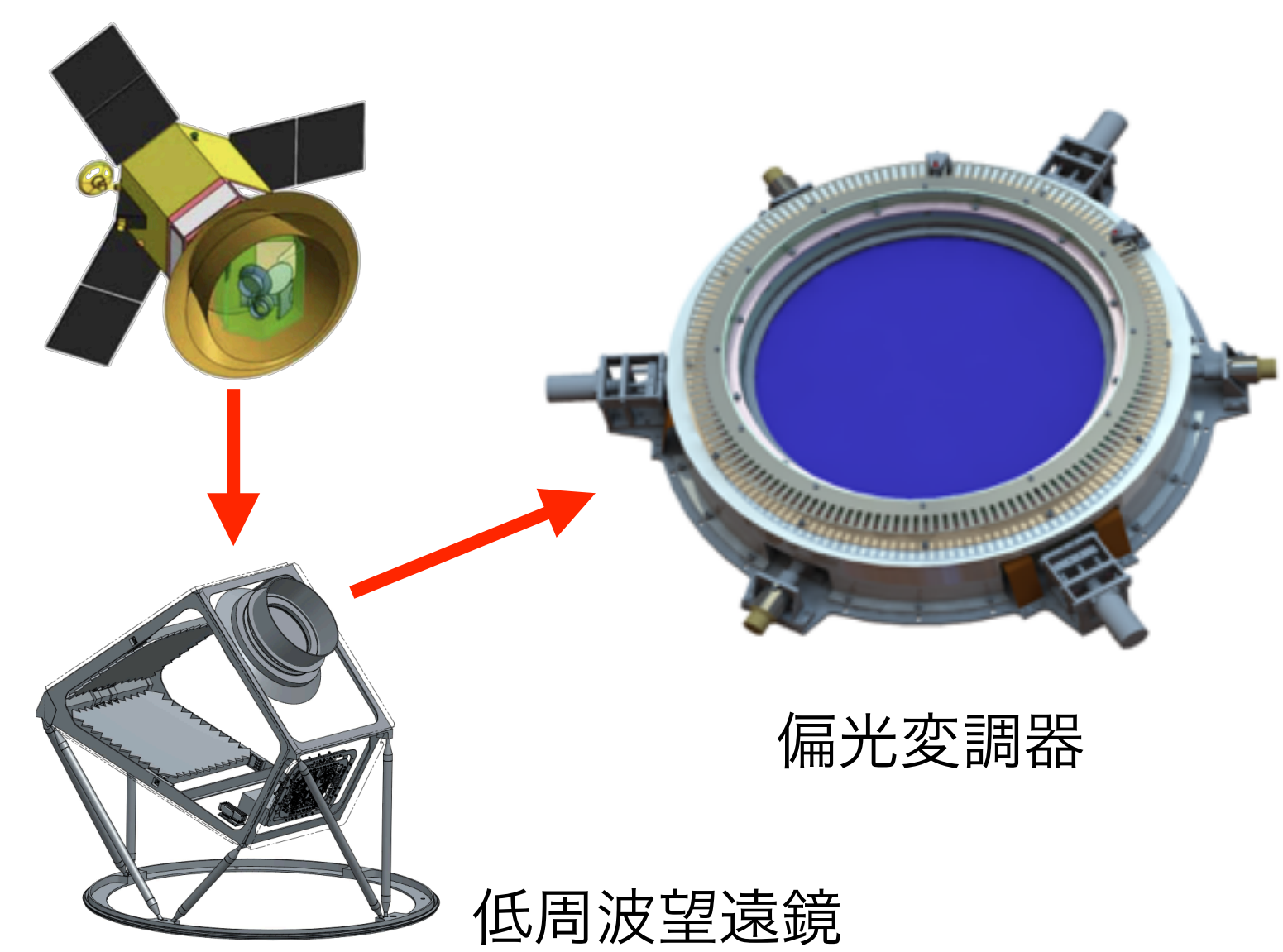


Introduction

- LiteBIRDは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) のB-mode偏光成分を3年間の全天精密観測を行い、**宇宙のインフレーション**を探索する次世代型衛星計画である。
- 偏光変調器は、微弱なB-mode信号の精密測定を実現するための最重要開発機器の一つである。
- 本発表では、日本グループが開発担当のLiteBIRD低周波望遠鏡に搭載を検討している**サファイア半波長板連続回転式偏光変調器**の開発状況を紹介する。



偏光変調器：Polarization Modulator Unit

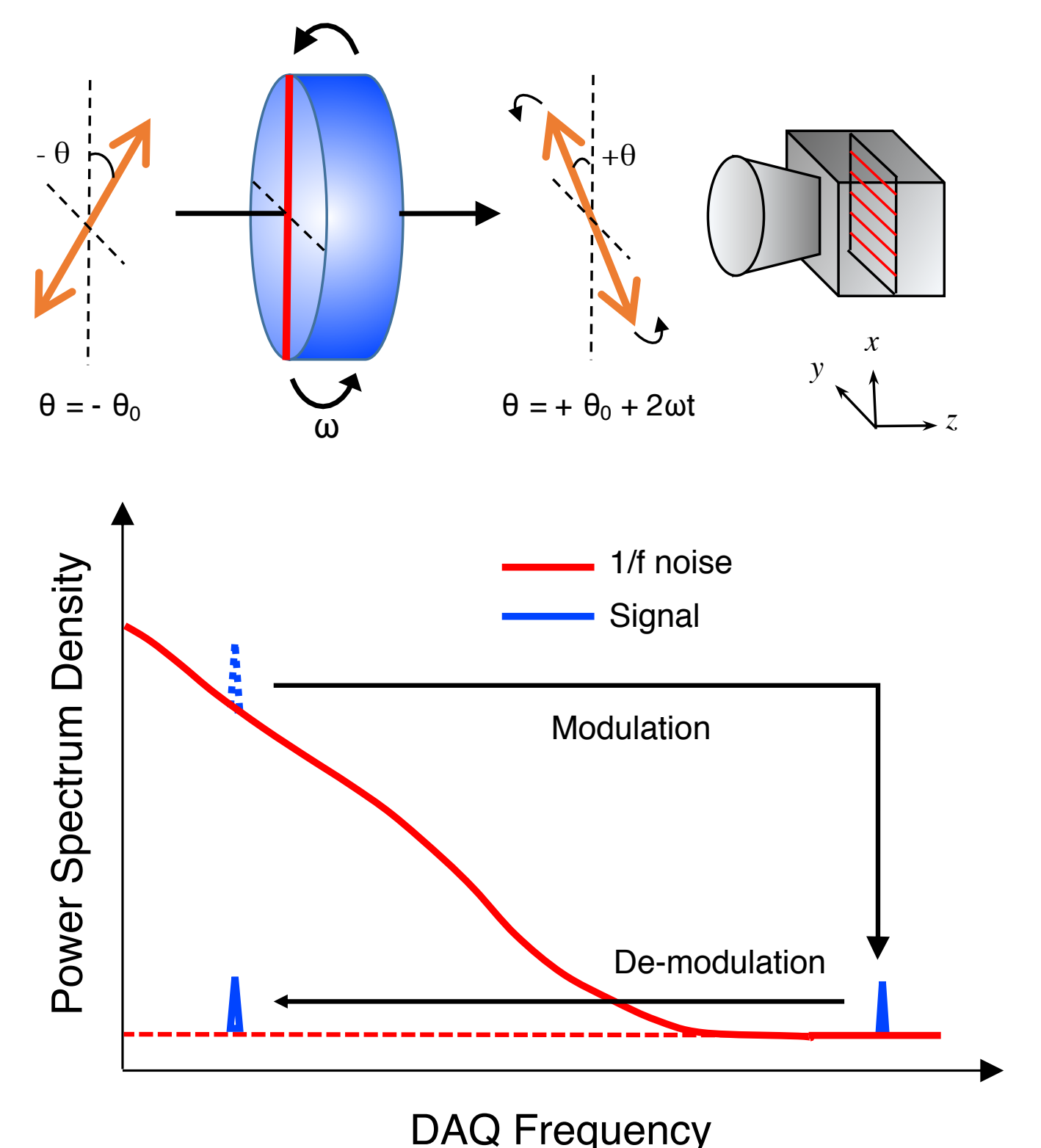
偏光変調器 = 連続回転する半波長板により入射直線偏波に回転・変調を付加する装置。

- ・変調によって信号帯域をアップコンバート⇒ **1/f (低周波)ノイズを大幅に低減**
 - ・信号直線偏波を回転させることで1検出器で偏光を再構成 ⇒ **検出器の差分起因の系統誤差を消去**
- 要求達成のためには**広帯域半波長板**と**低発熱回転機構**の開発が鍵である。

現状では、システムとしてTRL 4 (ISO準拠) を達成、コンポ毎は半波長版：TRL 4、回転機構：TRL 5

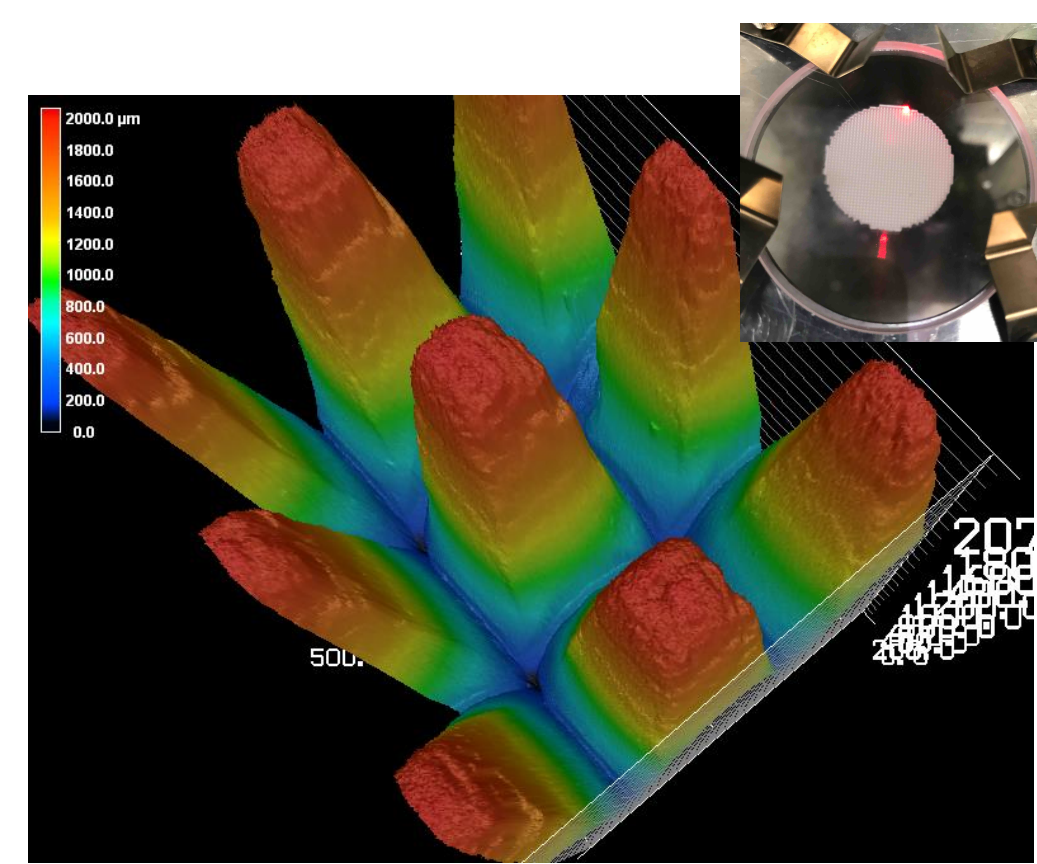
直径	透過率	偏光変調効率	半波長板温度	排熱	回転速度	寿命
$\Phi \geq 450$ [mm]	> 98% 帯域：34 ~ 161 [GHz]	> 98% 帯域：34 ~ 161 [GHz]	< 20 [K]	< 4.0 [mW]	91 [RPM]	> 3年

注：低周波望遠鏡用偏光変調器の代表的要求値

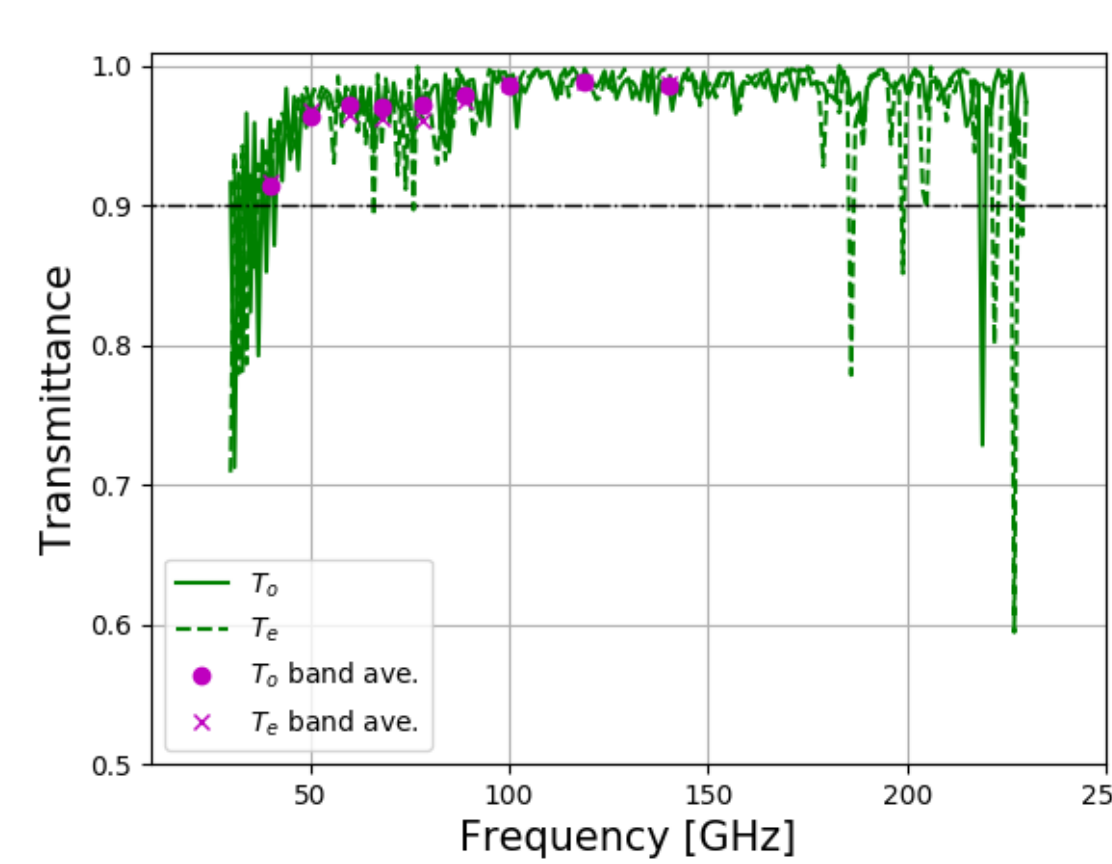


広帯域反射防止構造

- ✓ レーザー加工によりサファイア半波長板表面にモスアイ（蛾の目）構造を施す反射防止構造の開発を進めている。（サファイアは表面処理なしでは約50%の反射率）
- ✓ 34-161GHzと広帯域のため、狭いピッチ幅と高いアスペクト比(1:5)を同時に実現する高い加工技術が求められる。
- ✓ 小径サイズ $\phi=100\text{mm}$ で実現性を検証済み。
- ✓ **片面加工時間を約3年→約3ヶ月と大幅に改善**
- ✓ 今後は実機サイズ $\phi\sim 400\text{mm}$ の製造と低温測定を行う予定である。使用するレーザー加工機の最適化も進行中：3~100W、IR・UV・CW



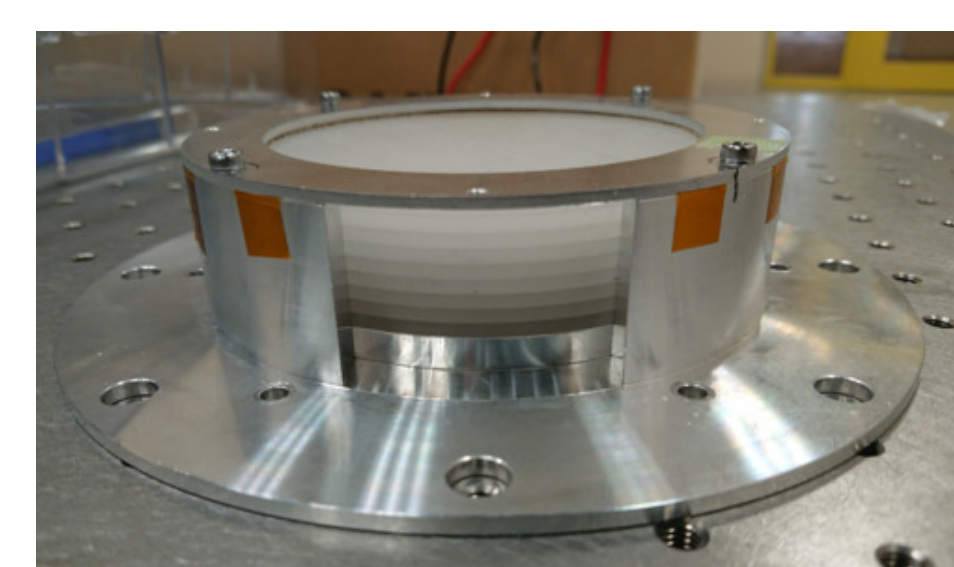
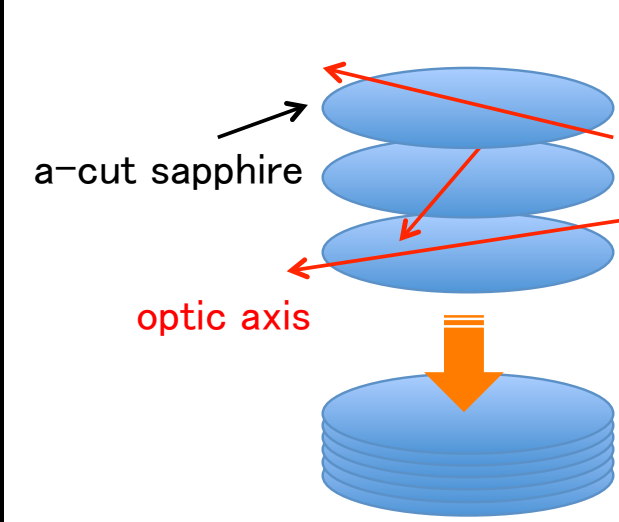
実際に加工したモスアイ構造



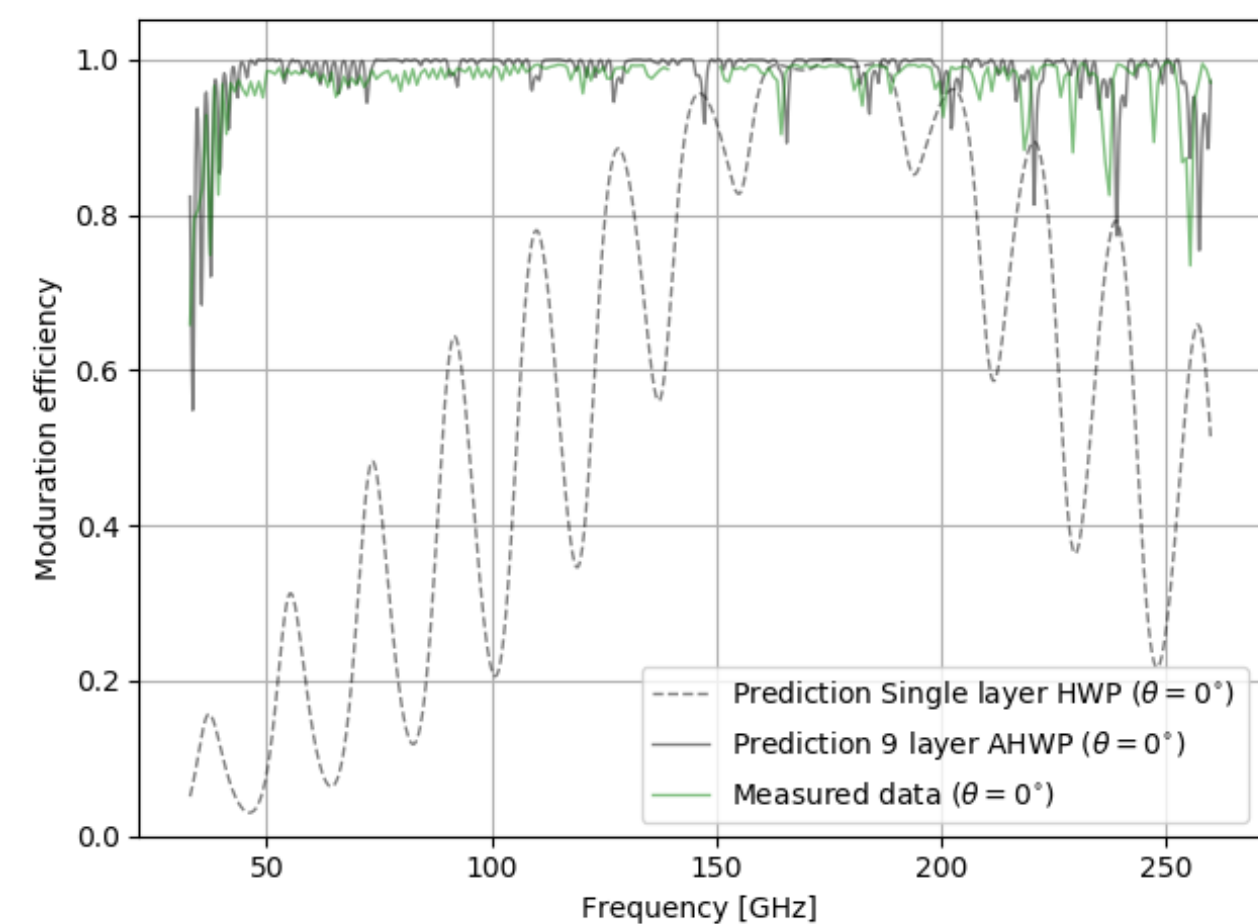
加工サンプルの透過率 (シミュレーション)

広帯域偏光変調効率

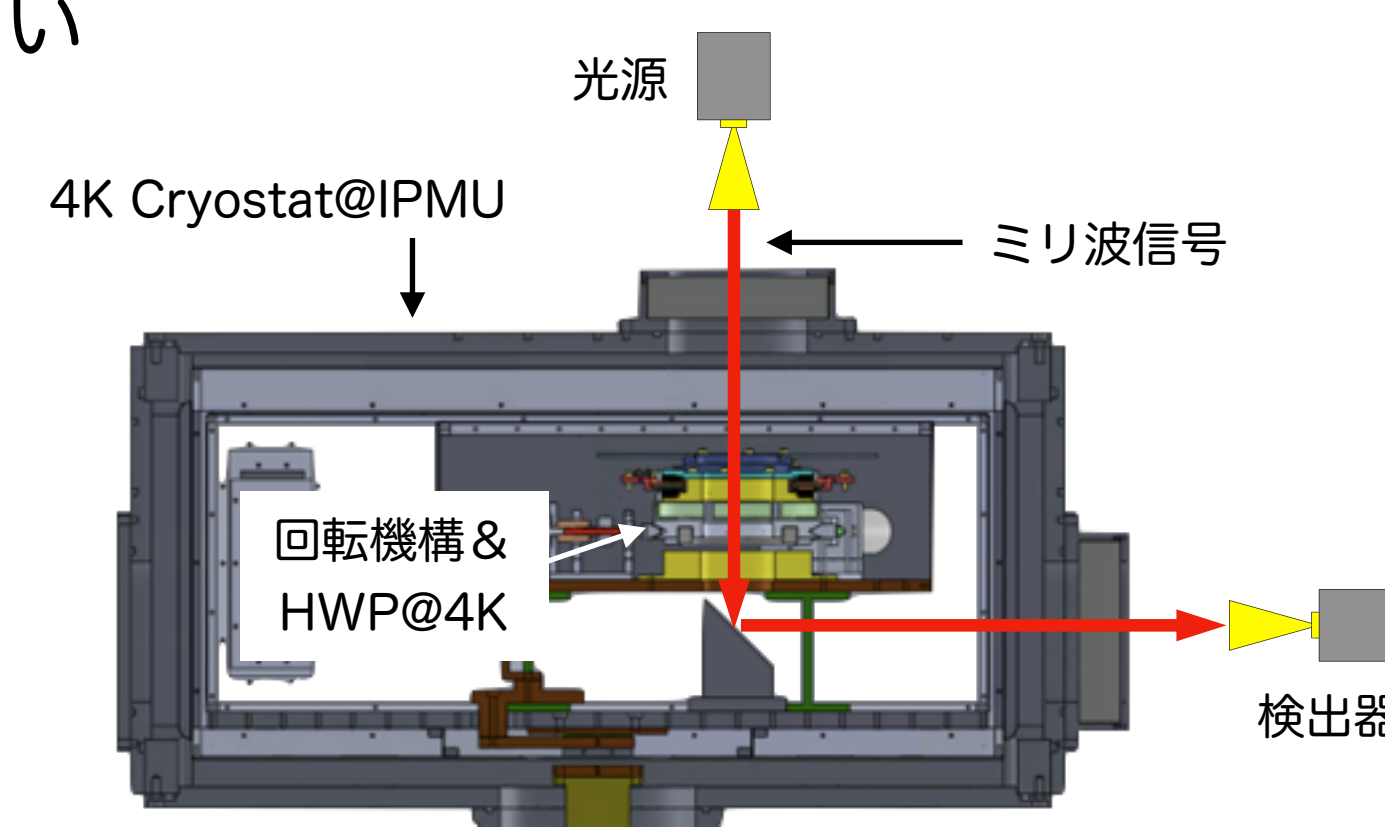
- ✓ サファイアは1枚では厚みに応じた単一周波数にのみ高い偏光変調効率を持つ。
- ✓ サファイアを積層した多層型半波長板によって広帯域化を実現する。
- ✓ **小型サイズ $\phi=100\text{mm}$ で実現性を検証済み。**
- ✓ 今後は極低温連続回転機構と組み合わせた低温での測定と実機サイズでの検証を行っていく予定である。



9層小型サンプル



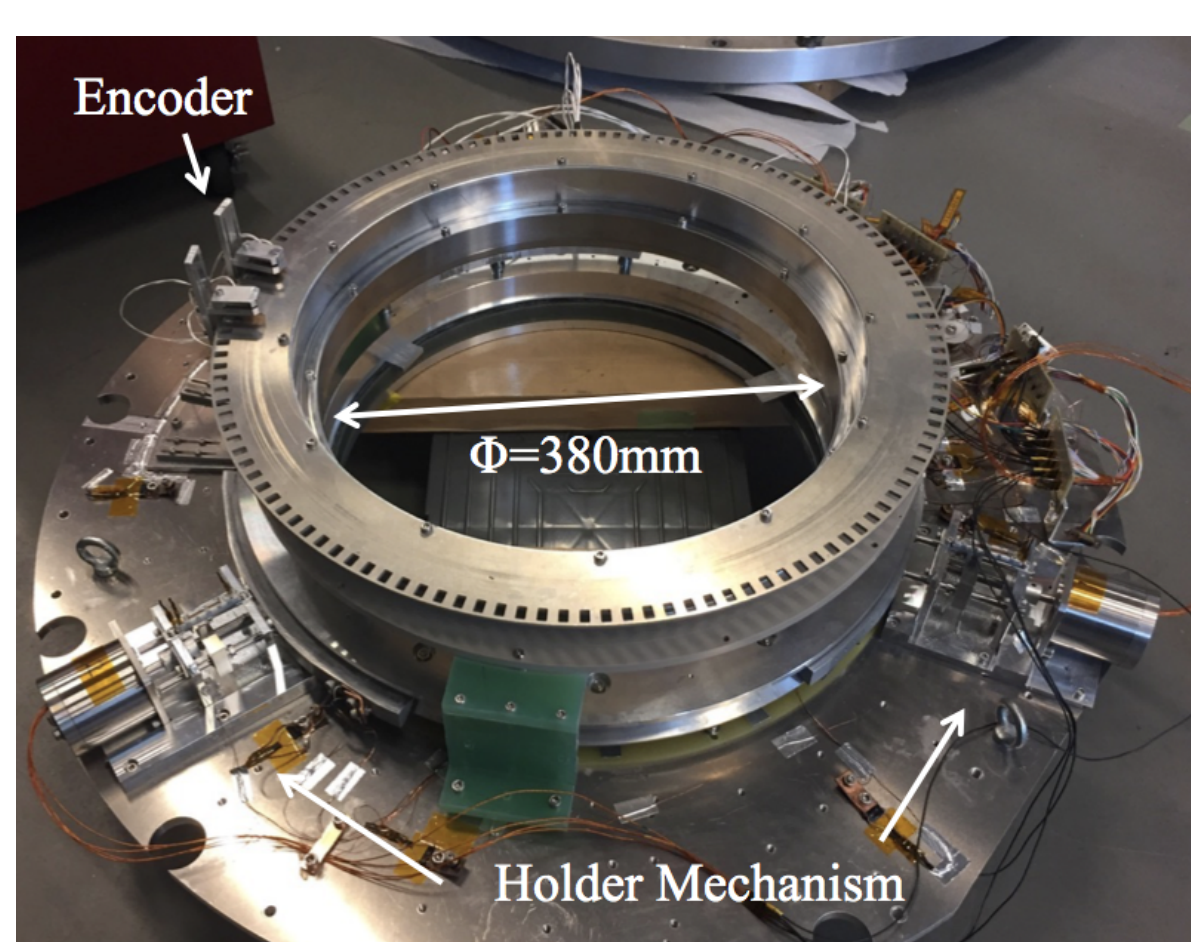
9層小型サンプルの測定結果



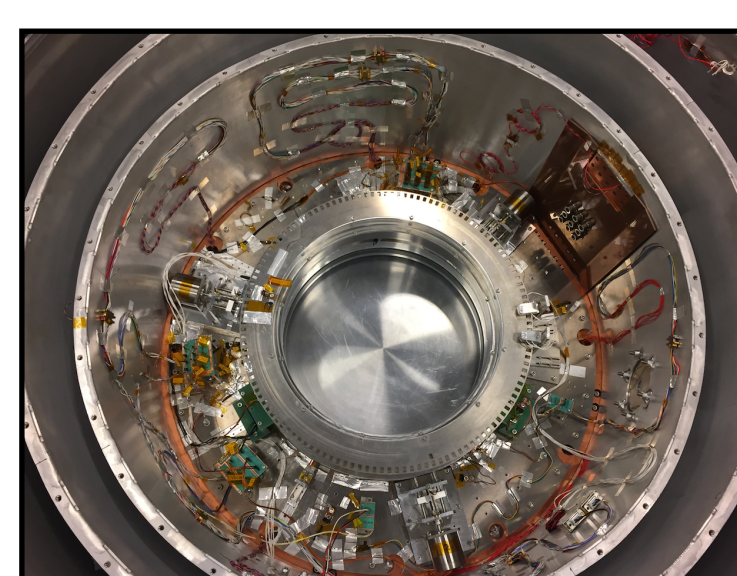
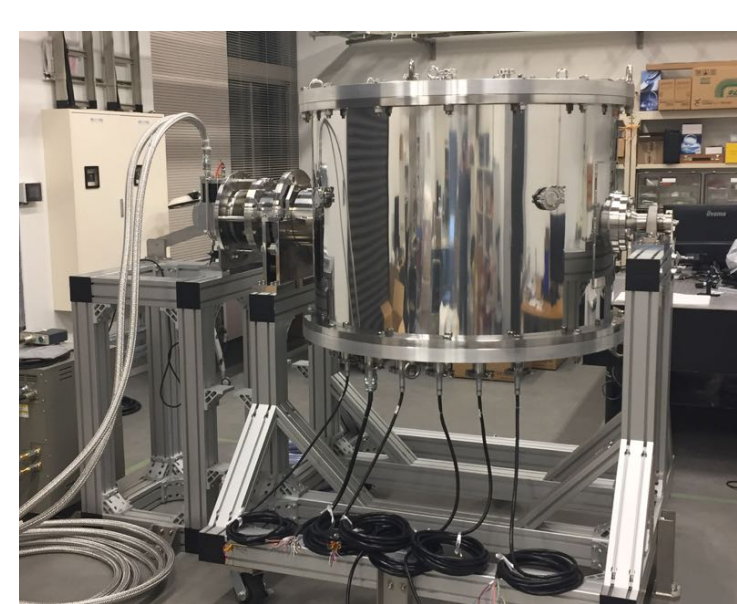
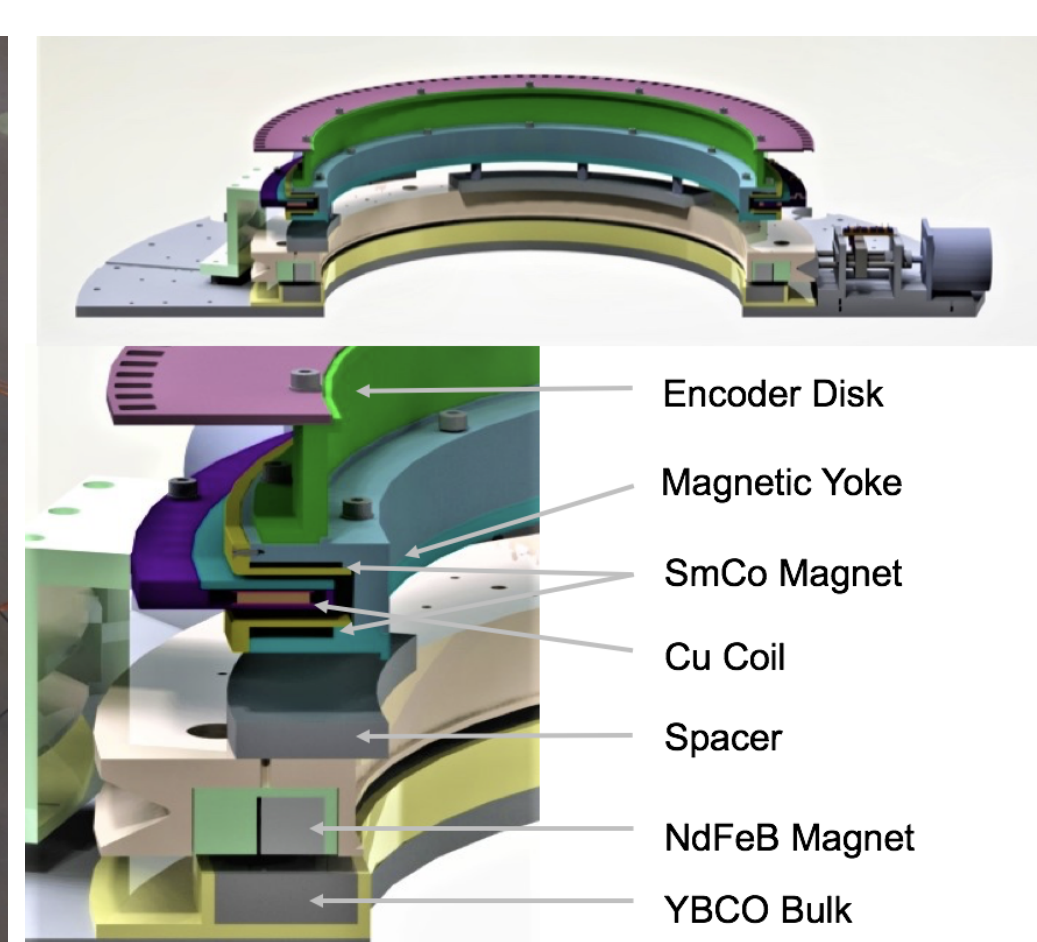
極低温光学測定系案(小型)

極低温連続回転機構

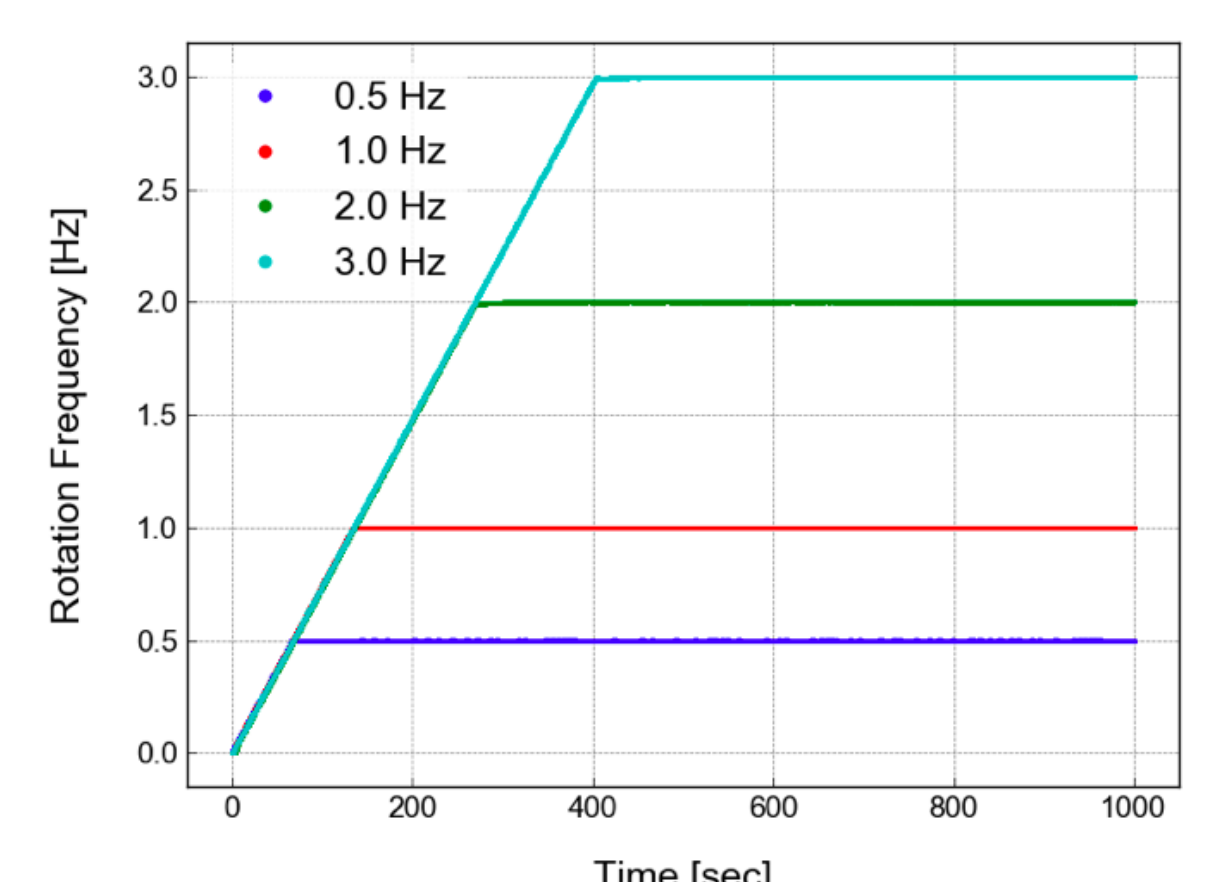
- ✓ 半波長板温度 < 20 K かつ 排熱 < 4 mW での3年間の連続回転が要求。
- ✓ 低発熱かつ摩耗のない非接触型低温回転機構のBBMを設計・製造した。
- 超電導磁気軸受：非接触浮上式回転軸受、リング型永久磁石+YBCO型固定子
- 非接触駆動機構：24極18相同期モーター、回転子に永久磁石+磁気コア、固定子に銅コイル
- 低温保持機構：室温→低温まで回転子を保持、低温ステッピングモーター+保持アーム
- 光学式エンコーダー：回転中のサファイアの光軸位置を測定、赤外LED+SiPD



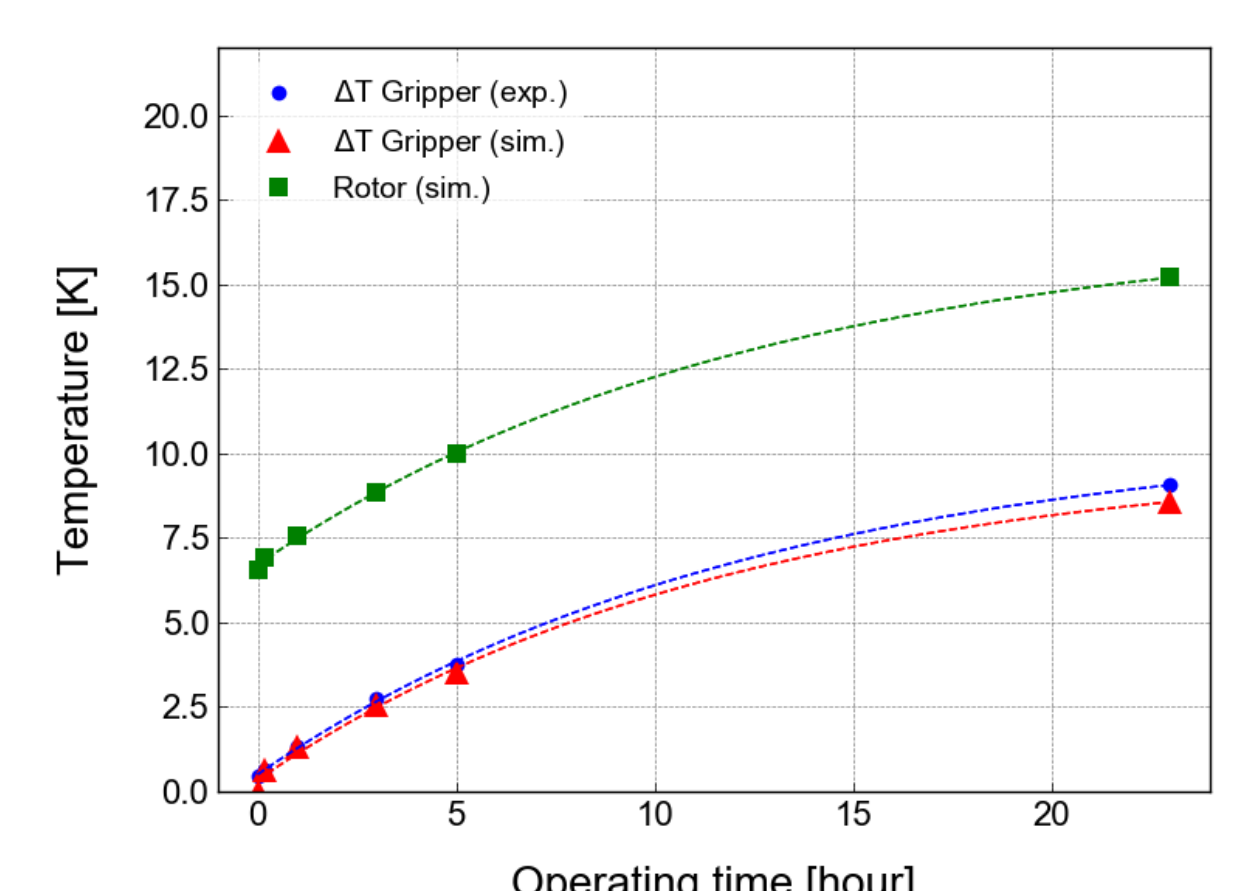
製造した准実機サイズ BBMと試験用大型クライオスタット



- ✓ 10K以下での各回転速度での安定した連続回転を確認。
- ✓ 回転子の各機構における発熱量を実験から推定した。
- ✓ 実機サイズの熱モデルを構築し、設計に改善を加えることで**要求が実現可能であることを確認した。**
- 低発熱化に向けた改善項目：磁気回路、高純度銅線コイル、軽量化等
- ✓ 今後は望遠鏡、衛星システムとの統合に向けたインターフェースを考慮した設計の最適化と検証試験を行っていく予定である。
- 望遠鏡開口部の光学的インターフェース、FPGAを用いた読み出し回路、振動・音響試験、帯電対策、他



低温 (<10K) での回転安定性



保持機構と回転子の温度推移