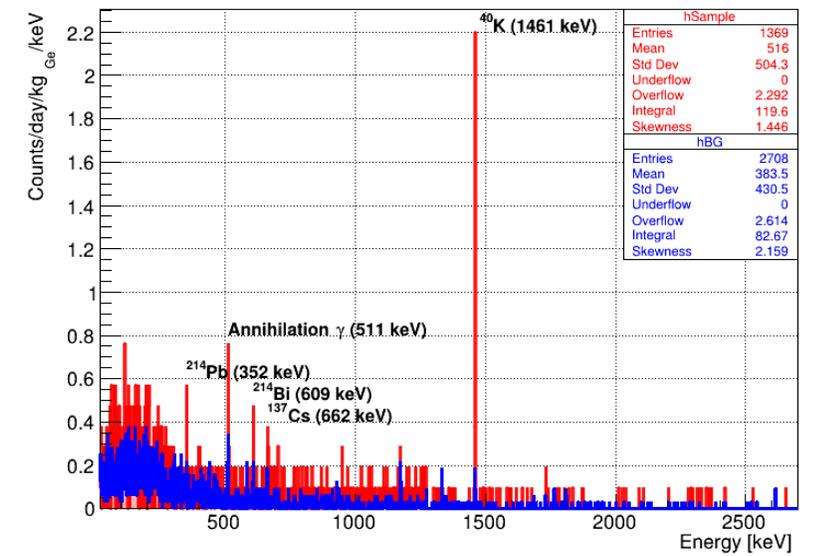
ケブラー29



ケブラー129



シベラス



紐の太さ選定

1. KamLAND1から採取した紐の強度確認



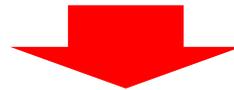
- KL1解体時に紐を採取し強度劣化を確認
- 10サンプルの引張試験を行ったところ破断強度は $35.3 \pm 2.5 \text{ kN}$
- 規格強度比の最小値は0.82
→0.8を劣化による低減率とする

$$\frac{(240+23) \times 5}{0.8} \approx 16 \text{ kN} : \text{要求強度}$$

240kgf: 液面差
23kgf: 密度差
5: 安全率

2. 4000lbs強度品の強度確認

- 4000lbs強度品の仕様強度は17.8kN
- 4000lbs強度品の10サンプルの引っ張り試験を行ったところ $20.87 \pm 0.86 \text{ kN}$
→実際の引張強度でも要求を満たす



KamLAND2ではケブラー29を用いた4000lbsの紐を使用する