

# 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 「LiteBIRD」 開発状況

2022年4月

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

- LiteBIRD計画は、技術のフロントローディングも活用した概念検討を着実に進めてきた。
- 現在、
  - ①キー技術含めた技術的成立性の確認
  - ②開発体制の構築
  - ③パートナー含めた費用見積もり等の各観点で現フェイズで求められる活動の完了に目途がついた。
- 宇宙研として、次フェイズに移行する準備が整ったと判断。以下の観点から速やかにフェイズアップしたい。
  - ① 技術検討の詳細化の必要性  
技術のフロントローディングだけでは限界があり、早期にフェイズアップをして、衛星システムのメーカーによる設計検討や、観測機器の試作・検証を行う必要。
  - ② 開発体制の確立  
仏CNESや高エネルギー加速器研究機構等の参画による開発体制の確立のため、ミッションをリードするJAXAのフェイズアップが極めて重要。

## 目的：宇宙背景放射(CMB)を用いたインフレーションの検証

### 戦略的中型ミッション2号機

人類にとって根源的な知的探求

- ◆ 宇宙誕生の瞬間とは？
- ◆ 宇宙・時空を創るルールブック (究極理論) とは？

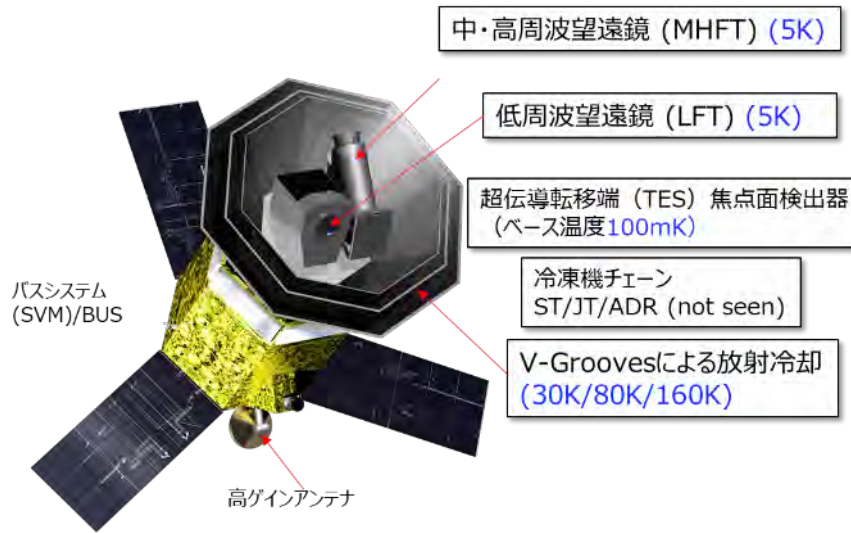
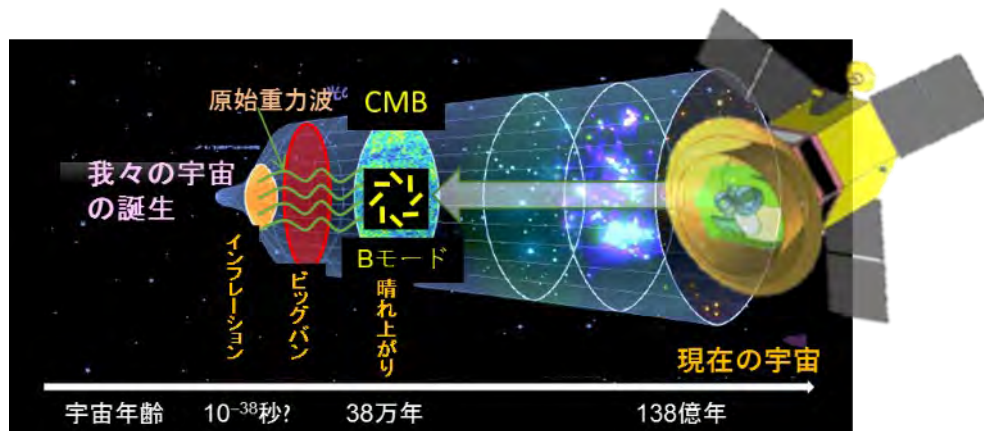
「宇宙のインフレーション仮説」

(佐藤勝彦東京大学名誉教授等が提案) は、熱いビッグバン以前の宇宙に関する最有力仮説。原始重力波の存在を予言。

原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光マップに「指紋」の様な痕跡(Bモードと呼ばれる)を残す。

LiteBIRDはスペースからの観測でのみ可能な「指紋」の全天精査を行い、インフレーション仮説を徹底検証する。

「Bモードの発見は、科学史上最も大きな発見の一つとなる」(レイナー・ワイス、2018年ノーベル物理学賞)



## 2. 経緯



1. 2015年9月25日 戦略的中型宇宙科学ミッション候補としてISAS選考委員会が選定
2. 2016年5月 国際科学審査会 委員長 Lyman Page (プリンストン大学)
3. 2016年8月 ISAS Phase-A1準備審査会
4. 2019年5月 Pre-Phase A2確認会
5. 2019年5月21日 ISASがLiteBIRDを戦略的中型2号機に選定  
→選定を踏まえ、同12月 宇宙基本計画工程表記載
6. 2020年3月 NASA 協同ミッション公募 (MoO : Mission of Opportunity) 落選  
→NASAが「MoOを国際協力ミッションには使わない」という方針変換。  
→NASA提供を予定していた焦点面検出器の代替案を検討開始
7. 2021年10月 世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 「量子場計測システム国際拠点(QUP)」採択
8. 2021年10月 LiteBIRDに関する協定を仏CNES-ISAS及びKEK素核研-ISASと締結 (NASA提供を予定していた検出器検討含む)
9. 2022年3月 KEK素核研-ISAS協定を、KEK素核研-KEK QUP-ISASの三者協定に改訂。

# 3 Phase Aへ向けた検討状況（概要）



- 2020年3月のNASA参加取りやめ後、ISASとして組織的に国内外のパートナー候補と交渉を行い、今般、開発体制の立て直しに目途を付けた。技術検討も進捗したため、宇宙基本計画工程表の達成へ向け、ミッション定義審査(MDR)を受審し、次の開発フェイズ(概念設計フェイズ：Phase A)へ移行できる見通しがついた状況。
- 早期に次フェイズに移行したうえで、ミッション部の実証モデル(DM)、熱構造モデル(STM)試験等を行い、リスクを低減したうえで、メーカ選定及びプロジェクト移行を行っていききたい。

## ■ ミッション定義審査(MDR)における主な確認項目と進捗状況概要（次頁以降に詳細を報告）

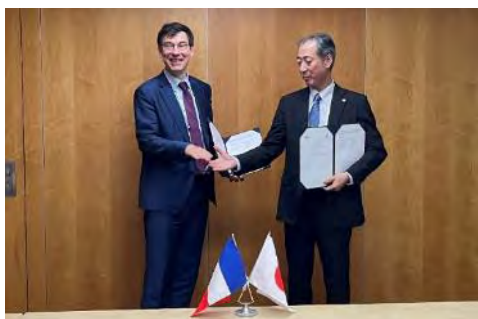
NO	確認項目	進捗状況
1	ミッションの意義・価値	打上げ時点でのサイエンス価値は非常に優れていると評価されており、成功基準も明確。
2	開発体制	国内外のパートナーによる開発体制に目途がついた。 CNES, KEKとは協定を締結。国内外の他の協力機関とも協定を準備中。
3	システムの実現可能性	新規性の高いキー技術含め現段階のシステム実現可能性を確認。 技術のフロントローディング活動(機械式冷凍機等)も活用。
4	スケジュール	2028年度打上げの見通しを確保。
5	総プロジェクト経費	現時点において戦略中型のコストキャップに収まる見通しを確保。
6	リスクおよびリスク対処方針	技術リスク、マネジメントリスクを識別し、リスク対処方針を策定。



# 3.1 開発体制 1 / 3



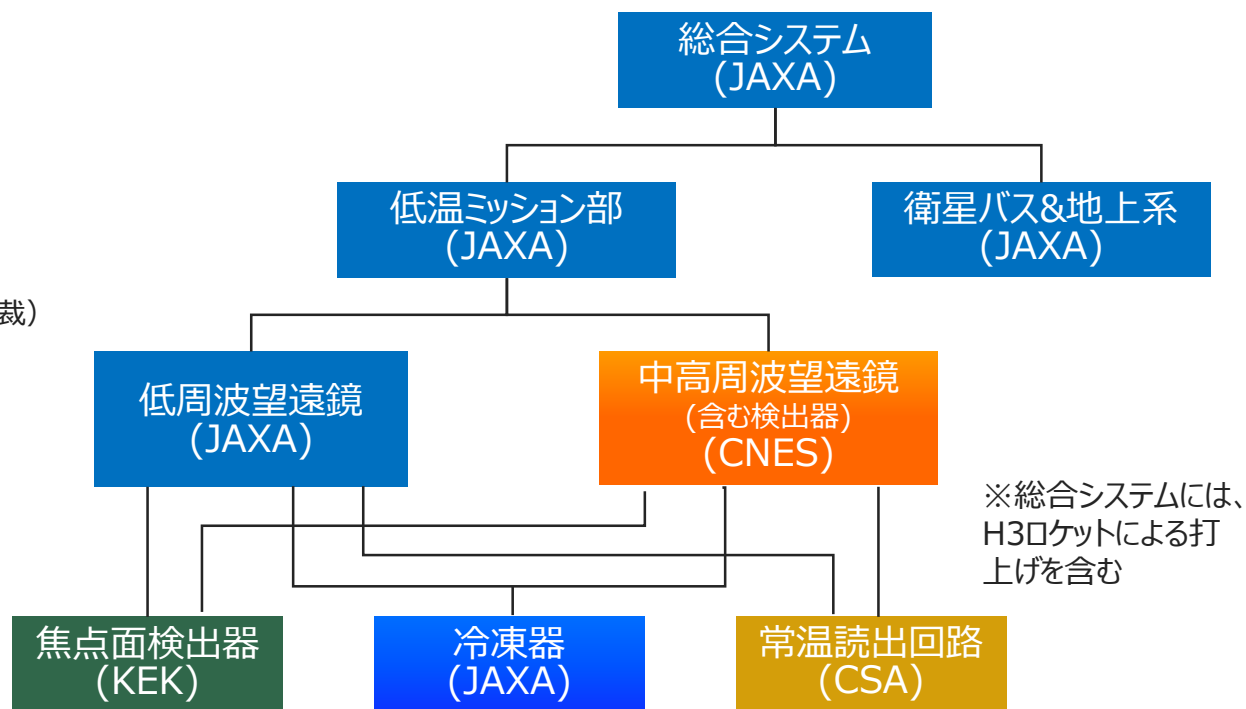
- NASAの参画取りやめを受け、開発体制の見直しを短期間で実施。仏CNES及び高エネルギー加速器研究機構（KEK）がNASAからの提供を想定していた焦点面検出器を分担する予定。
- KEKでは、世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）「量子場計測システム国際拠点（QUP）」が発足し、そのフラッグシップ計画として、LiteBIRDに貢献する体制を構築。
- 2021年10月にCNES-JAXA間の協定、及びKEK-JAXA間の協定を締結（加CSAと協定調整中）。2022年3月に、後者をQUPを含む三者協定に改訂。



2021年10月のLiteBIRDに関するCNESとの協定署名式@IAC（山川理事長-バティスタ総裁）



KEK素核研-KEK QUP-ISASの三者協定 @KEK（國中所長-齊藤所長-羽澄拠点長）



## KEKの新しいWPI拠点 量子場計測システム国際拠点

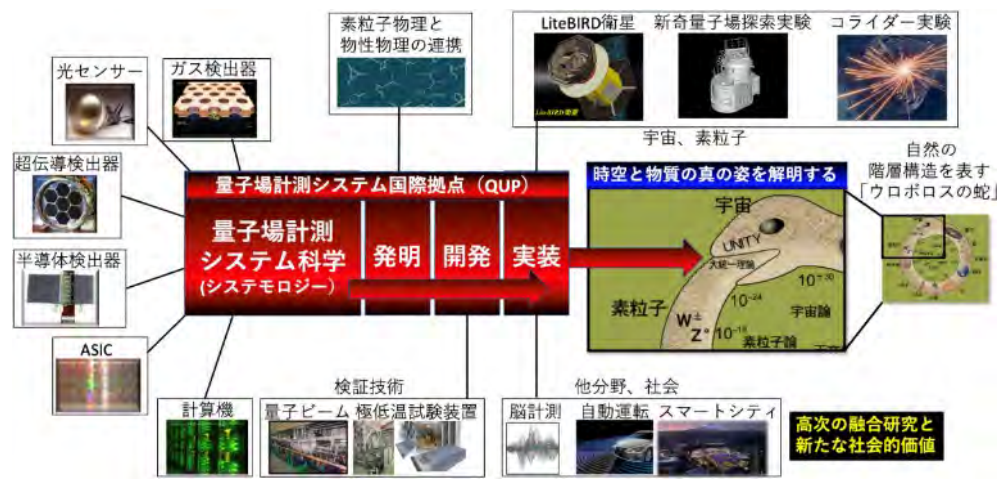
### International Center for Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe and Particles (QUP)

- 文科省 / 日本学術振興会：世界トップレベル研究拠点プログラム
- 2021年度 1 件のみ採択 -> QUPを採択
- 2021年度から10年間、最大70億円
- KEKがホストし、拠点長のトップダウンで進める独立性が高い拠点
- LiteBIRD PI (羽澄) が拠点長
- LiteBIRDは拠点のフラッグシッププロジェクトという位置づけ→焦点面検出器の開発を推進
- カリフォルニア大学バークレー校を「QUPサテライト」として拠点の一部とする手続きが進行中
- KEKが担当する超伝導センサー製作を、サテライトで推進

#### 目標

「量子場」は神羅万象の根源である。本拠点は、

- 宇宙物理、素粒子物理、物性物理、計測科学、システム科学を融合する。
- 融合研究により、量子場を計測する新しいシステムを発明・開発し、宇宙観測や素粒子実験における計測に革新をもたらし、時空と物質の真の姿を解明する。
- 以上の実践から手段の科学として新しい計測学（量子場計測システムロジック）を確立し、さらに、物理学にとどまらない広い分野への応用と社会実装を目指した研究により、高次の融合研究と新たな社会的価値を創出する。



UC Berkeley Satellite

豊田中央研究所サテライト

## 3.2 技術的な成立性



- 主要な技術課題の実現性検討、及びシステム概念検討を実施中。
- 現時点で解決が難しい大きな技術課題はない。今後、段階的に検討の進捗を見極めつつ、現時点で次の開発フェイズ移行の技術的な準備は整うと判断。

検討項目	実施状況
主要技術課題 (新規技術)	<p>低周波望遠鏡の広視野ミリ波冷却アンテナについて、波動解析およびスケールモデルの光学特性評価により、高精度での偏光測定の実現性を確認。検出器、偏光変調器とのインターフェース要求を明確化。※詳細P.11</p> <p>低周波望遠鏡(含む、偏光変調器、検出器)</p> <p>KEKが担当する検出器は、当該技術を有するカリフォルニア大学バークレー校がQUPサテライトとして開発に参加する体制を構築。要素試作を含む概念検討を実施中。※詳細P.12</p> <p>東大IPMUが担当する偏光変調器(PMU)は、準実機サイズのBBMにより、課題であった広帯域光学特性、半波長板の耐環境性を概ね確認。残る低発熱化の評価を実施中。※詳細P.14</p> <p>中高周波望遠鏡</p> <p>CNES主導で実現性検討を2020年4月から2022年9月にかけて実施中。プラック衛星の経験を元に、開発は可能と判断している。現在、概念検討・要素開発と共に、詳細な開発計画の検討も実施中。※詳細P.15</p> <p>ペイロードモジュール冷却構造(含む機械式冷凍機)</p> <p>概念検討において、熱・構造設計の成立性を確認。機械式冷凍機は、技術のフロントローディングにより先行技術検討を行い、2K-JT, 4K-JT, 2STの国産採用で目途を得た。※詳細P.16,17</p>
システム設計	システムメーカーとのシステム検討を実施し成立性を確認。 ※詳細P.18 現在、追加のシステム検討を実施し、開発検証計画の詳細化、コスト精査等を実施中。



# 3.2 技術的な成立性・ミッション部開発フロー 1/2



Phase A以前の研究開発 (～FY2022)

現在 ▼

Phase A以降の開発

## 低周波望遠鏡(LFT)

望遠鏡全体,  
アンテナ(JAXA)

アンテナ光学特性解析  
スケールモデル試験

偏光変調器  
(東大IPMU)

半波長板、磁気軸受等  
要素試作

検出器(KEK)

NASA不参加を受けた体制再構築、  
量子場計測システム国際拠点立ち上げ

LFT概念設計  
要素試作

準実機サイズBBM  
試作試験

検出器要素試作  
放射線影響評価

実証モデル  
(DM)  
(実機サイズ)

## ペイロードモジュール (PLM)

PLM概念検討  
(断熱放射シールド+機械  
式冷凍機による熱構造成立  
性評価)

PLM概念設計、材料評価  
(インタフェース設計含む)

要素試作  
(断熱放射シールド  
スケールモデル試験等)

熱構造モデル  
(STM)  
(実機サイズ)

## 機械式冷凍機

技術のフロント  
ローディングの活用

2K-JTシステムの総合実証

冷凍機の長寿命化、低擾乱化

### ①新規性の高いキー技術の実現性確認

- 物理光学シミュレーション、1/4スケールモデル試験により、高精度偏光角測定の実現性の**目処を得た**。インタフェース設計を含む概念設計、要素試作による製造性の確認等を進めている。(JAXA)
- UCバークレーの技術に基づく検出器の要素試作とノイズ評価を行い、所定の雑音性能を実現できる**見通しを得た**。課題であった宇宙線ノイズによる観測性能への影響の低減方策の**目処を得た**。(KEK)
- 偏光変調器について、半波長板等の要素試作や準実機サイズのBBM試作試験を進め、課題であった広帯域光学特性、耐環境性、低発熱化の**目処を得た**。(東大IPMU)

### ②熱・構造要求を両立するPLM冷却構造の実現性確認

- 数学モデルによる熱・構造解析により要求達成の**目処を得た**。
- 現在実施中の断熱放射シールド等の要素試作・試験により、MDRまでに技術成熟度(TRL)を必要なレベルに向上できる見込み。

### ③LFT DMによる総合的な観測性能の実証

- 実機サイズのLFT実証モデル(DM)を開発し、KEKに整備する冷却試験設備を用いて総合的な観測性能の実証を行う。
- 本モデルの試作試験の結果に基づき、EM設計へのフィードバックを行う。

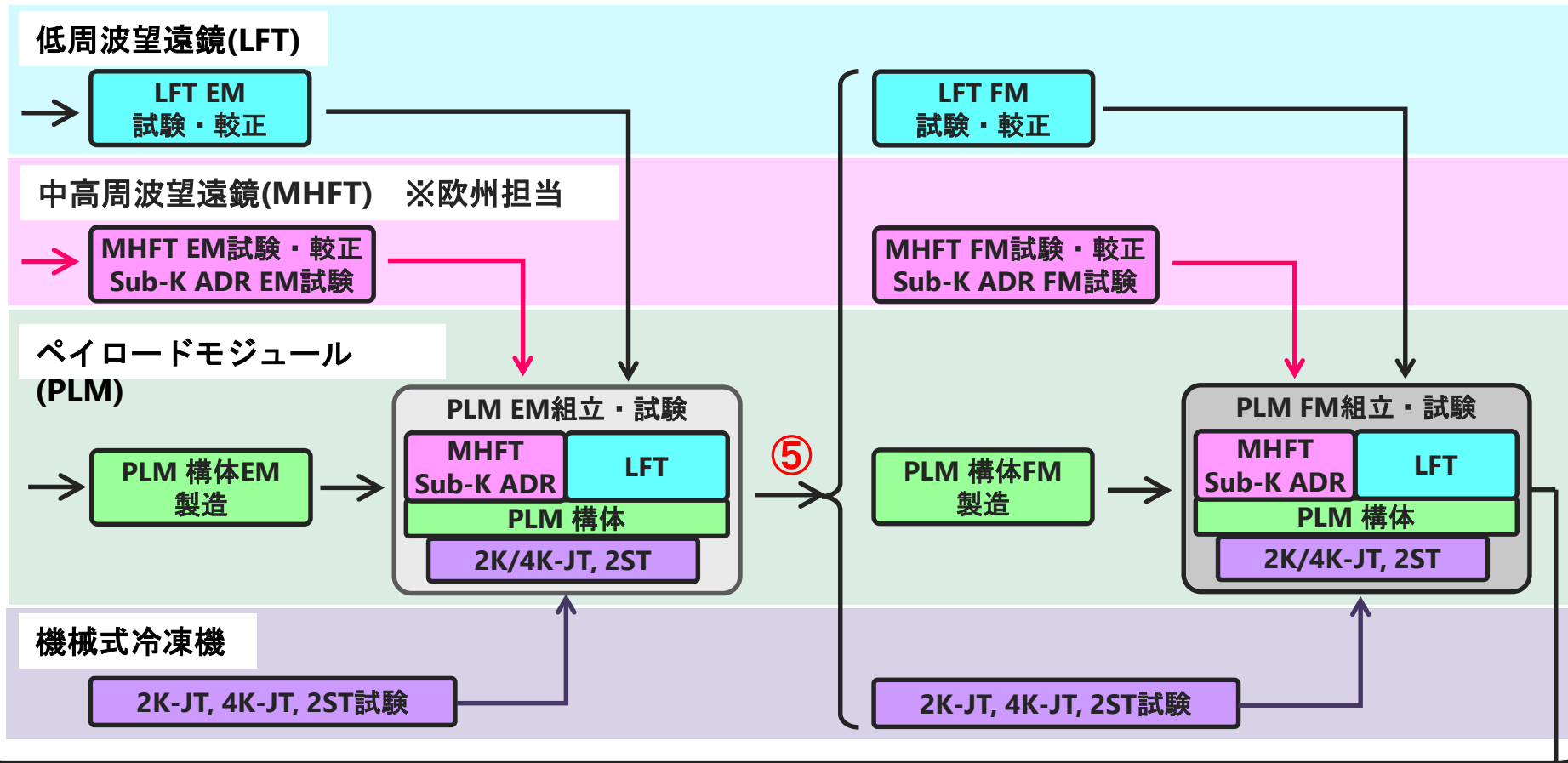
### ④PLM STMによる構造・冷却性能の実証

- PLM熱構造モデル(STM)による機械環境・冷却性能試験による実証を行う。

# 3.2 技術的な成立性・ミッション部開発フロー 2/2



Phase A以降の開発 (ミッション部)



## ⑤PLM全系における設計検証

- PLM EMIによる機械環境・冷却性能・低温アライメント・雑音試験等により、PLM全系としての設計妥当性の検証を行う。
- PLM形態により初めて実機検証が可能になる、電磁干渉や冷凍機擾乱による雑音評価を含め、観測性能要求を達成できることを確認する。
- PLM EM試験の結果に基づき、FM設計を確定する。また、FM試験の手法・手順を確立する。

バス部とのインテグレーションののち、衛星システムPFTへ



# 3.2 技術的な成立性（低周波望遠鏡）



## 開発方針

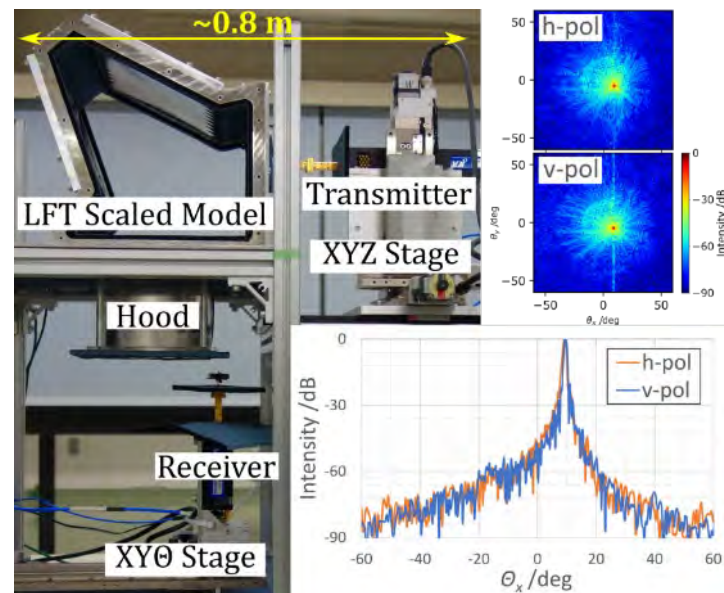
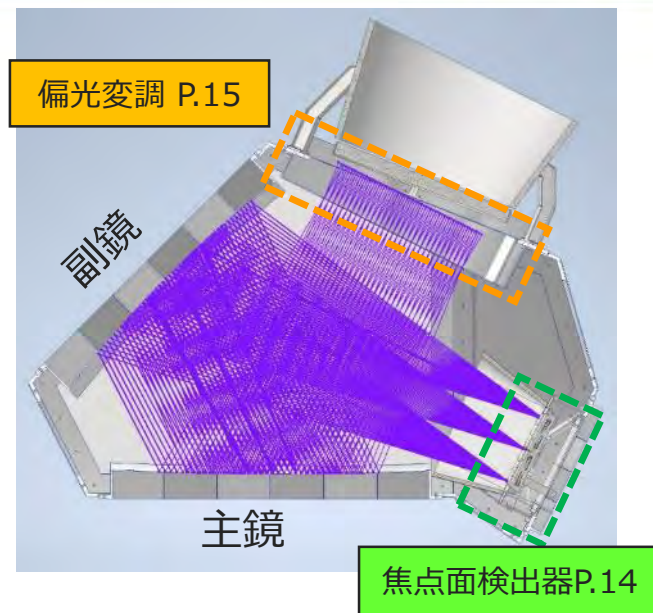
低周波望遠鏡(LFT)は、JAXAがアンテナおよび全体インテグレーション、KEKが焦点面検出器、東大IPMUが偏光変調器(PMU)を担当する体制で開発を進めている。

## キー技術の開発状況

LFTのキー技術（偏光変調器と焦点面センサは後述）の主な進捗状況は以下のとおり。

- LFTの広視野ミリ波冷却アンテナの光学性能については、物理光学シミュレーションにより解析を進めるとともに、1/4スケールモデル（右下図）をやはりスケールした波長で計測することで、要求性能達成の見込みが得られている。
- LFT全体をアルミ製として、相似収縮により熱歪みの影響を最小に押さえる方針としている。熱歪み解析結果を光学シミュレーションに取り込むことで、影響を評価し、要求に収まる目処を得ている。
- 極低温部の軽量化の一貫として、鏡面裏のリブ構造の最適化を要素試作によりMDRまでに実施予定。

次のステップとして、実証モデル（DM）を製作し、極低温試験で特性評価を行う予定。



LFT 1/4スケールモデルによる光学性能試験



# 3.2 技術的な成立性（焦点面検出器）

## 開発体制

焦点面検出器は、KEK QUPで米国の技術を導入して開発する体制を構築した。

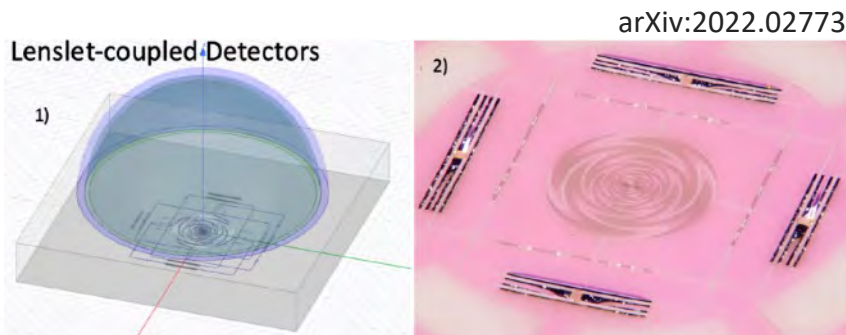
## キー技術の開発状況

以下のような主要技術項目について開発が進んでいる

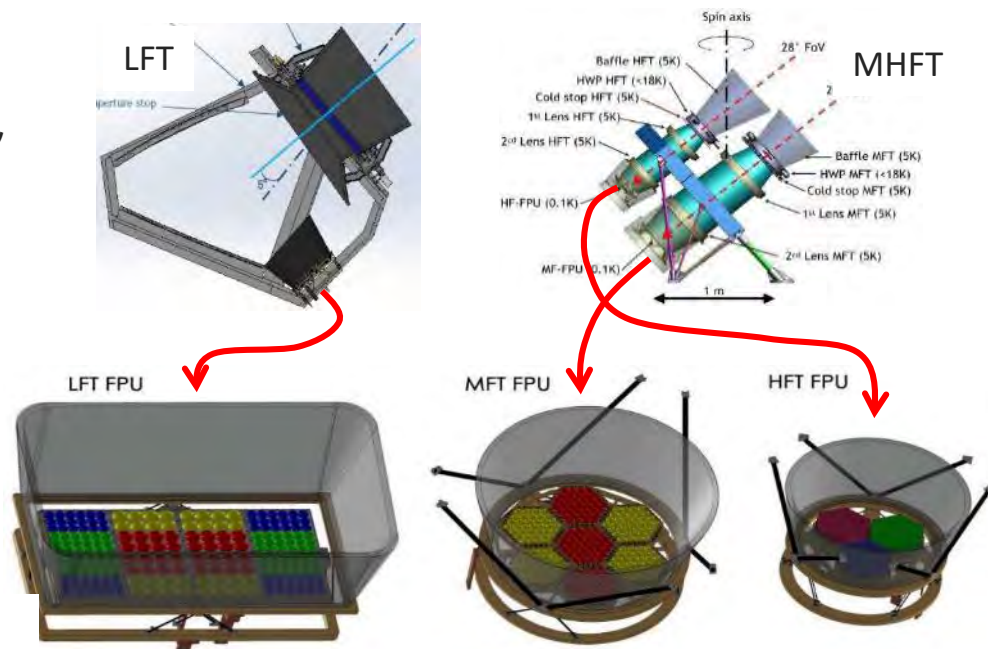
- TES検出器について、低ノイズ性能の要求を満たす目処を得た。また、3種の望遠鏡に対応したTES arrayの試作と評価を進めている。
- 宇宙線ノイズ対策として、Pd層を追加したTESを開発し、その特性評価を進めている。
- LFT用光学素子であるレンズレットを試作し、ビームパターンの評価を進めている。

今後、BBMを開発し、低周波望遠鏡の実証モデル（DM）に組み込んで、望遠鏡システムとしての性能試験・特性評価を実施する。

## 焦点面検出器の概要

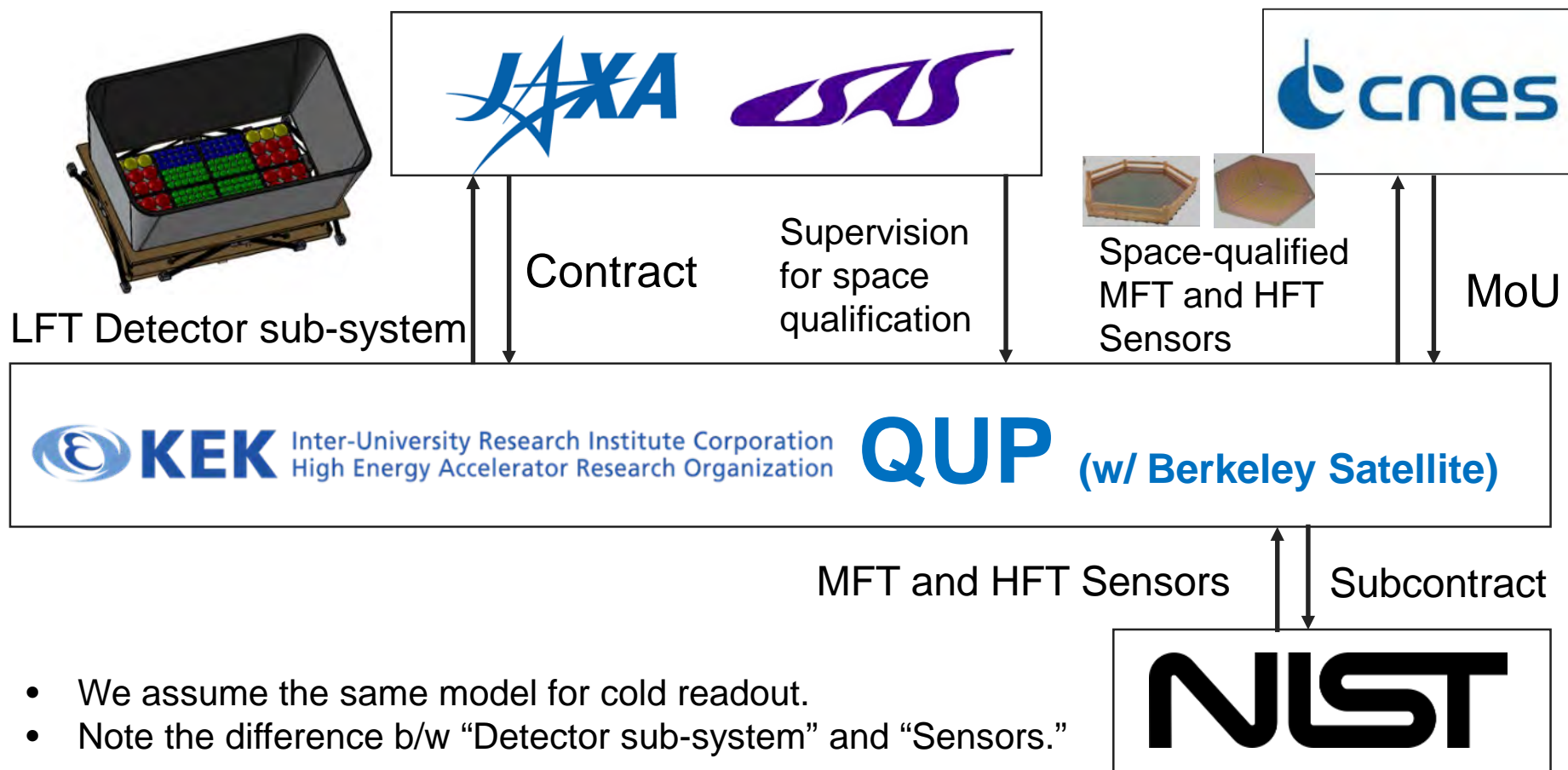


➤ レンズレットと検出素子(左)。SinuousアンテナとTES(右)。





# 焦点面検出器に係る開発体制【参考】



- We assume the same model for cold readout.
- Note the difference b/w “Detector sub-system” and “Sensors.”

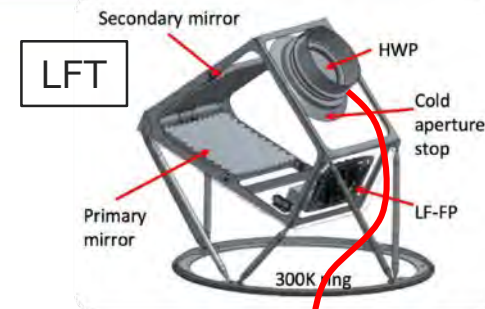


# 3.2 技術的な成立性（偏光変調器）

## キー技術の開発状況

LFT用の偏光変調器は、東大IPMUで開発が進んでいる。  
偏光変調器のキー技術とその開発状況は、以下の通り。

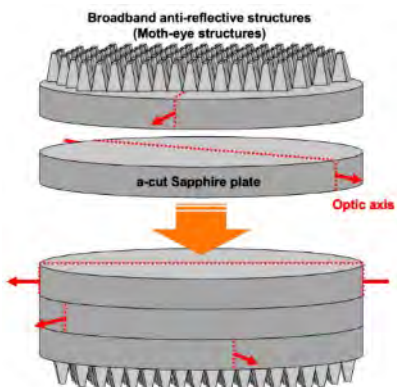
- 半波長板は、直径約500mmのサファイア板を複数枚積層する必要があり、最外層表面には反射防止加工を施す必要がある。要求される反射防止構造（左下図）の製作方法、サファイア板の接着方法と温度サイクル耐性の開発に目処をつけることができた。
- 偏光変調器は、極低温で連続回転する必要があり、低発熱が求められる。軽量化および超伝導磁気ベアリングの磁場の一様性改善等により、発熱低減を進めている。
- 回転角計測や駆動機構、半波長板保持機構の評価のため、準実機サイズのBBMを製作し試験を進めている（右下図）。



偏光変調器

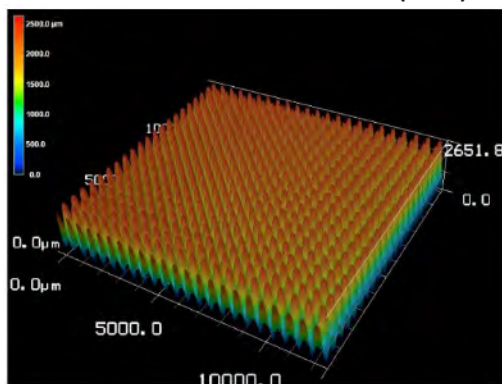


K. Komatsu et al. SPIE (2020)



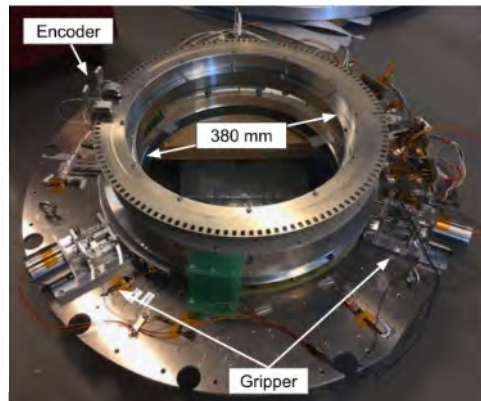
半波長板の構成

R. Takaku et al. LTD (2021)

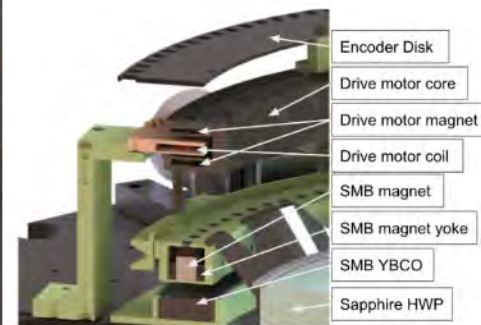


表面の反射防止加工

Y. Sakurai et al. SPIE (2020)



開発中の準実機サイズBBM



# 3.2 技術的な成立性 (中高周波望遠鏡, sub-K ADR)

中高周波望遠鏡(MHFT)とサブケルビン断熱消磁冷凍器(sub-K ADR)は、フランス宇宙機関(CNES)リードにより、プラंक衛星の経験をもとに、欧州で概念検討・要素開発が進行中。本年9月のPhase-A Study終了までに、成立解の見込みを得る予定。

## 光学系

レンズのプロトタイプを試作および低温特性試験が進行中。

## 熱構造

構造モデルによる解析、熱モデルをPLMモデルに組み込んでの熱解析により、成立解の見込みを得た。

## 偏光変調器

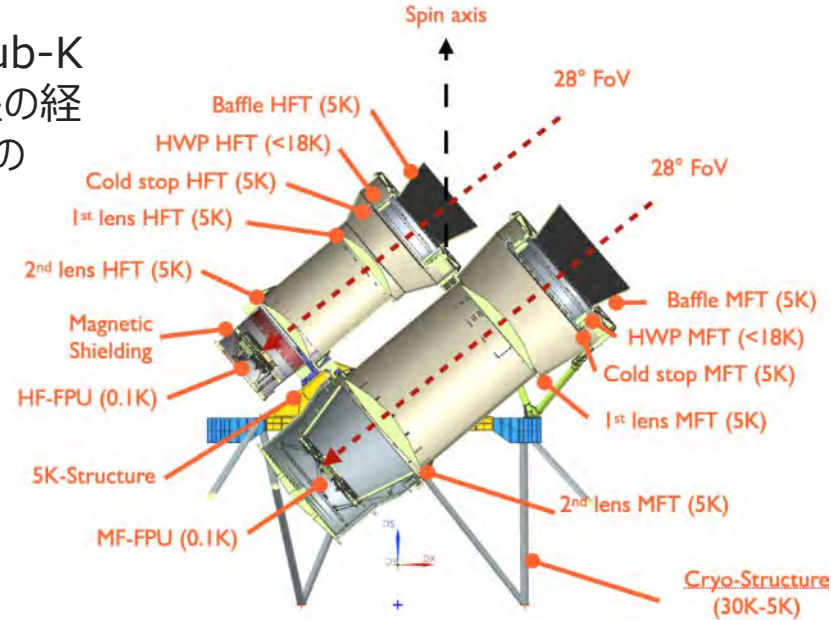
メーカー(伊)での概念検討、大口径の半波長板の開発が進行中。

## 焦点面検出器

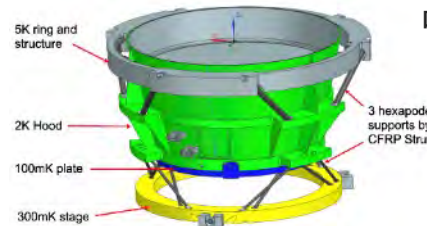
熱構造検討および構造設計のトレードオフ検討が進行中。

## sub-K ADR

プロトタイプ連続運転試験 (@350mK) を実施。Thermal linkの概念設計が進行中。また、2K-JTとsubK ADRの間の熱・機械インタフェース調整を進めている。



中高周波望遠鏡 (MHFT)

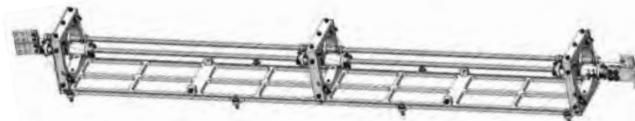


焦点面検出器 (MHFT)

## サブケルビン断熱消磁冷凍機



4 hours cycles  
2.7 K interface



sub Kelvin Thermal link

## 3.2 技術的な成立性（パイロードモジュール）

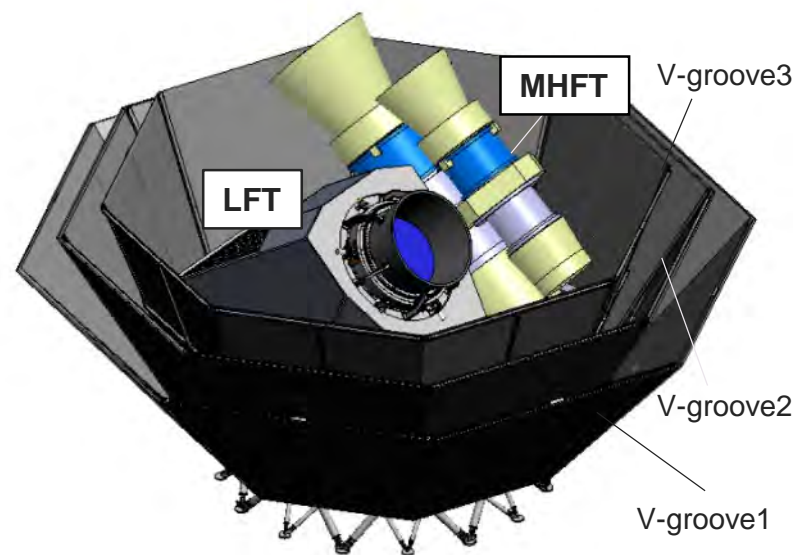


### 開発方針

LFT, MHFTの両望遠鏡を低温(5K)に冷却するため、機械式冷凍機と放射断熱シールド(V-groove)を組み合わせによる、無寒剤冷却システムを採用する。

### キー技術の開発状況

- パイロードモジュールでのキー技術は、低温ミッション部の熱構造設計になる。特に、打上げ環境に耐えるための剛性要求と、機械式冷凍機の熱負荷要求の両方を満たすことが必要。
- この課題に対し、30Kインタフェースプレートの導入、LFT/MHFTの軽量化、断熱サポートトラスの最適化、放射断熱シールド(V-groove)の最適化等の導入により、冷凍機の熱負荷に対するマージンを確保しつつ、剛性要求を満たす設計解が得られている。
- 放射断熱シールドV-grooveは、我が国では初めての技術であり、設計技術を確立するため、スケールモデル試験による特性取得を進めている。
- 次のステップとして、熱構造モデル(STM、実サイズ)を開発し、熱および構造特性の確認を進める予定である。



パイロードモジュールのうち、低温ミッション部（V-groove含む）



# 3.2 技術的な成立性（機械式冷凍機）



## 開発方針

機械式冷凍機については、ASTRO-H等での技術へリレーを基盤として、技術のフロントローディング(FL)の成果をLiteBIRDに最大限に活用する。

## 技術のFLでの開発項目

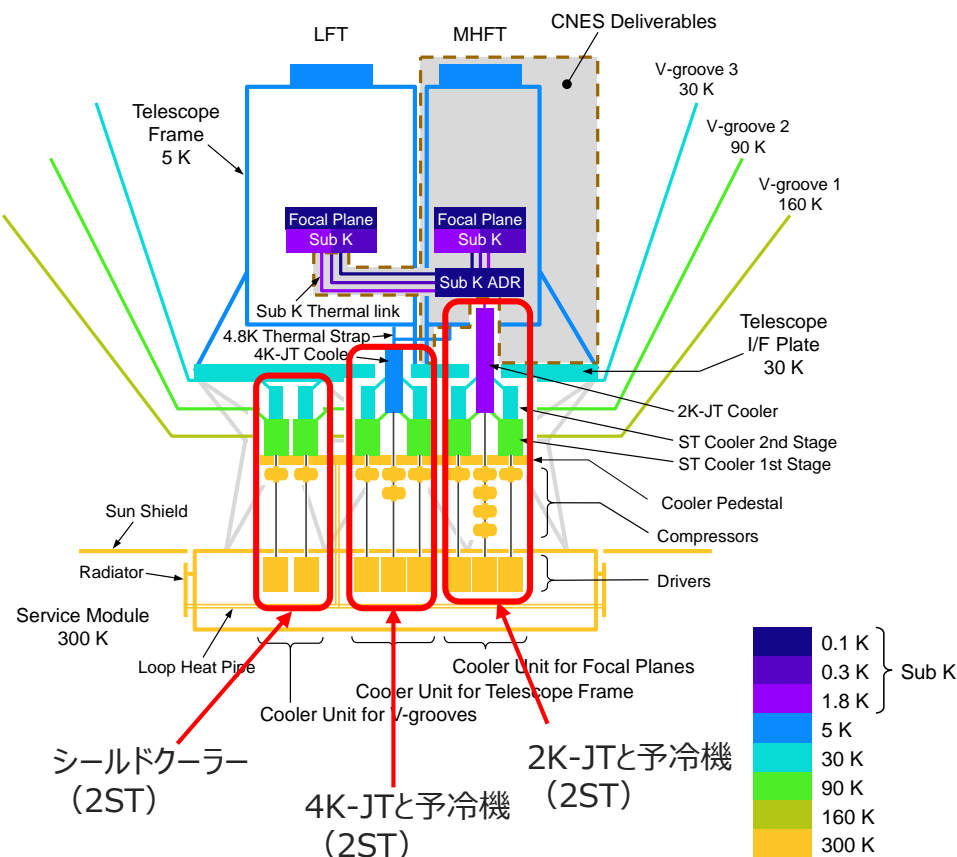
- 2ST  
板バネ化による信頼性向上および低振動化
- 冷凍機ドライバ  
コンプレッサーの能動制御による擾乱抑制
- 2K-JT冷凍機システム  
2K-JTの長寿命化と改良型ドライバを組み合わせた総合実証

## 検討状況

- 機械式冷凍機は、技術のフロントローディングにより先行技術検討を行い、2K-JT, 4K-JT, 2STの国産採用で目途を得た。
- 次フェーズにおいて、LiteBIRDのSTM試験に、技術のFLで開発した冷凍機を登場させ、パイロードモジュール全体としての冷却性能の検証を実施する。

### LiteBIRDで使用する機械式冷凍機

- 2段スターリング冷凍機（2ST）
- 4Kジュールトムソン冷凍機（4K-JT）
- 2Kジュールトムソン冷凍機（2K-JT）



# 3.2 技術的な成立性（衛星システム・バス）



## 概要と検討状況

- ミッション要求より、ラグランジュ点L2からスピンとプリセッションを組み合わせた全天観測を、3年にわたり行う。
- ミッション系からの要求がクリティカルな構造系、熱系、姿勢系、通信系などを中心に概念検討を実施。MDRまでに、衛星システム全体としての成立解が得られる見通しが立っている。
- 今後、衛星システム及びバス部の開発に係る技術課題の抽出を行い、これを踏まえた開発モデル、地上検証計画のベースライン案を策定する。特に、微小擾乱や電磁干渉については、コンポーネントからシステムレベルに至る段階的な検証計画案を具体化する。



### 主要諸元

- 打上げロケット：H3ロケット
- 質量：2.6 トン、電力 3 kW
- 観測期間：3年
- 軌道：太陽-地球 L2、リサージュ軌道
- 極低温望遠鏡：広視野~20度、温度5K

### L2での全天スキャン方式

