



GRAMS実験気球工学試験 (B23-06号機@JAXA TARF) フライト概要と結果報告

ICEPPシンポジウム

2024 2/18-21

早稲田大学寄田研究室修士1年

内海和伸

GRAMS実験：液体ArTPCを用いた気球実験@南極上空

- 物理目標
 - ・ MeV- γ 線観測
 - ・ 宇宙線反粒子（特に \bar{d} ）観測 → 暗黒物質（DM）間接探索

Target粒子

- ・ DM由来の反粒子

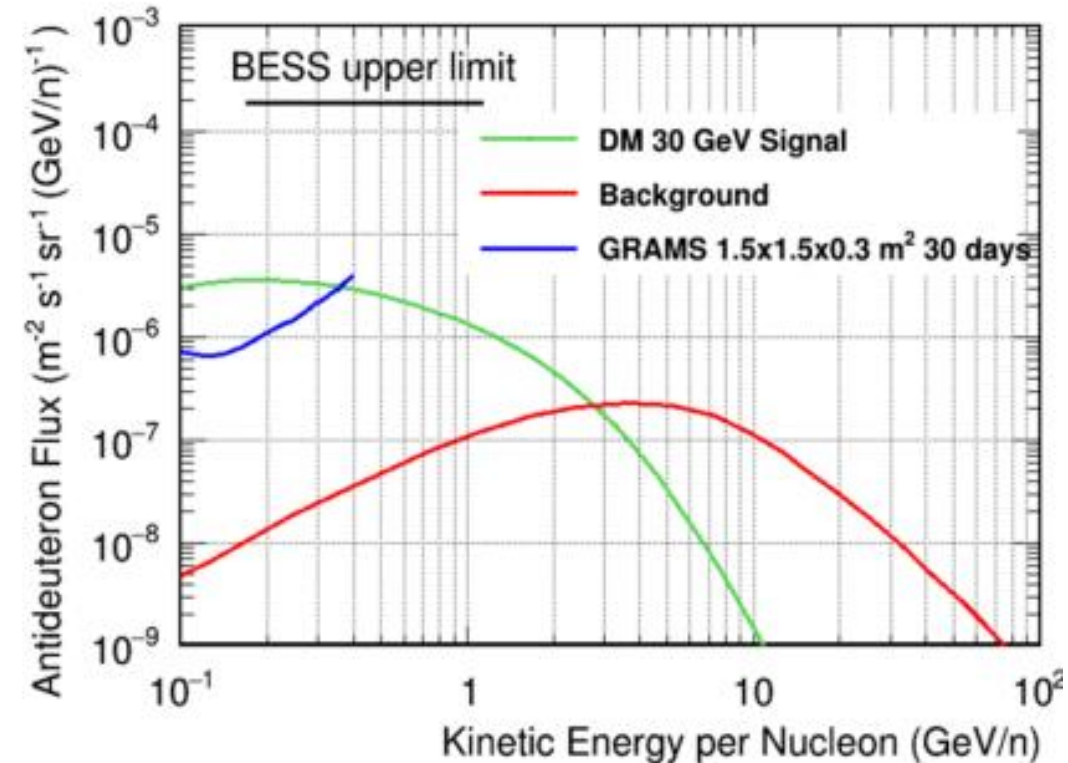
Background粒子

- ・ 一次宇宙線と星間物質との衝突由来の反粒子

⇒ \bar{d} は低エネルギー領域で S/N が 10^3 程度
 ≈バックグラウンドフリーな探索

- 稀事象探索 = 信号感度の確保が大事
 - ・ 地磁気による粒子数の減少対策 → 極付近
 - ・ 大気による粒子数の減少対策 → 高高度

⇒ 南極上空40 kmでの長期間気球実験（いずれは衛星実験）



GRAMS検出器

- LArTPC：3次元飛跡再構成 + dE/dx測定
- 2層のToFプラスチックシンチレータ：入射粒子の β 測定

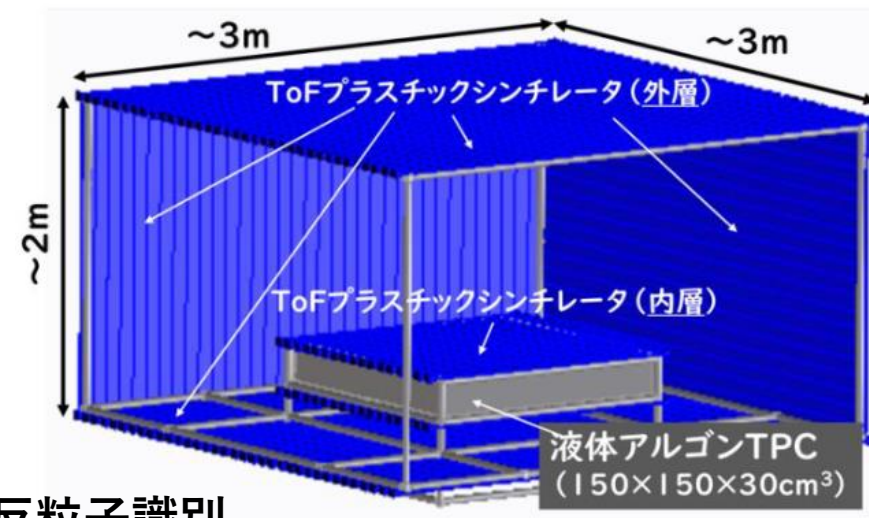
粒子識別

Target：反重陽子 \bar{d} (BG粒子： d, p, \bar{p} etc..)

- 質量識別： $\beta + dE/dx +$ 飛跡長
- 粒子反粒子識別：原子核捕獲事象



磁場を用いない粒子・反粒子識別



GRAMS実験のR&D要素

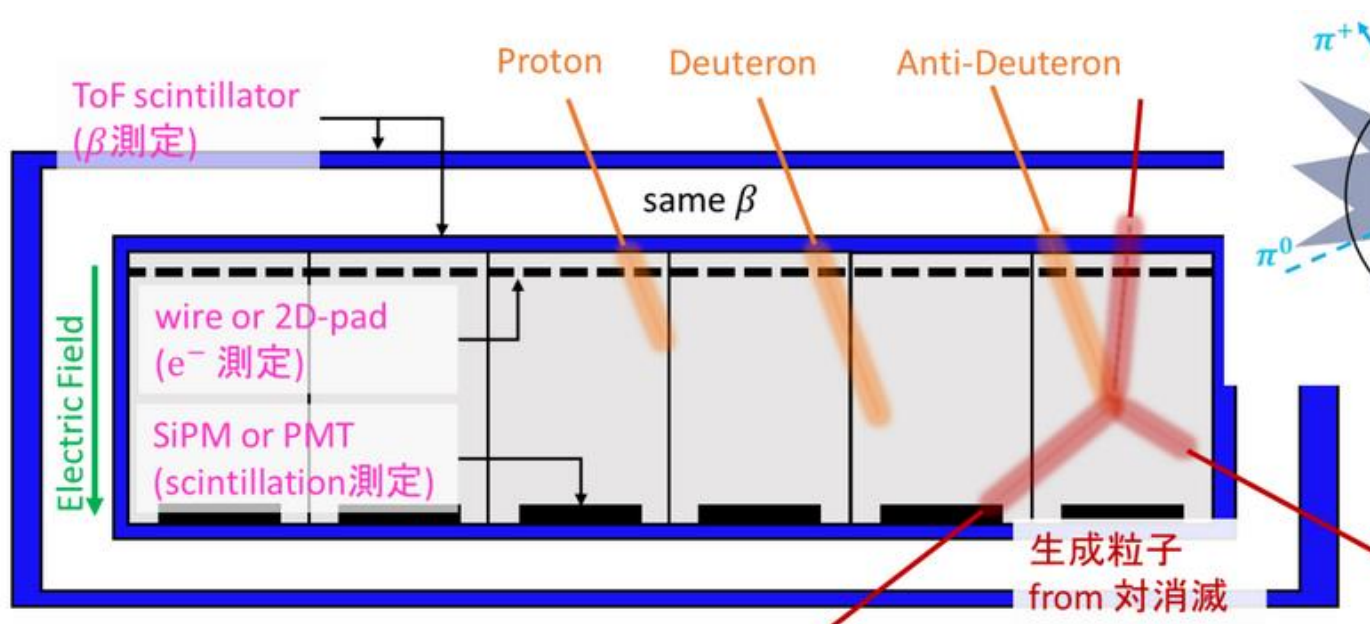
● LArTPCの開発

- 荷電粒子の反応観測
- 反粒子捕獲事象の観測

● LArTPCの上空運用



気球工学試験：B23-06



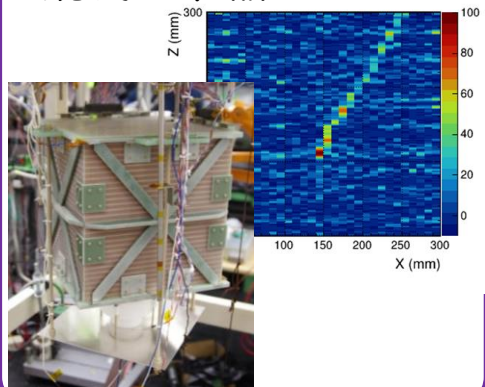
現在の状況：原理実証、技術確立の段階

- ・ Ar中での原子核捕獲事象が未実証
- ・ **LArTPCを飛行体に搭載した事例が世界にない**

1. 原子核捕獲, 粒子識別手法の実験的検証

宇宙線 μ 観測試験

LAr中での停止 μ の
観測@早稲田



Oct. 2022

Cosmic μ Run : done

ビームテスト @J-PARC

LAr-反粒子捕獲事象の検証
→ @ J-PARC K1.8BR
JPARC T98実験として既に承認



Jun. 2023

Phase1 : done

本発表の内容

2. LArTPCの気球運用技術確立

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に実施済



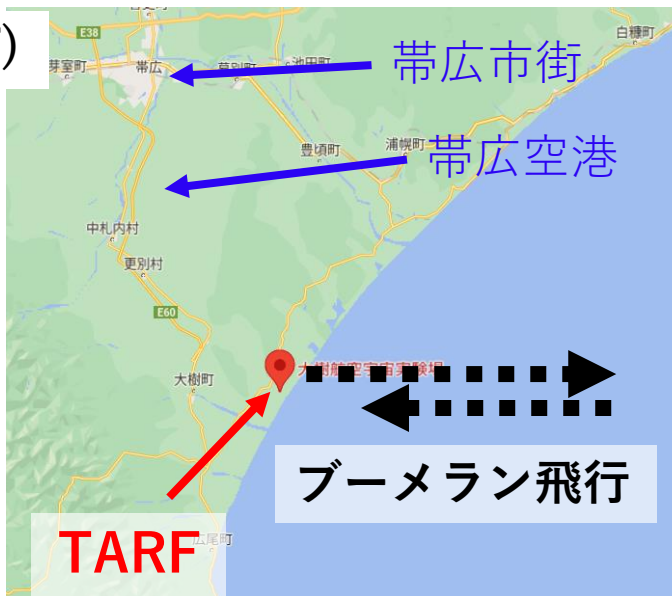
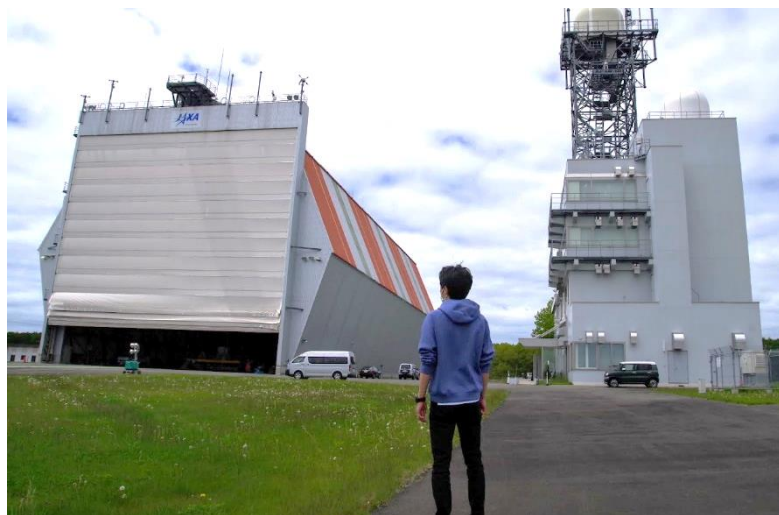
Jul. 2023

B23-06 Flight : done

現在の状況：原理実証、技術確立の段階

- ・ Ar中での原子核捕獲事象が未実証
- ・ **LArTPCを飛行体に搭載した事例が世界にない**

JAXA/ISAS 大樹航空宇宙実験場(TARF)



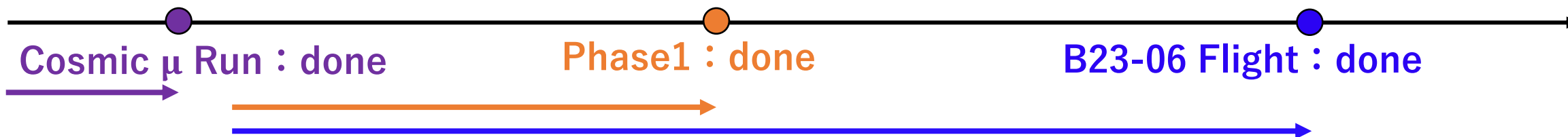
本発表の内容

2. LArTPCの気球運用技術確立

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に実施済



Jul. 2023



現在の状況：原理実証、技術確立の段階

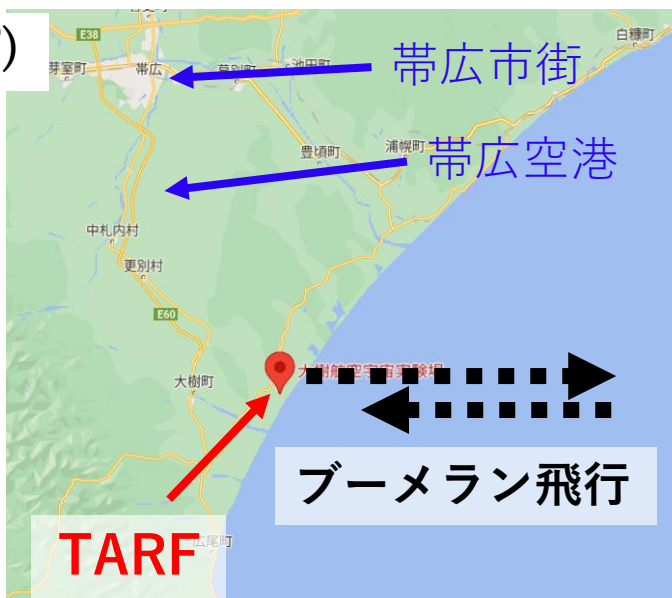
- ・ Ar中での原子核捕獲事象が未実証
- ・ **LArTPCを飛行体に搭載した事例が世界にない**

JAXA/ISAS 大樹航空宇宙実験場(TARF)

- 気球グループがインフラ提供
- 物理実験でも多くの飛行実績

status	#mission
launched	33
postponed: no good wind condition	15
postponed: problem in JAXA apparatus	7
postponed: problem in user apparatus	8
postponed: covid-19	1
total	64

From 2011



本発表の内容

2. LArTPCの気球運用技術確立

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に実施済

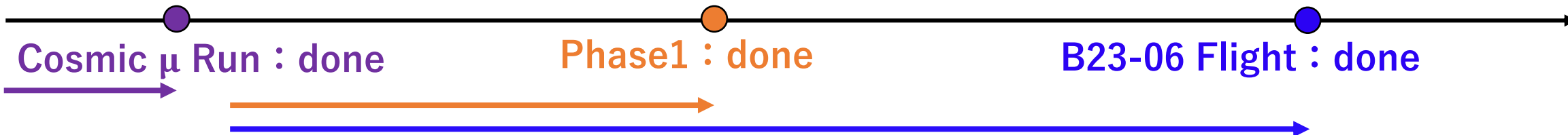


Jul. 2023

Cosmic μ Run : done

Phase1 : done

B23-06 Flight : done



現在の状況：原理実証、技術確立の段階

First Engineering Balloon Flight Experiment Using a Liquid Argon Time Projection Chamber



ICEPP Symposium
Feb. 19 2023

Waseda Univ. Yorita Lab
1st Year Masters
Riki Nakajima

本発表の内容

2. LArTPCの気球運用技術確立

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に実施済



Jul. 2023

Cosmic μ Run : done

Phase1 : done

B23-06 Flight : done

From 011

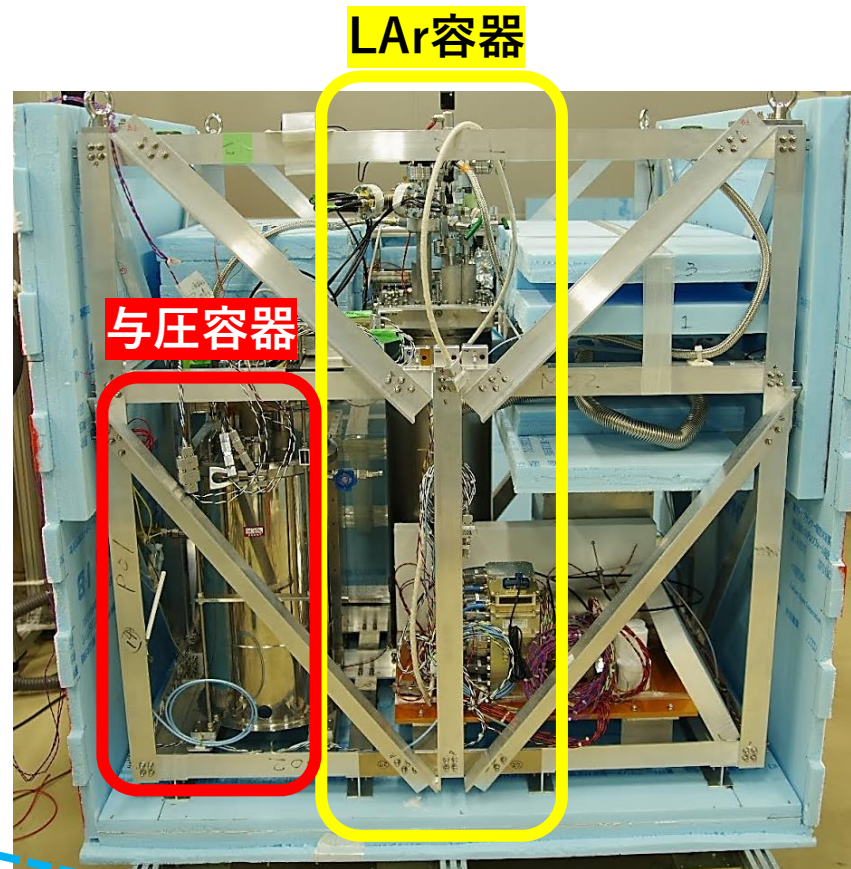
JAXA TARFにおけるB23-06実験概要

B23-06実験目的：気球環境でのLArTPC運用実証

- 放球から回収まで**LArを維持**：容器内圧、温度の維持
- 実験装置の**安全回収**：LArの上空排出
- 上昇中（+Level Flight中）の**LArTPC信号取得**

B23-06号機ゴンドラ

構成部品	重量 [kg]
気球	152.10
冗長系	3.00
荷姿	46.00
与圧容器	31.00
液体Ar容器	71.00
ゴンドラ全体	442.80
総重量	643.20



約140 cm



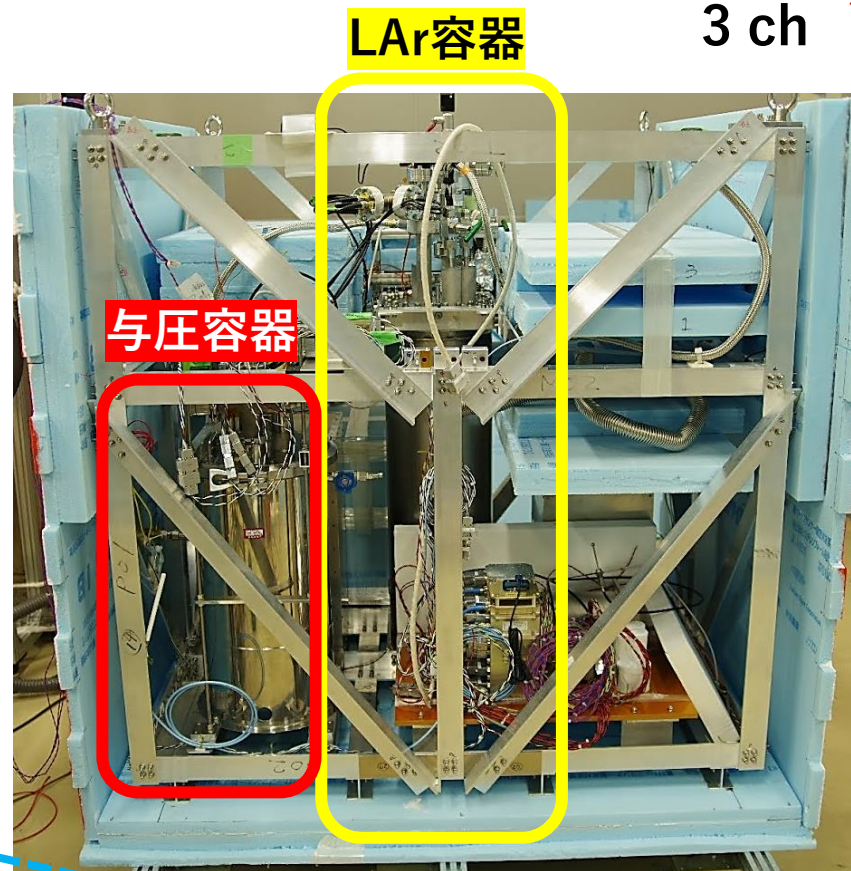
JAXA TARFにおけるB23-06実験概要

B23-06実験目的：気球環境でのLArTPC運用実証

- 放球から回収まで**LArを維持**：容器内圧、温度の維持
- 実験装置の**安全回収**：LArの上空排出
- 上昇中（+Level Flight中）の**LArTPC信号取得**

B23-06号機ゴンドラ

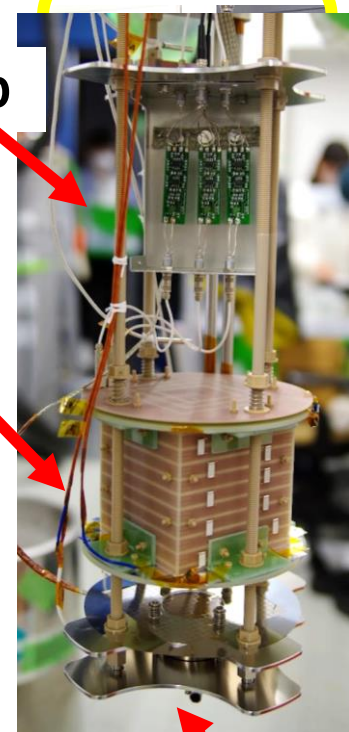
構成部品	重量 [kg]
気球	152.10
冗長系	3.00
荷姿	46.00
与圧容器	31.00
液体Ar容器	71.00
ゴンドラ全体	442.80
総重量	643.20



約140 cm

Amp

10 cm角
LArTPC
3 ch



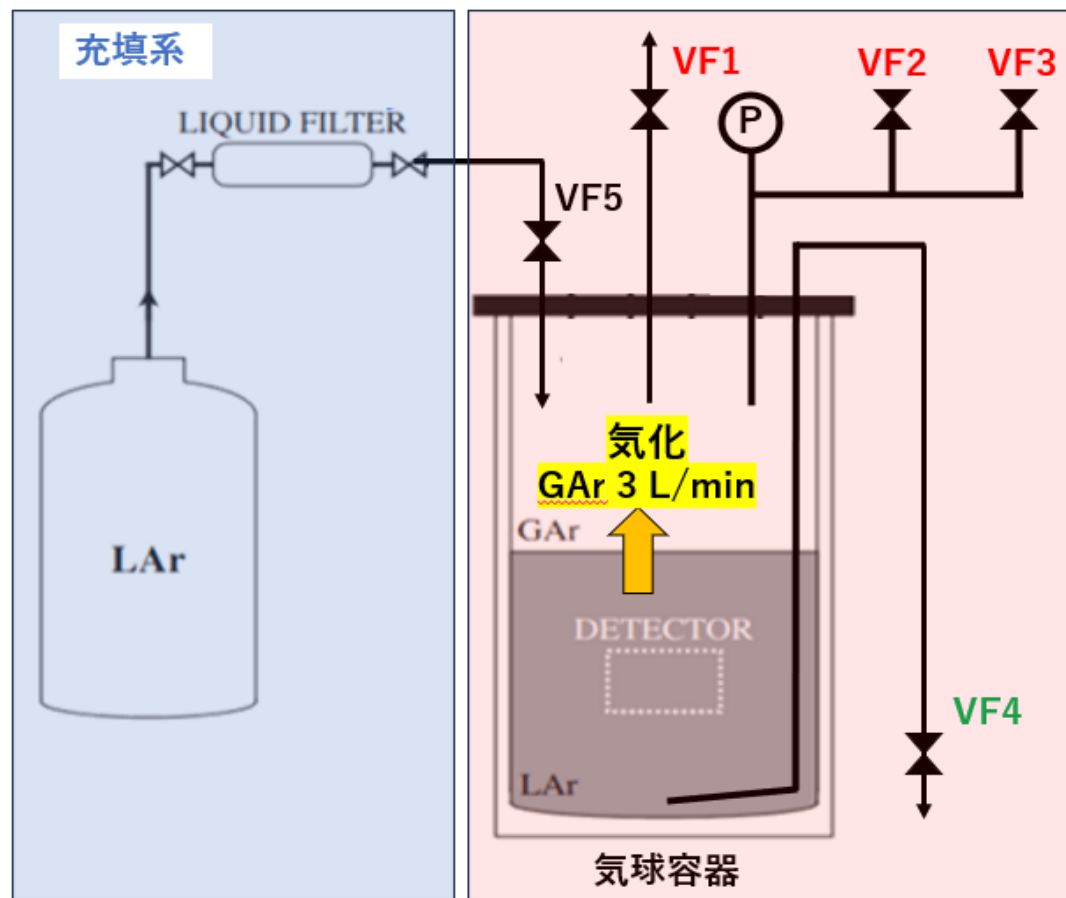
PMT
1 ch



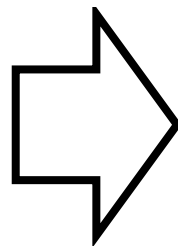
Arの性質

液相：3 Kの範囲内！

項目	値
凝固点 (1 atm)	-189.15 °C
沸点 (1 atm)	-185.65 °C



通常運用



VF1：絶対圧弁

- 内部に真空槽あり
- 内圧：1.2 atm
- 流量：~20 L/min

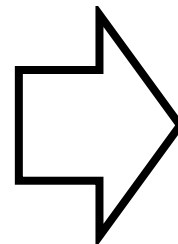


VF4：電磁弁

- 超低温用
- 24V通電時開



安全装置



VF2：差圧弁

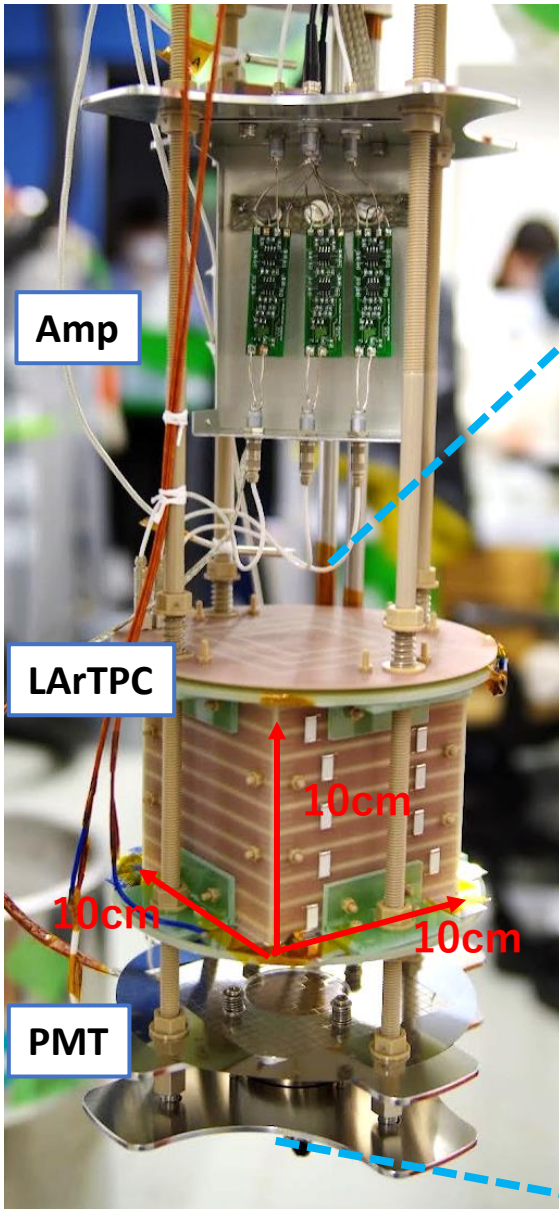
- 内圧：+1.5 atm
- 流量：600 L/min



VF3：破裂弁

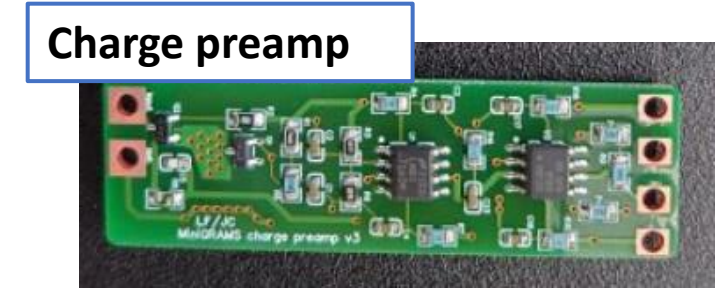
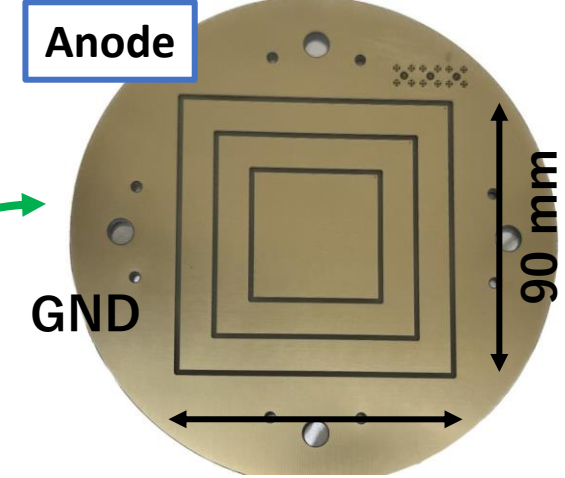
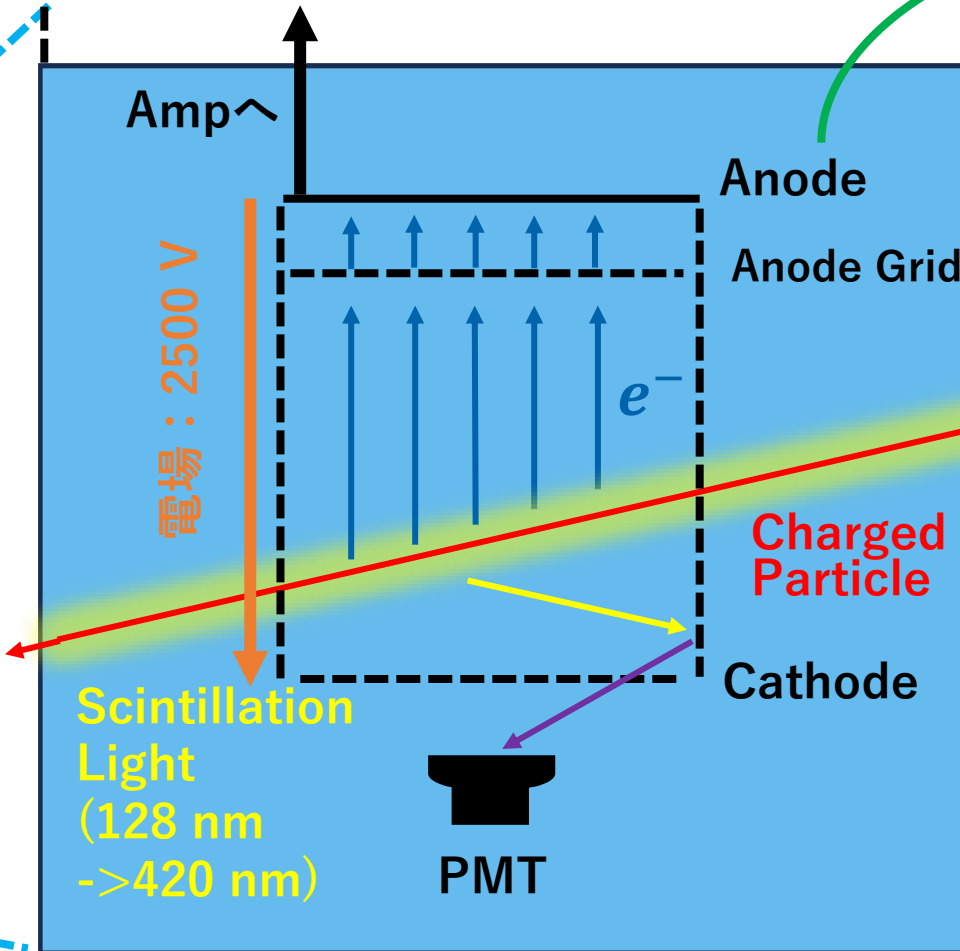
- 内圧：+2.0 atm
- 不可逆





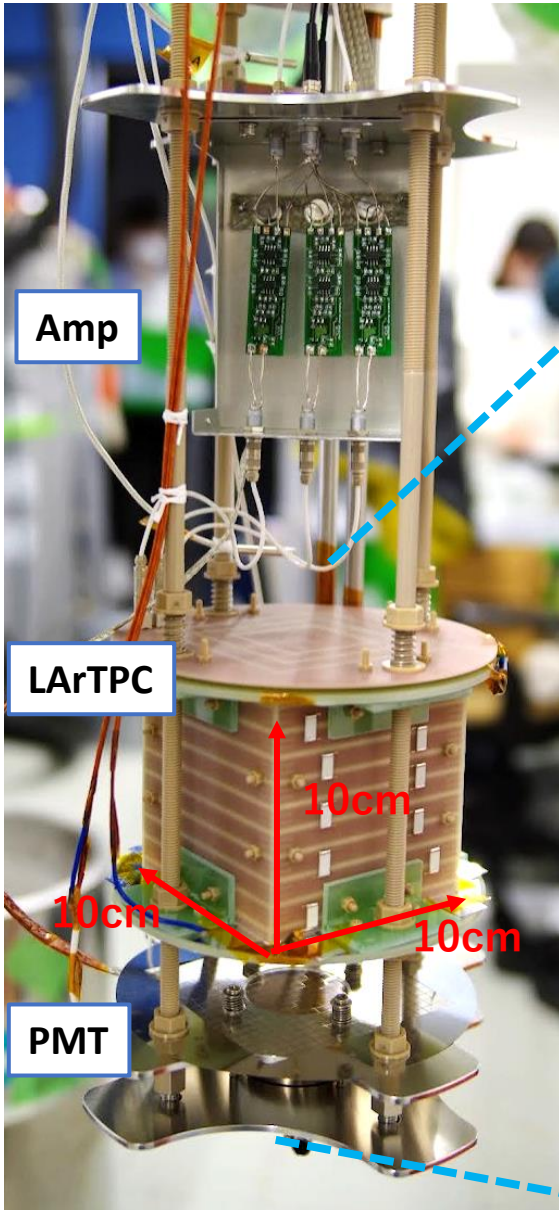
10 cm角LArTPC

- 光信号 (1 ch) : PMT
- 電離電子信号 (3 ch) : LArTPC



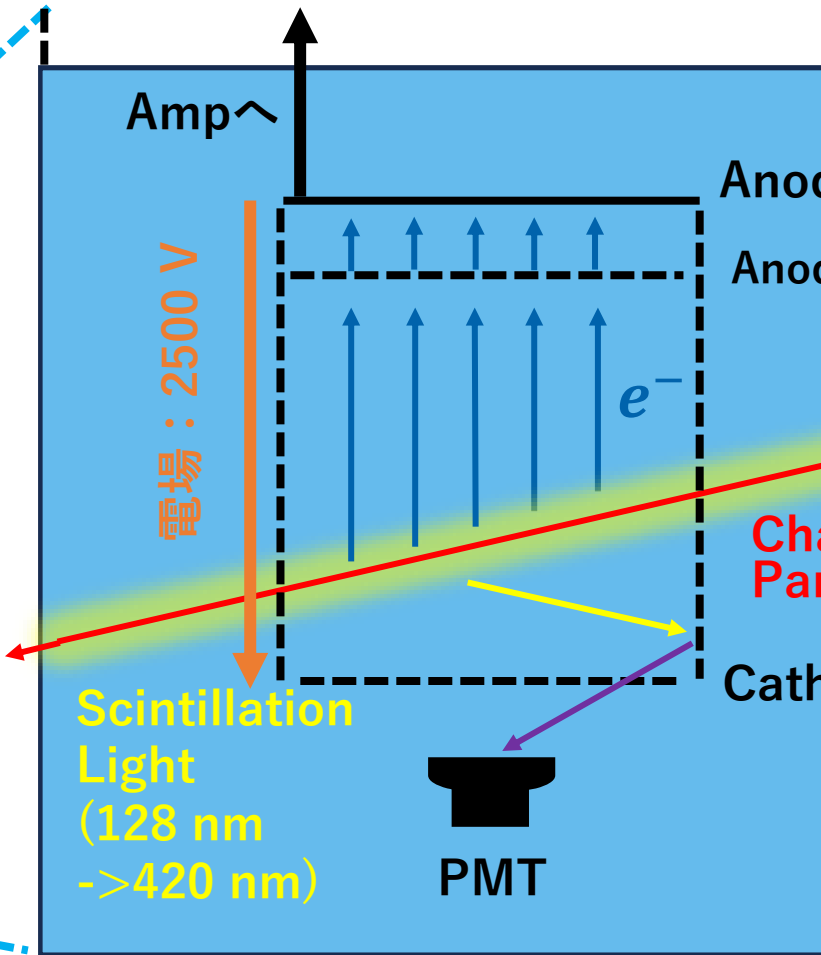
約50 mm

- Gain : 2 V/pC
- 時定数 $\tau = 500\mu\text{s}$
- LAr温度での運用可能

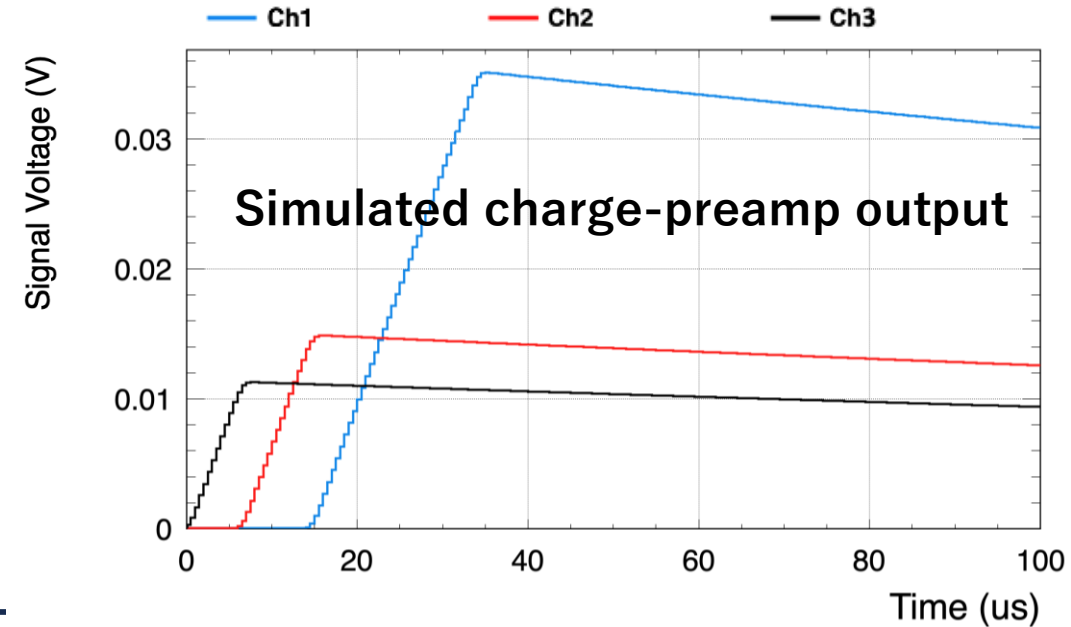
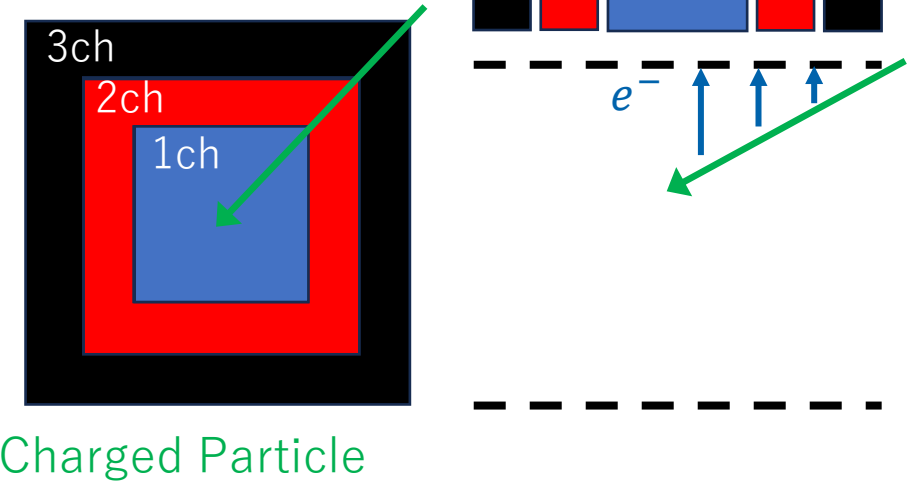


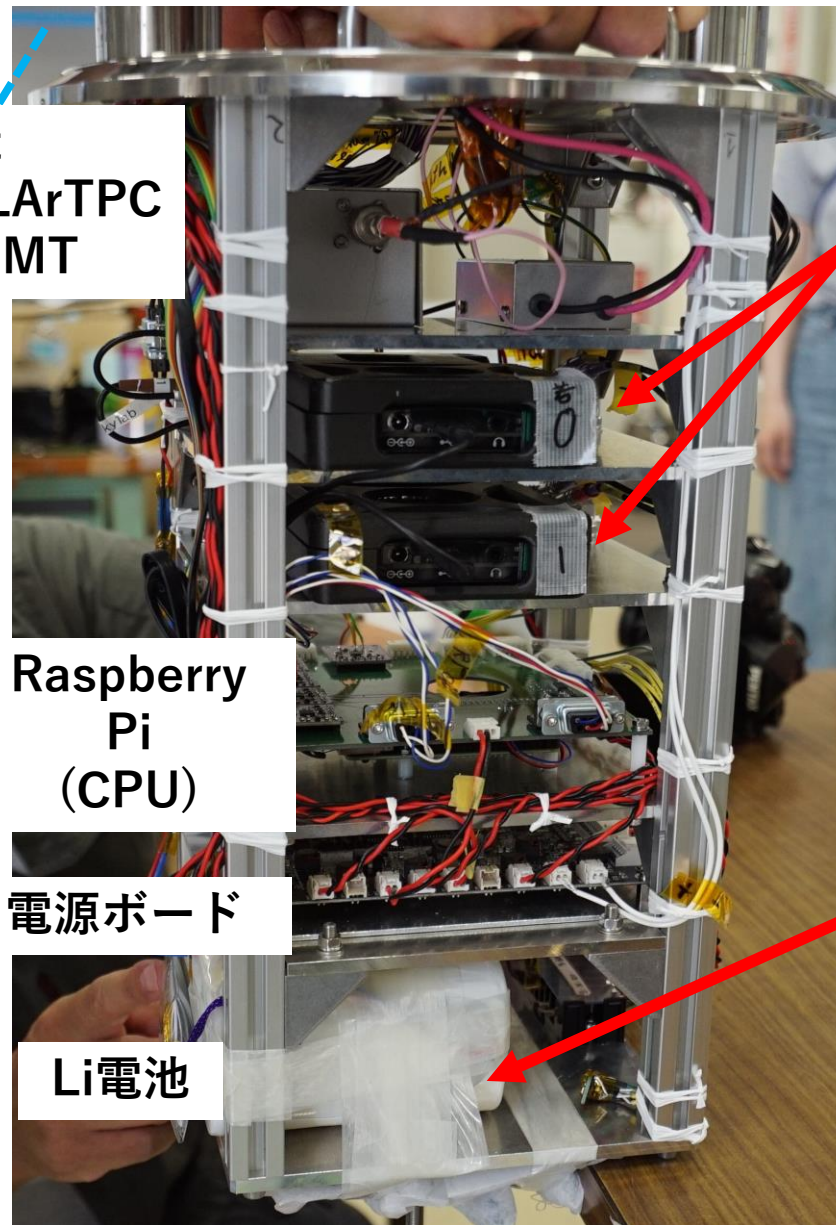
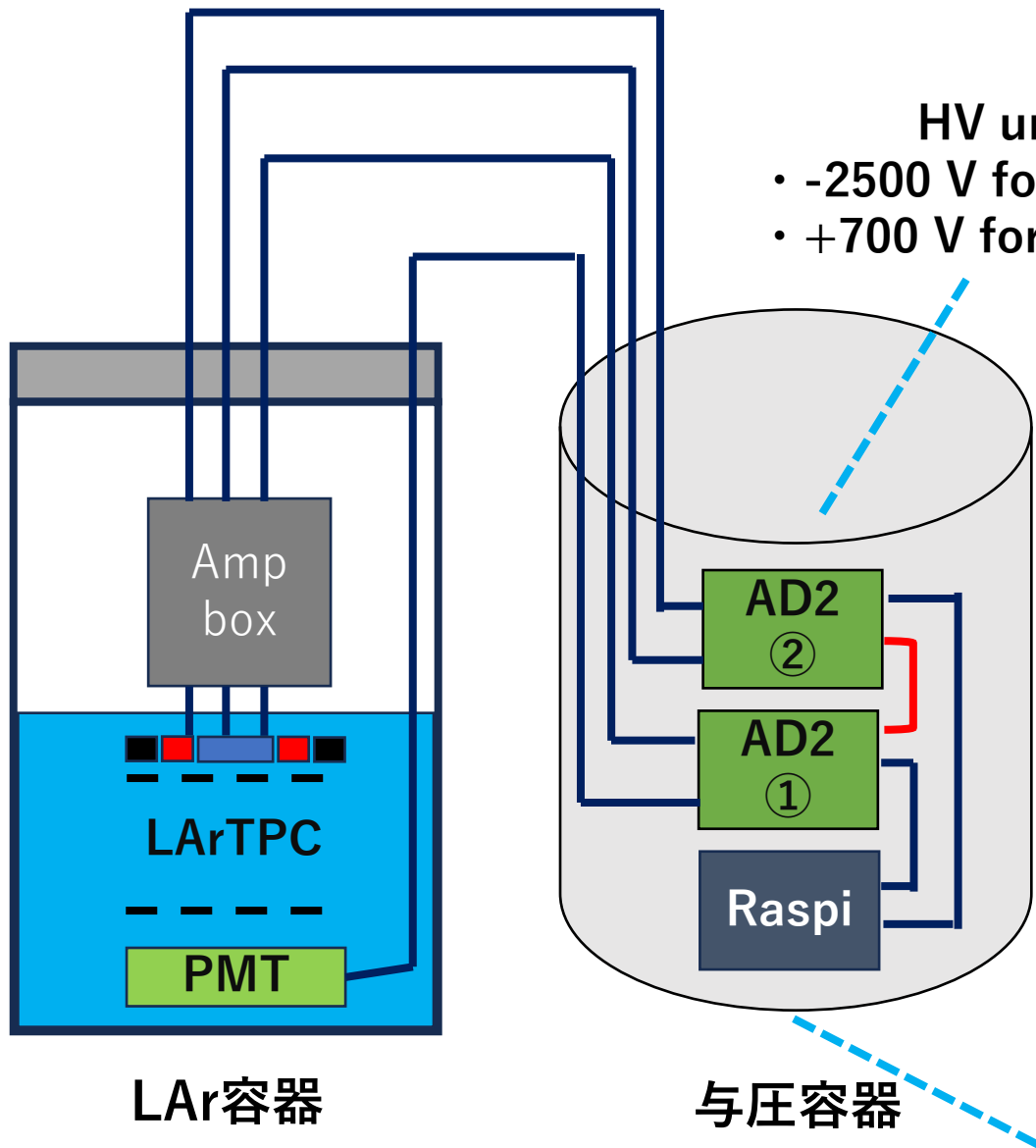
10 cm角LArTPC

- 光信号 (1 ch) : PMT
- 電離電子信号 (3 ch) : LArTPC



Stopped Event





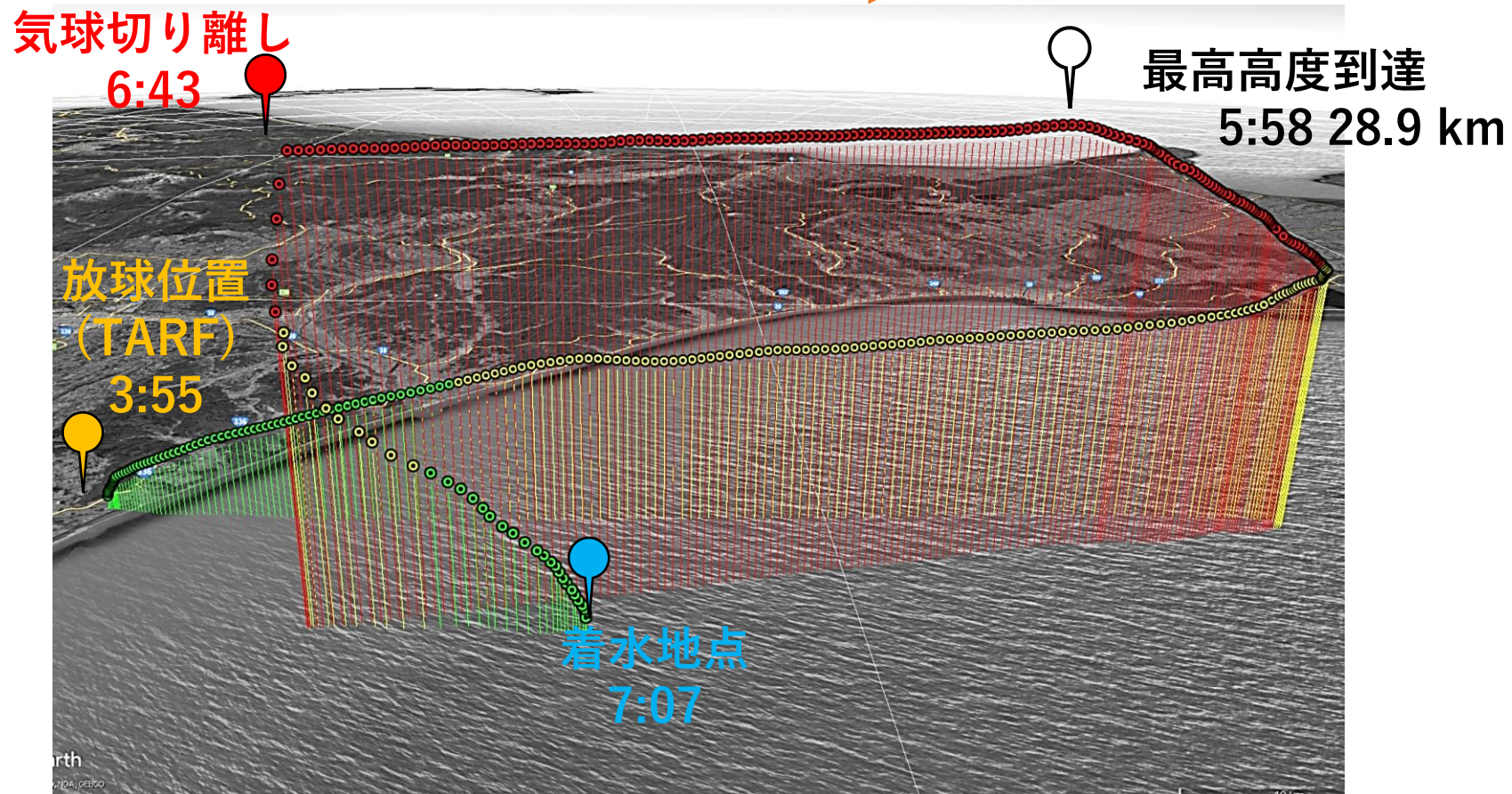
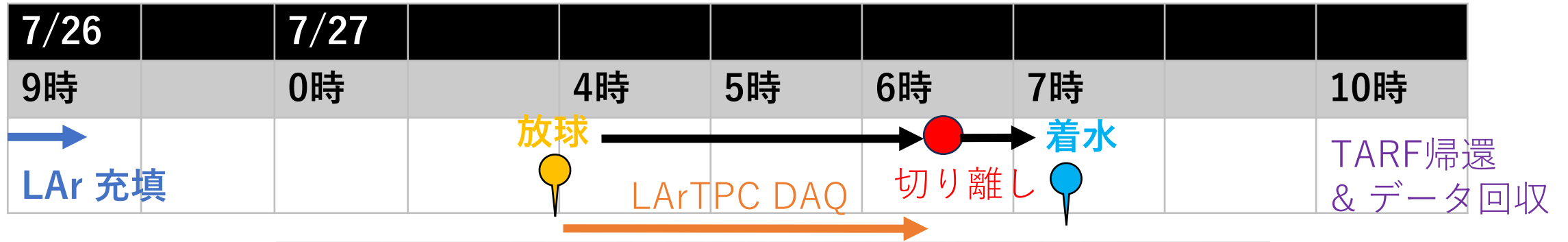
Analog Discovery 2

- 2 ch USBオシロ
- 50 MHz Sampling
- Timewindow -> 160 μ sec
- Max DAQ rate -> 60 Hz

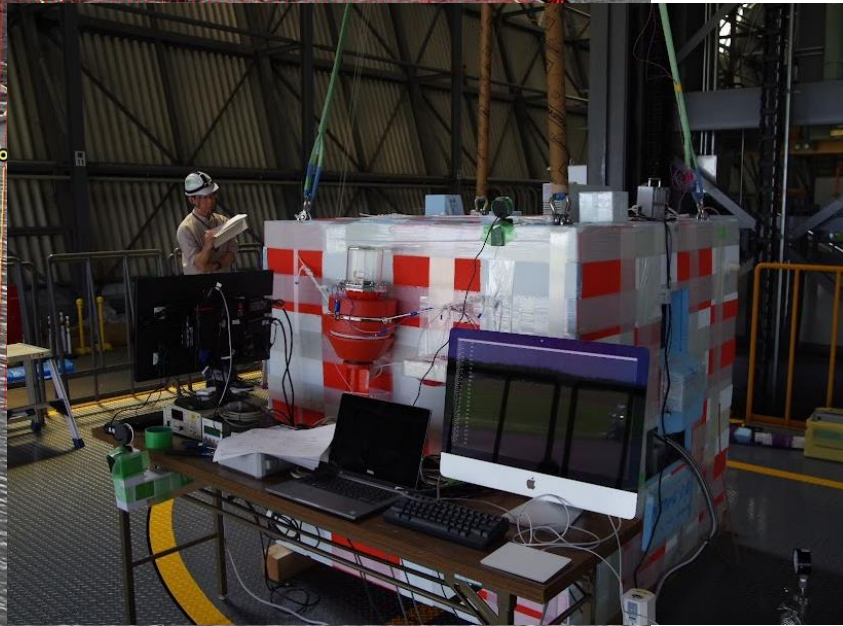
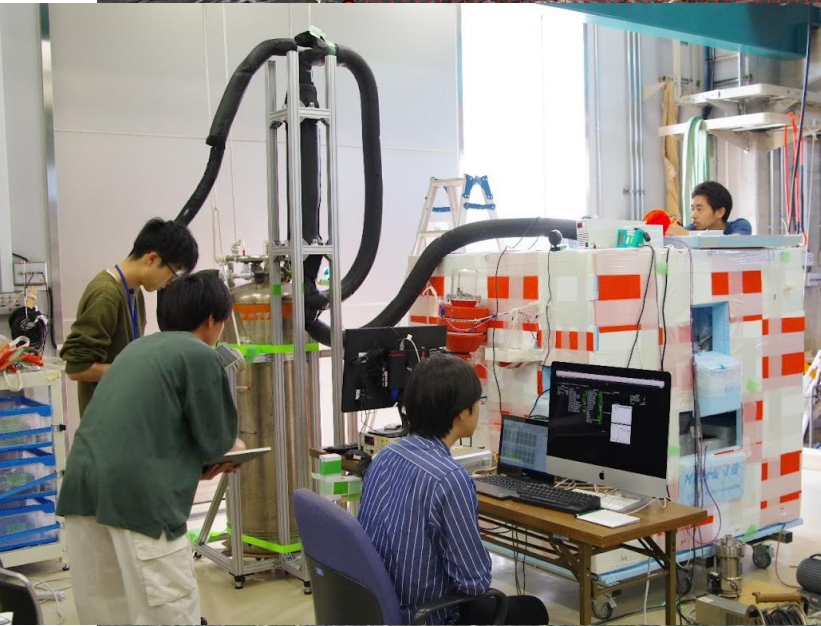
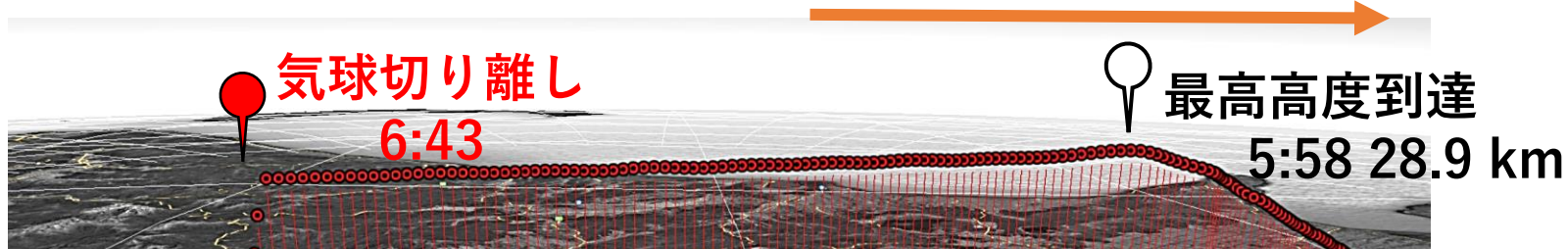
Electrochem社 3B0076

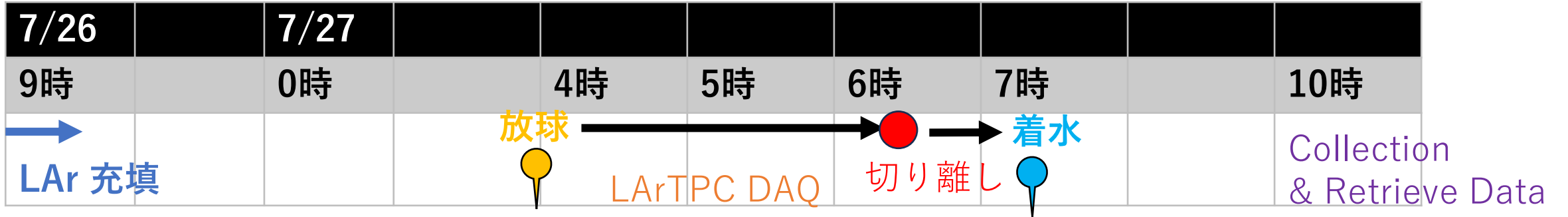
- 30 Ah
- 3.9 V@25 °C





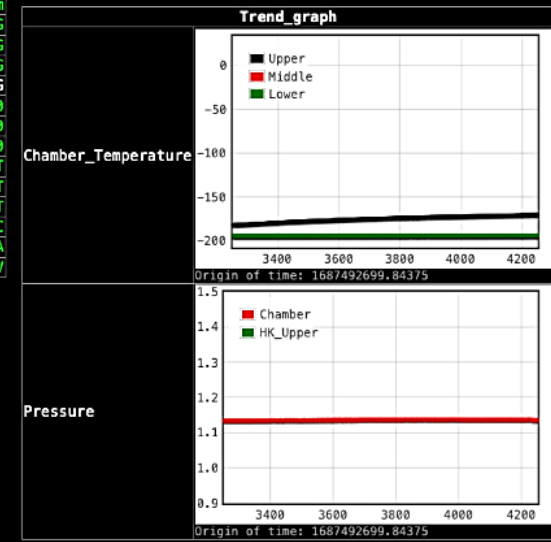
7/26	7/27							
9時	0時		4時	5時	6時	7時		10時
→ LAr 充填			放球	LArTPC DAQ	切り離し	着水		Collection & Retrieve Data

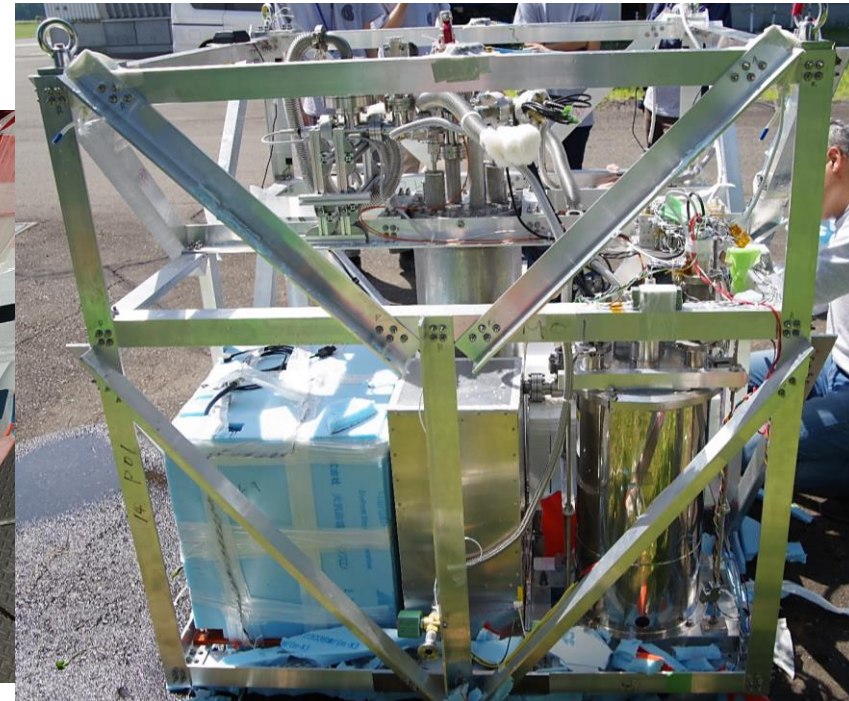
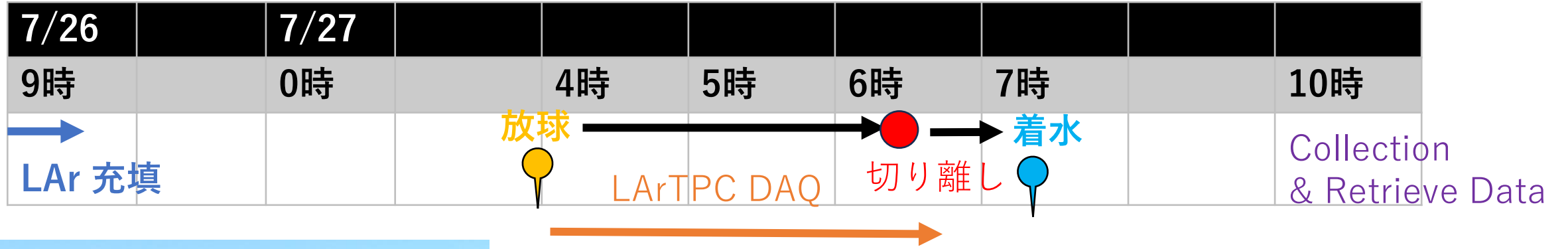




Fri, 23 Jun 2023 05:09:50 GMT | TI: 107999804907 | Time: 1687496951.671875

Header		Detector		DAQ_Vessel		Command_Name	
Start_Code	0xEB905B6A	Event_Count	2117	CPU_Temperature	57.9 °C	Last_Command	Get_Waveform
Telemetry_Type	1	Event_Rate	1.962	HK_Temperature_Upper	26.300 °C	Software	
Time	1687496951	Current_EventID	2896	HK_Temperature_Middle	27.400 °C	Last_Command_Index	49
Time_us	685031	Chamber_Pressure	1.135 atm	HK_Temperature_Lower	25.800 °C	Last_Command_Code	210
Telemetry_Index	4248	Chamber_Temperature_Upper	-170.134 °C	HK_Humidity_Upper	4.200 %	Command_Reject_Count	0
Run_ID	172	Chamber_Temperature_Middle	-194.288 °C	HK_Humidity_Middle	3.300 %	Software_Error_Code	0
		Chamber_Temperature_Lower	-193.717 °C	HK_Humidity_Lower	4.100 %	CRC	59788
		Valve_Temperature	-27.529 °C	HK_Pressure_Upper	1.21 atm	Stop_Code	0xC5A4D279
		Outer_Temperature	2.067 °C	HK_Pressure_Middle	1.21 atm		
		TPC_Control_Voltage_Setting	1.250 V	HK_Pressure_Lower	1.21 atm		
		TPC_High_Voltage_Setting	2.500 kV	Acceleration_x	-0.020 G		
		TPC_High_Voltage_Measurement_ADC	512	Acceleration_y	0.000 G		
		TPC_High_Voltage_Measurement	2.513 kV	Acceleration_z	0.990 G		
		TPC_Current_Measurement_ADC	77	Acceleration	0.990 G		
		TPC_Current_Measurement	4.724 uA	Gyro_x	-0.010		
		PMT_Control_Voltage_Setting	2.800 V	Gyro_y	0.000		
		PMT_High_Voltage_Setting	700 V	Gyro_z	0.000		
				Magnet_x	0.830 uT		
				Magnet_y	0.210 uT		
				Magnet_z	-0.500 uT		
				Accel_Sensor_Temperature	36.200 °C		
				Main_Current	0.506 A		
				Main_Voltage	23.912 V		





7/26	7/27							
9時	0時		1時	5時	6時	7時		10時

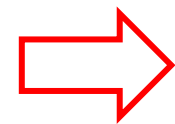
→
LAr 充填



on
ve Data

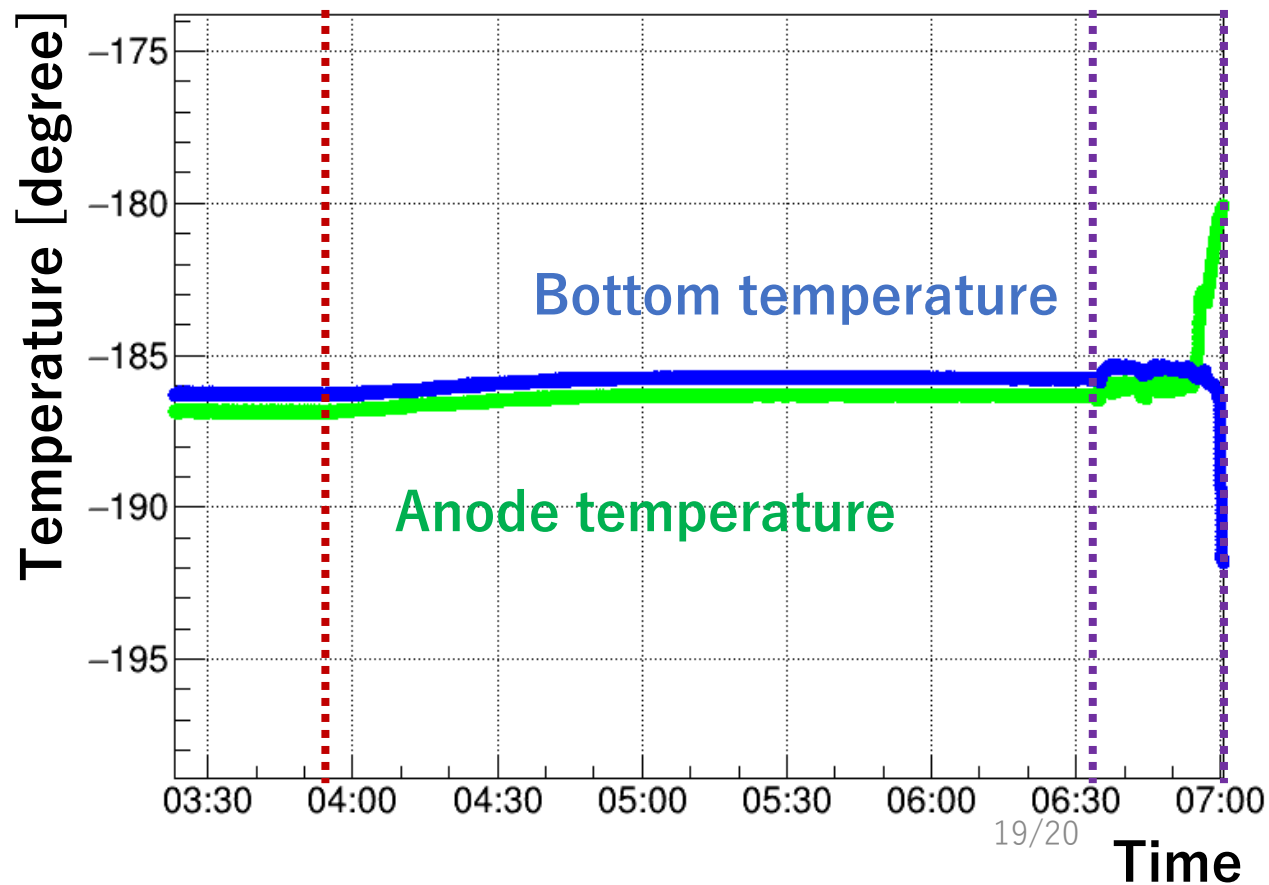
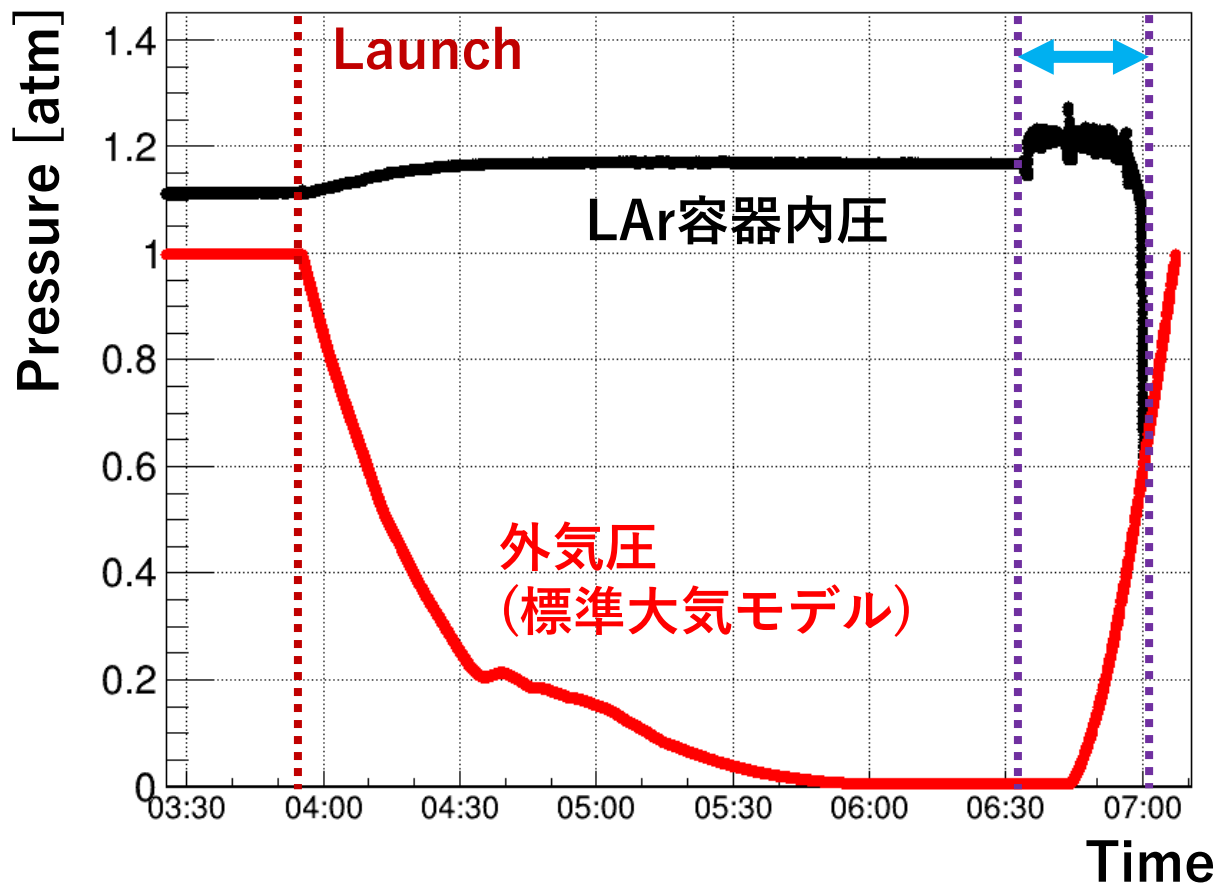
B23-06実験目的：気球環境でのLArTPC運用実証

- 放球から回収までLArを維持：内圧・温度維持
- 実験装置の安全回収：上空でのLAr排出
- 上昇中 + Level Flight中のLArTPC信号取得



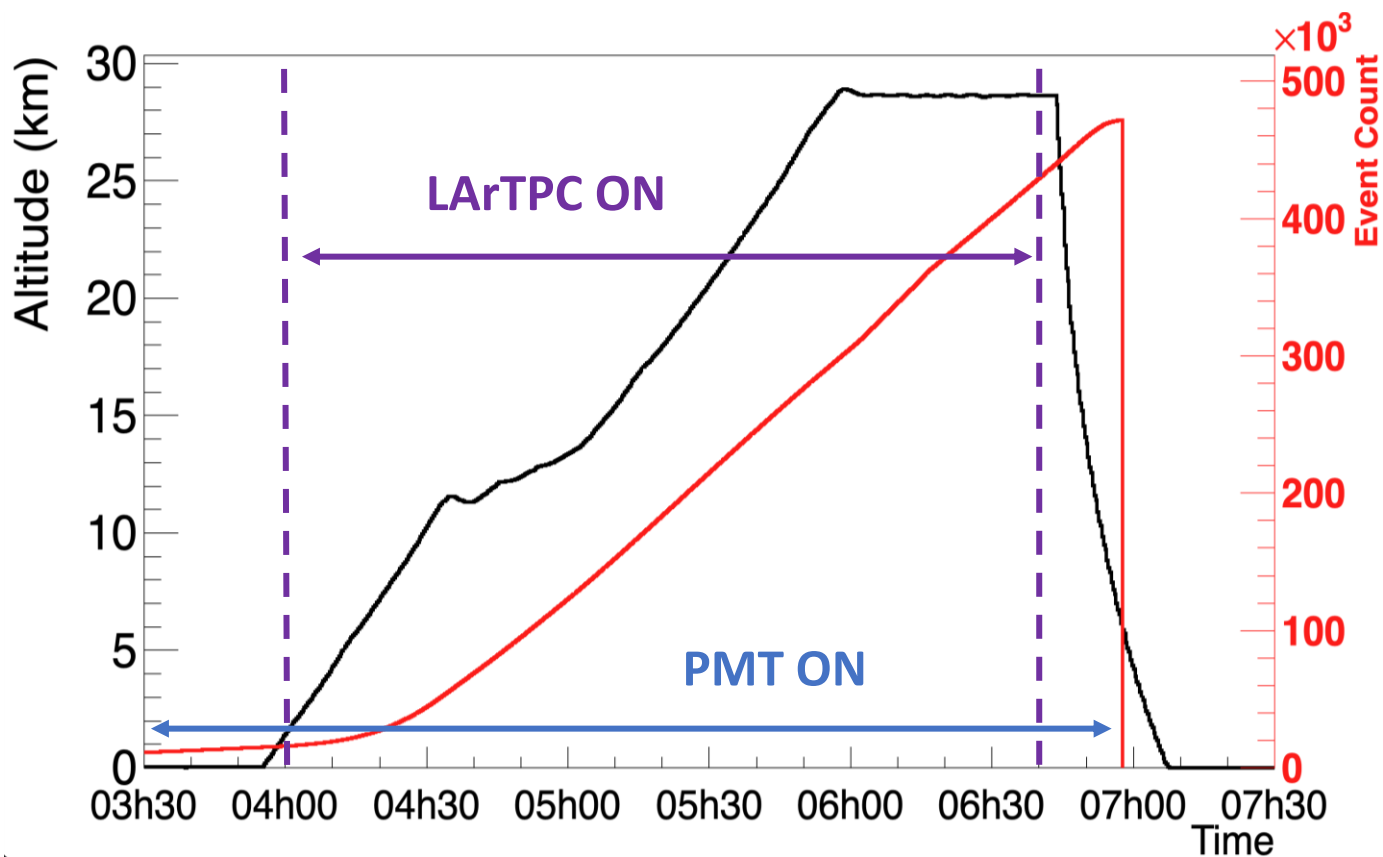
All Completed !!

Discharge



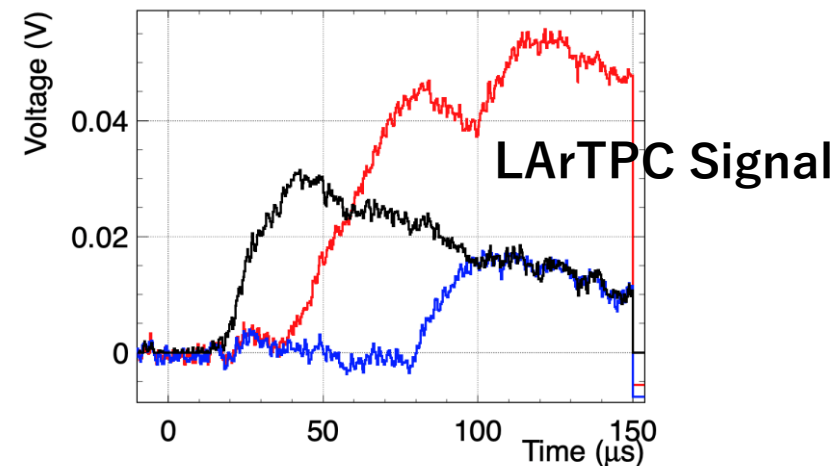
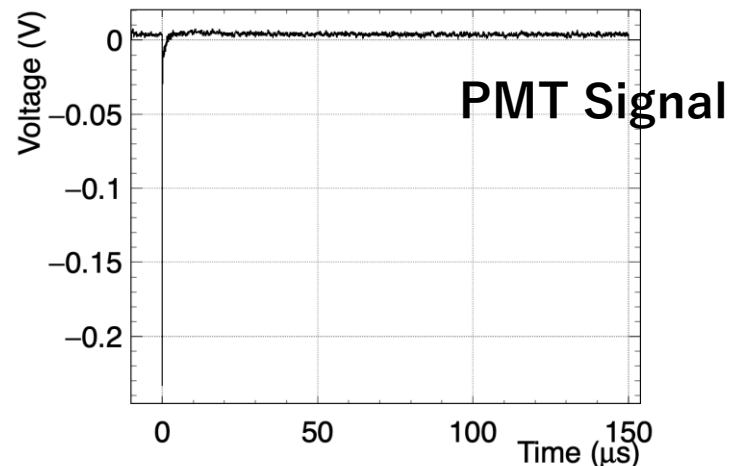
Flight Data

- PMT 1ch : Trigger
- LArTPC 3 ch
- フライト中のEvent数 : ~400 k



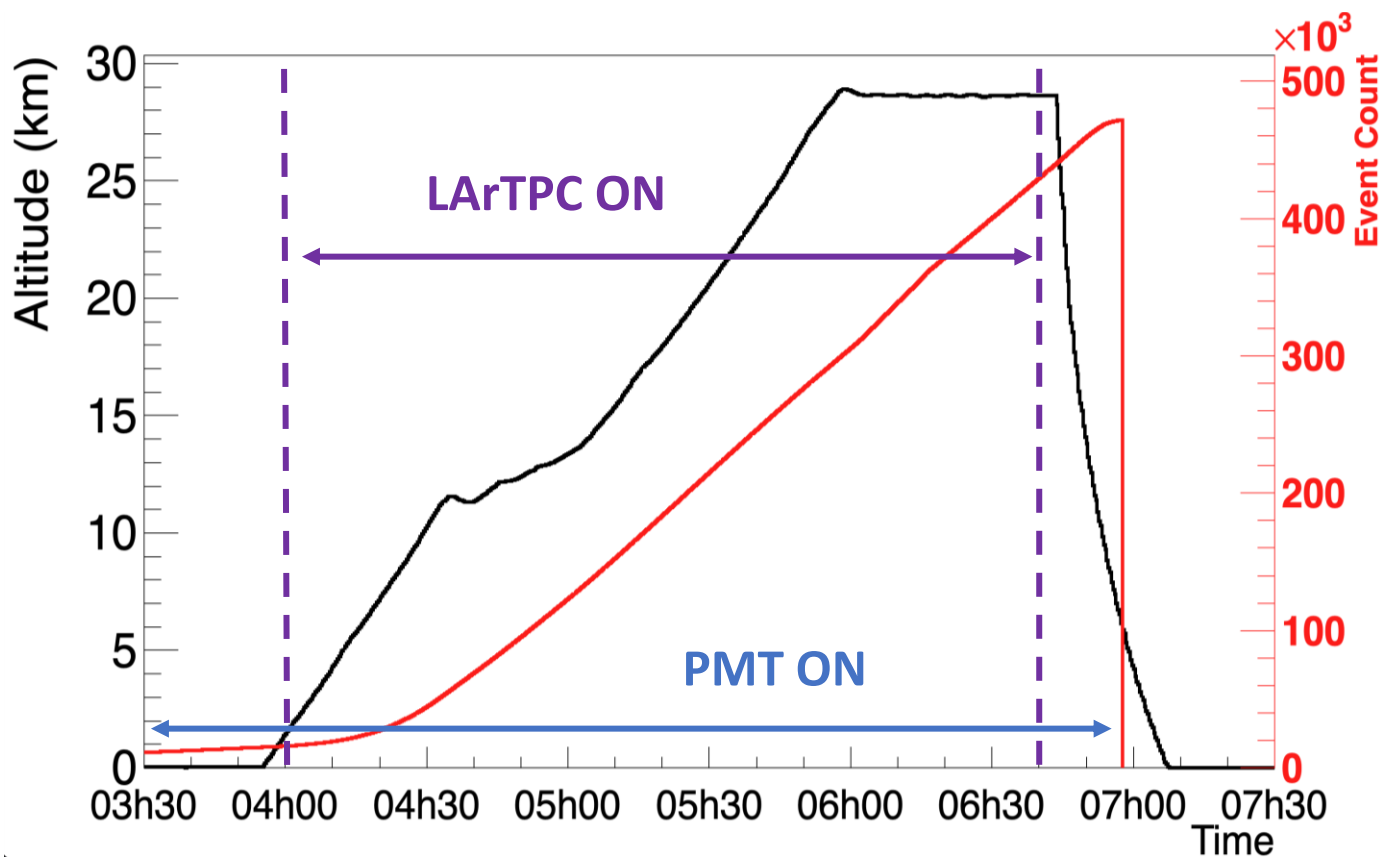
Flight event example

- 高度~5 kmで取得された荷電粒子event
- 飛跡 : Ch3 -> Ch2 -> Ch1 -> Ch2



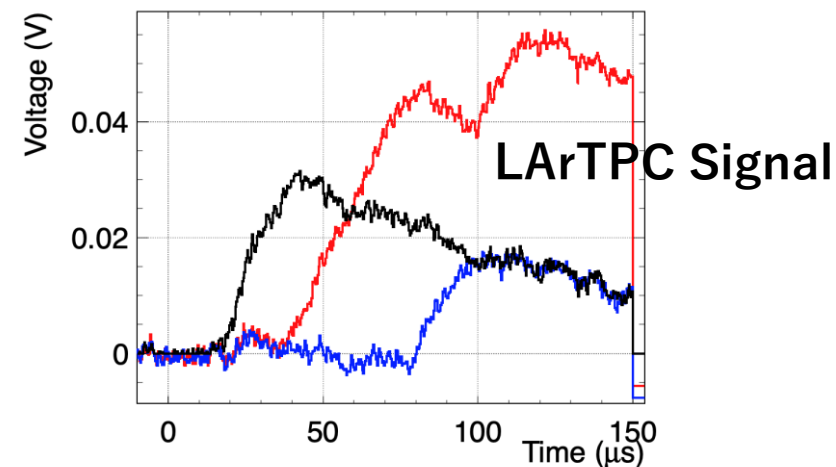
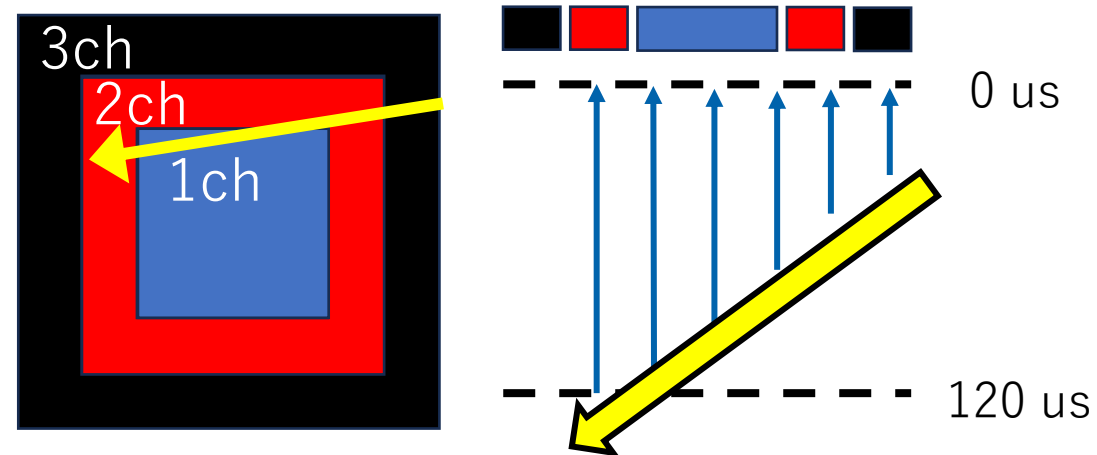
Flight Data

- PMT 1ch : Trigger
- LArTPC 3 ch
- フライト中のEvent数 : ~400 k



Flight event example

- 高度~5 kmで取得された荷電粒子event
- 飛跡 : Ch3 -> Ch2 -> Ch1 -> Ch2

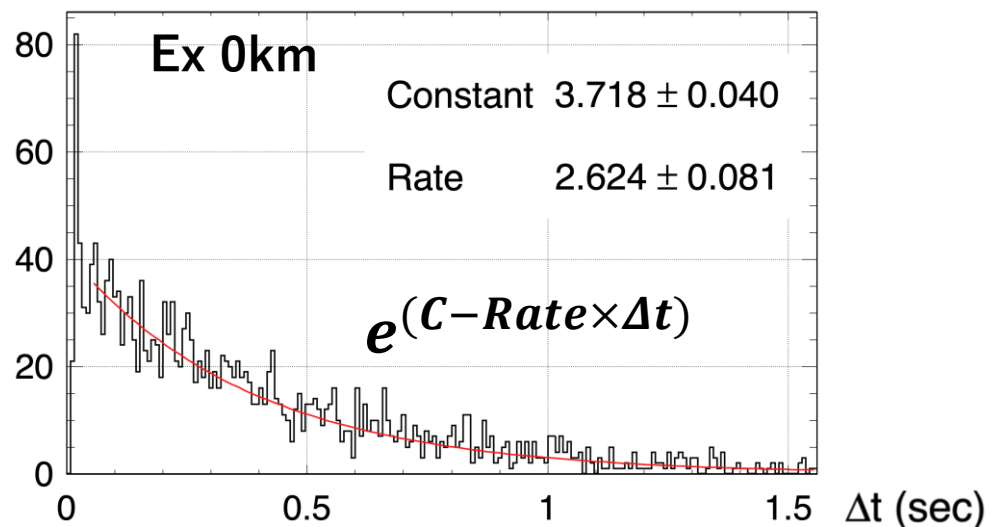


B23-06実験目的：気球環境でのLArTPC運用実証

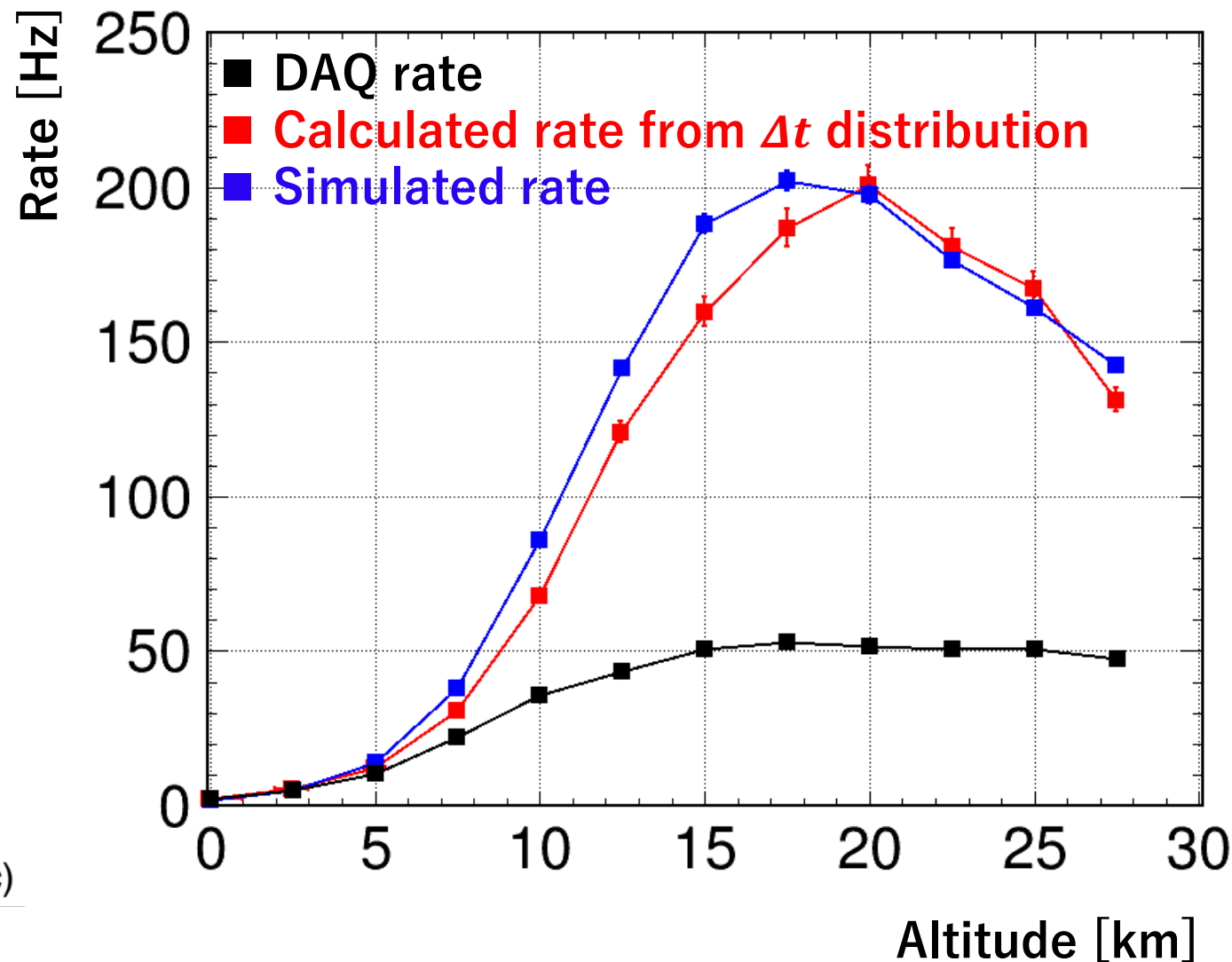
- 上昇中 + Level Flight中のLArTPC信号取得
 - 高度変化によるSignal rateの変化をみる
 - 実観測rate：60 Hzに制限 from DAQ system
 - 実測DAQ rateでは不十分

Cosmic Signal rateの算出

- 取得したEvent毎の時間差 Δt @特定の高度



- GEANT4+EXPACSによるSimulation

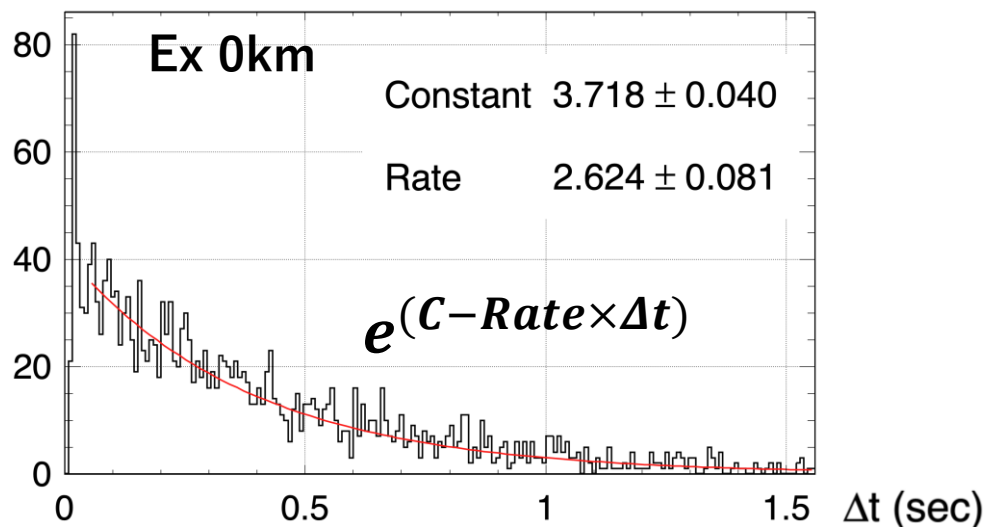


B23-06実験目的：気球環境でのLArTPC運用実証

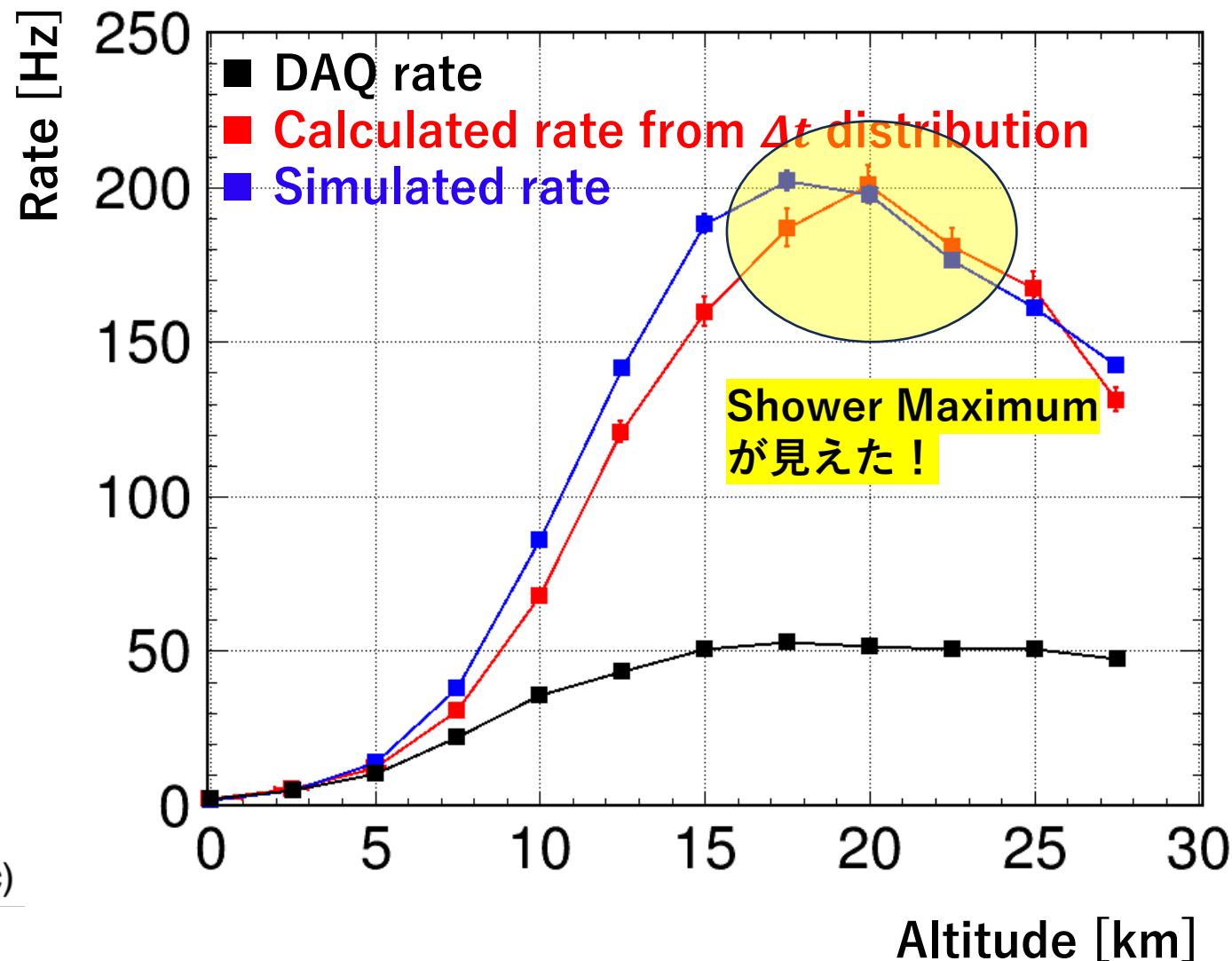
- 上昇中 + Level Flight中のLArTPC信号取得
 - 高度変化によるSignal rateの変化をみる
 - 実観測rate：60 Hzに制限 from DAQ system
 - 実測DAQ rateでは不十分

Cosmic Signal rateの算出

- 取得したEvent毎の時間差 Δt @特定の高度



- GEANT4+EXPACSによるSimulation

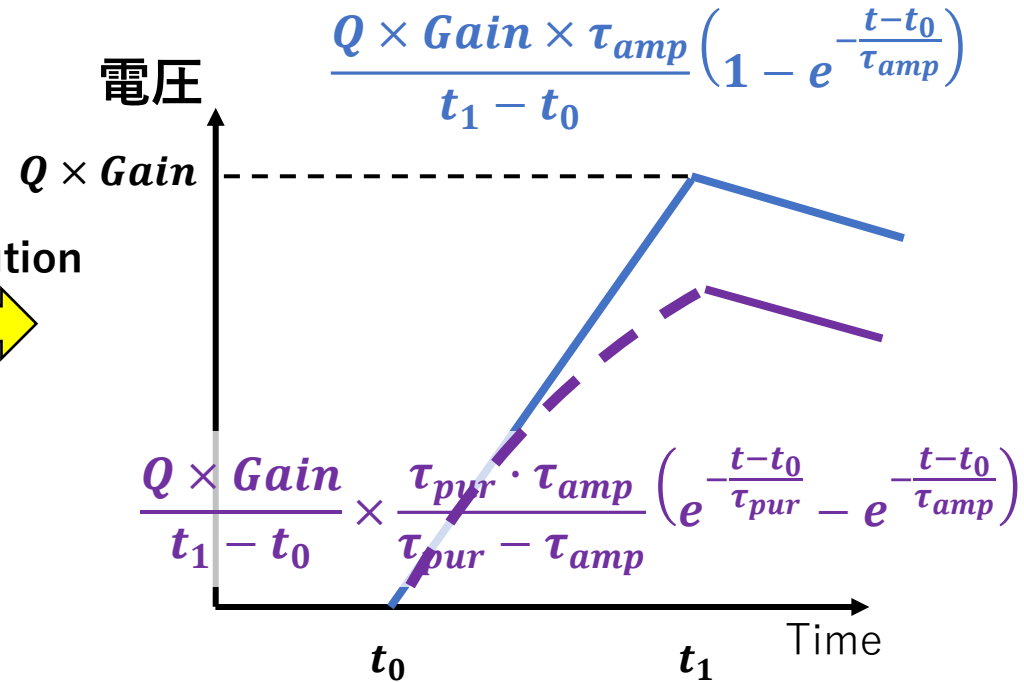
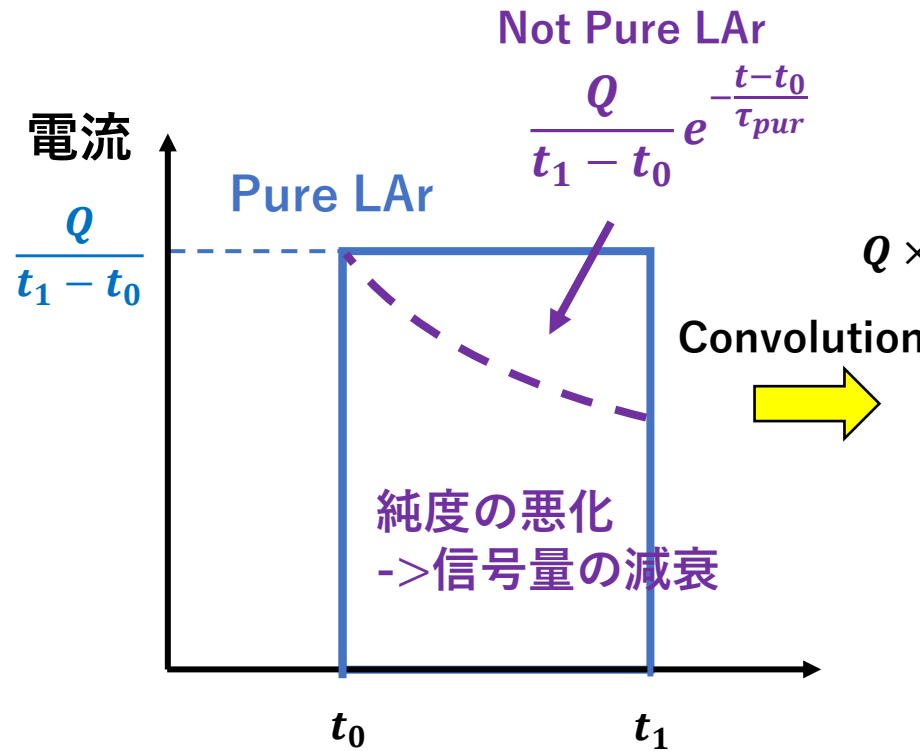
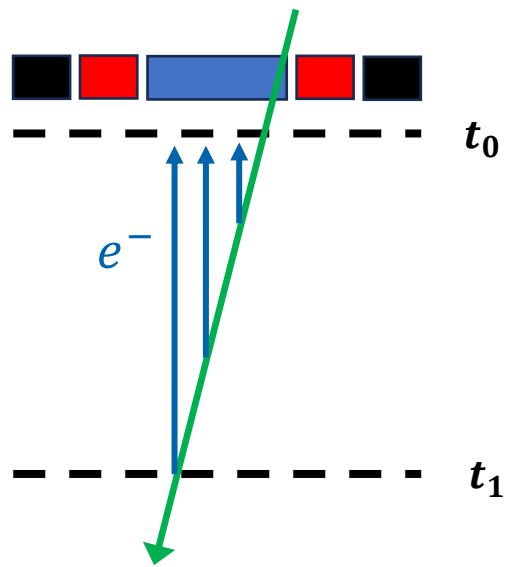


B23-06：気球環境でのLArTPC運用実証

- 上昇中 + Level Flight中のLArTPC信号取得 → Flight前後でのLAr純度の変化を算出

Eventの選択

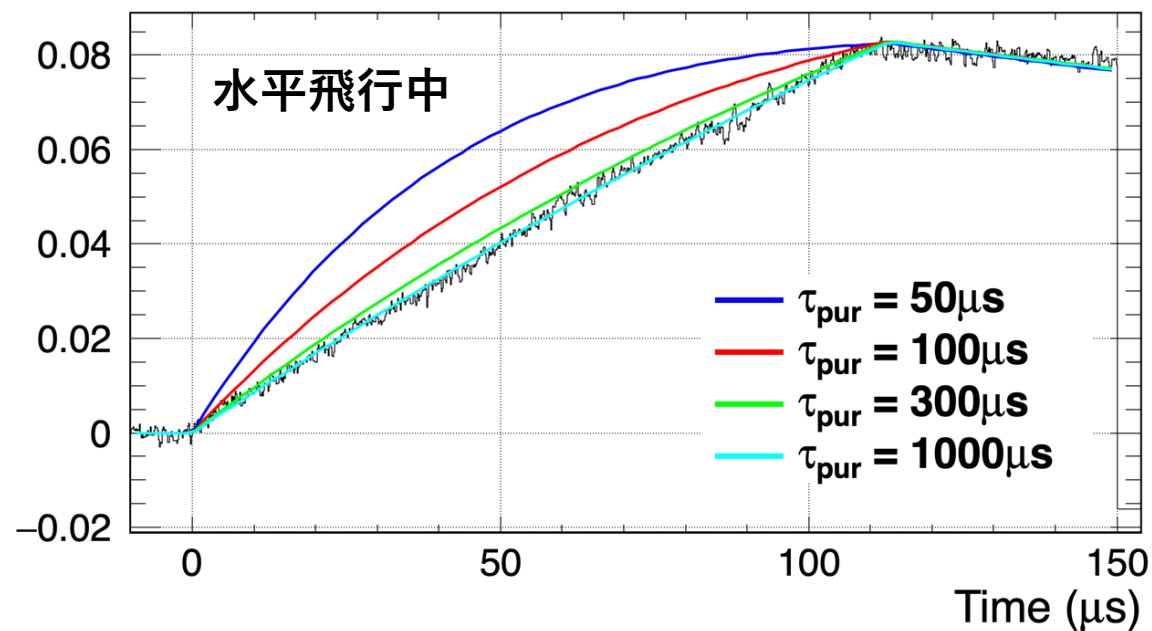
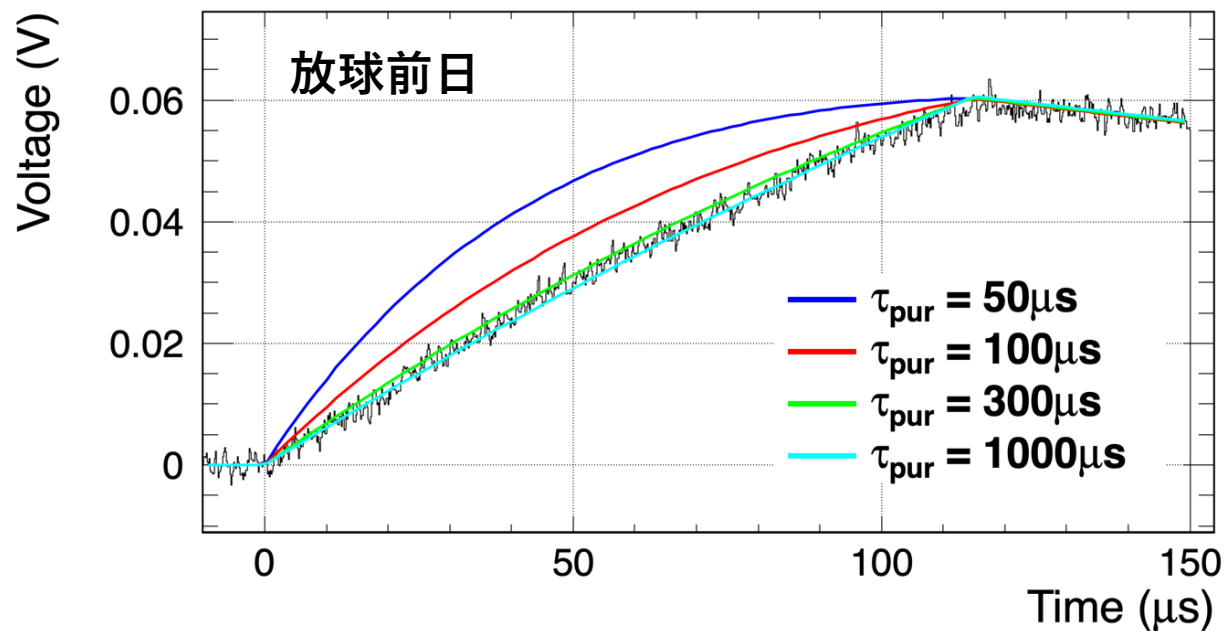
- 信号がCh1にのみ存在：**Ch1 > 0.04 V** && **Ch2, Ch3 < 0.015 V**
- Ch1の信号が1つだけ
- PMT信号が1つだけ



B23-06：気球環境でのLArTPC運用実証

- 上昇中 + Level Flight中のLArTPC信号取得 → Flight前後でのLAr純度の変化を算出

τ_{pur} を変化させ実データの最大値で規格化



- Flight前後で純度の明確な悪化はなし
- Flightを通じて約1 ppbの純度を維持できていた

GRAMS実験：MeV- γ 線観測宇宙反粒子観測を目的とした気球・衛星実験

● R&D要素

- LArTPC中での荷電粒子の観測
- LArTPC中でのAnti-particle観測
- **LArTPCの気球上での運用** ➡ **気球工学試験：B23-06@JAXA TARF**

B23-06実験：気球環境でのLArTPC運用実証

- 放球から回収まで**LArを維持** ⇨ Flight中、**LAr容器内圧、LAr温度を安定維持**できた
- 実験装置の安全回収 ⇨ LArの**上空排出完了** + 回収後の実験装置に**破損無し**
- 上昇中（+ Level Flight中）の**LArTPC信号取得**
⇨ 上昇中 + Level flight中に400k eventsの宇宙線データを取得
 - ~20 km程度でのShower Maximumを確認できた
 - Flight前後でLAr純度は1 ppb程度で維持できていた

今後の展望



液体Ar検出器の特性

液体Ar検出器

- ・ 荷電粒子の入射：電離電子、シンチレーション光
- ・ 希ガス原子：電離電子がドリフト可能
 - ・ ドリフト速度：1 mm/μs (0.25 kV/cm)
 - 高純度 (ppb) の要求

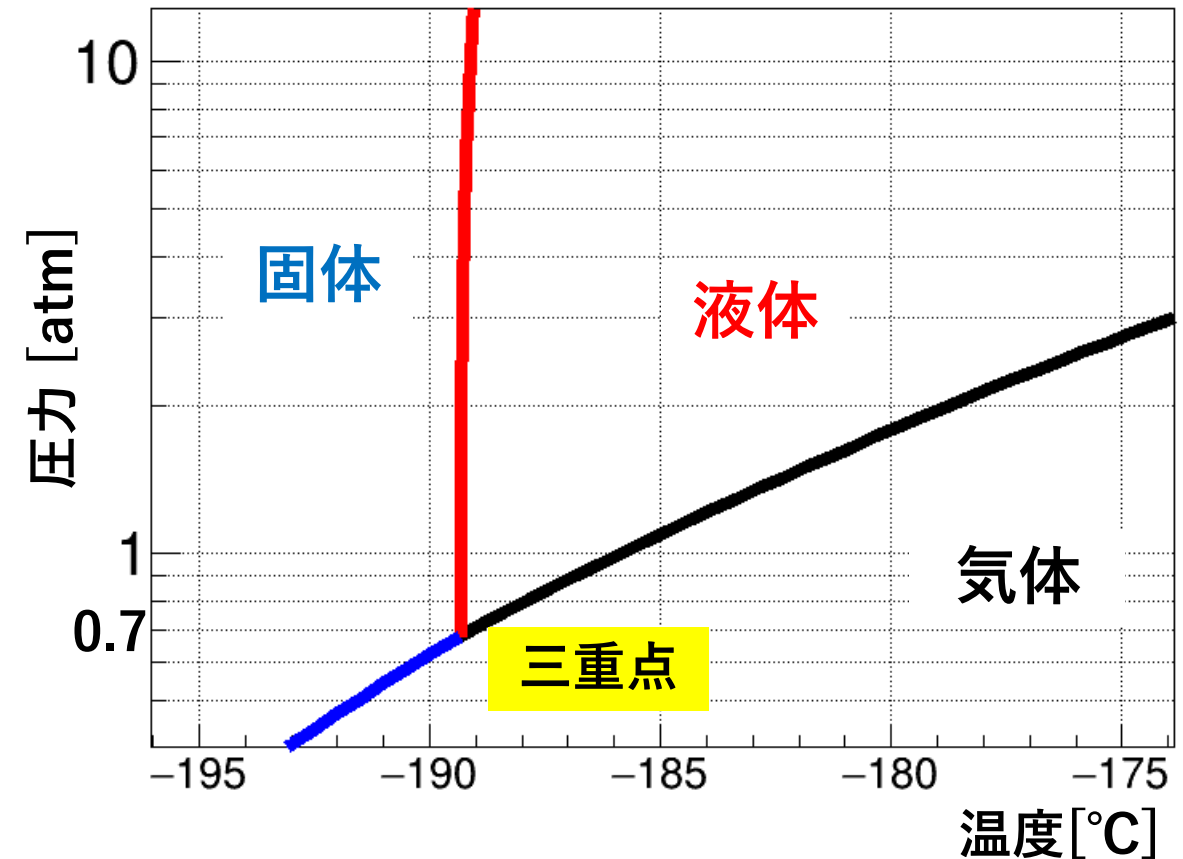
Arの性質

項目	値
液密度	1.395 g/cm ³
凝固点 (1 atm)	-189.15 °C
沸点 (1 atm)	-185.65 °C

- ・ 1 atmで沸点と凝固点の温度差：約3 °C
- ・ 0.7 atm以下で液体状態なし

液体Arの運用には温度、圧力管理が重要

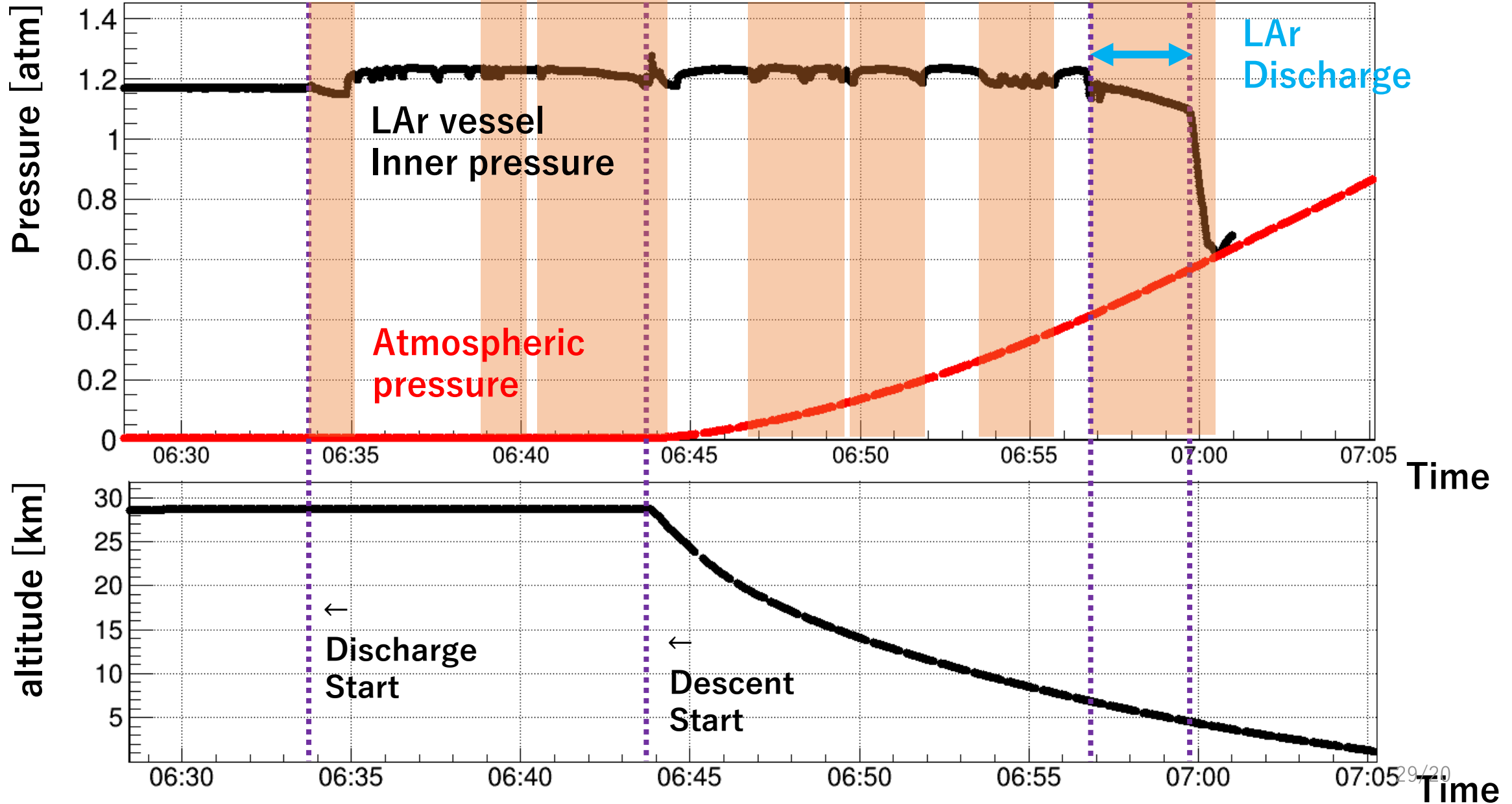
Arの状態図



↑
<https://encyclopedia.airliquide.com/argon#properties>
 記載のデータを用いて作成した

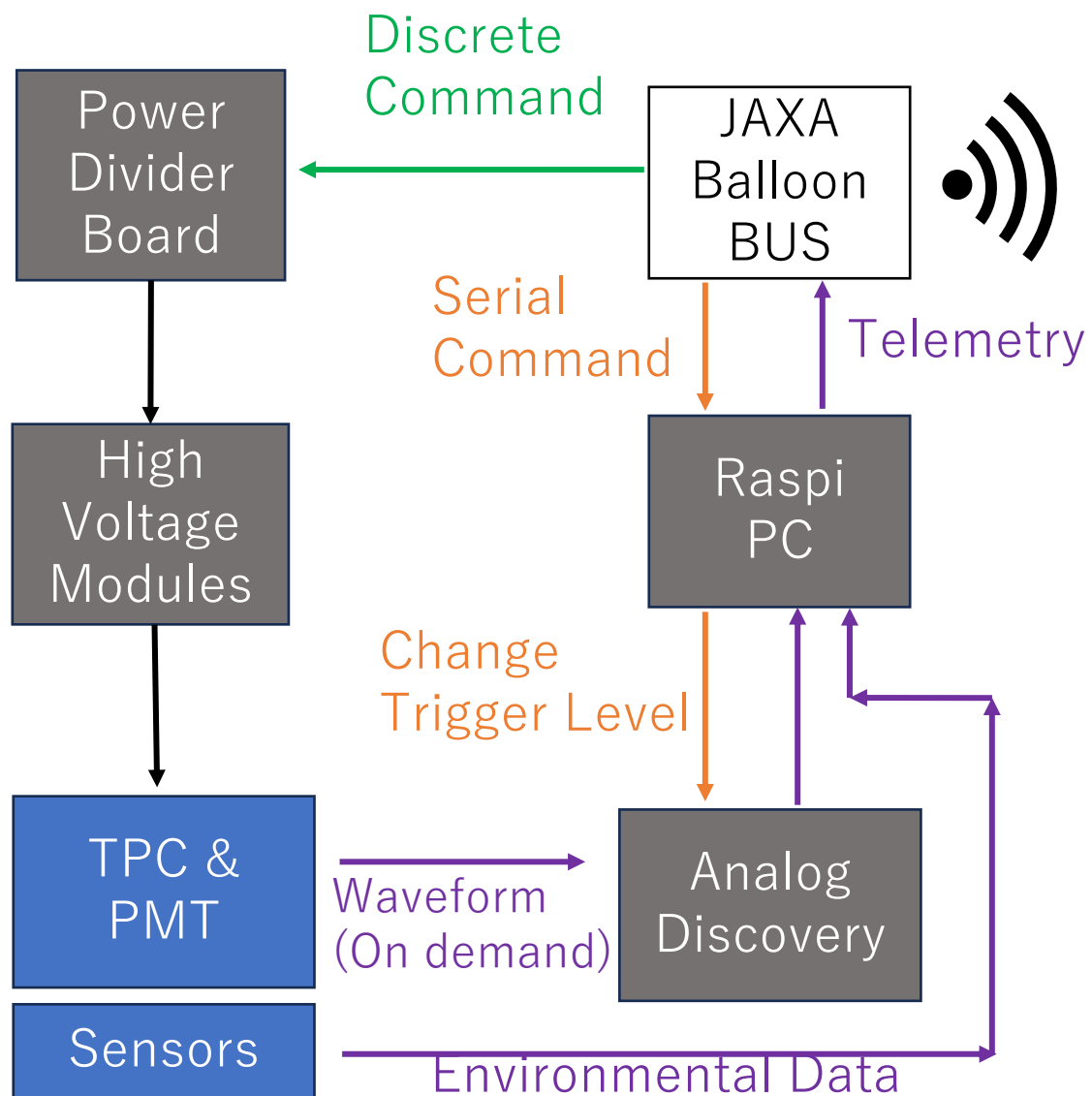
Flight result : Discharge

Solenoid valve open

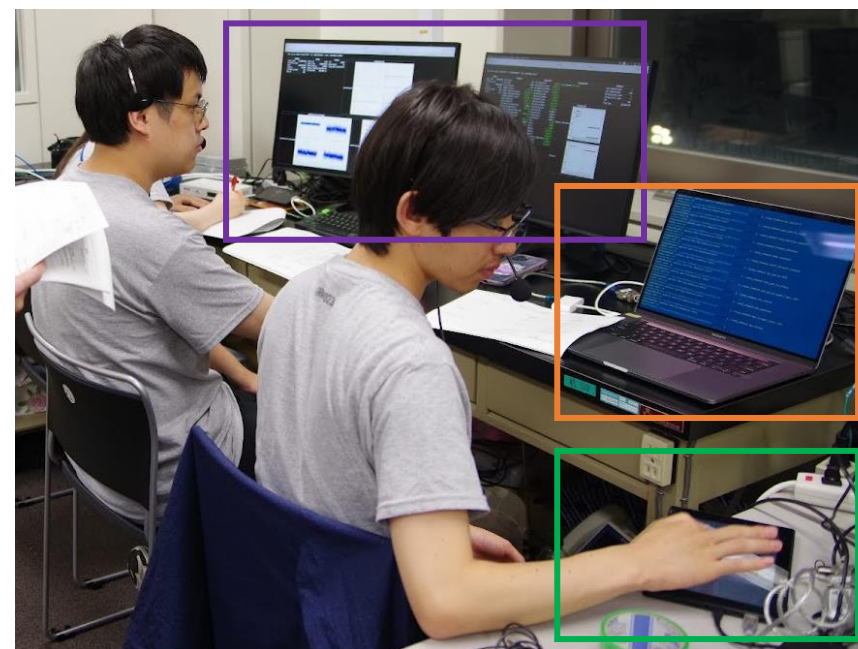
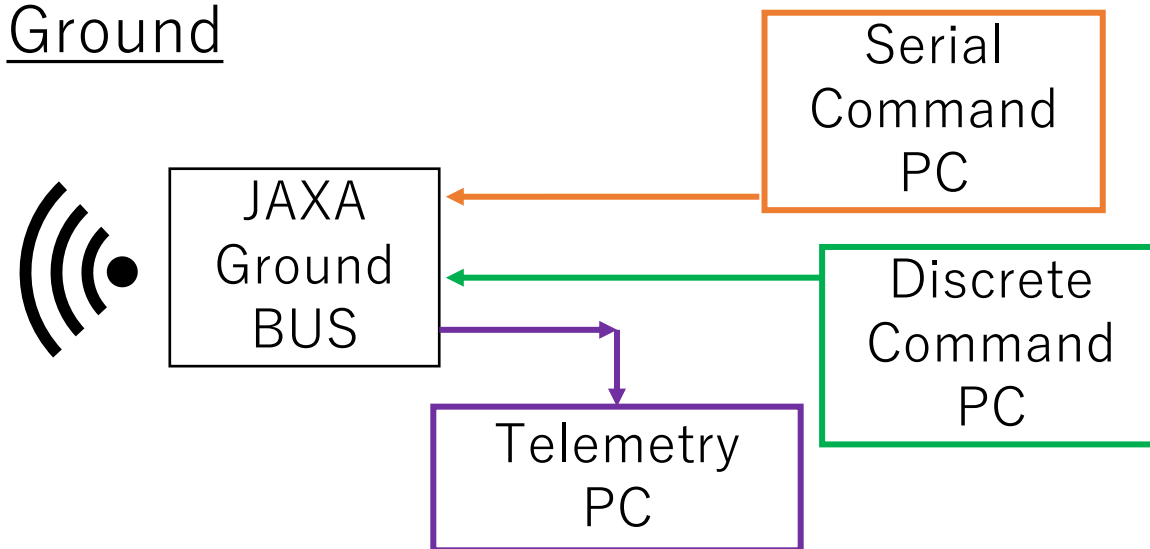


Remote Control System

Balloon



Ground



Environmental Monitoring Values

LAr vessel

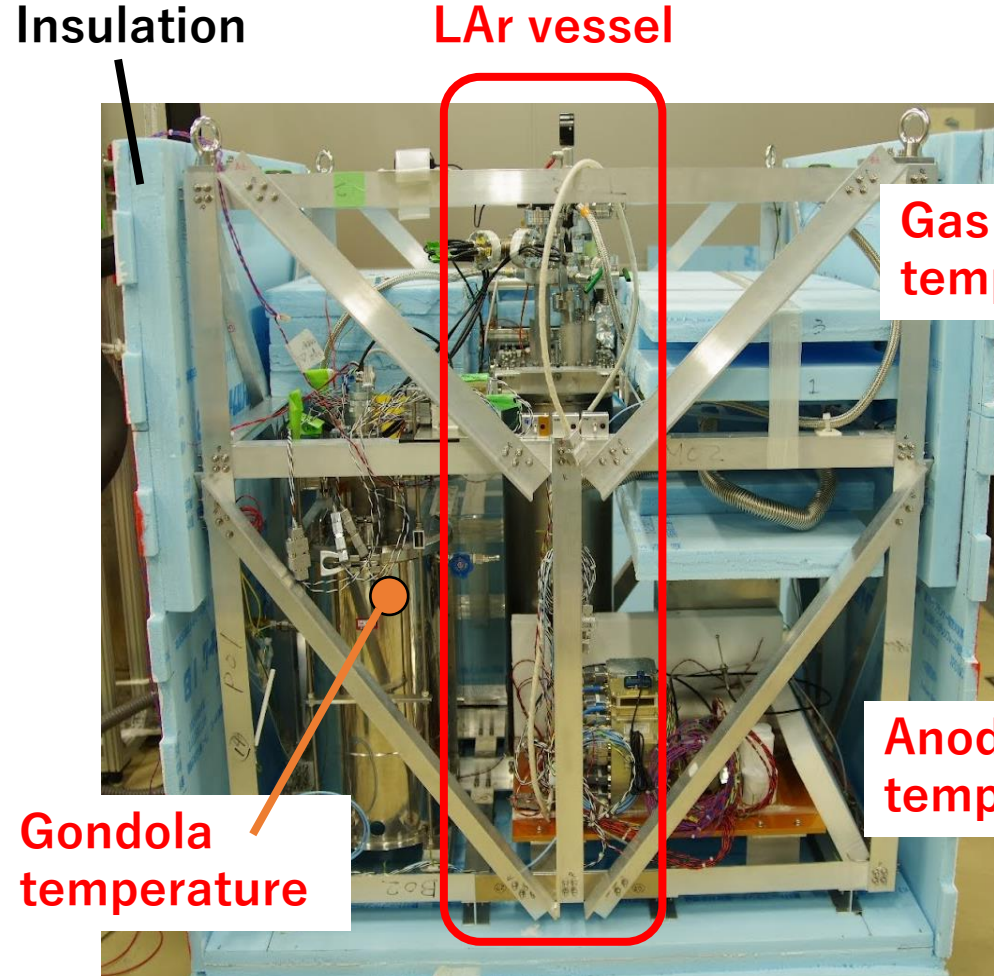
- Inner pressure
- Bottom temperature
- Anode temperature
- Gas temperature

Pressurized vessel

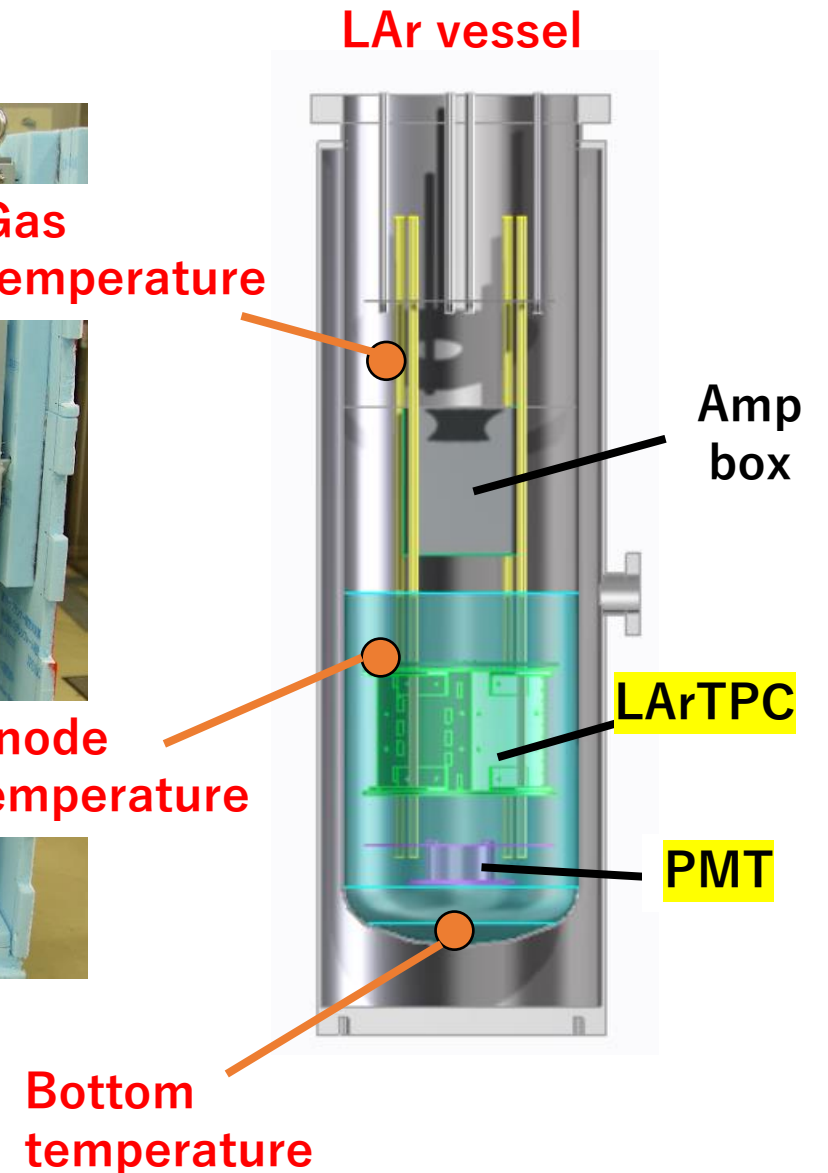
- Inner pressure
- Inner temperature
- Acceleration
- Gyro
- Magnet
- Voltage
- Current

Other

- Gondola temperature



B23-06 Gondola

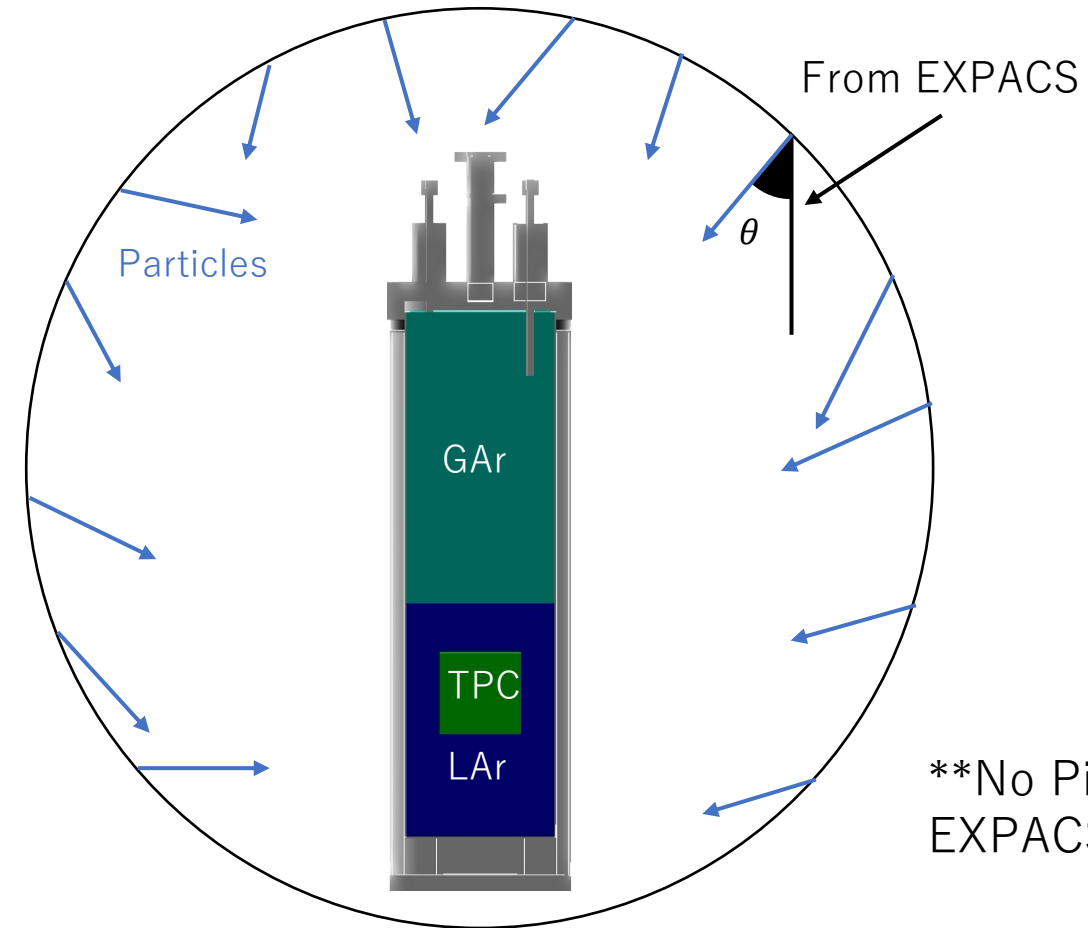


Geant4 + EXPACS Cosmic Rate Simulation

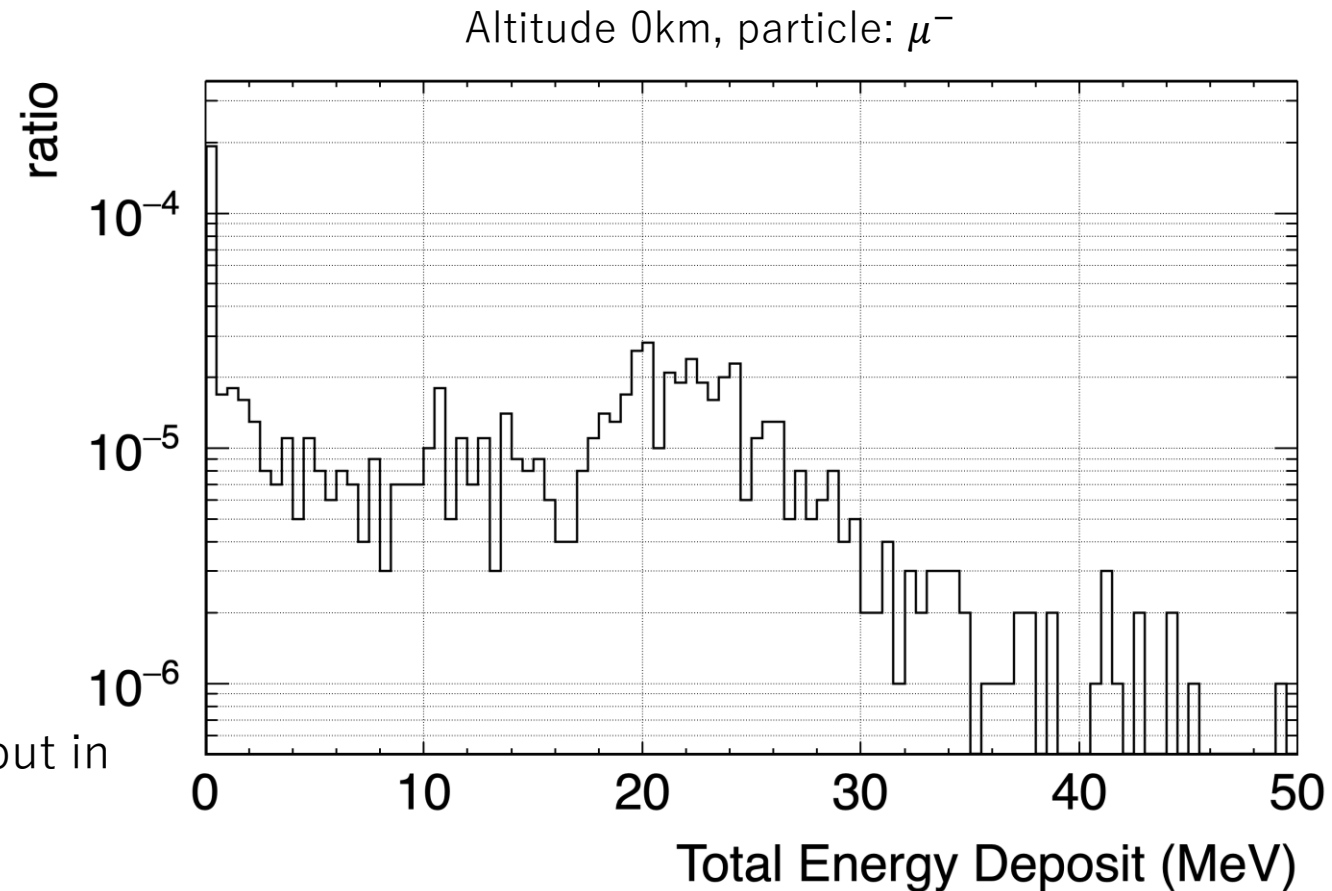
EXPACS + Geant4 → Rate of events in TPC at various altitudes

EXPACS: Obtain energy + angle distribution at given altitude for each particle (e^\pm , μ^\pm , gamma, proton, helium)

Geant4: Obtain events that deposit energy in TPC



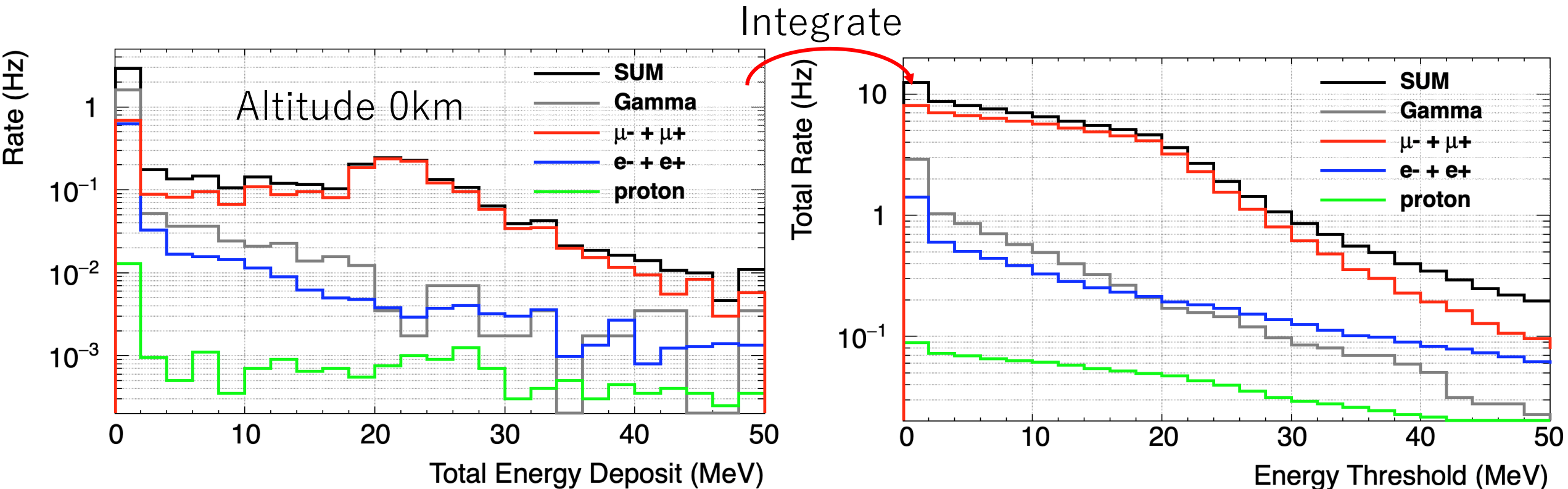
**No Pion input in EXPACS



Cosmic Rate Calculation

$$\mathbf{Rate(/s)} = \mathbf{Flux(/cm^2/s)} \times \mathbf{ratio} \times \mathbf{Orthodrome\ Area}$$

- $Flux(/cm^2/s)$ = Integral Flux from 10MeV ~ 10GeV (EXPACS)
- Ratio = $\frac{\text{Number of events depositing energy in TPC}}{\text{Total number of events generated}}$
- Orthodrome Area $800mm \times 800mm \times \pi$ (Geant4 Setup)

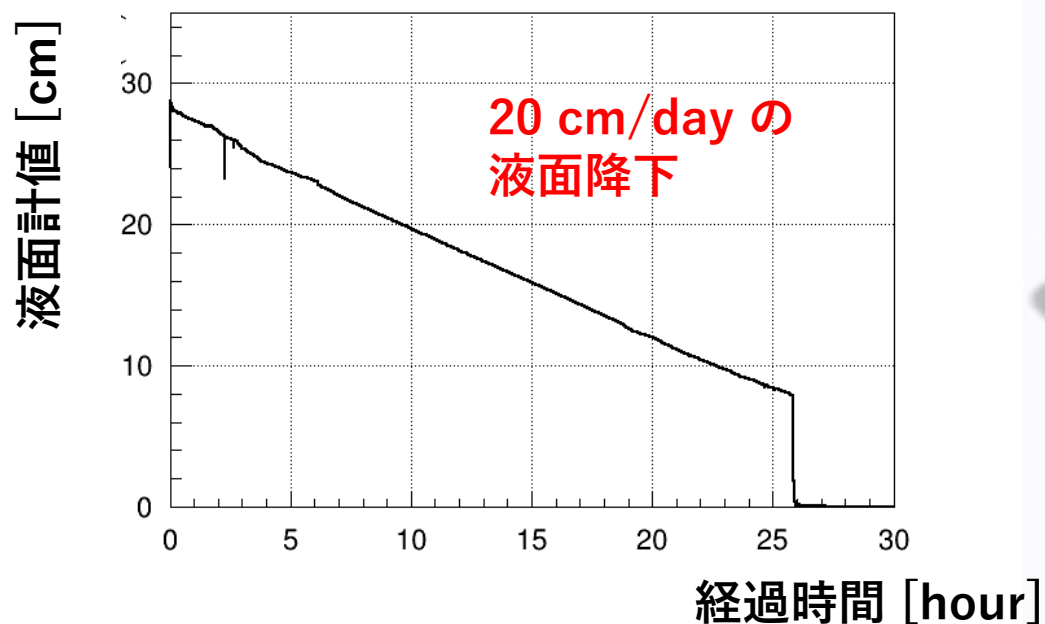


● LAr容器設計コンセプト

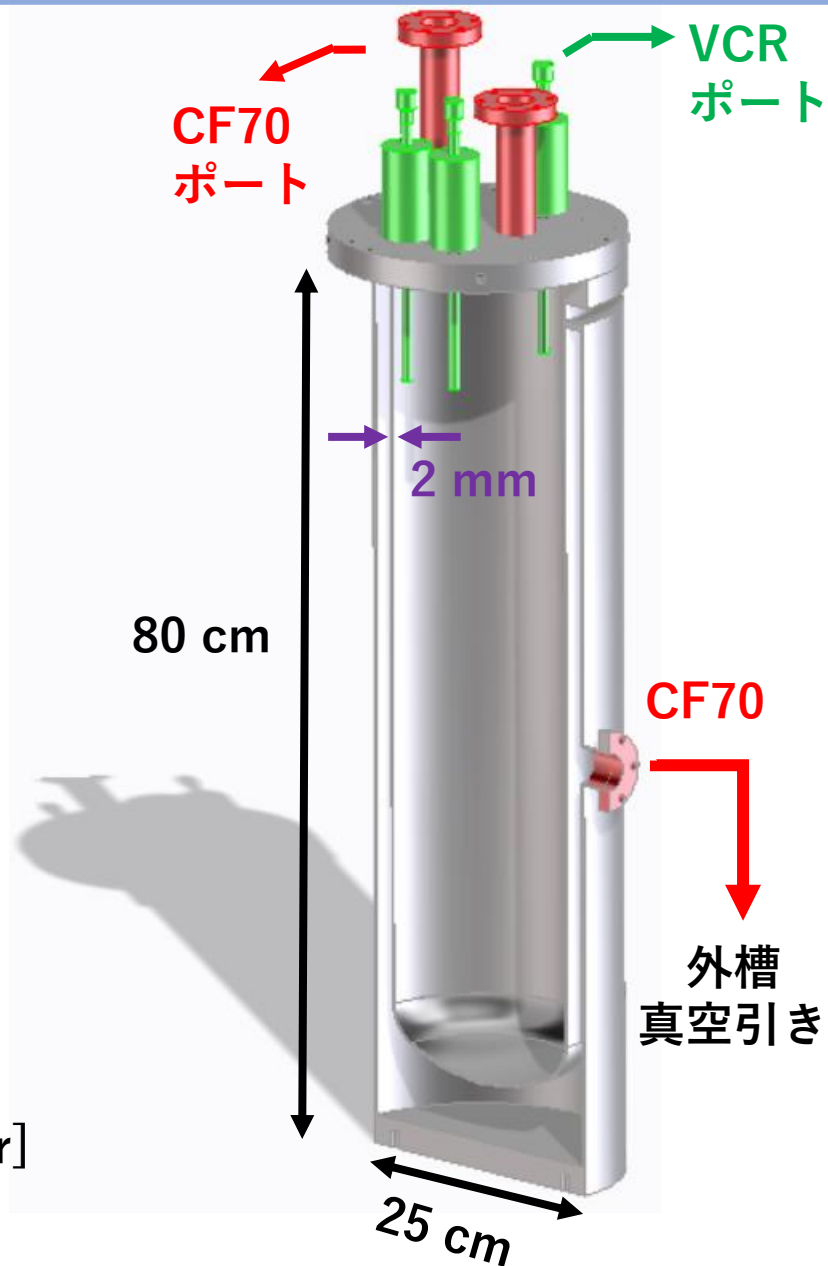
トップフランジ付きオープンバス型真空断熱容器

・低熱流入：15 W

- ・真空断熱層
- ・スーパーインシュレーター
- ・内槽壁：厚さ2mm
- ・胴長構造 + バッフル板



・小型サイズ：46 kg, $\Phi 25$ cm



Detector Design

Detector Principle

- PMT detects scintillation light
- LArTPC detects ionized electrons

LAr Reaction

