



# 南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画

ギャップス  
**GAPS** (General Anti-Particle Spectrometer)

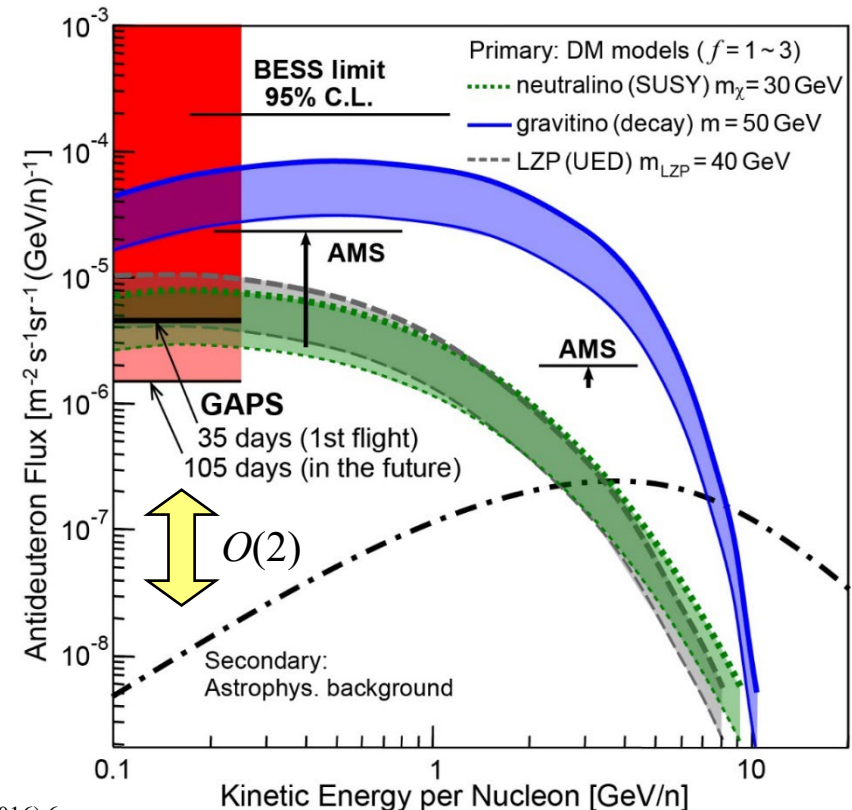
福家 英之 (JAXA/ISAS)

on behalf of the GAPS collaboration

# 宇宙線反重陽子による暗黒物質(DM)間接探索

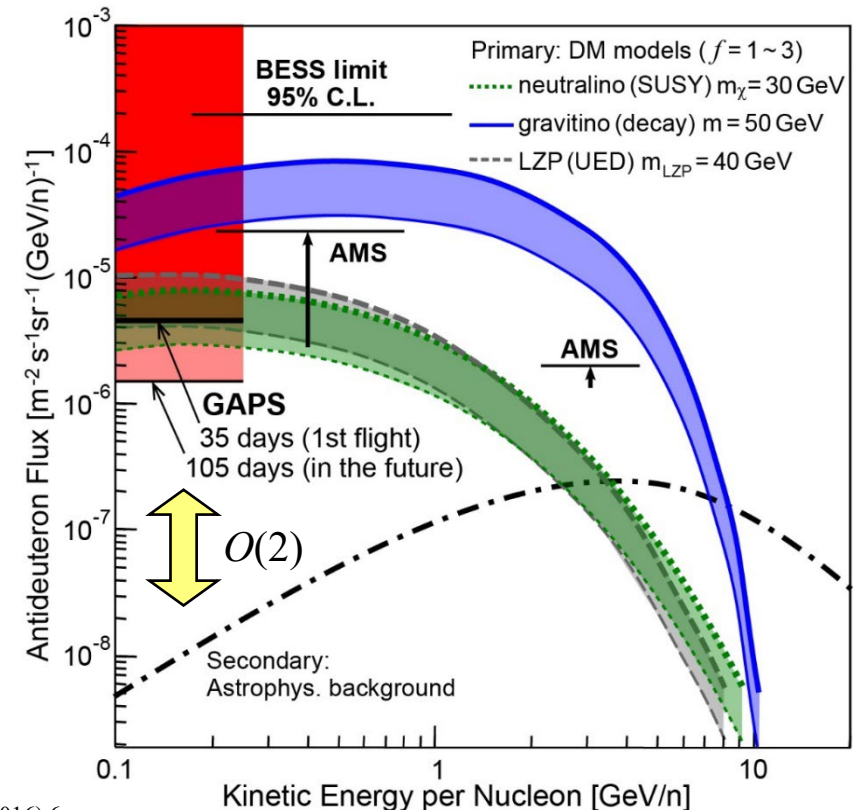
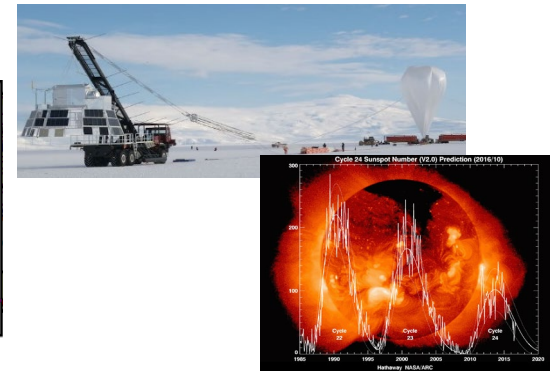
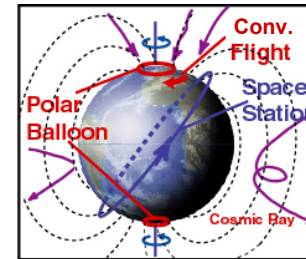
- ◆ 暗黒物質や反物質は宇宙物理・素粒子物理学的に重要・喫緊の課題, 宇宙科学・探査ロードマップやNASA Decadal Surveyでも柱の一つ.
- ◆ 反重陽子 (anti-deuteron  $\bar{d}$ ) は未開拓ながらDMの魅力的なプローブ. 特定のDMモデルを起源とする $\bar{d}$ の理論予想  
 ⇒ 低エネルギー (sub-GeV域) に極大を持つ特徴的な流束.
 

$\bar{p}$   $\bar{d}$   $\bar{n}$
- ◆ 一方、二次起源 (通常の宇宙線起源)  
 ⇒ 低エネルギーで運動学的に抑制.
- ◆ 容易に識別可能 “Background Free”
  - 他の宇宙線DM間接探索には無い特徴的な利点.
  - 1事象検出でもインパクト大.
  - ただし、予想存在量が極微.
- ◆ DM探索パラメータ領域は他実験と相補的.



# 南極周回気球による高感度探索

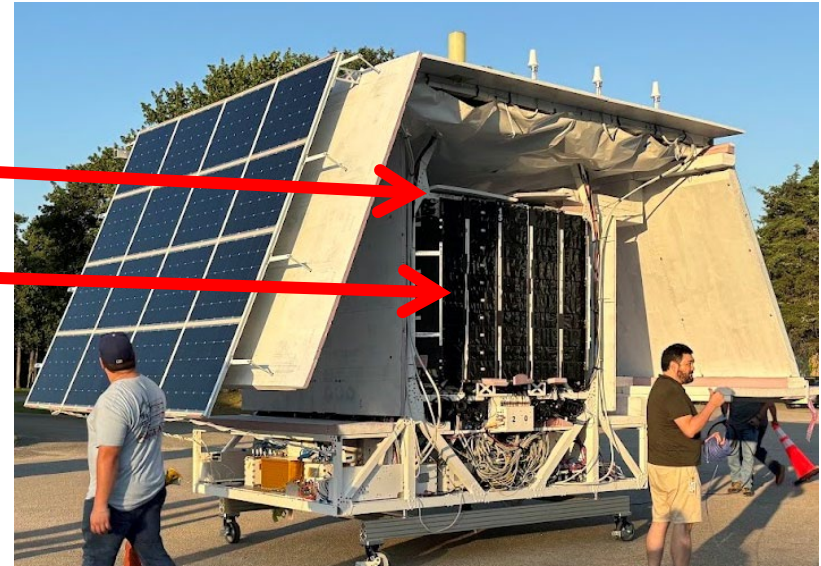
- ◆ **磁極域を長時間飛翔する NASAの南極周回気球を利用。**  
(周回衛星やISSよりも低エネルギー荷電粒子の観測に適した飛翔体)
- ◆ 太陽活動静穏期を含む期間に複数回の飛翔観測。
- ◆ 大面積立体角の測定器で長時間飛翔  
⇒ **世界最高感度**での  $\bar{d}$  観測  
(未踏の  $10^{-6}$ オーダー)
- ✓ BESS上限値よりも2桁以上の高感度。
- ✓ AMS on ISSよりも低エネルギー反粒子に適合。
- ✓ GAPSは反陽子 $\bar{p}$ の高統計観測や反ヘリウム $\overline{\text{He}}$ の探索も実施予定。



# GAPSの反粒子検出方法

## ◆ 主要測定器:

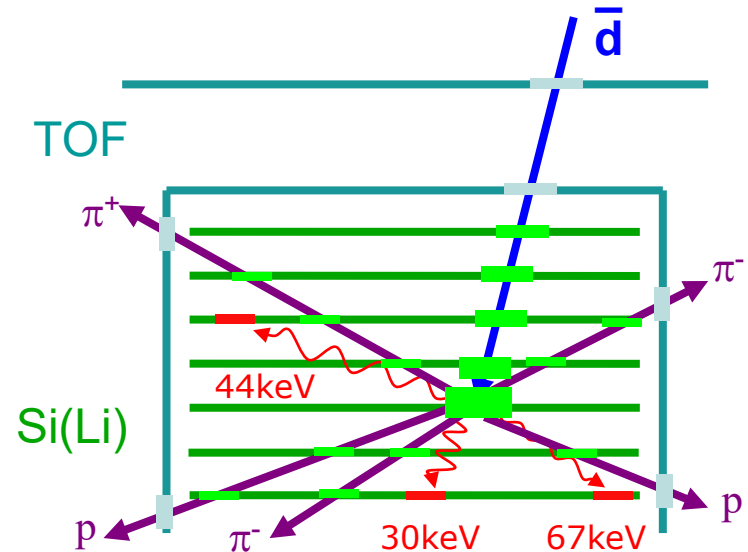
- TOFシンチレーションカウンタ
- シリコン検出器アレイ



4.3m<sup>W</sup> × 6.7m<sup>L</sup> × 4.3m<sup>H</sup>, 重さ ≈ 2.5t

## ◆ 独自の反粒子識別手法を採用 (エキゾチック原子法)

- 反粒子を捕捉し  
エキゾチック原子崩壊に伴う  
特性X線と核子群の検出で  
 $\bar{p}$  や  $\bar{d}$  などの反粒子を同定.
- ✓ 従来の磁気スペクトロメータ法よりも  
測定器の大型化・観測の長時間化が  
比較的容易.
- ✓ 検出原理の妥当性は  
反陽子ビームテストで確認済み.





# 研究体制

- 国際共同. 日米伊. 約40名.  
 PI 米: Chuck Hailey (Columbia)  
 日: 福家英之 (JAXA / ISAS)  
 伊: Mirko Boezio (INFN)
- 日本チームは重要・必須な役割.
  - ① シリコン検出器の開発・量産
  - ② 測定器設計・数値シミュレーション
  - ③ 熱設計・冷却システム開発



2019年1月 審査会(PDR/CDR)通過

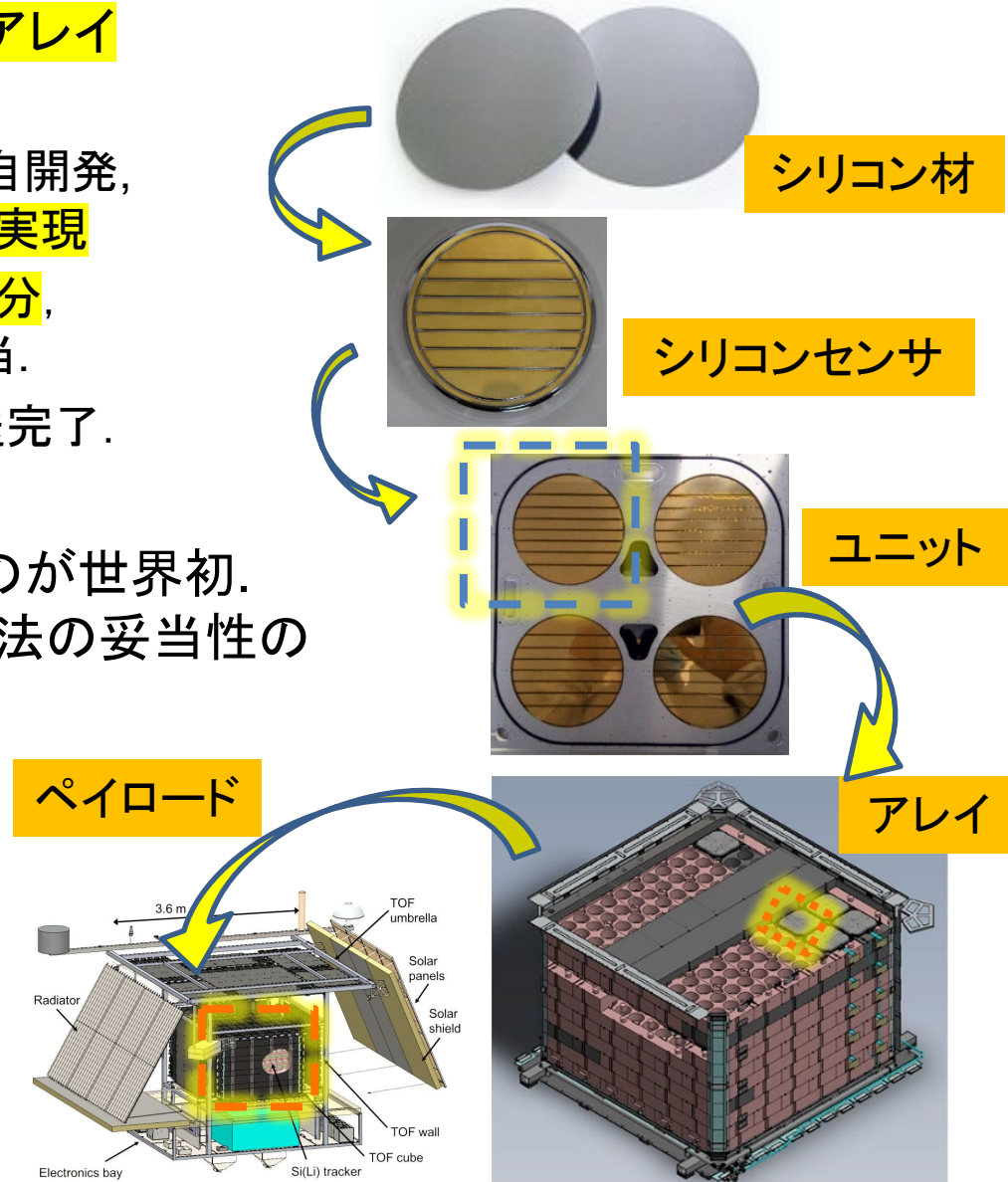
# ① シリコン検出器の開発・量産

## ◆ GAPSの中核を担うSi(Li)検出器アレイ

- 大型・厚肉・高分解能・高温動作
- 島津製作所と共同でGAPS用に独自開発、1000個オーダーの量産を世界初で実現
- センサ部の量産が日本の主担当部分、ユニット化以降の工程は米国が担当。
- 2021年3月までに全数を米国に輸送完了。  
(日本側の責務を完遂)
- 大型Si(Li)センサの量産そのものが世界初。量産データの詳細解析により製法の妥当性の再確認に成功。他用途への応用も検討提案。

## ⇒ 成果発表(論文)の例:

- NIM A 905 (2018) 12.
- NIM A 947 (2019) 162695.
- JINST 14 (2019) P10009.
- NIM A 997 (2021) 165015.
- NIM A 1034 (2022) 166820.



## ② 測定器設計・シミュレーション開発

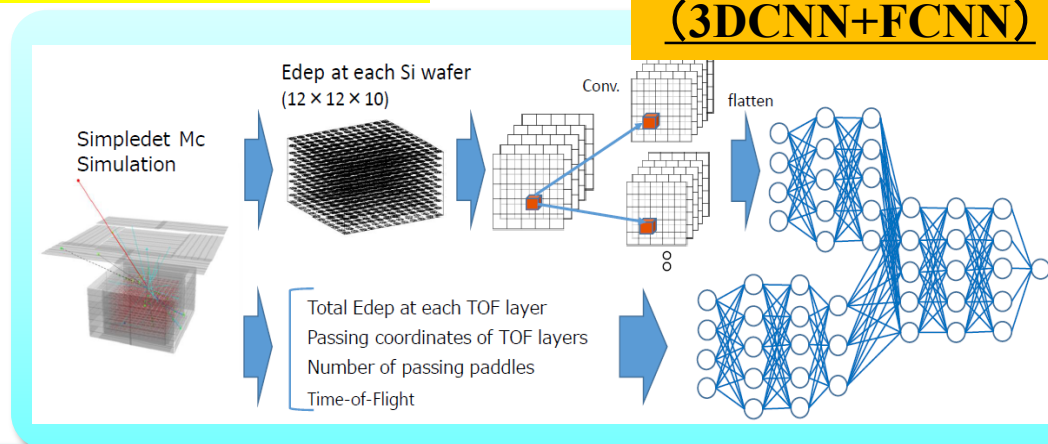
### ◆ GEANTシミュレーションの高度化

- 主目的の反重陽子検出における反陽子バックグラウンド除去能を複数の機械学習手法の導入によって更に強化
- 飛跡再構成アルゴリズムなどデータ解析スキームの構築

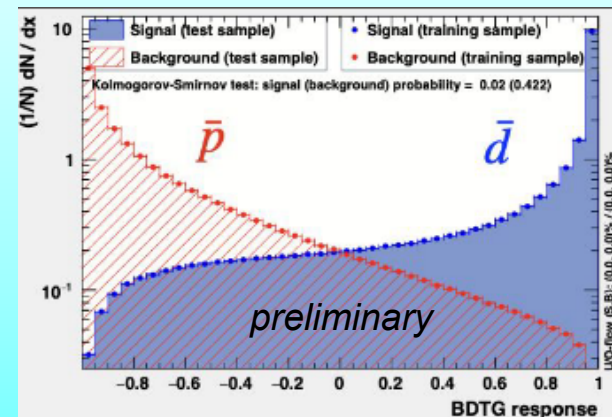
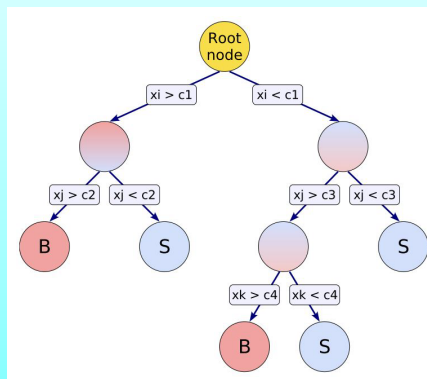
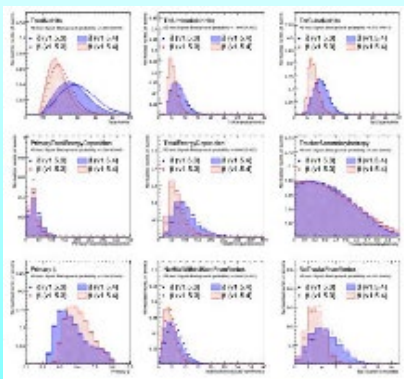
### AI技術 (3DCNN+FCNN)

#### ⇒ 成果発表(論文)の例:

- TASJ 18(3) (2020) 44.
- Astropart. Phys. 130 (2021) 102580.
- NIM A 1045 (2023) 167617.
- Astropart. Phys. 145 (2023) 102791.
- JESA 1 (2023) 2.



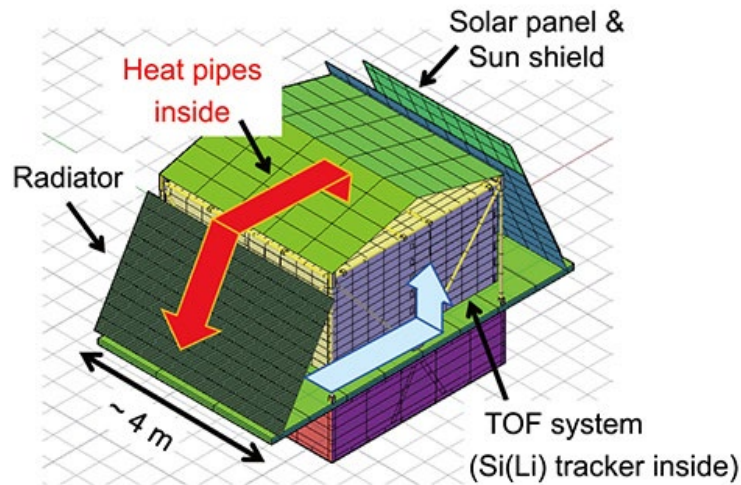
### Boosted Decision Tree





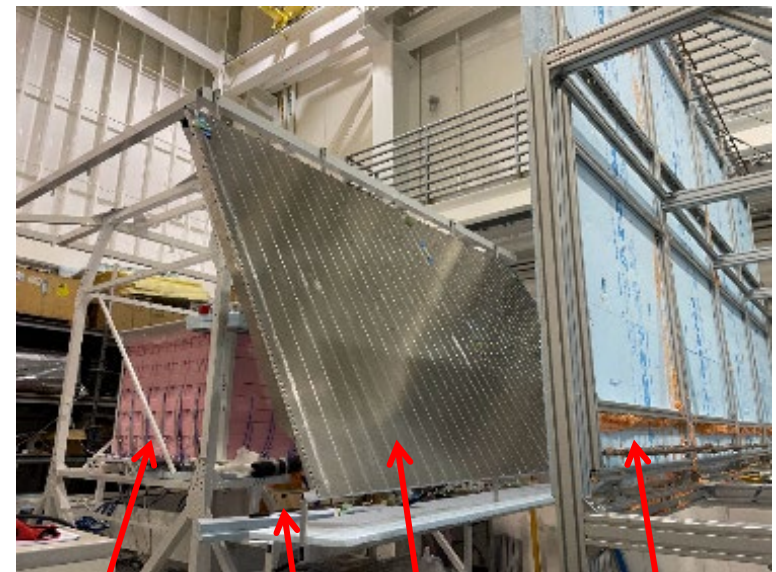
### ③ 熱設計・冷却システム開発

- ◆ シリコン検出器の冷却のため**独自開発ヒートパイプ技術**を使用
- ◆ **ペイロード全体の熱設計**も意欲的・特徴的
- ◆ 地上での動作確認を簡易的に実現する**地上冷却系**も開発



⇒ **成果発表(論文)の例:**

- JAI 6(2) (2017) 1740006.
- ATE 141 (2018) 20.
- ATE 198 (2021) 117497.
- NIM A 1049 (2023) 168102.
- JESA 1 (2023) 2.
- JESA 2 (2024) 156.
- JESA 2 (2024) 177.



Si(Li) tracker

Radiator

地上冷却系

ヒートパイプ(細すぎて  
写真だと見えないが、  
多数配置されている)

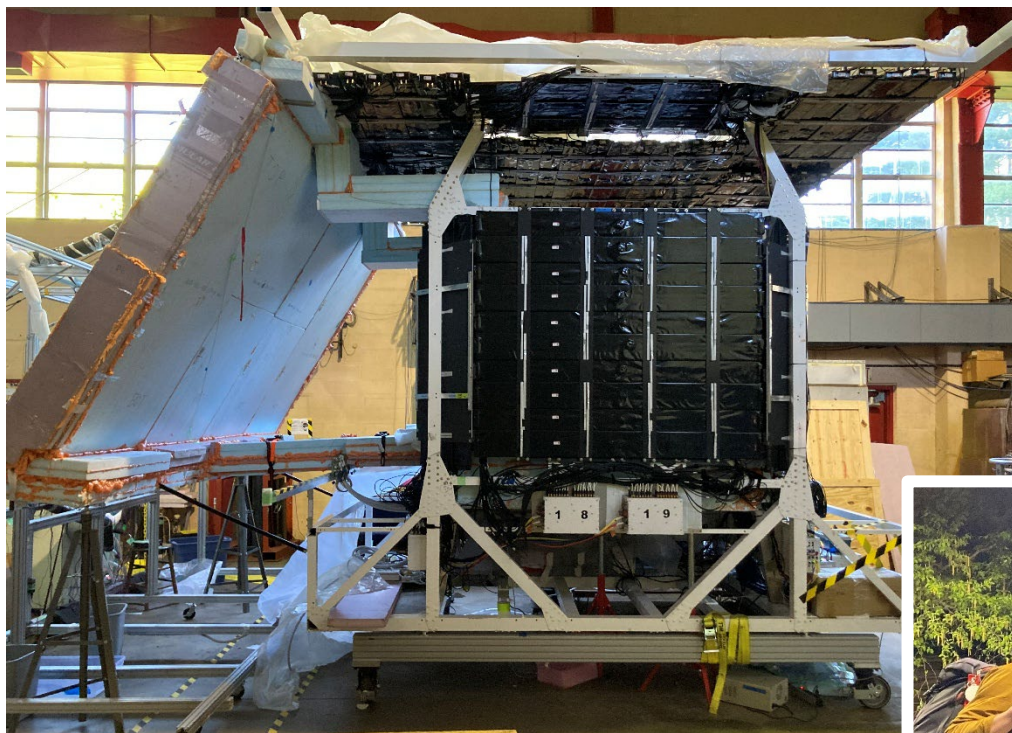


# 2019~2023年度の経緯(既報, おさらい)

- ◆ 2019年: 自主審査会(PDR/CDR相当)を経て, FM開発フェーズに移行.
  - FM開発フェーズに 1/10スケールモデル構築のマイルストーンを追加.
- ◆ 2020年: コロナ禍に伴い, NASAが同年の南極気球事業の不実施を決定.
  - コロナ禍で国際輸送なども遅延. GAPS放球を2021年以降に順延.
- ◆ 2021年: コロナ禍が続き, NASAは2021年も南極気球事業の不実施を決定.
  - これにより, GAPS放球を2022年以降に順延.
- ◆ 2022年: 日本チームの米国出張(現地作業参加)を再開.
  - 米国メンバーの異動等に伴い, 拠点を MIT から UC Berkeley に引越.
  - NASA が GAPS を 2023年12月期の南極気球実験の一つとして採択.
- ◆ 2023年: NSFの南極事業計画変更に伴い, NASAが南極気球事業を縮小.
  - これにより, GAPSの2023採択が取消となり, 2024年12月期に再設定.
  - 米国NTSにてFM熱真空試験.
  - 米国チーム事情により, 拠点をNYコロンビア大学に再変更.

# 2024年度 活動実績(1)

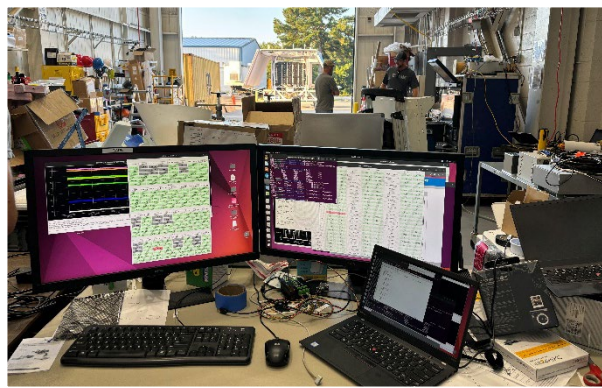
- ◆ 4月～5月： 米国NYコロンビア大学にてペイロード開発を完了。
  - 日本メンバーも現地参加。長期連続の動作試験にはリモートでも参加。
  - いったんペイロードを部分解体し、テキサス州NASA気球施設本部へ発送。





# 2024年度 活動実績(2)

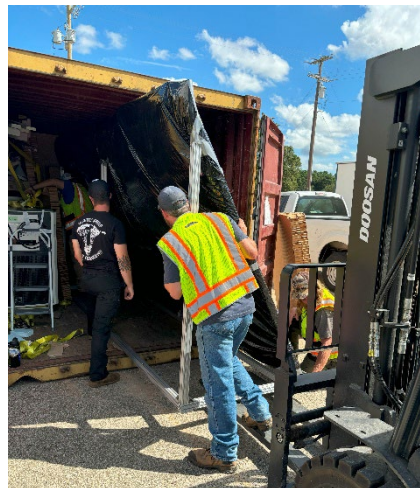
- ◆ 5月～9月： 米国テキサス州パレスティンNASA気球施設本部.
  - 解体輸送したペイロードを再構築し, NASA気球バス機器との噛合せ試験.
  - 日本チームメンバーも現地参加. 日本からのリモートでも参加・支援.



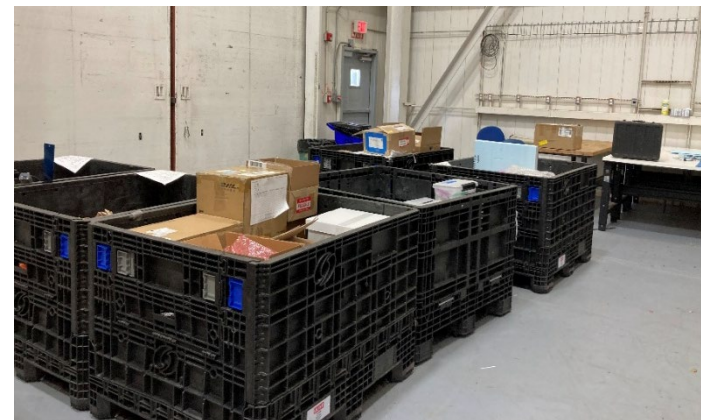


# 2024年度 活動実績(3)

- ◆ 5月～9月： 米国テキサス州パレスティンNASA気球施設本部.

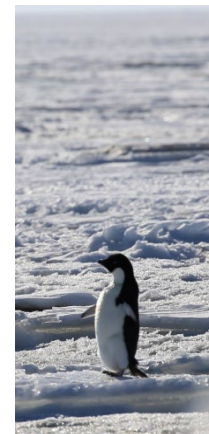


- ペイロードを再び部分的に解体・梱包し、南極へ発送.



# 2024年度 活動実績(4)

- ◆ 11月～1月: **南極マクマード基地 LDB site**にて最終準備.
  - 米国からの荷物輸送が輸送会社の事情で2週間ほど遅延.
  - メンバーの現地入りも遅らせた. 日本からはJAXA職員 3名を派遣.

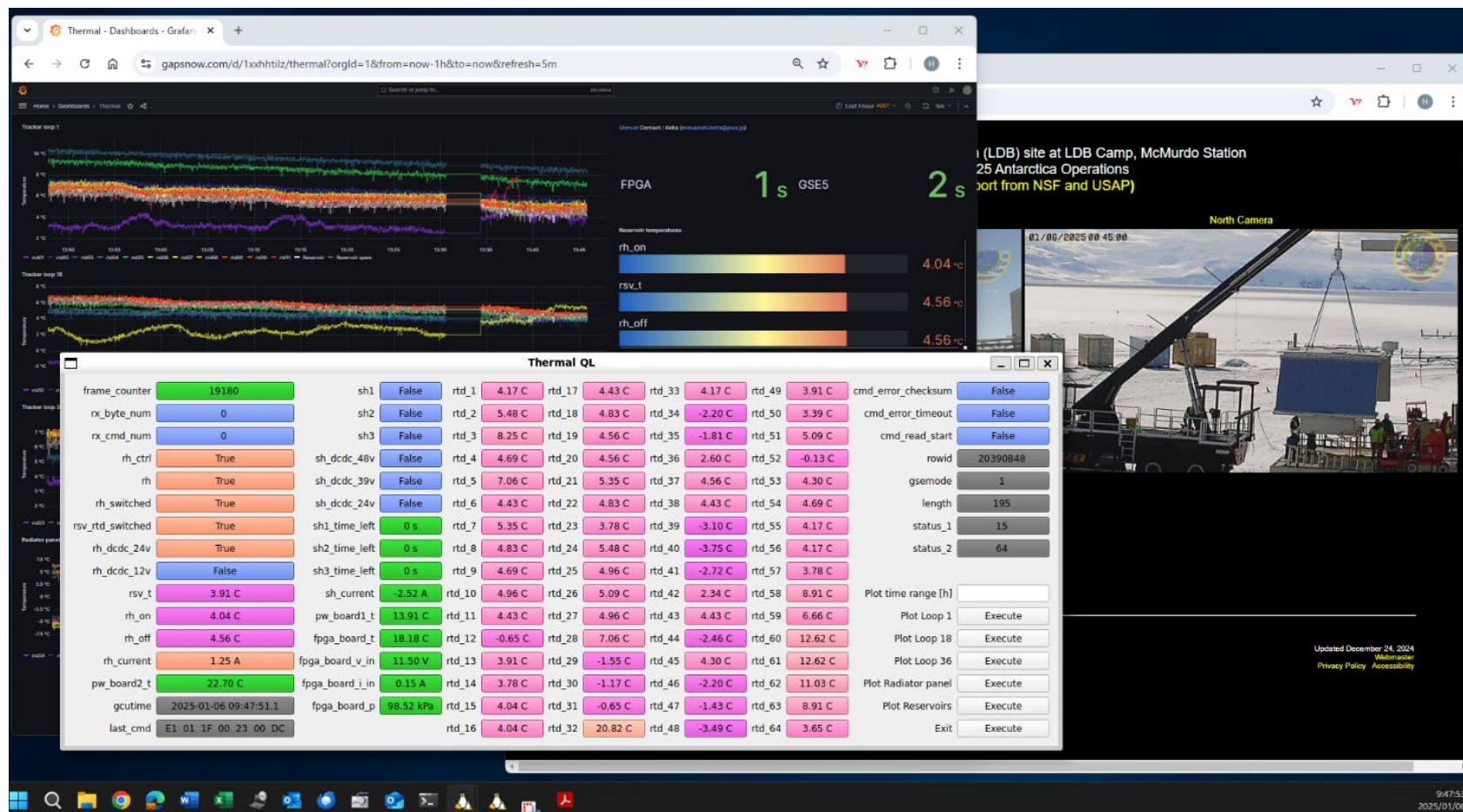


- 12月23日: NASA Flight Readiness Review を通過. Flight Readyとなる.
- 南極での長時間連続運転試験においても, 日本からリモートで参加.



# 2024年度 活動実績(5)

- ◆ 「お天気待ち」: 気球の放球に適した気象条件の機会を待つ。
  - 7回のチャンス(12/24, 12/25, 12/30, 12/31, 1/1, 1/6, 1/7): 7回ともチャレンジ「show-up」。
  - しかし、放球には至らず。地上風など気象条件が適合せず。



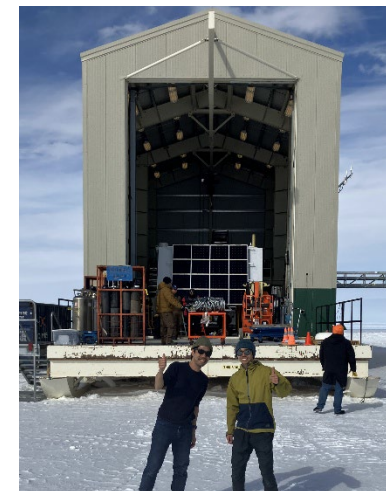
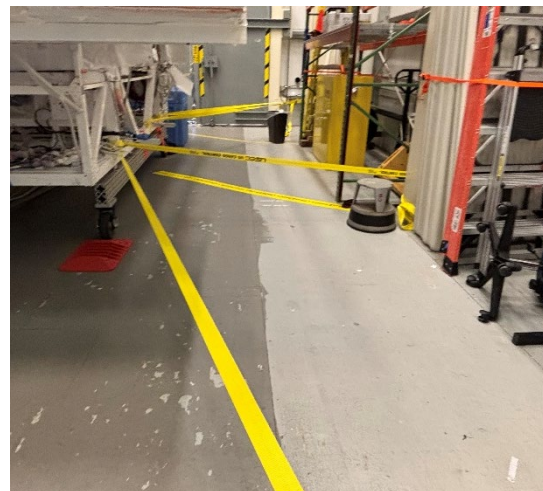


# 2024年度 活動実績(7)

◆ 1月8日： **気象条件不適合のため今期中の放球を断念.**

➤ NASAとの調整により以下の方針を決定:

- 南極上空を周回する成層圏風の極渦が崩れ始めており、気球フライトに適したシーズンの終焉を迎えつつある一方で、地上の好天も見込めず、**今期のGAPSフライト実施を断念.**
- GAPSペイロード本体を含む**大半の器材は南極に残置し越冬させる.**  
GAPSメンバーは一旦南極から引き揚げ、2025年10月下旬 or 11月初旬に再度現地入りして**2025年12月～2026年1月のフライト実施を目指す.**



- 越冬に向けてペイロードを保管する建屋ごと氷上を移動するため、柱などに固定して格納。耐寒性の弱い地上系PCは基地の屋内で保管。整備が必要な一部器材は米国に輸送。
- 次回は、越冬させた器材の健全性を確認したうえで、早期の flight readyを目指す。

# 2024年度 活動実績(補足)

- ◆ 10月: 日米間の「傘」協定である ISAS-コロンビア大学間の LoA を改訂・更新。有効期間を延長 (~2025年7月 ⇒ ~2029年11月 に延長)。
- 年間を通じて、日本メンバーを米国や南極に派遣 (のべ 417人・日, JAXA職員)。
- 年間を通じて、リモートでも運用に参加 (のべ 266人・日, 主に東海大・神奈川大)。

## 2025年度の予定

- ◆ 2025年度 予定 (日米伊 共通)
  - ◆ 4月~10月: データ解析フレームワーク構築の強化。
  - ◆ 11月~1月: 南極での実験準備を再開。気球フライト実施・観測データ取得。
  - ◆ 2月~3月: 回収した観測データの解析に着手。器材は日本関係も一旦米国へ輸送。
- ◆ 並行して、2回目・3回目の南極フライトに向けた準備・技術開発も進める。

# CRCからの継続的なご支援

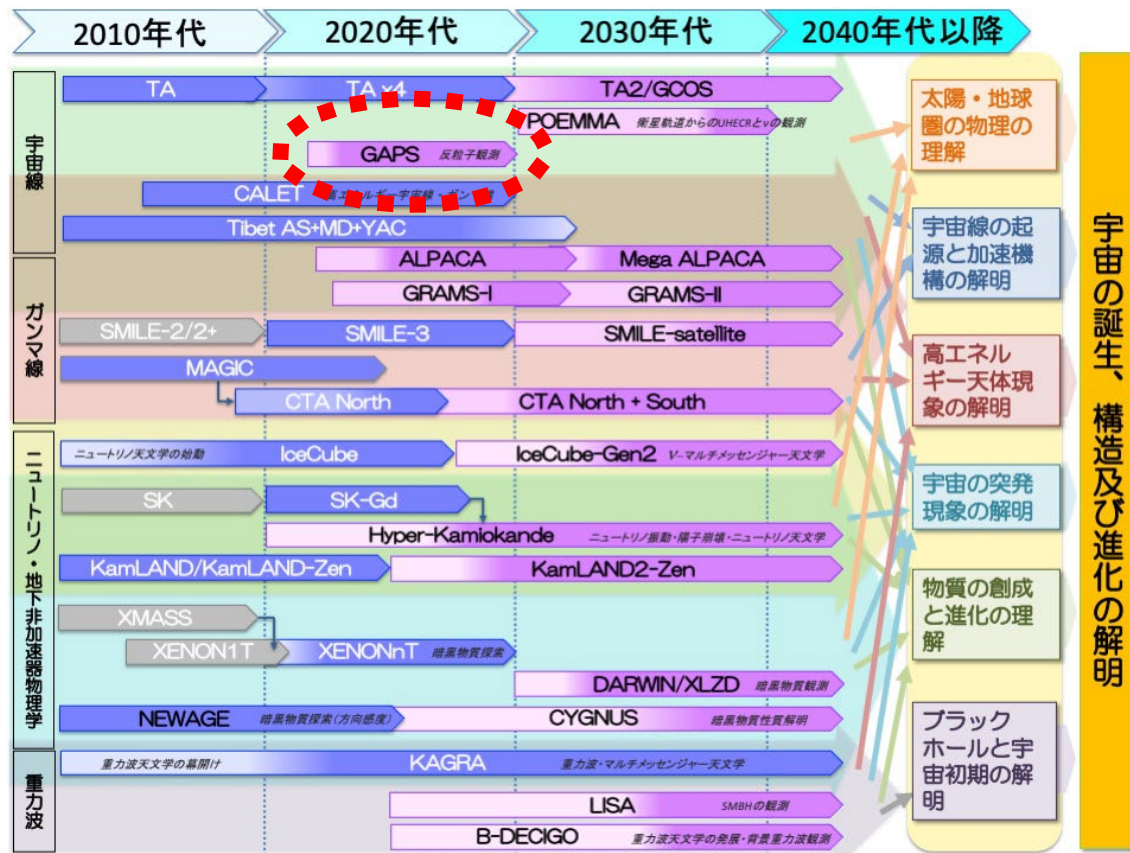
## ◆ CRCタウンミーティング

- 2015年度(2015年12月21日).
- 2016年度(2017年3月25日).
- 2017年度(2017年12月15日).
- 2023年度(2024年3月28日).

## ◆ CRC将来計画検討小委員会

- 2015-2017年度報告書.
- 2019年 宇宙ミッション提案.
- 2022年 大型・中型将来計画冊子(ロードマップ案).

- ◆ CRCのロードマップに載っていることは JAXA/ISAS等に対するアピールとしても重要.





のべ100日間の飛翔観測に向けて道のりは続きます。引き続きCRCからのご支援をお願いいたします。

実験への参加者を随時募集しています。興味がある方はお声がけください。