

GRAMS実験における 気球上での液体アルゴン運用に向けた LAr純化装置の開発

2025/12/20

MPGD & Active媒質TPC2025研究会

早稲田大学 修士2年

荒井紳太郎

GRAMS Collaboration

◆ Gamma-Ray and Anti-Matter Survey

- ・ 液体ArTPC搭載の気球/衛星実験
宇宙線反粒子(素粒子)、MeVガンマ線(天文)

◆ 日米国際共同実験

- ・ 22 institutes 73 collaborators

7th collaboration meeting, May 2024 @ Boston

Japan

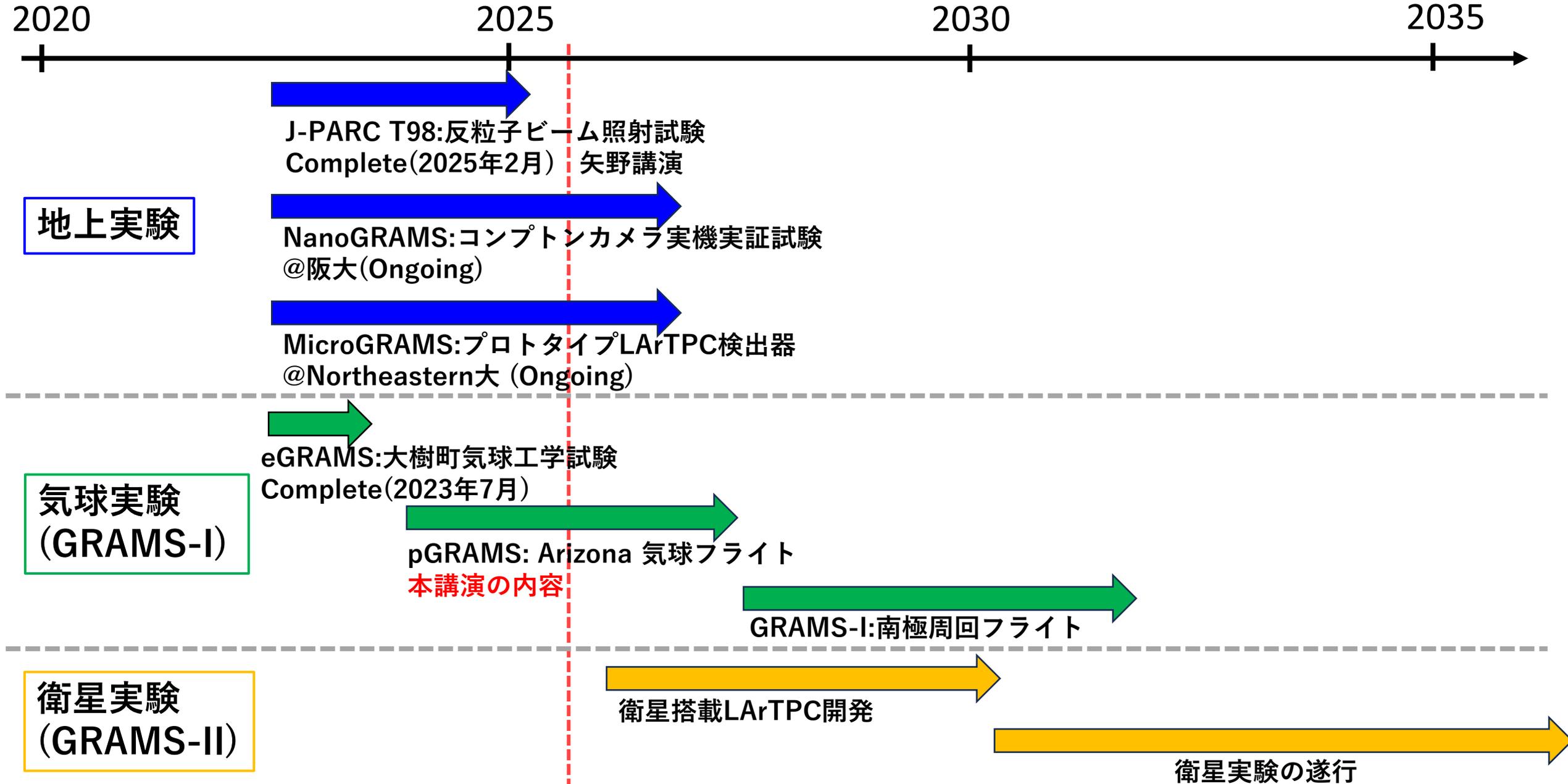
- Hiroshima University
- Kanagawa University
- Osaka University
- RIKEN
- Rikkyo University
- University of Tokyo
- JAXA
- University of Toyama
- Waseda University
- Nagoya University
- Tokyo University of Science
- NDMC

International

- Barnard College
- Columbia University
- Howard University
- NASA GSFC
- Northeastern University
- Oak Ridge National Lab
- Universität Würzburg
- California Berkley
- UT Arlington
- Washington University at St. Louis



GRAMS実験:タイムライン



液体ArTPC

◆ 液体アルゴンの特性

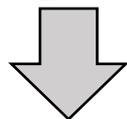
アルゴン(Ar)の諸性質

原子番号	18
密度(液体)	1.4 g/cm ³
融点@1atm	84 K (-189 °C)
W値(電離 - 液体)	23.0 eV
蛍光波長	128 nm



◆ 検出器動作原理

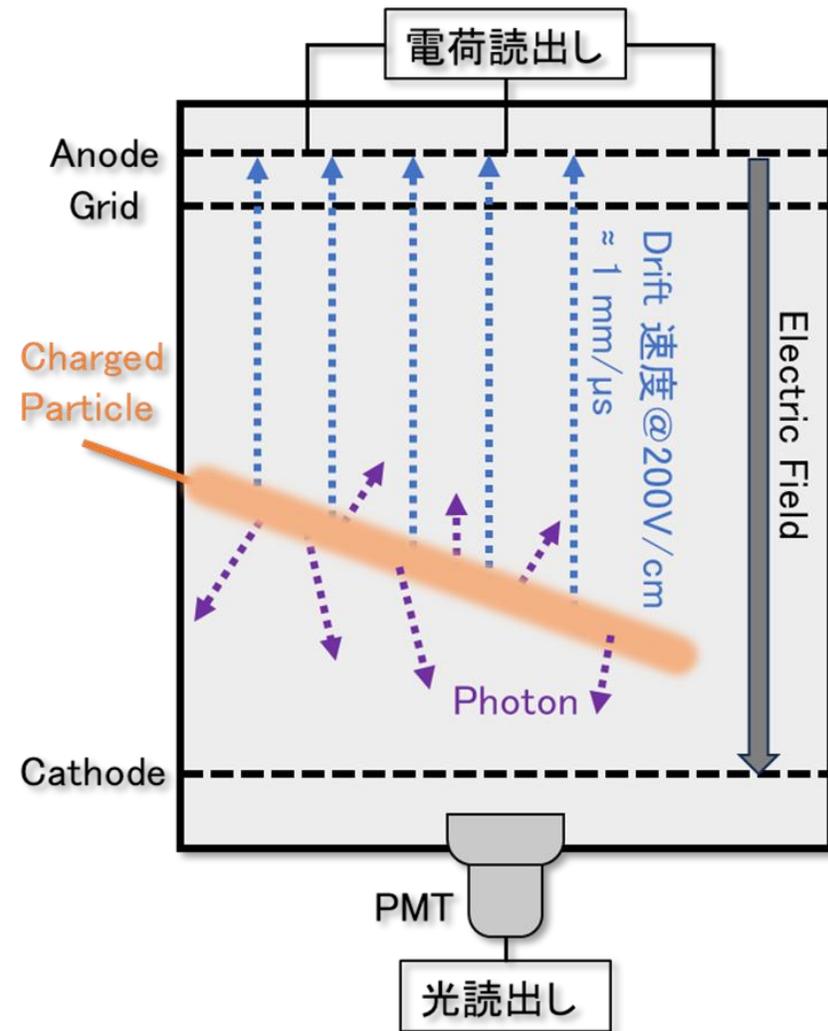
- 電離電子
TPC内電場に従いドリフト
→ Anode電極で読み出し
- シンチレーション光
波長変換
(128nm→420nm)
→ PMTにより読み出し



Anodeの二次元構造
+ 電子・光信号の時間差



三次元飛跡再構成
エネルギー損失の測定



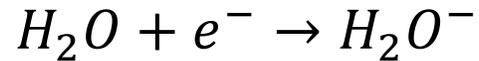
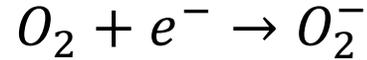
- ◆ 不純物が電離電子を吸着
電子信号が減衰
→ 高純度の液体Arが必要

液体Ar純度

◆ 不純物の影響

- 液体Ar中に不純物が混入

→ 電離電子が吸着

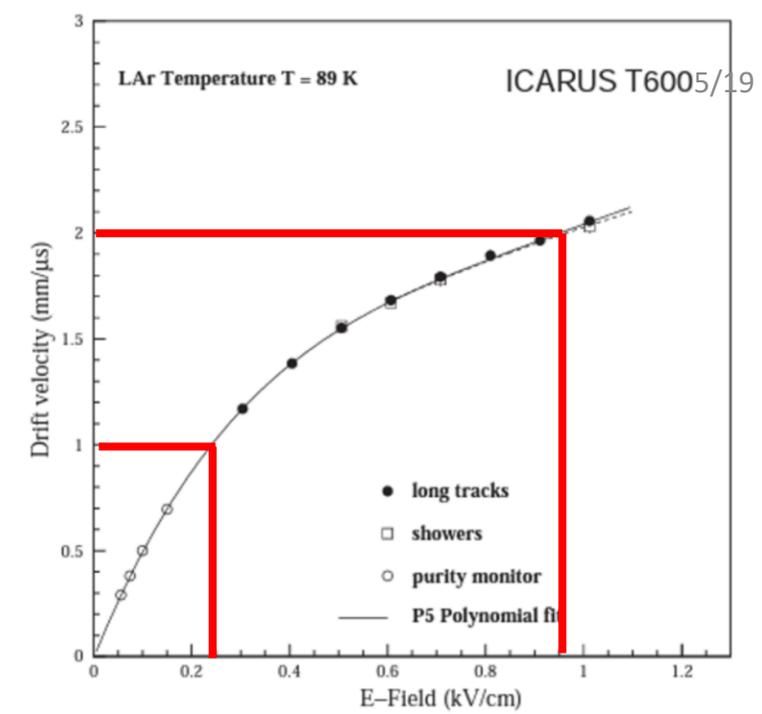
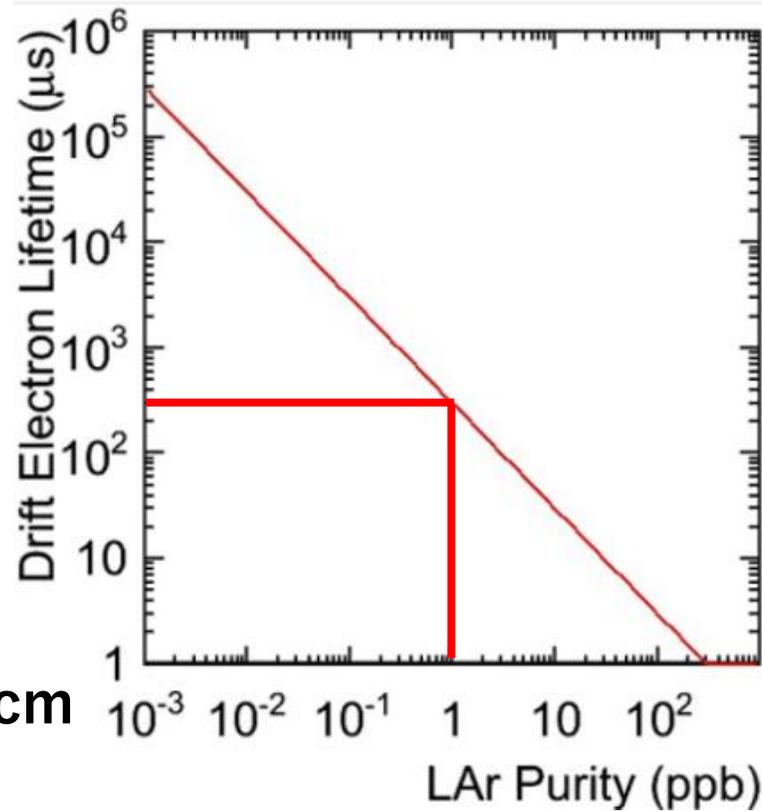


- 電子寿命

$$\tau = 300 \mu\text{s} (O_2:1 \text{ ppb})$$

* 250 V/cm、ドリフト長:30 cm

→ 電子信号が1/eに減衰



液体Ar純度が悪いと検出器性能が低下

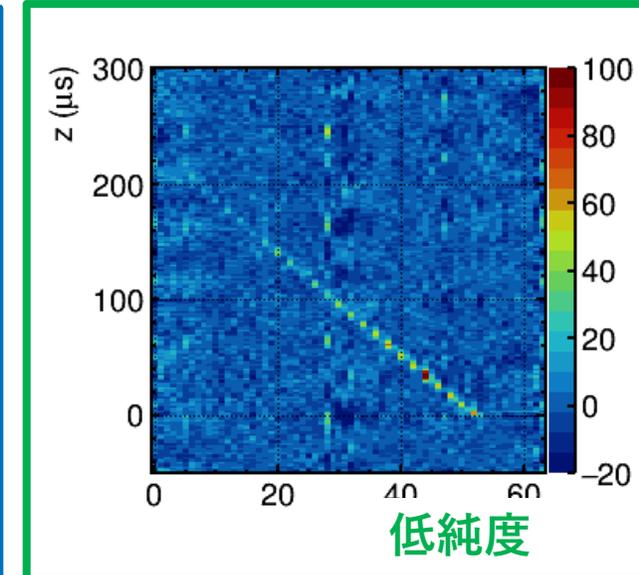
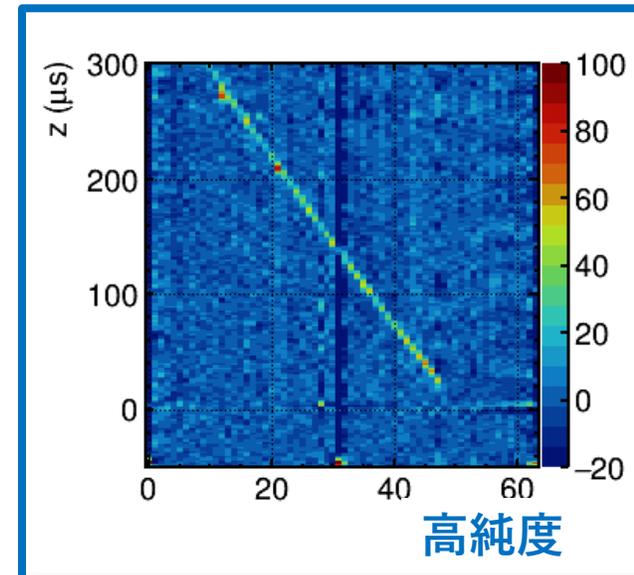
→ **高純度の達成・維持が重要**

◆ 本研究の目的

- 高純度達成条件の検証

- LAr純化手法の確立

→ pGRAMSにおいて高純度を達成する



液体Ar純化フィルター

◆ 純化フィルター

- ・ 市販の液体Ar: ~1 ppm
- ・ 自作のフィルターで純化
- ・ フィルター材: モレキュラーシーブ、酸化銅触媒

◆ モレキュラーシーブ(MS)

- ・ 合成ゼオライト
- ・ 化学式: $Na_{12}(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12} \cdot 27H_2O$
- ・ 吸着剤としてさまざまな分野で利用
- ・ **液体Ar中の H_2O や高分子を吸着**
- ・ 水の加熱除去で再利用可能

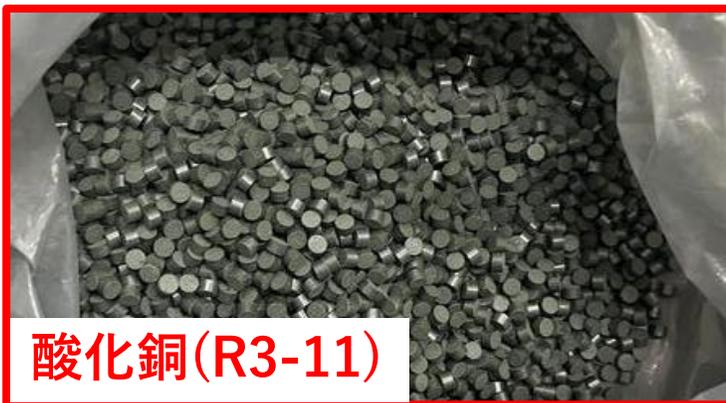
◆ 酸化銅触媒(CuO)

- ・ R3-11(BASF社製)
- ・ $CuO + H_2 \rightarrow Cu + H_2O$
- ・ **液体Ar中の O_2 を除去**

モレキュラーシーブ



酸化銅(R3-11)



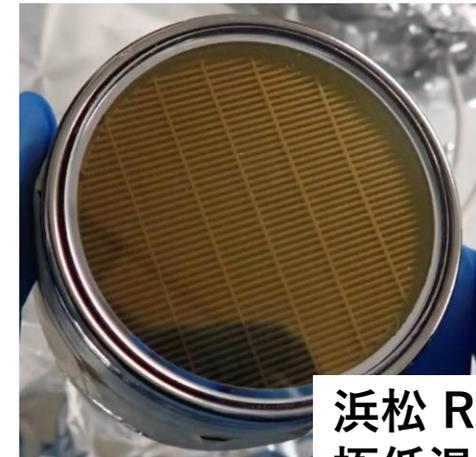
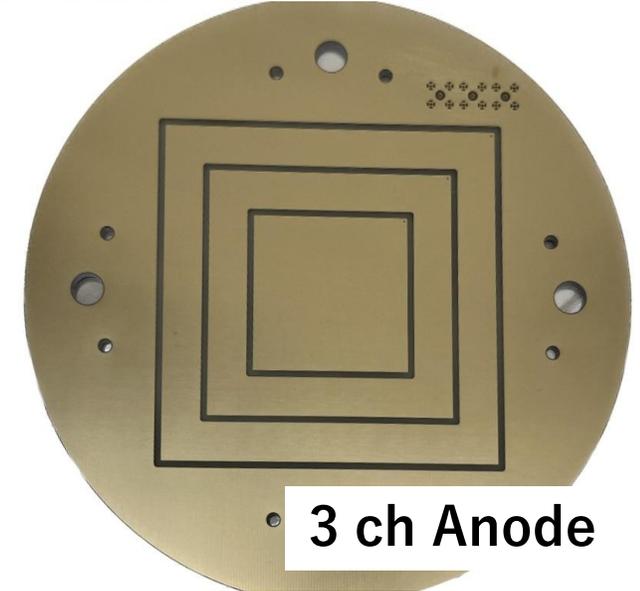
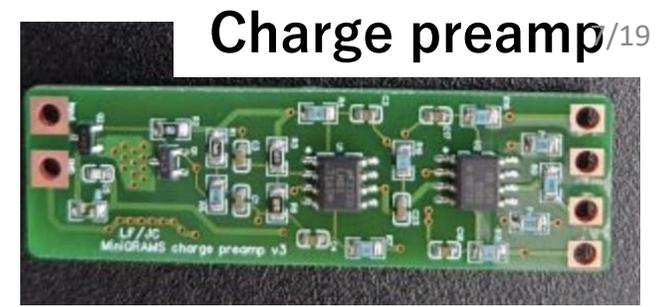
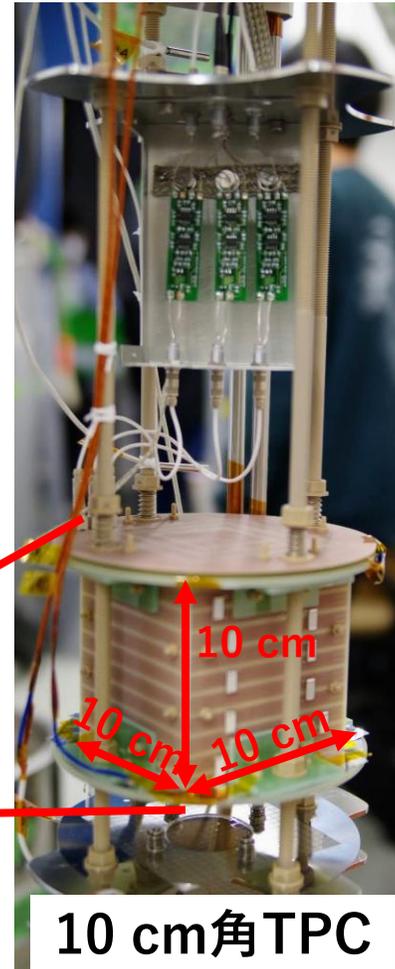
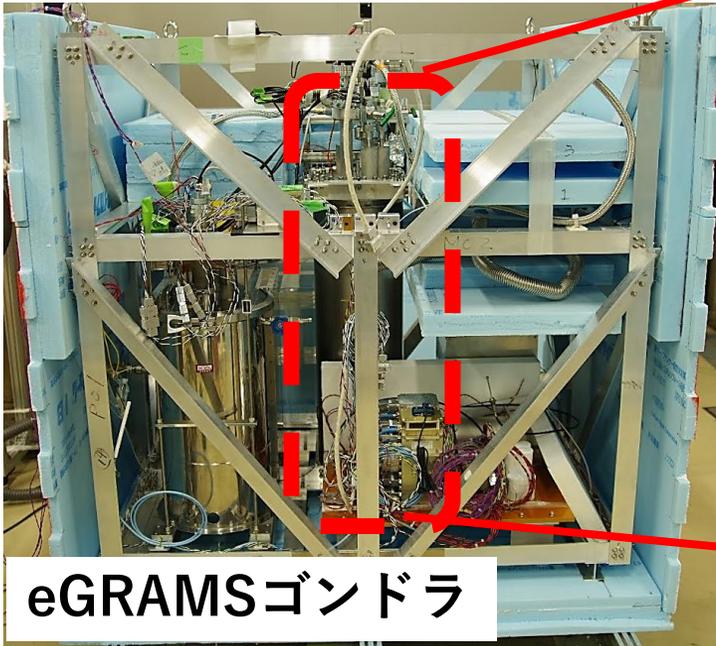
64 cm



MS層 約500 mL 混合層 約200 mL CuO層 約900 mL

eGRAMS(engineering GRAMS)

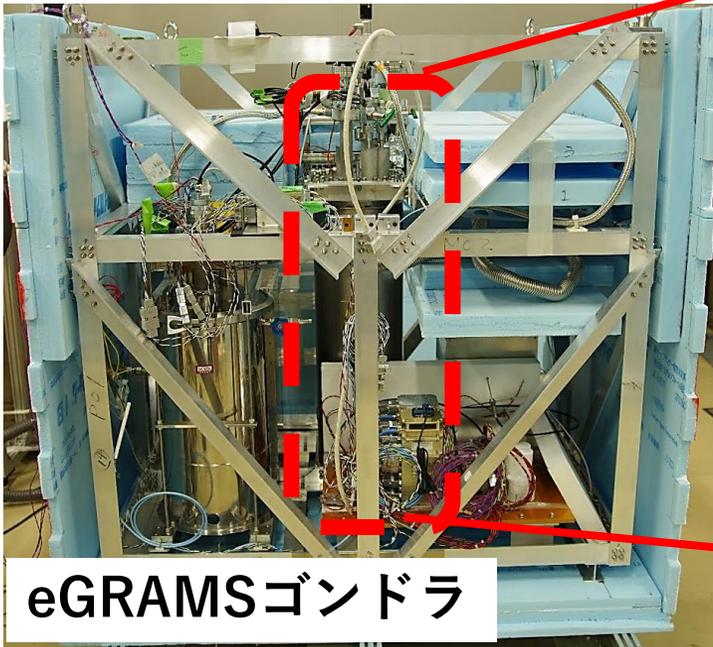
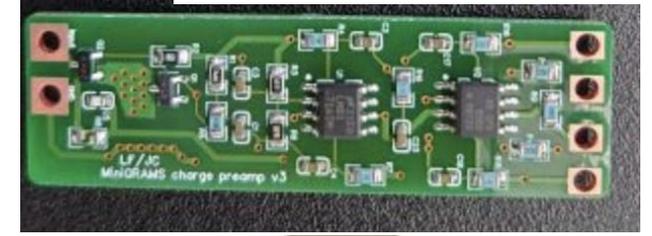
- 目的
気球上でのLArTPC運用手法の確立
開発課題の洗い出し
- 場所
JAXA TARF@北海道大樹町
- 検出器サイズ
10 cm × 10 cm × 10 cm
→気球上で運用した世界初の事例
(小型かつ4時間の運用)



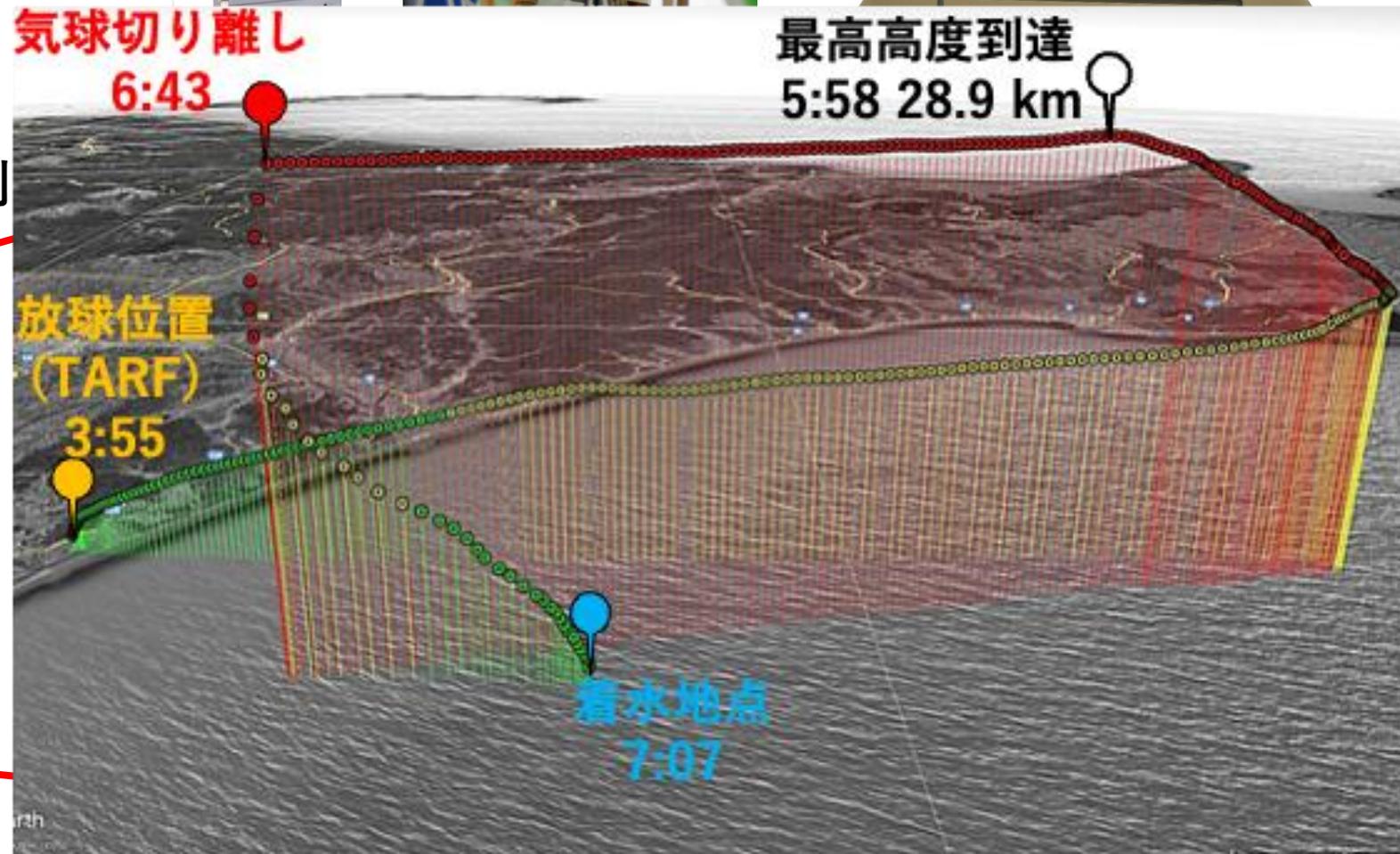
eGRAMS(engineering GRAMS)

- 目的
気球上でのLArTPC運用手法の確立
開発課題の洗い出し
- 場所
JAXA TARF@北海道大樹町
- 検出器サイズ
10 cm × 10 cm × 10 cm
→気球上で運用した世界初の事例
(小型かつ4時間の運用)

Charge preamp 6/19

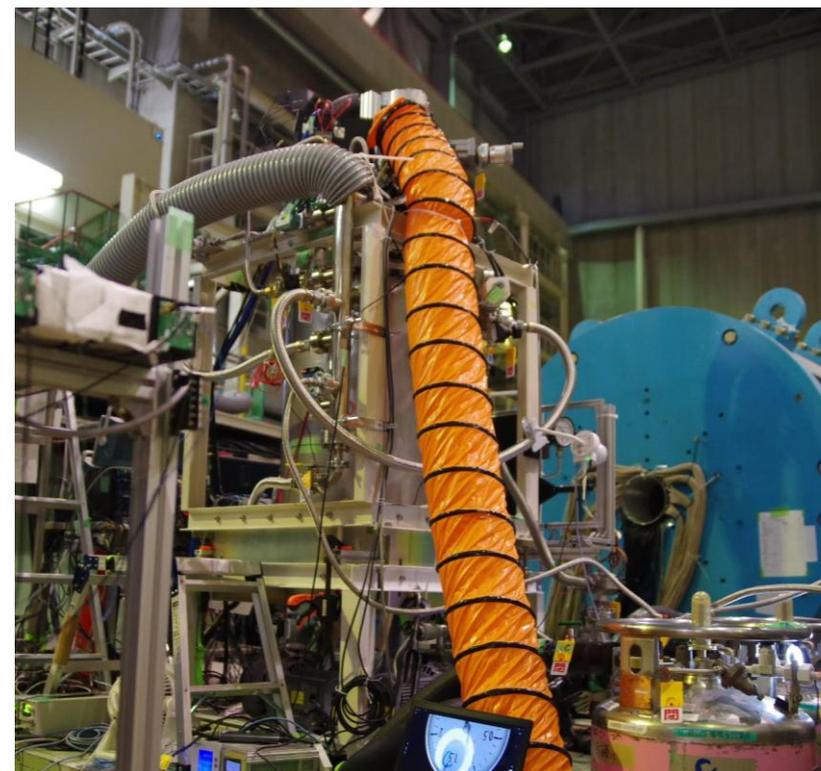
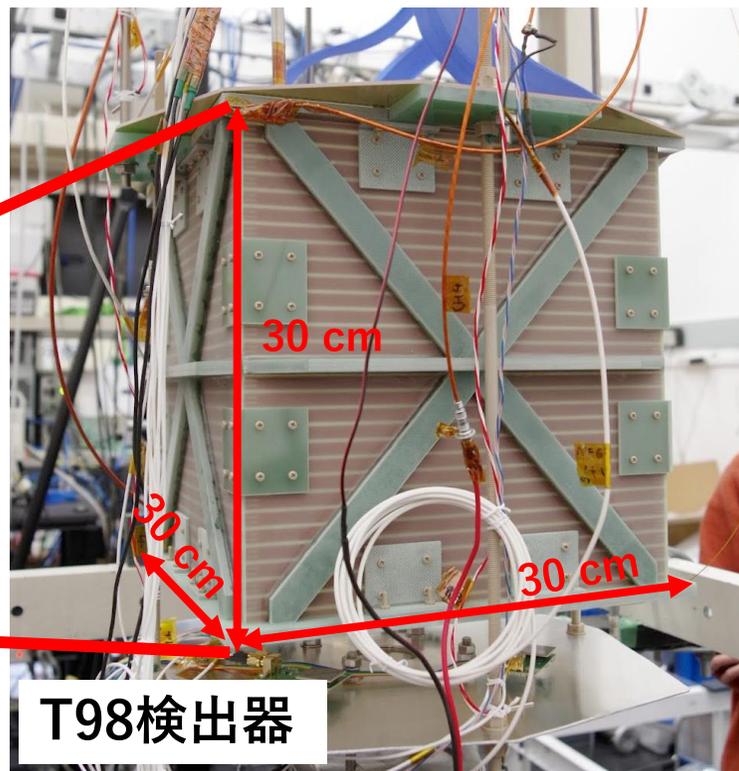
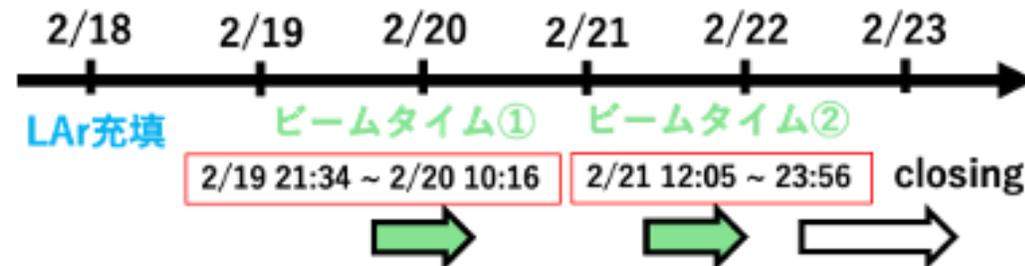


eGRAMSゴンドラ



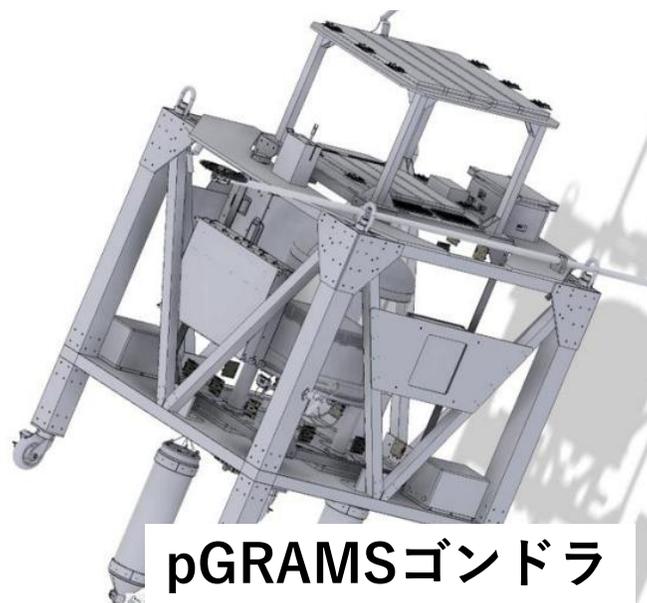
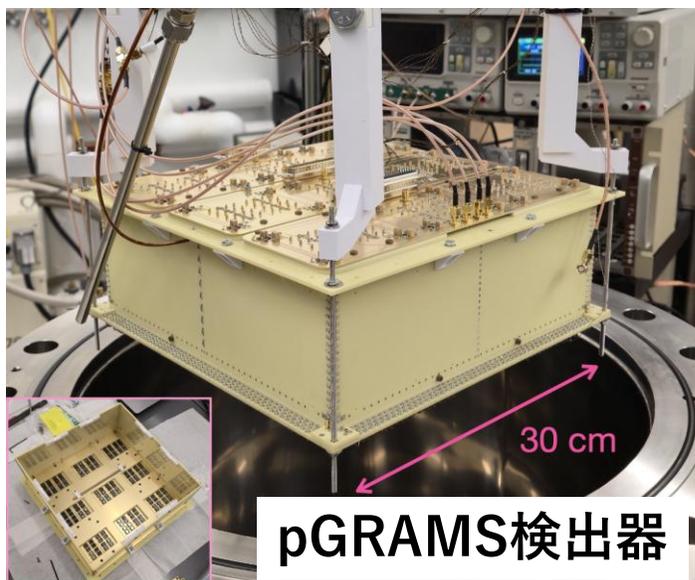
T98 Phase-2実験

- ・ 目的
高統計の液体Ar-反陽子反応事象を収集
反重陽子事象に対するBackground Reductionの確立
- ・ 場所
J-PARC K1.8BRビームライン@茨城県東海村
- ・ 検出器サイズ
30 cm × 30 cm × 30 cm
→5日間の液体Ar運用
(地上で実施)



pGRAMS (prototype GRAMS)

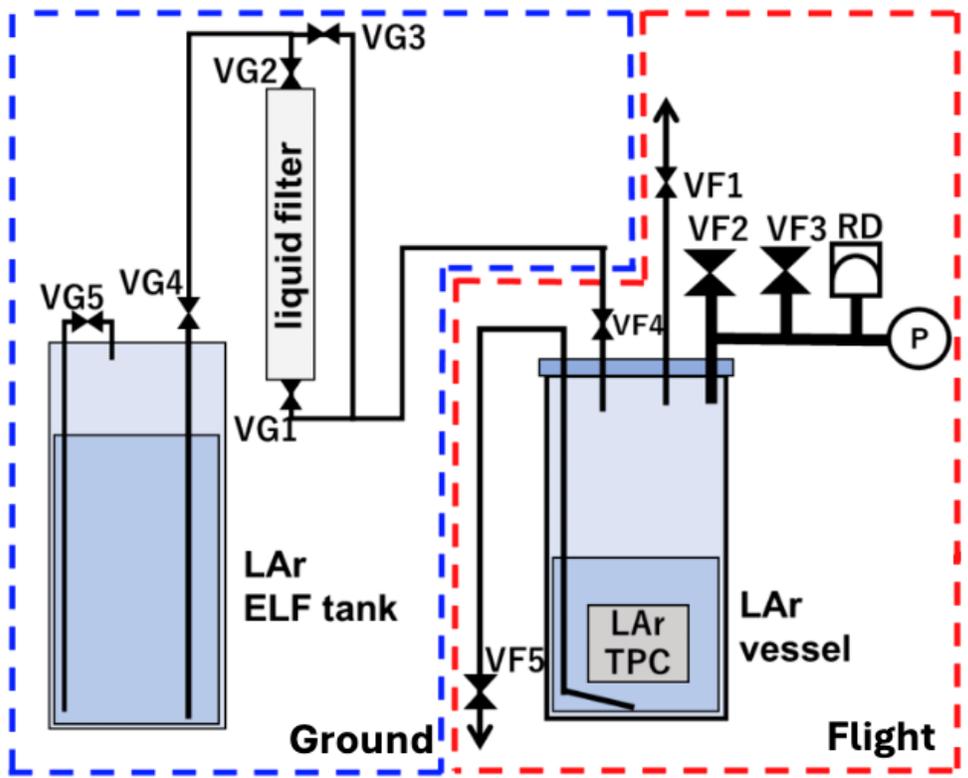
- 目的
飛行中のLArTPC性能の検証
→荷電粒子のトラッキング、ガンマ線の検出
- 場所
World View@米国アリゾナ州
- 検出器サイズ
30 cm × 30 cm × 20 cm
→eGRAMSより大型の検出器で実施
フライト時間:~1 day



純度決定要素

◆ eGRAMS配管図

- ・ フィルターを通して充填



◆ 純度を定める要素

- ・ 液体Ar初期純度
- ・ フィルターによる純化
- ・ 容器内の不純物

液体Arタンク
X ppb

- ・ 納品された液体Ar自体の純度
→ 納品場所によって異なる
10 ppb @早稲田
~100 ppb @阪大

フィルター
X → X' ppb

- ・ フィルターを通して不純物を除去

液体Ar容器
Y ppb

- ・ 容器内の不純物
→ 真空引きで削減
適切な運用が不可欠

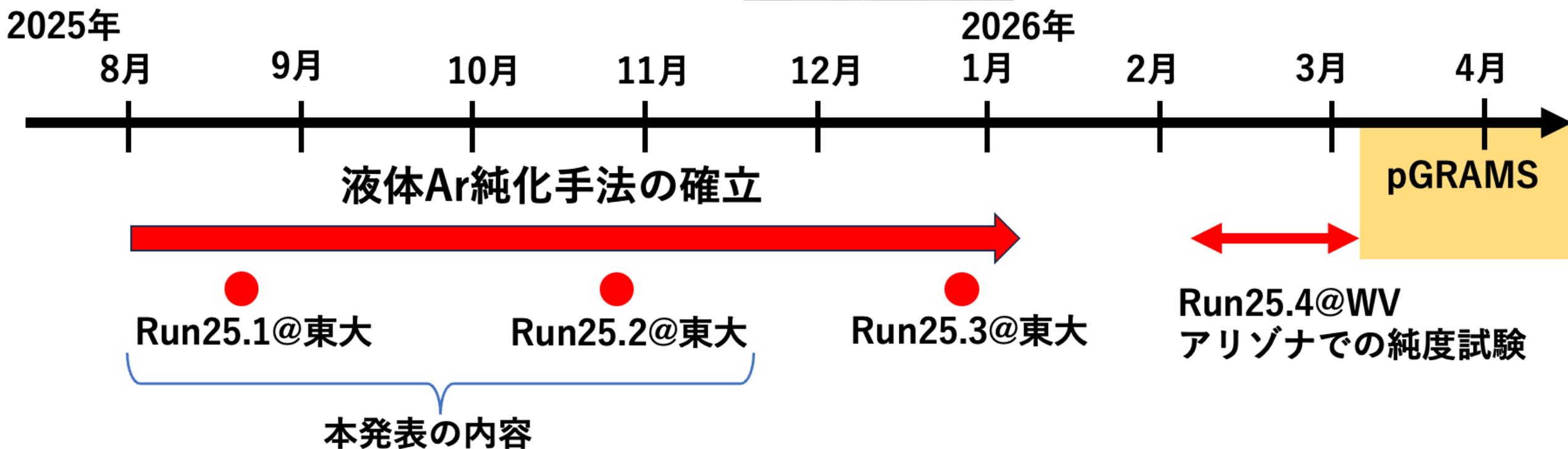
容器内純度
X' + Y ppb

- ・ 充填後の液体Arの純度
X' + Y < 1 ppbが目標

- ・ アリゾナ初期純度: ? ppb
- ・ 高純度を達成できる手法の確立
→ 液体Ar純度試験の実施

液体Ar純度試験

- 目的
液体Ar純化手法の確立
→ pGRAMSで高純度を達成
- 場所
東京大学 理学部1号館 1020室
(World View)



液体Ar純化装置

◆ 試験内容

充填条件ごとの純化性能を比較
(低速充填・直列接続)

◆ 充填条件

1. 低速充填

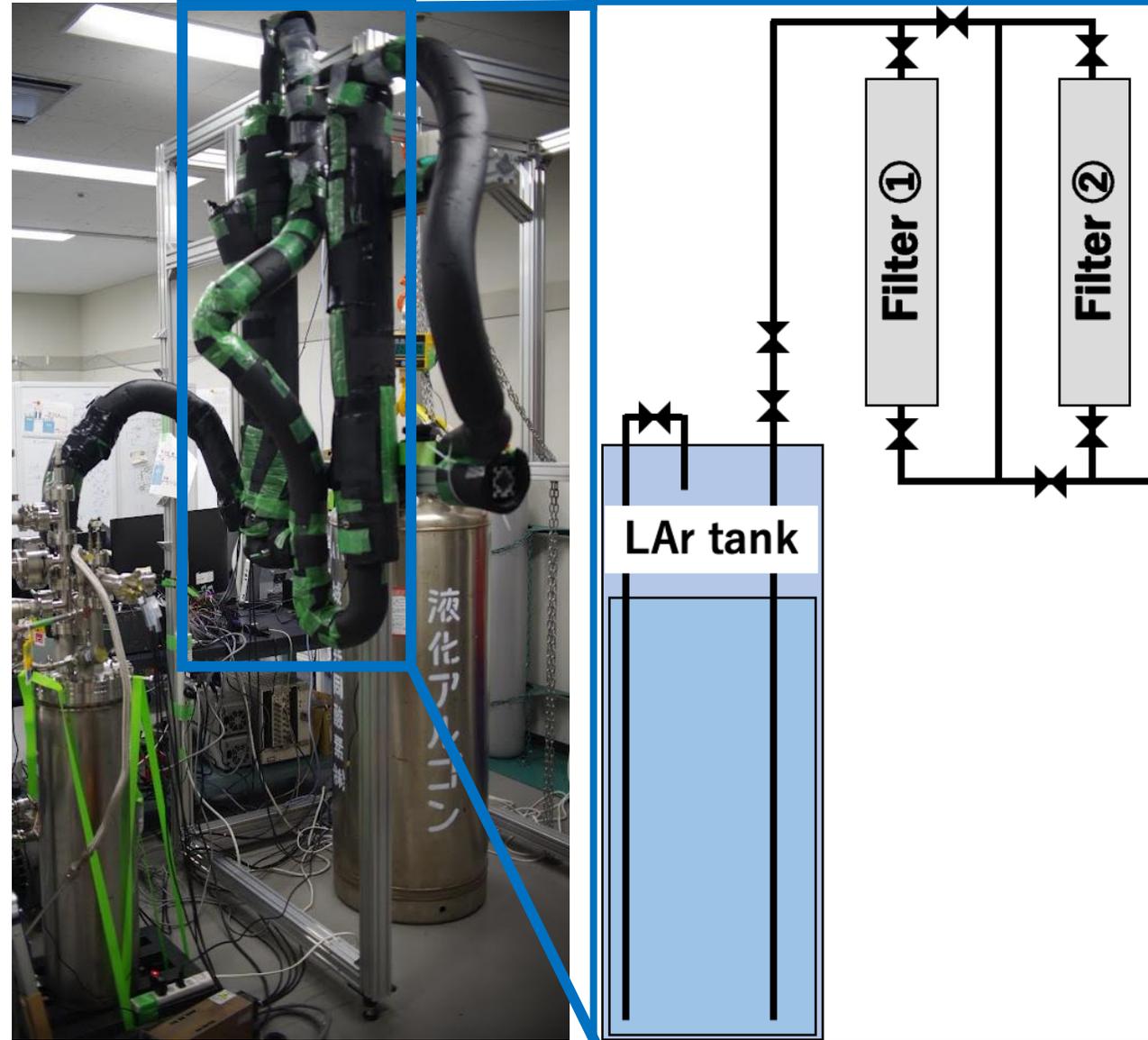
充填配管への流量を低下
→ フィルター内での滞在時間を増加

2. 直列接続

2つのフィルターを用いて純化
→ 純化経路の延長

→ より高純度を達成できる純化手法の検討

◆ 純化装置



液体Ar純化装置

◆ 試験内容

充填条件ごとの純化性能を比較
(低速充填・直列接続)

◆ 充填条件

1. 低速充填

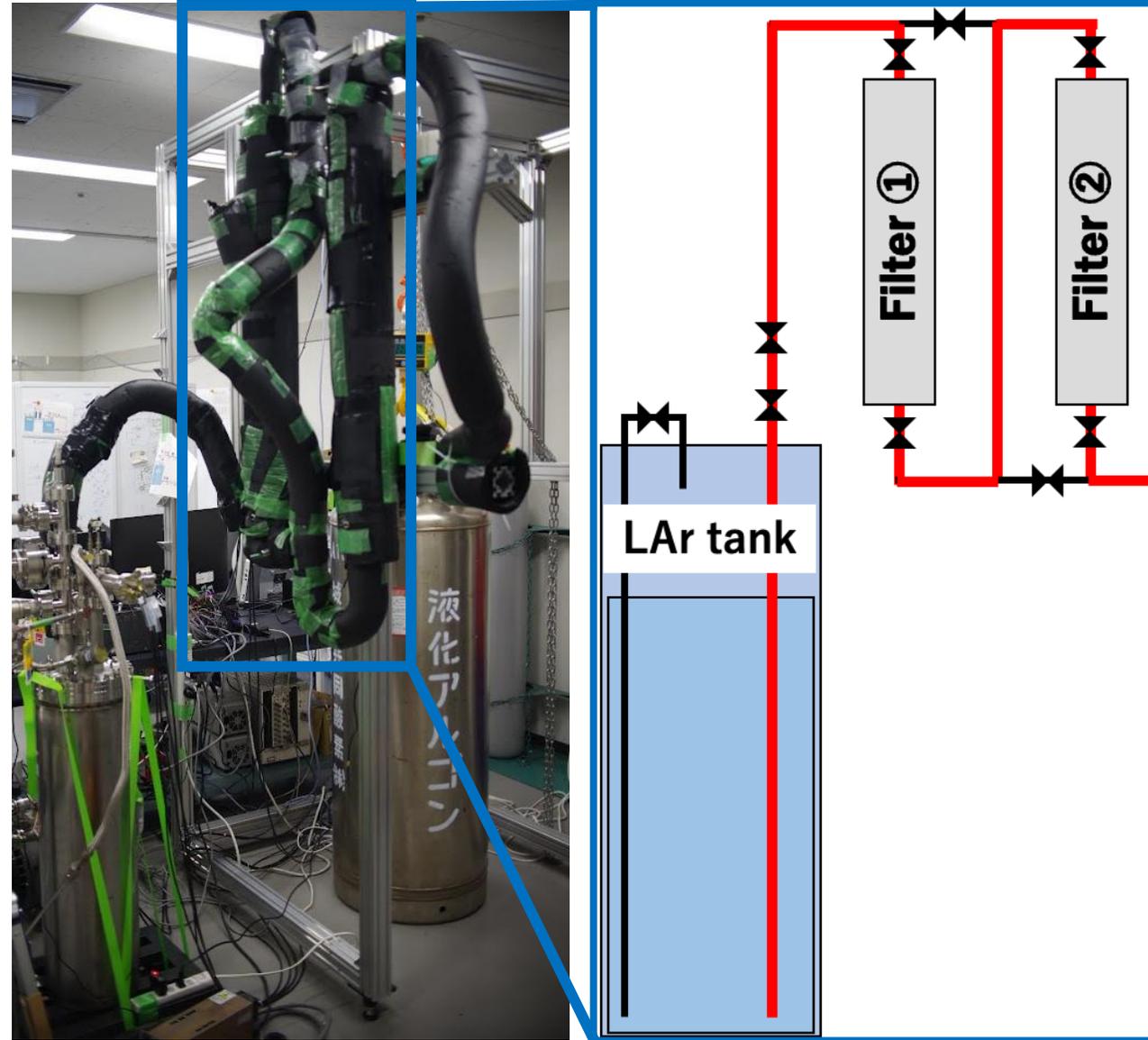
充填配管への流量を低下
→ フィルター内での滞在時間を増加

2. 直列接続

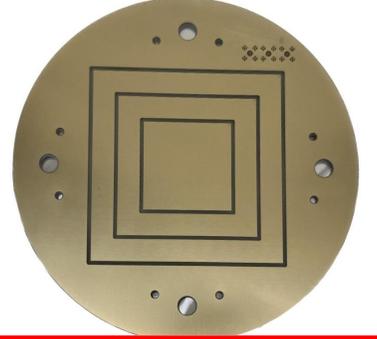
2つのフィルターを用いて純化
→ 純化経路の延長

→ より高純度を達成できる純化手法の検討

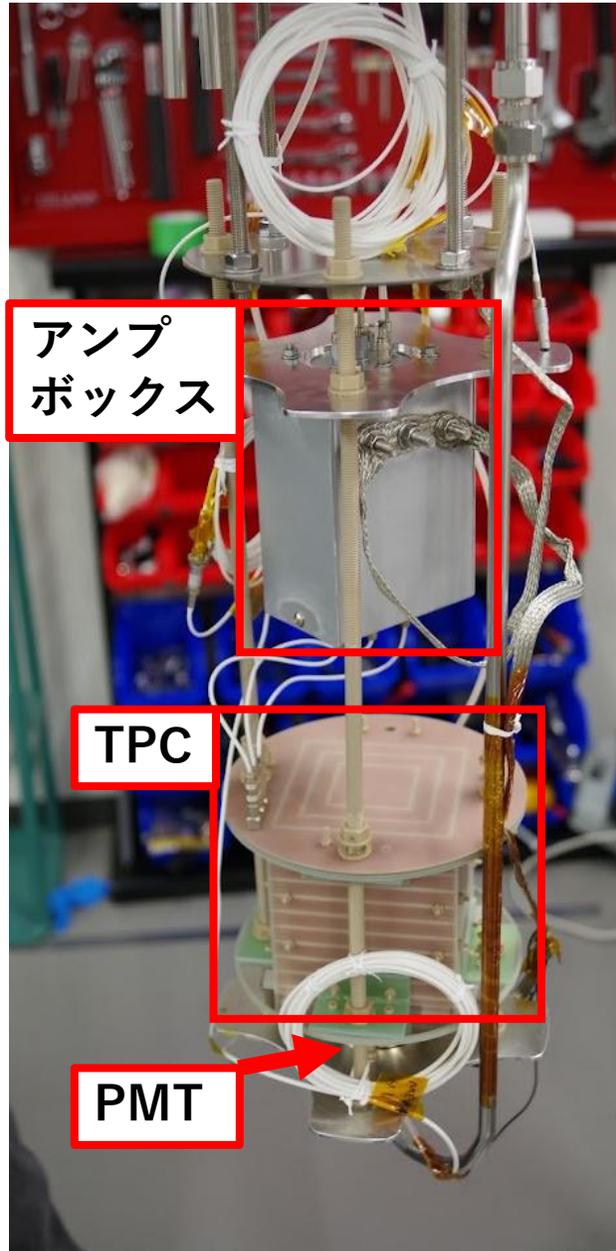
◆ 純化装置



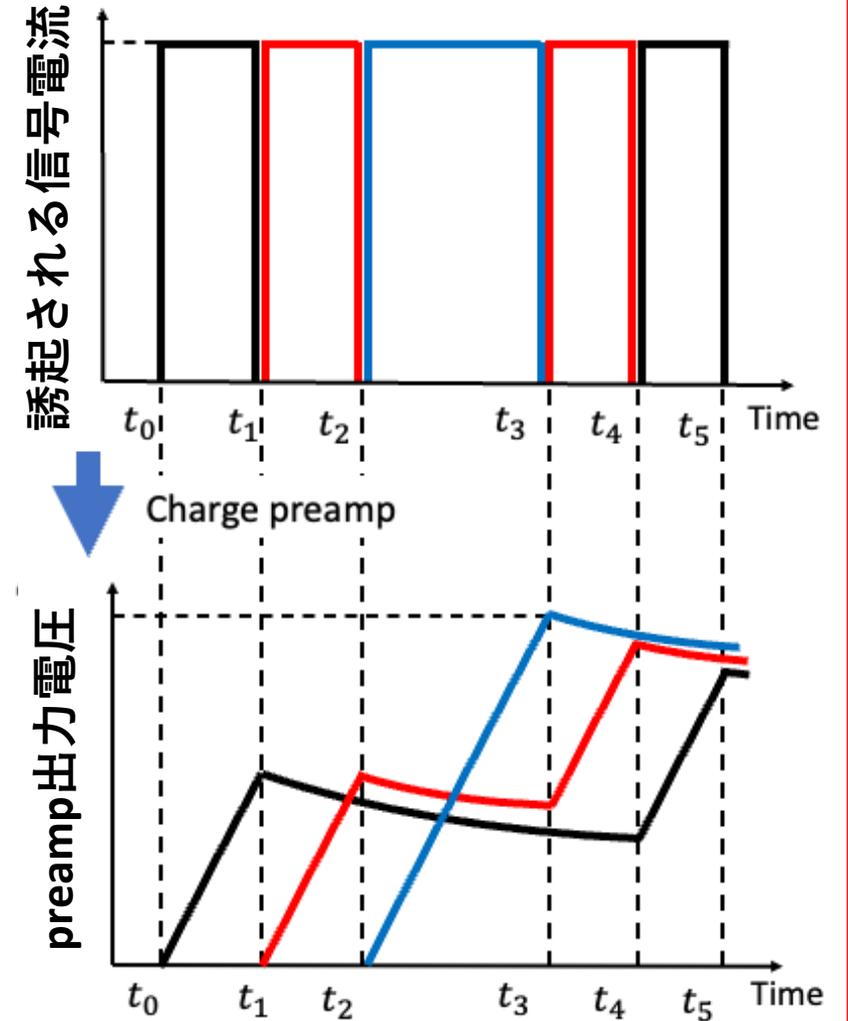
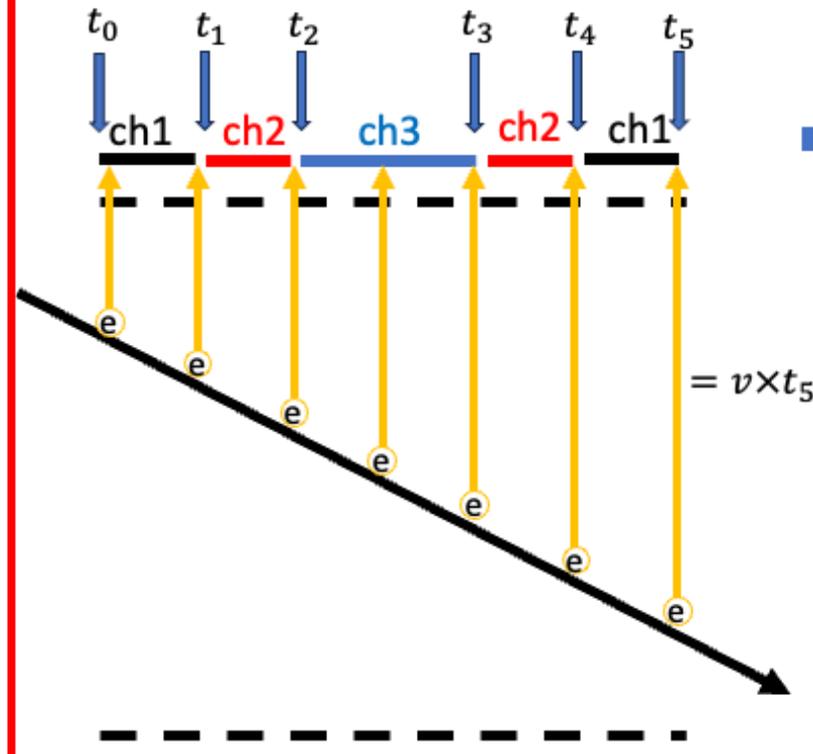
液体Ar純度試験 検出器



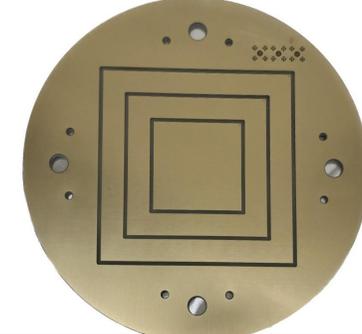
- eGRAMS検出器を使用
簡易的なセットアップで安定して運用可能



TPC信号波形モデル

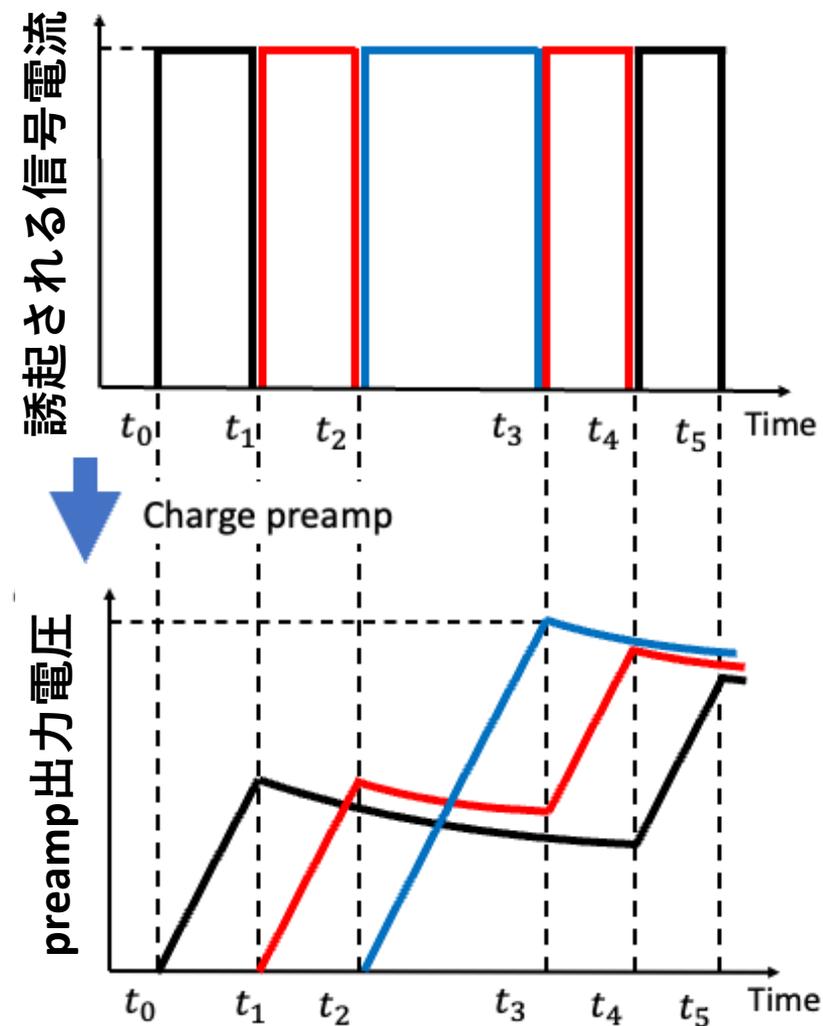
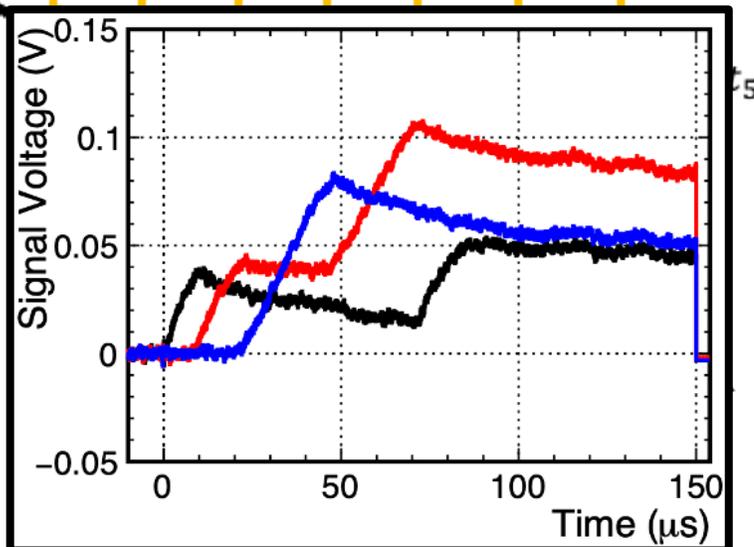
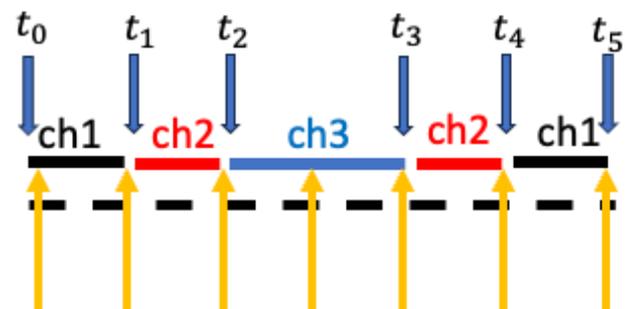


液体Ar純度試験 検出器



- eGRAMS検出器を使用
簡易的なセットアップで安定して運用可能

TPC信号波形モデル



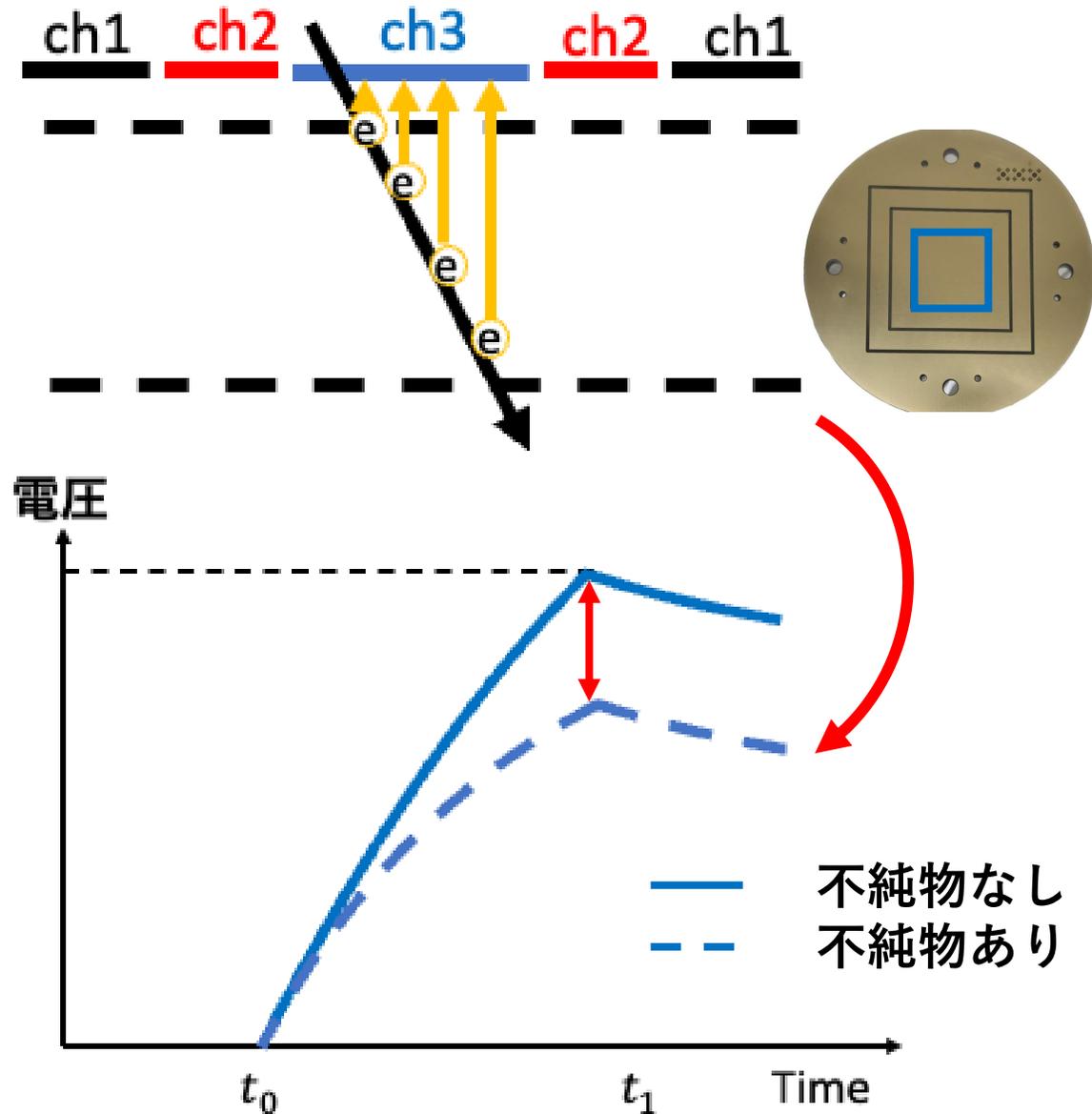
アンプ
ボックス

TPC

PMT

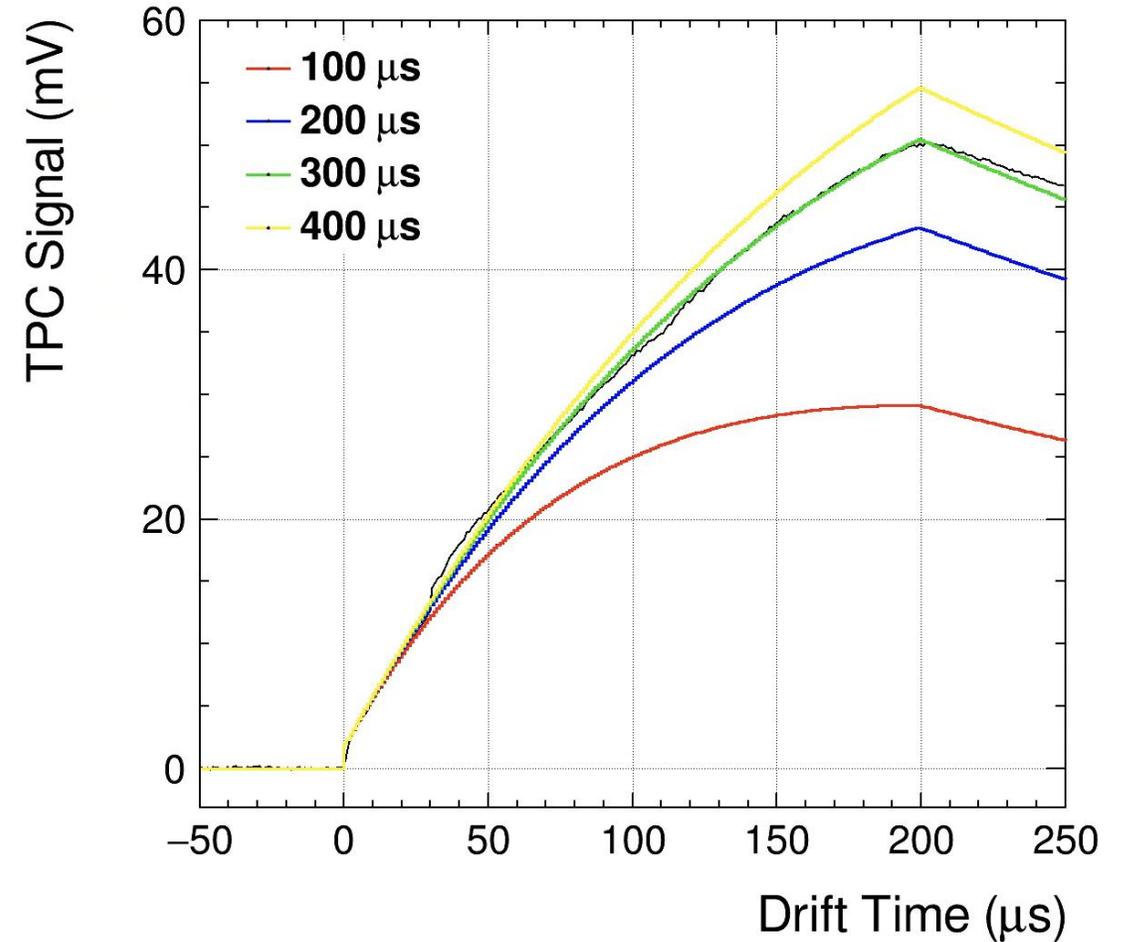
純度解析

- 縦突き抜けevent



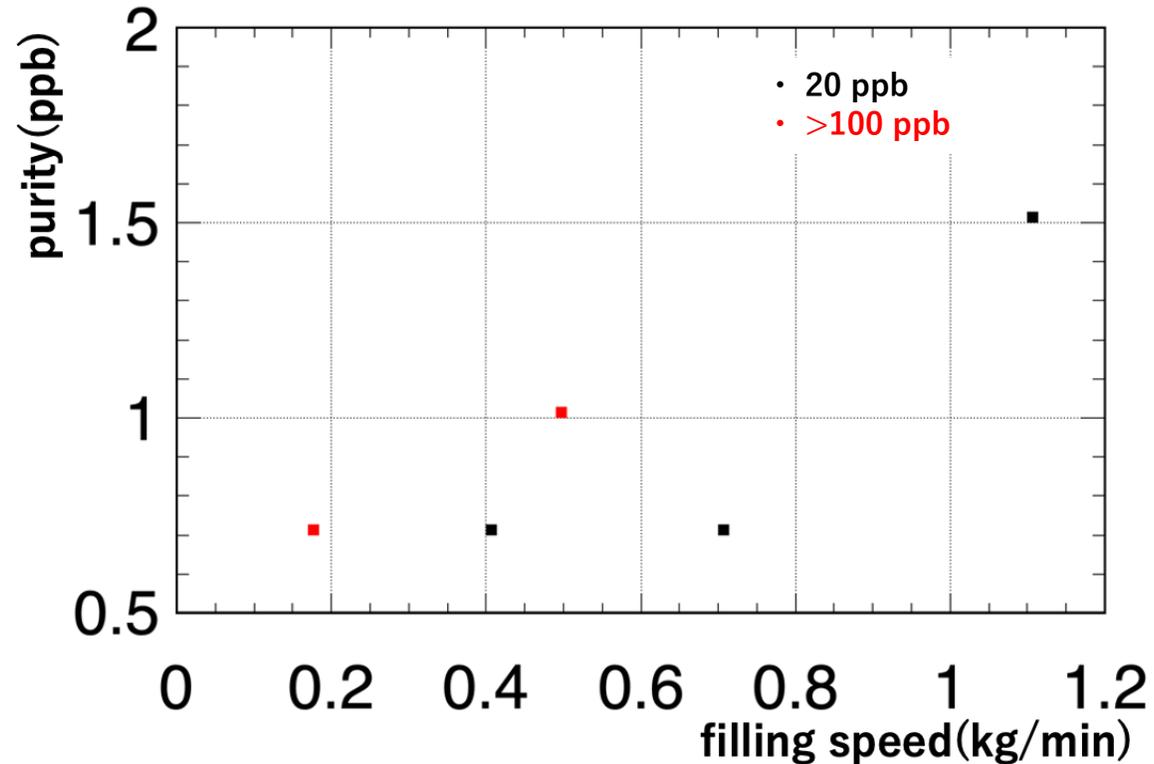
- 純度の算出

実データとシミュレーションを比較
→ 信号の立ち上がり、最大値から算出



純度試験結果

◆ 純度と充填速度



- 低速充填
 - 1.1 kg/min: 1.5 ppb
 - 0.4 kg/min: 0.7 ppb
- 直列接続
 - 0.5 kg/min: 1.0 ppb
 - 0.17 kg/min: 0.7ppb
- 低速充填+直列接続でsub-ppbを達成
 - **>100 ppb → 0.7 ppb (450 μs)**
 - 同程度であればアリゾナでも純化可能
- 更なる性能の向上に向けて
 - より低速の充填、フィルターの改良
 - Run25.3を実施予定

	初期純度 (ppb)	充填経路	充填速度 (kg/min)	純度 (ppb)
1	20	1本	1.1	1.5
2	20	1本	0.7	0.7
3	20	1本	0.4	0.7
4	>100	直列	0.5	1.0
5	>100	直列	0.17	0.7

まとめ・今後の展望

◆ GRAMS実験

- ・ 気球搭載LArTPC検出器を用いた宇宙線反粒子、MeV- γ 線の観測実験
- ・ eGRAMS(2023年7月)・T98(2025年2月)を実施
→pGRAMS(2026年春~秋)に向けて準備中

◆ pGRAMS

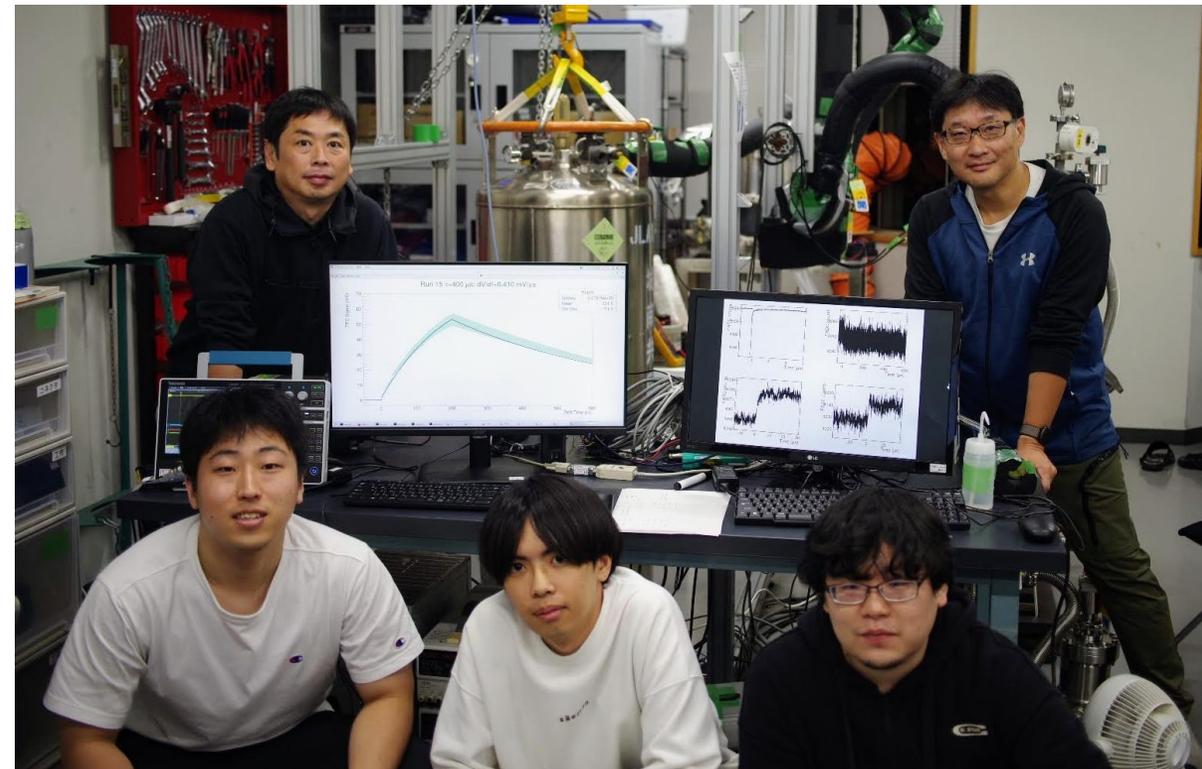
- ・ 飛行中のLArTPC性能の検証@米国アリゾナ州
- ・ 上空で長時間の液体Ar運用
→高純度の維持

◆ 液体Ar純度試験

- ・ 液体Ar純化手法の確立
- ・ 充填条件を変えて純度を比較
→初期純度が悪くても高純度を達成

◆ 今後の展望

- ・ Run25.3の実施(12/23,24)
→純化手法の改善
- ・ pGRAMSにて高純度での運用を達成

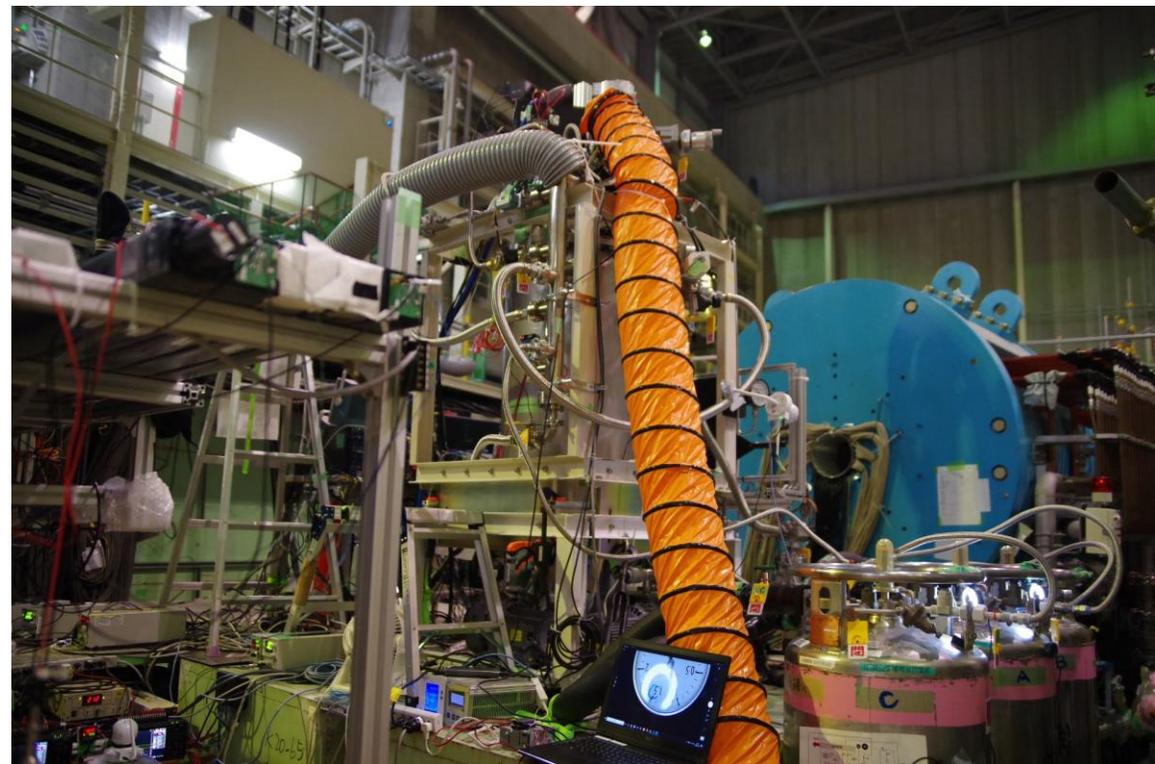
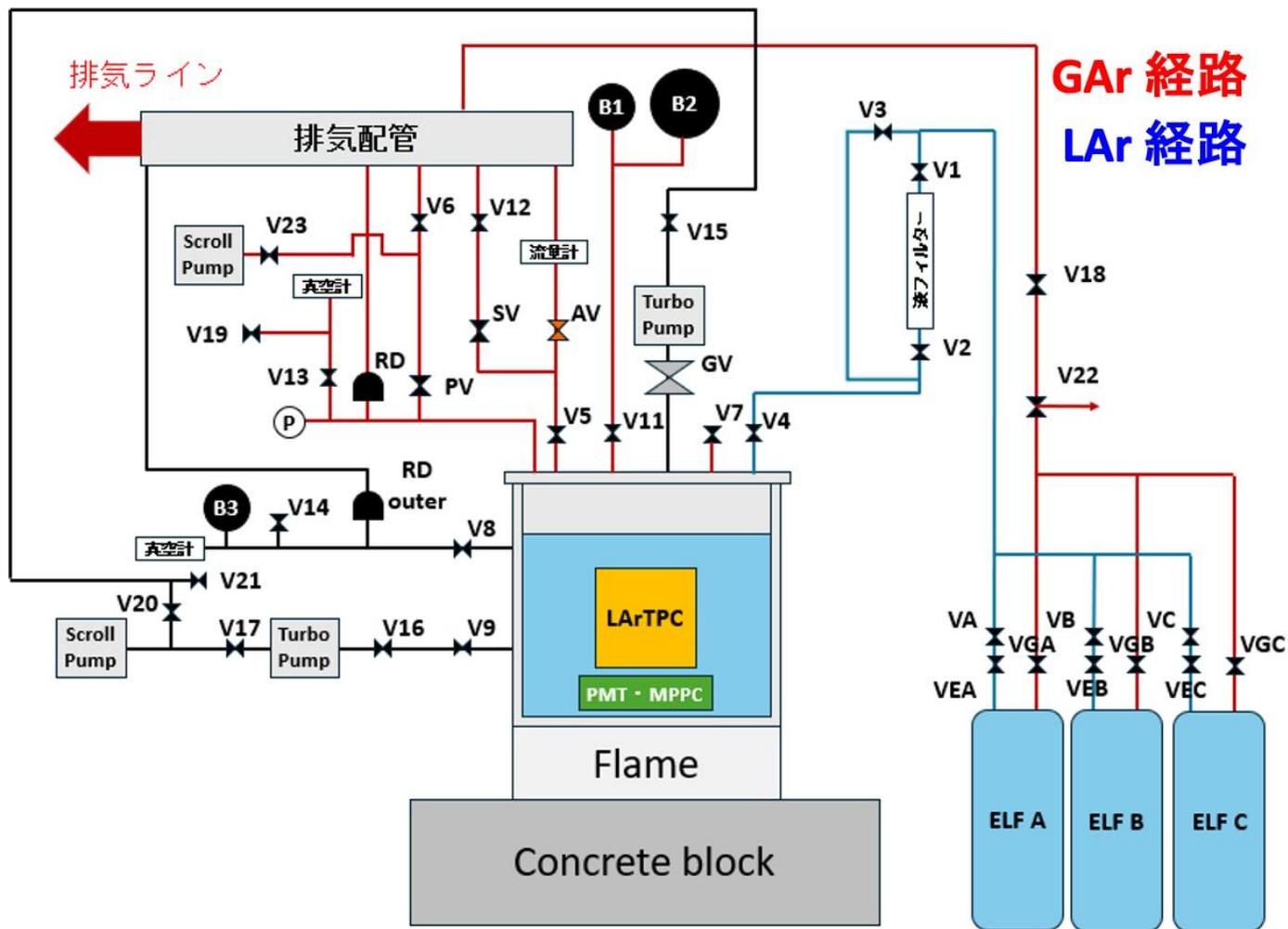


Back up

T98実験

◆ T98 Phase-2概要

長期間の真空引きにより容器内の不純物を削減
eGRAMSと同じように運用+追充填が可能



液体ArTPCを4日間運用

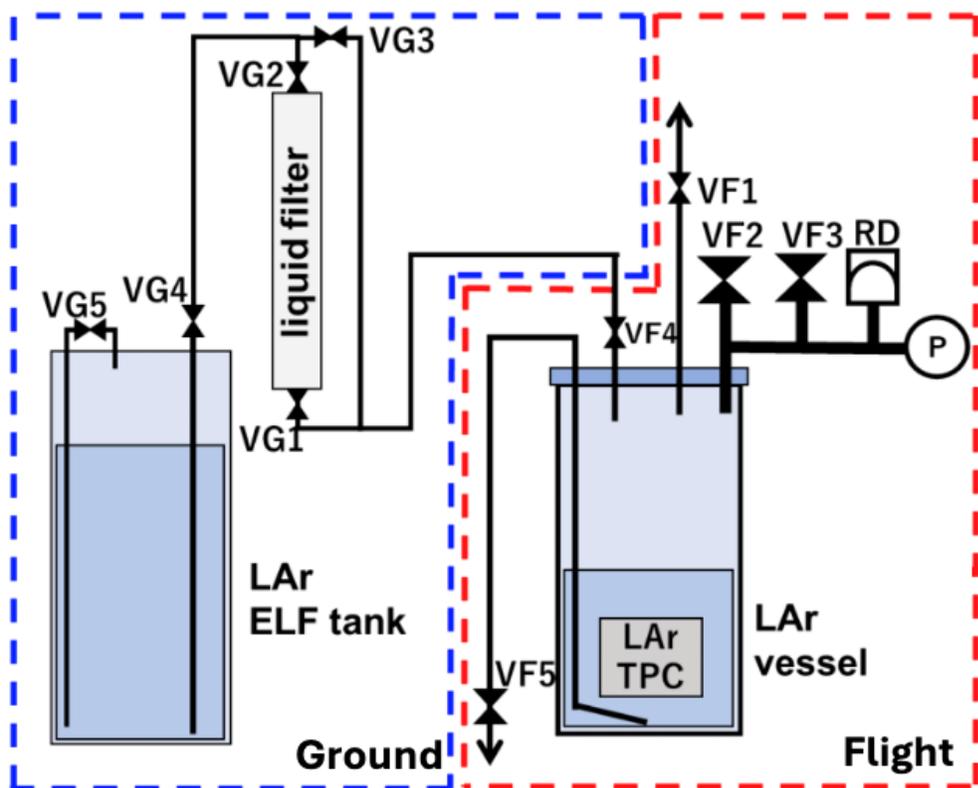
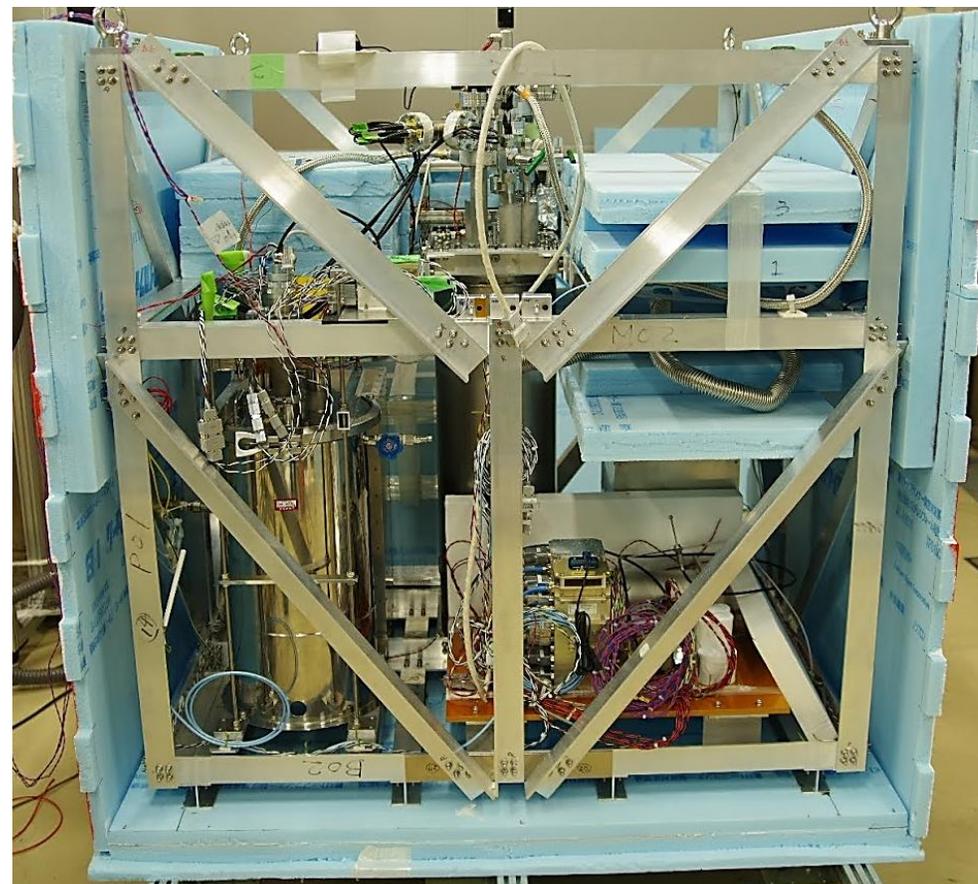
- ・ 安定した圧力コントロール
- ・ 数日にわたって高純度を維持

T98でも、準備段階では
高純度を達成できないことがあった
→ 大気(0.16 L)がタンクに混入
 O_2 :200 ppb相当

eGRAMS

◆ eGRAMS概要

フィルターを通して液体Arを地上で充填(放球直前)
気球上で液体Arを運用し純度を維持



約3時間のフライトを実施

- ・ 安定した液体Arの運用
- ・ 高純度を維持
- 世界初の気球上での液体ArTPC運用事例

一方で、準備段階では
高純度を達成できないことがあった

Run25.1 概要

◆ 目的

LAr純度達成条件の確認

フィルター性能、充填速度、初期純度 など

◆ 実施日

8/20~21

充填、データ取得、排液の繰り返し
充填条件を変えて液体Ar純度を比較

◆ 充填条件

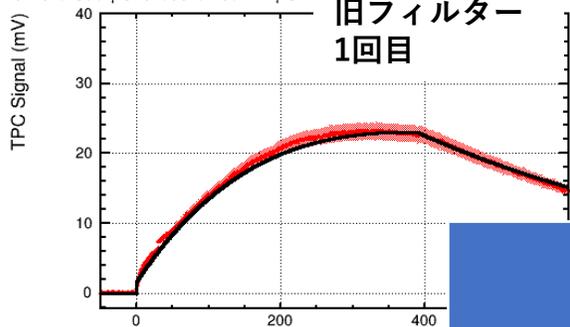
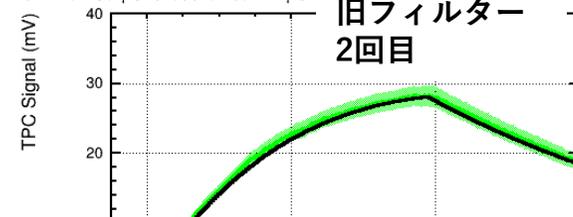
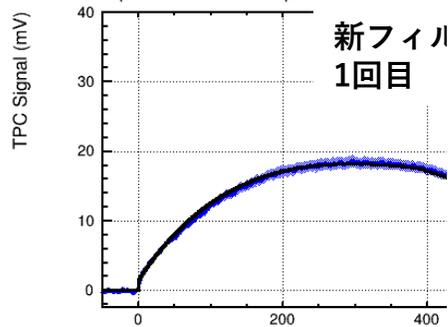
- 1: バイパス (初期純度の評価)
- 2: 旧フィルター (性能確認兼とも洗い)
- 3: 旧フィルター (性能確認)
- 4: 新フィルター (性能確認)
- 5: 新フィルター (充填速度を落とす)
- 6: バイパスから追充填 (初期純度の評価)

day \ hour	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
8/20 (Wed.)					Filling 1 (bypass)			Filling 2 (旧Filter)				Filling 3 (旧Filter)		Closing		
8/21 (Thu.)			Filling 4 (新Filter)		Filling 5 (新 Filter ゆっくり)			Filling 6 (bypass 追充填)			Closing					

Run25.1結果

◆ 実データとシミュレーションの比較

- 今まで通りの運用を行うと旧の方が高純度
- 充填速度を落とすことで高純度を達成可能
- 初期純度が17 ppb程度であれば十分ろ過できる
- 初期純度が悪い場合に高純度を達成できるか

Run 5 $\tau=300 \mu\text{s}$: $dV/dt=0.160 \text{ mV}/\mu\text{s}$ Run 7 $\tau=450 \mu\text{s}$: $dV/dt=0.160 \text{ mV}/\mu\text{s}$ Run 11 $\tau=200 \mu\text{s}$: $dV/dt=0.160 \text{ mV}/\mu\text{s}$ 

	初期純度 (ppb)	充填経路	充填速度 (kg/min)	純度 (ppb)
1	20	1本	1.1	1.5
2	20	1本	0.7	0.7
3	20	1本	0.4	0.7
4	>100	直列	0.5	1.0
5	>100	直列	0.17	0.7

Filling	Filter	Filled LAr (kg)	Consumed LAr (kg)	Filling Speed (kg/min)	Filling Eff. (%)	Electron lifetime (us)	Impurity (ppb)
1	bypass	13.5	35	1.2	39	18	17
2	old	13.5	38	0.7	36	300	1.0
3	old	12.5	35	0.7	36	450	0.7
4	new	12.5	35	1.1	36	200	1.5
5	new	13.0	36	0.4	36	450	0.7
6	bypass	13.0+7.0	17	1.6	41	47	6.4

Run25.2 概要

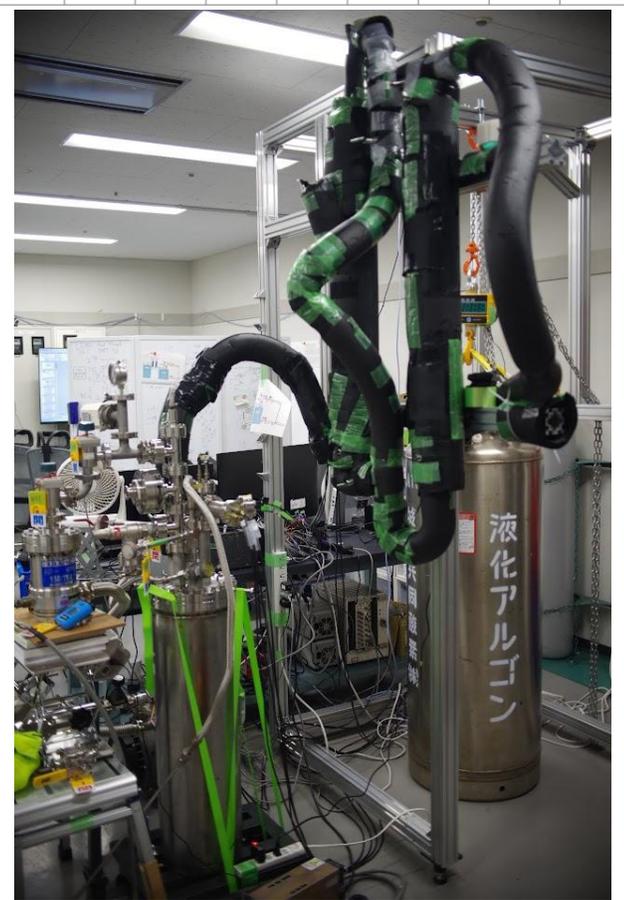
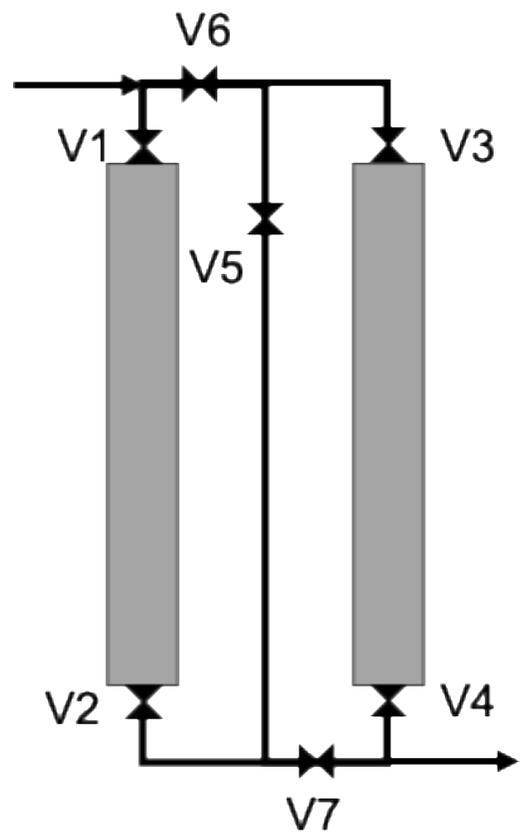
◆ 目的
 フィルターを直列充填することによって
 純化性能の向上が起こるかの確認

◆ 実施日
 10/28~29

◆ 変更点
 フィルター配管

- ◆ 充填条件
- 1: バイパス (初期純度の評価)
 - 2: 直列充填 (性能確認)
 - 3: 直列充填 (充填速度を落とす)
 - 4: バイパスから追充填 (初期純度の評価)

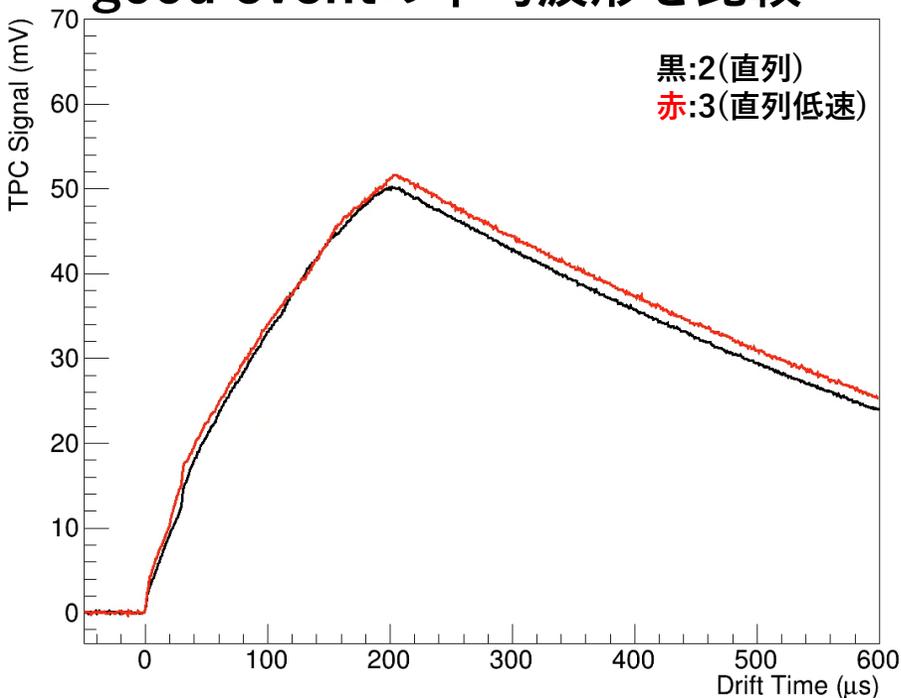
day \ hour	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
10/28 (Tue.)		Filling 1 (bypass)		Filling 2 (直列)			Filling 3 (直列 低速)										
10/29 (Wed.)					Filling 4 (bypass)			closing									



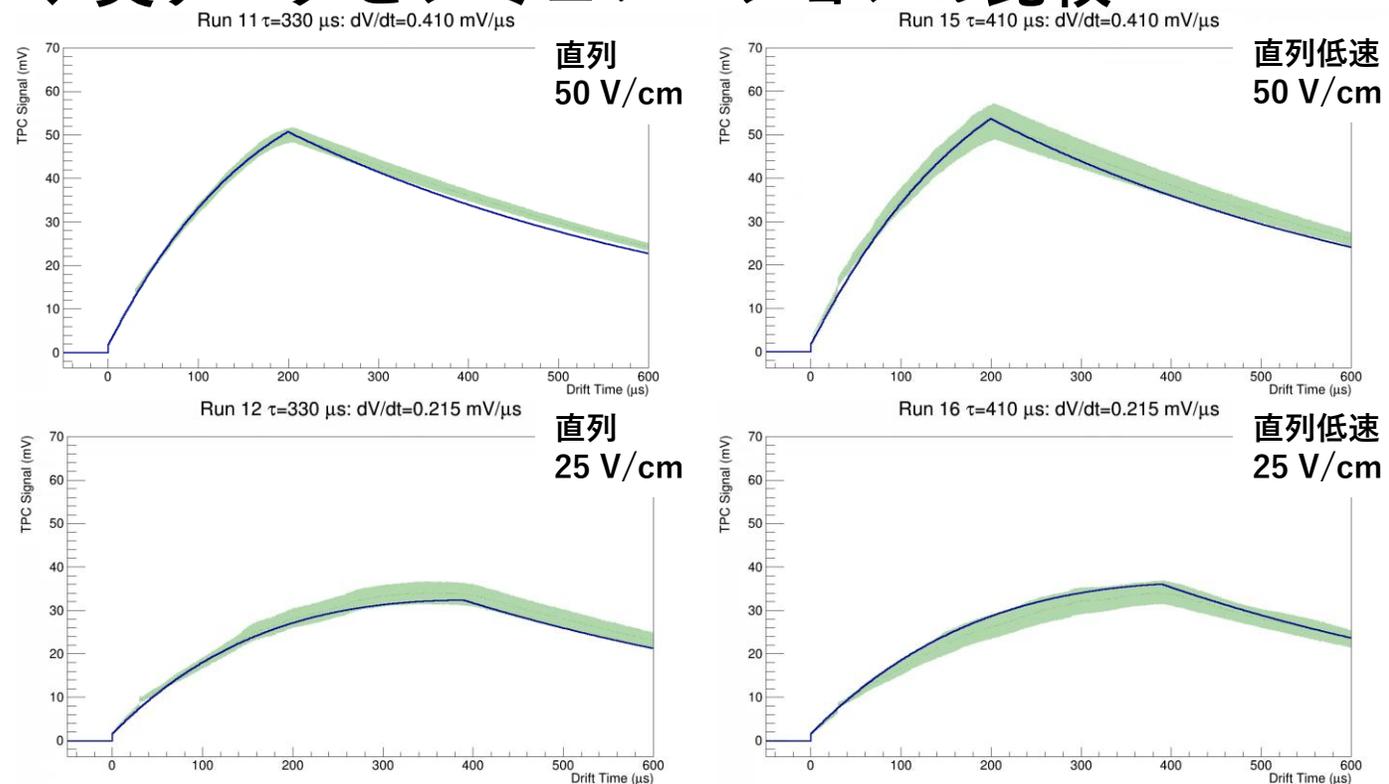
Run25.2結果

◆ 充填条件ごとの比較

good eventの平均波形を比較



◆ 実データとシミュレーションの比較



Filling	Filter	Filled LAr (kg)	Consumed LAr (kg)	Filling Speed (kg/min)	Filling Eff. (%)	Electron lifetime (us)	Impurity (ppb)
1	bypass	13.0	35	1.2	45	<few	>100
2	series	13.0	38	0.49	32	300	1.0
3	series	13.0	35	0.17	25	400	0.7
4	bypass	13.0	35	1.1	N/A	<few	>100

- フィルターを直列に繋ぐと初期純度がかなり悪くても十分ろ過できる
- 充填速度を落とした場合の影響はあまり見えなかった
- 不純物の特定および安全な運用法の確立
→Run25.3へ

Run25.1 概要

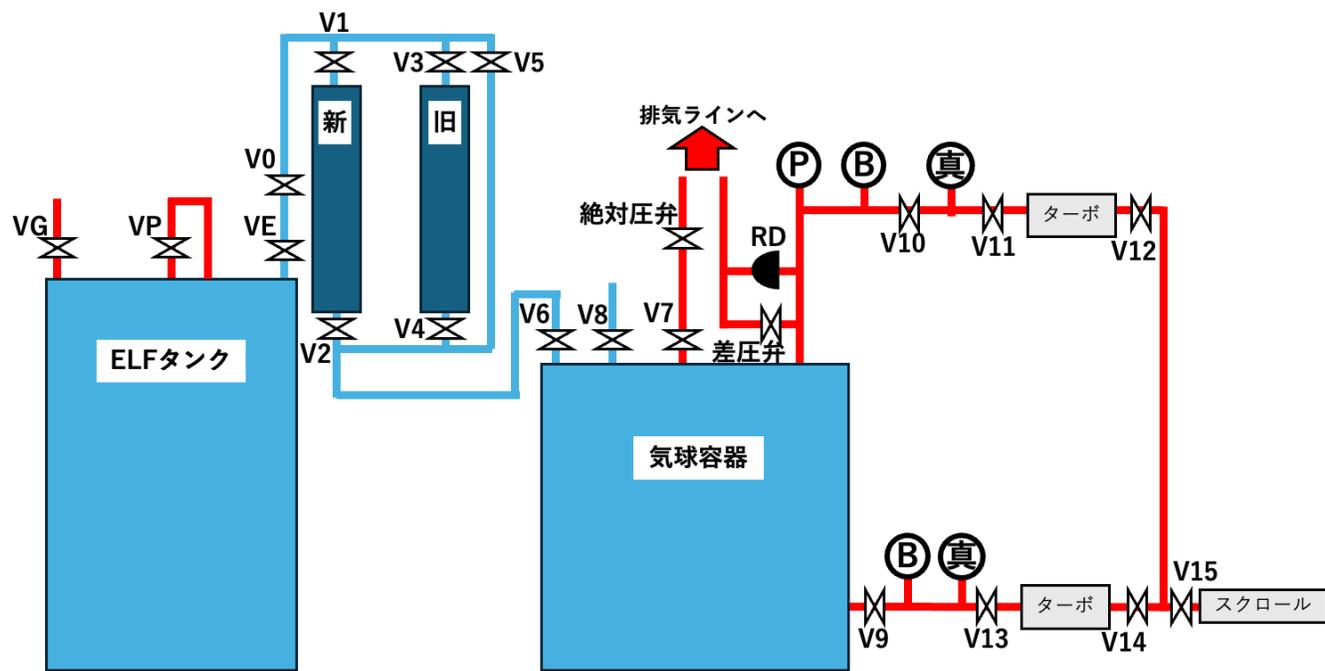
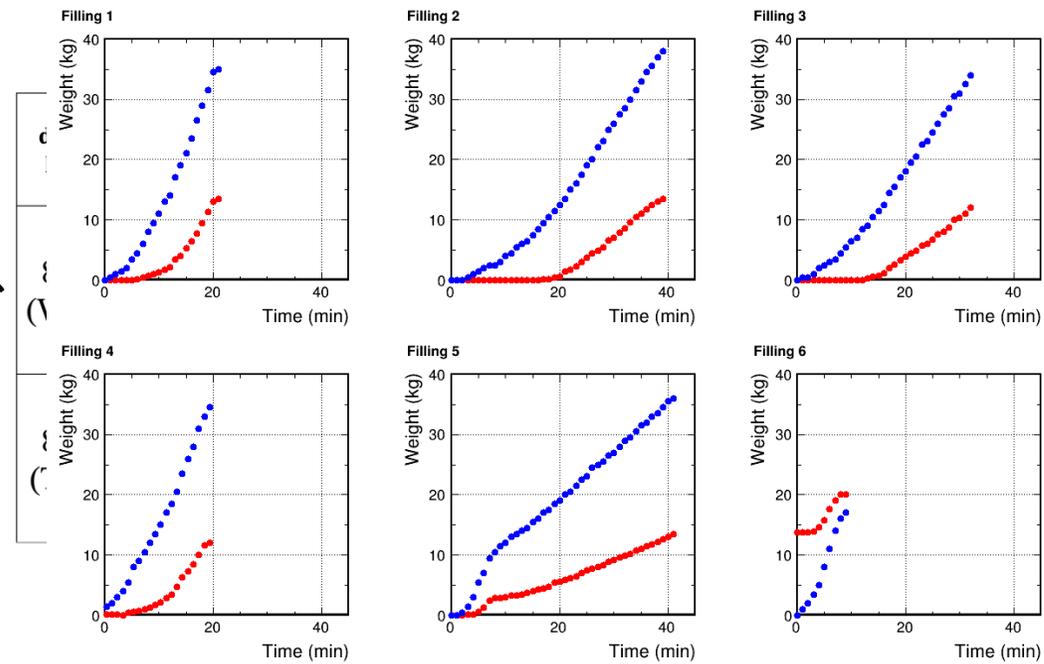
22	23

→ Closing

◆ 目的
LAr純度達成条件の確認
フィルター性能、充填速度、初期純度 など

◆ 実施日
8/20~21
充填、データ取得、排液の繰り返し
充填条件を変えて液体Ar純度を比較

- ◆ 充填条件
- 1: バイパス (初期純度の評価)
 - 2: 旧フィルター (性能確認兼とも洗い)
 - 3: 旧フィルター (性能確認)
 - 4: 新フィルター (性能確認)
 - 5: 新フィルター (充填速度を落とす)
 - 6: バイパスから追充填 (初期純度の評価)



過去の液体アルゴンRun

◆ PreRun1(2024/12/20)

J-PARCにセットアップを持ち込んでの試験
2023年に作成したフィルター(以下 新フィルター)
→純度が非常に悪かった(>100 ppb)

◆ PreRun2(2025/1/7)

元々使用していたフィルター(以下 旧フィルター)
→高純度を達成(sub ppb程度)

eGRAMS直前でも高純度達成できず

◆ PreRunの結果

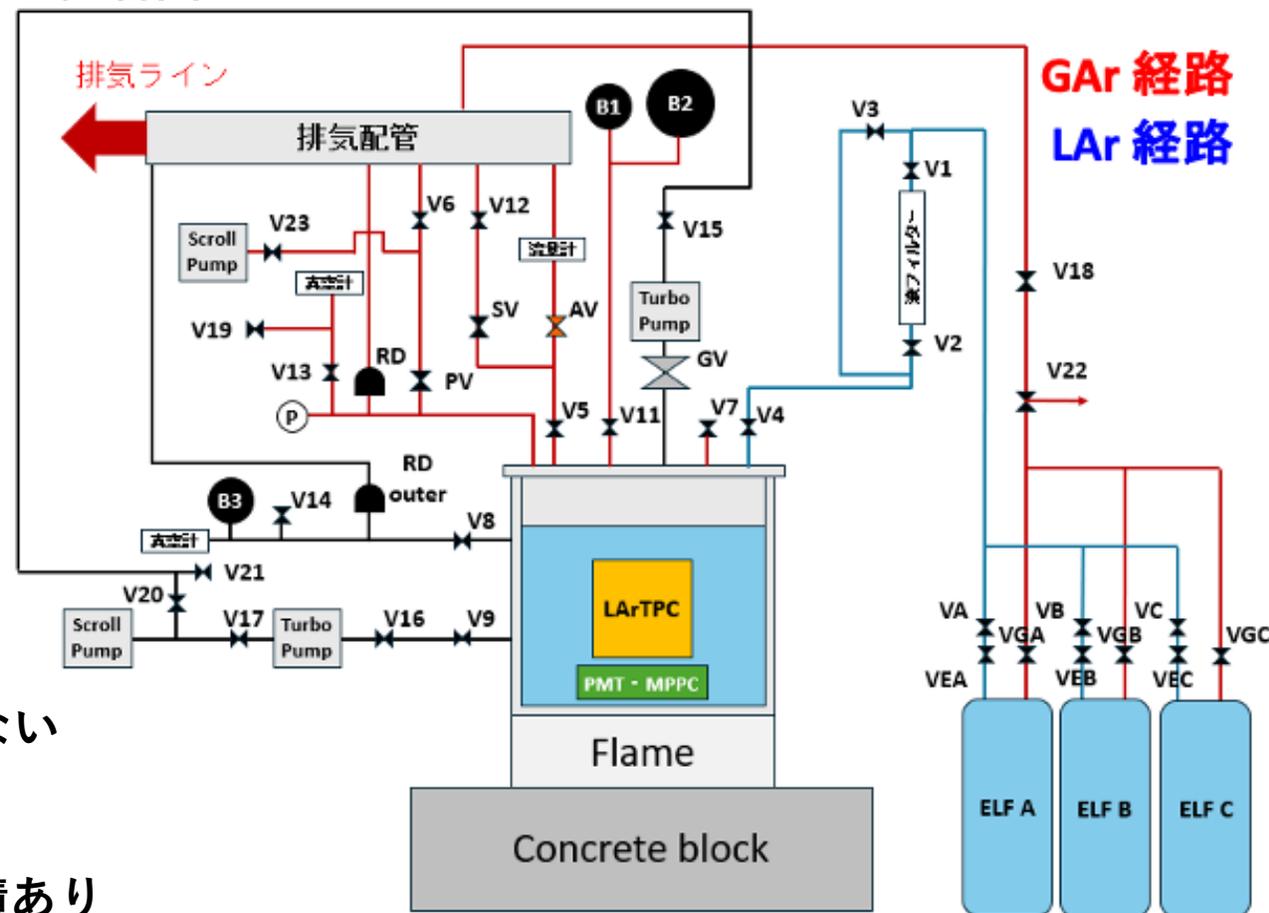
・ 純度悪化の原因

運用ミスをしてしまい、ELF内の純度が悪化
新フィルターでは不純物を除去しきれなかった
→初期純度が悪い場合には正しい運用でも純度が出ない

・ 2つのフィルターの違い

どちらのフィルターも以前のRunで高純度達成の実績あり
旧フィルターの方が充填に時間がかかる(約4倍)
→純粋な性能の問題なのか充填速度の問題なのか
初期純度が悪くても時間を掛ければ高純度を達成できるのか

◆ 配管図



液体Ar純度試験を実施することで高純度を達成するための方法を確認する

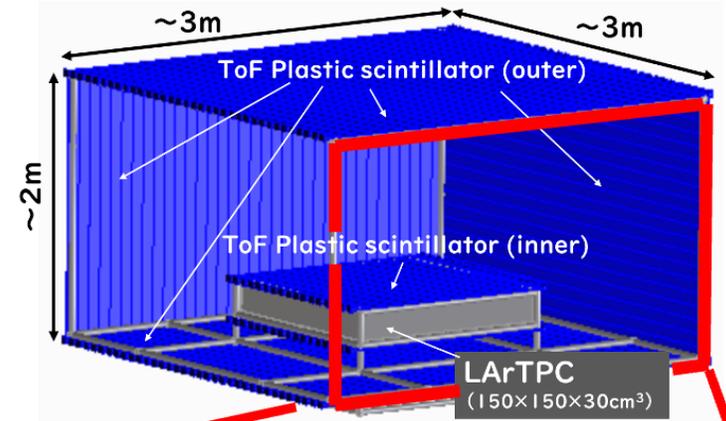
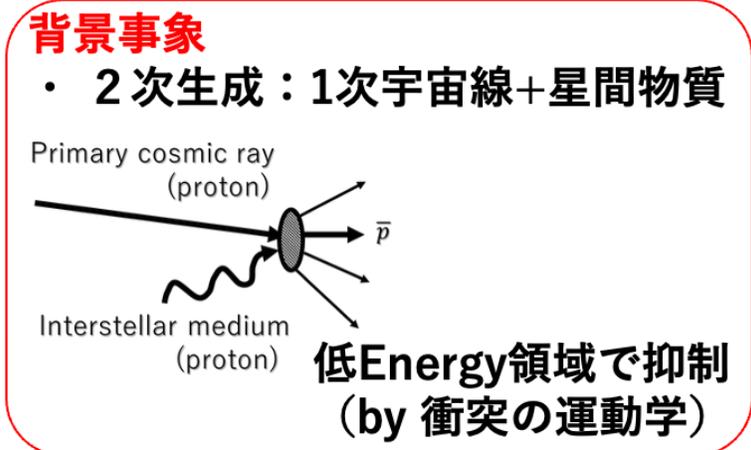
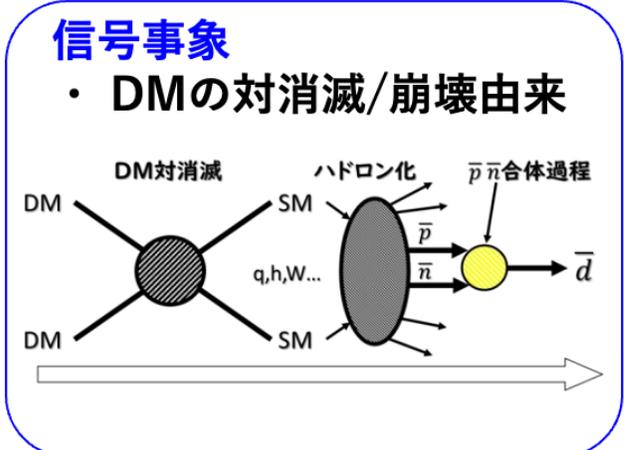
GRAMS実験: Gamma-Ray and AntiMatter Survey

◆ GRAMS実験

気球搭載LArTPCを用いた宇宙線反粒子、MeV- γ 線の観測実験

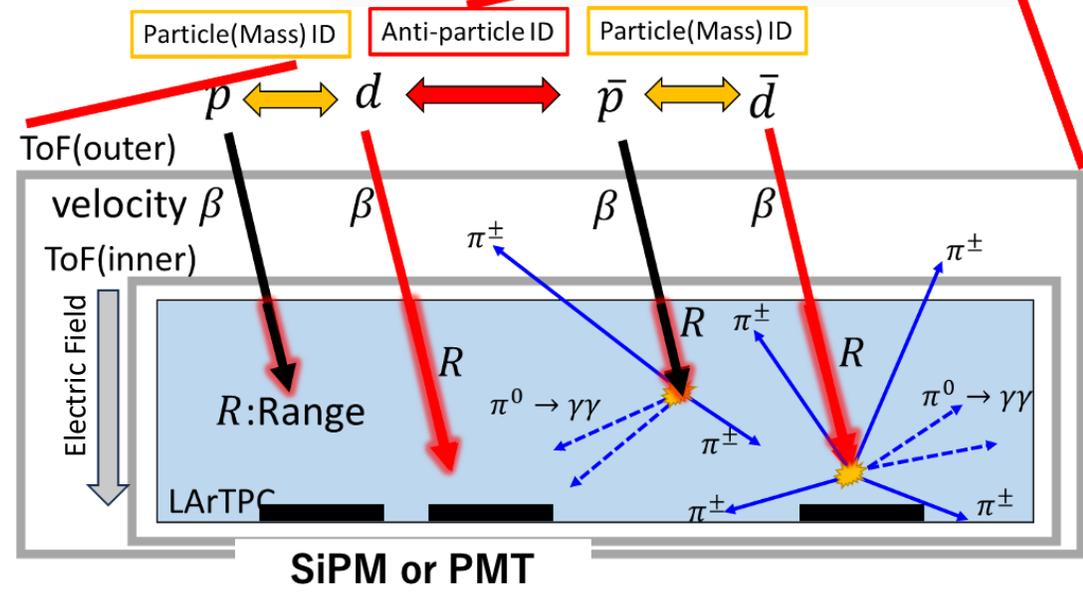
◆ 反粒子観測 (GRAMS Target:反陽子, 反重陽子, 反ヘリウム)

- ・ 反陽子はすでに多くの気球・衛星実験で観測
- ・ 宇宙線中の反重陽子,反ヘリウムは未観測



- ・ 反重陽子:ゼロバックグラウンドの観測が可能
→ 反重陽子の観測による暗黒物質間接探索

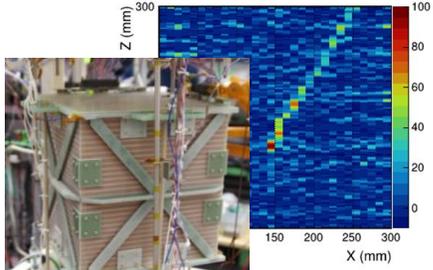
◆ LArTPC中のAr-反重陽子/反陽子反応を 実際に検出した例は(ほとんど)ない → 検出器を用いた検証が重要(T98実験)



GRAMS実験:マイルストーン

1. LArTPCの開発

宇宙線 μ 観測試験
LAr中での停止 μ の観測
@早稲田



30 cm角LArTPC

2022 10月

2. LArTPC検出器気球運用

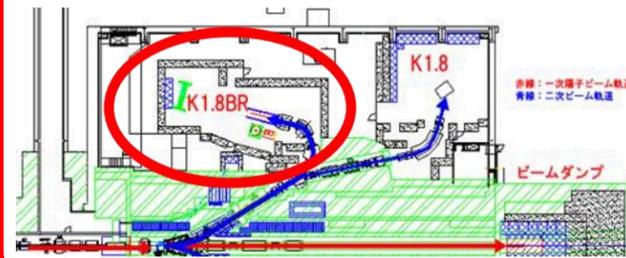
気球工学試験@JAXA大樹町
気球観測の経験 w/ 小型気球
B23-06実験として7/27に実施



2023 6,7月

3. 粒子識別方法の実験的検証

加速器ビーム試験 @ J-PARC K1.8BRビームライン
LAr-反粒子捕獲事象の検証 □ Phase-1
→ @ J-PARC K1.8BR
JPARC T98実験として承認済 → 1 event: > O(10²)時間



□ Phase-2
・反陽子捕獲事象収集

2025 2月

2026 3月

Phase-1 & eGRAMS

Phase-2

光信号解析

pGRAMS

本発表の内容

1.光信号解析

2.液体Ar純度評価

検出器試験 for Phase-2
@ 早稲田&J-PARC

液体Ar純度試験

液体Ar純度評価

過去Runでの充填速度

◆ 2024年度のRunにおける充填速度を確認した

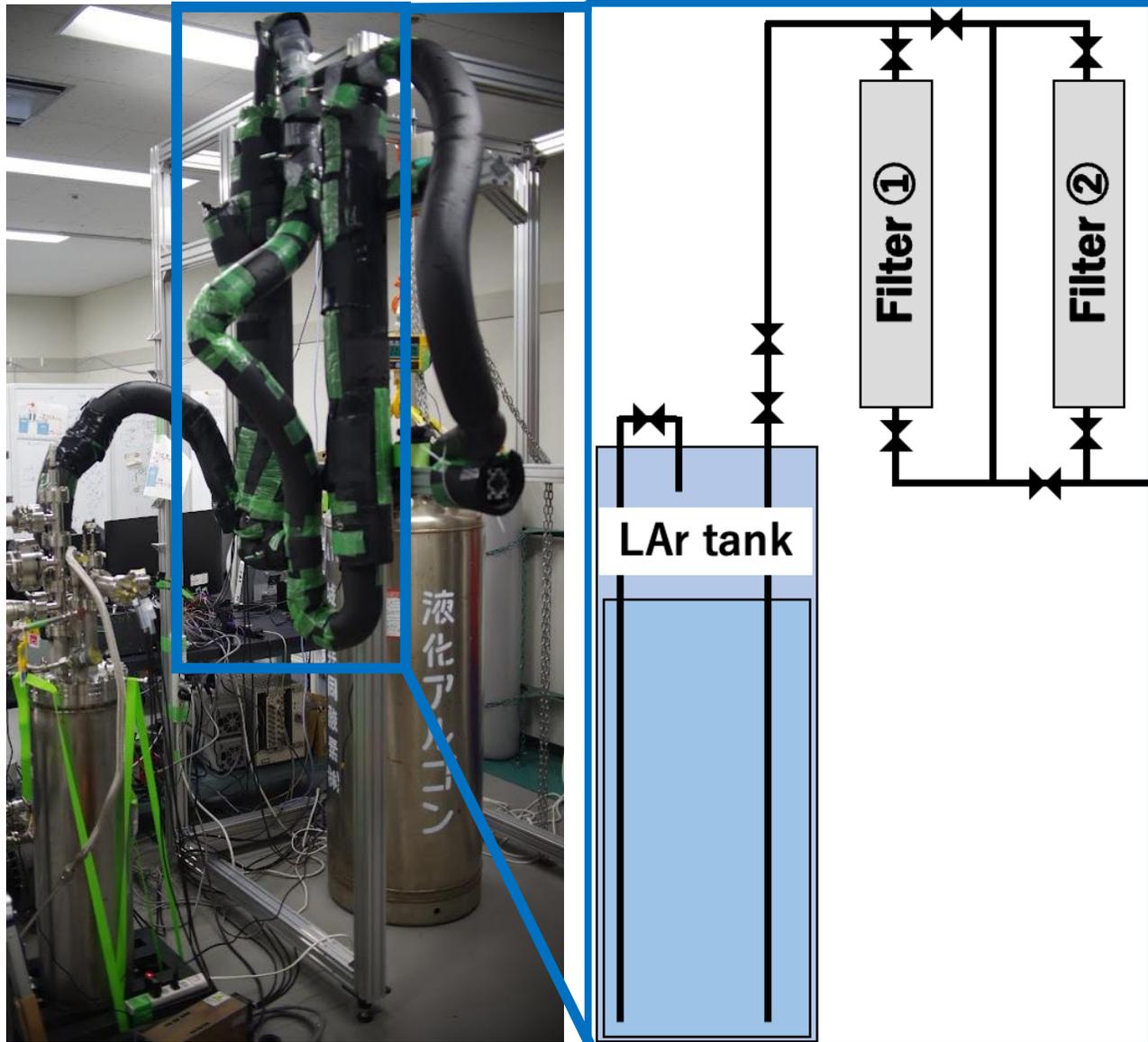
Run	Filter	Filling Speed (kg/min)
Run24.1	新	2.9 kg/min
Run24.2	新	4.1 kg/min
Run24.3	新	3.8 kg/min
PreRun1	新	2.8 kg/min
PreRun2	旧	1.1 kg/min
Phase-2	旧	0.8 kg/min

◆ Run25.1

Filling	Filter	Filled LAr (kg)	Consumed LAr (kg)	Filling Speed (kg/min)	Filling Eff. (%)
1	bypass	13.5	35	1.2	39
2	old	13.5	38	0.7	36
3	old	12.5	35	0.7	36
4	new	12.5	35	1.1	36
5	new	13.0	36	0.4*	36
6	bypass	13.0+7.0	17	1.6	41

液体Ar純化装置

◆ 純化装置



◆ 試験内容

充填条件ごとの純化性能を比較
(低速充填・直列接続)

→初期純度が悪くても純化できる手法の確立

◆ 純化手法の検証

1. 充填速度の調整

充填配管への流量を低下

→フィルター内での滞在時間を増加

2. フィルターの直列接続

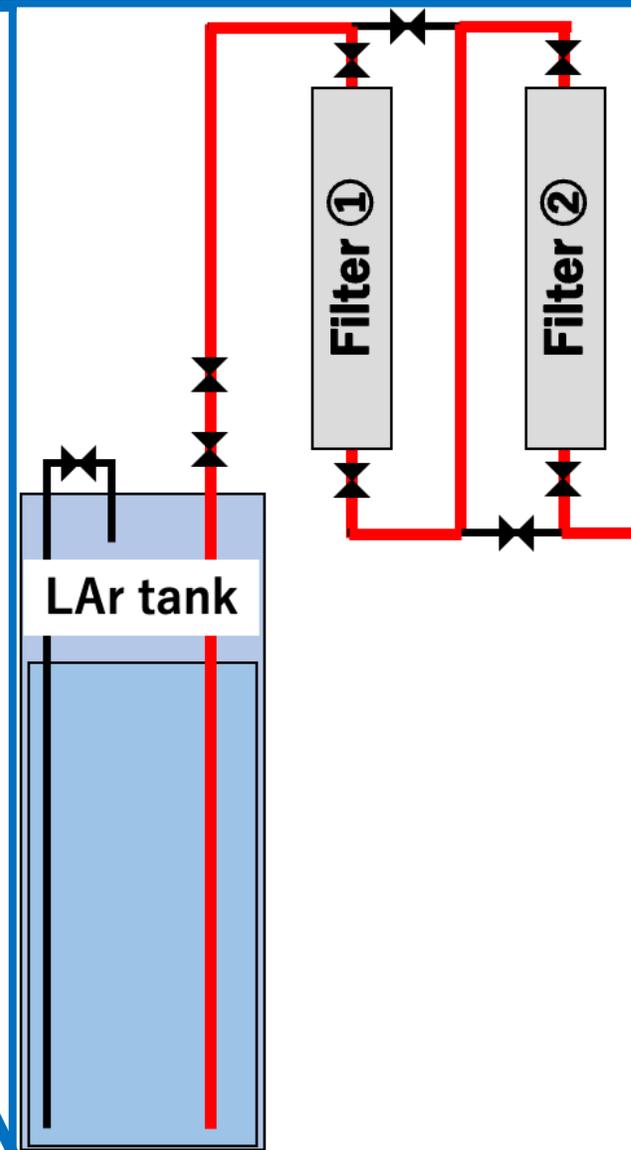
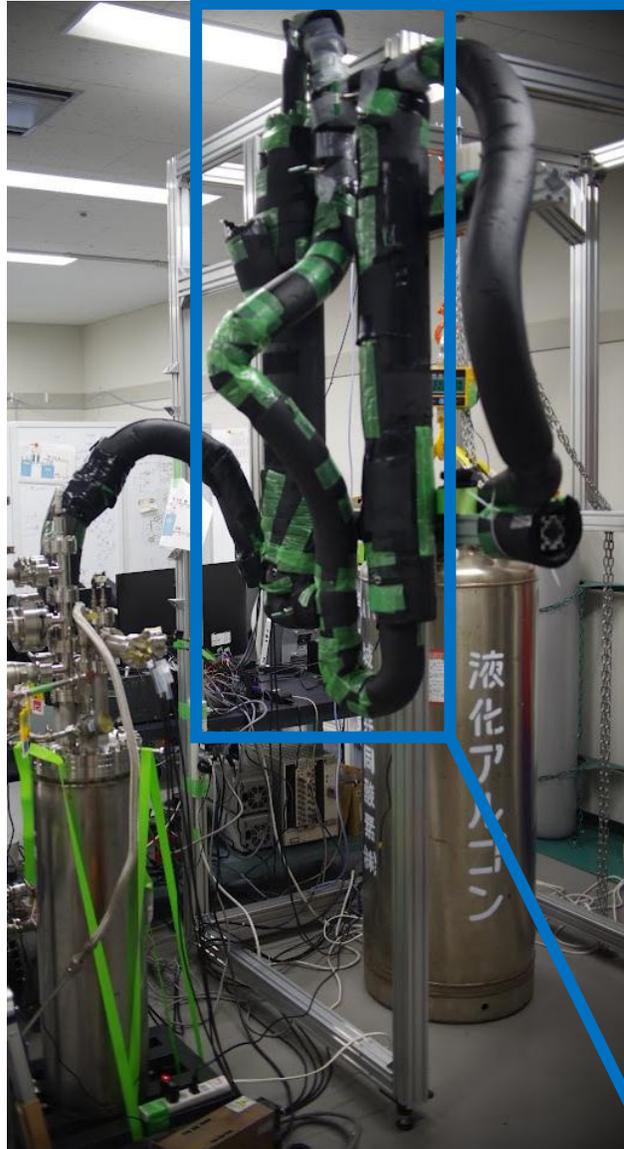
2つのフィルターを用いて純化

→純化経路の延長

sub-ppbの達成を目指す

液体Ar純化装置

◆ 純化装置



液体Ar純度試験

◆ 目的

高純度を達成できるセットアップの構築

→2026年春～秋に実施されるpGRAMSにおいて高純度を達成する

◆ Timeline

