20pH22-3

LiteBIRDにおける偏光変調器用連続回転機構の開発 II

桜井雄基, 松村知岳, 飯田光人, 片山伸彦, 菅井肇, 今田 大皓[A], 羽澄昌史[B], 山本亮[A], 宇都宮真, 片坐宏一[A], 他 LiteBIRD WG

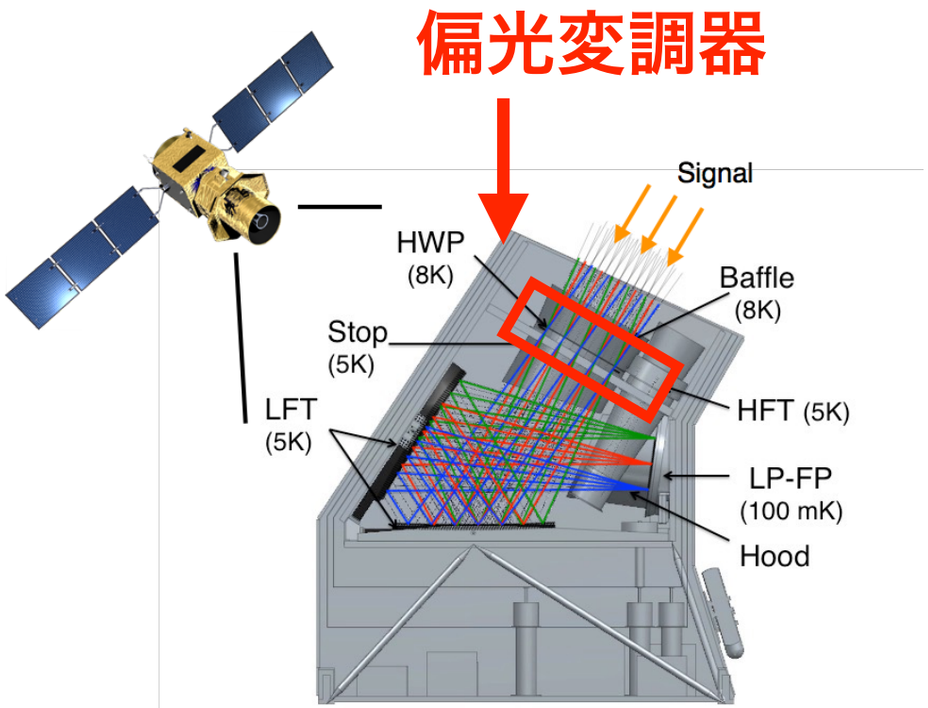
Kavli IPMU, KEK[A], ISAS/JAXA[B]

研究背景・偏光変調器

LiteBIRDの科学目標を達成するため、

系統誤差と1/fノイズの軽減が不可欠。

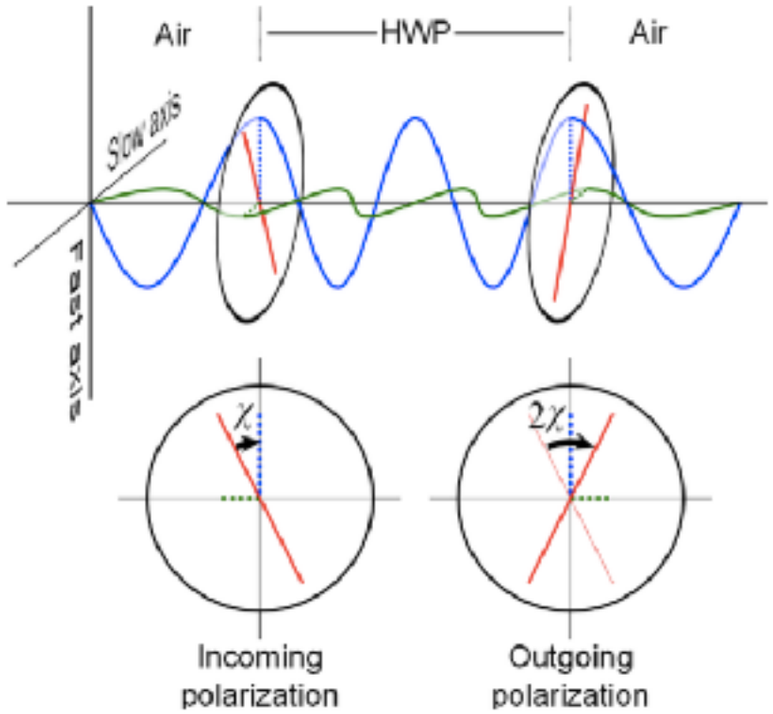
- 光学系の開口部に**偏光変調器**を導入予定。
- LiteBIRDの**最重要開発機器**であり、観測感度 + 衛星の要求を同時に満たす開発を推進中。



偏光変調器…

連続回転する半波長板 (Half-Wave Plate: HWP) により偏光信号に変調を付加する装置

1. 信号帯域を変調によりアップコンバート
   → 検出器の低周波揺らぎ (1/f ノイズ) を低減
2. 信号の偏光成分を１つの検出器で測定
   → 検出器のゲインに起因する系統誤差を低減



Kusaka et. al., Rev. Sci. Instrum., 85, 024501 (2014)

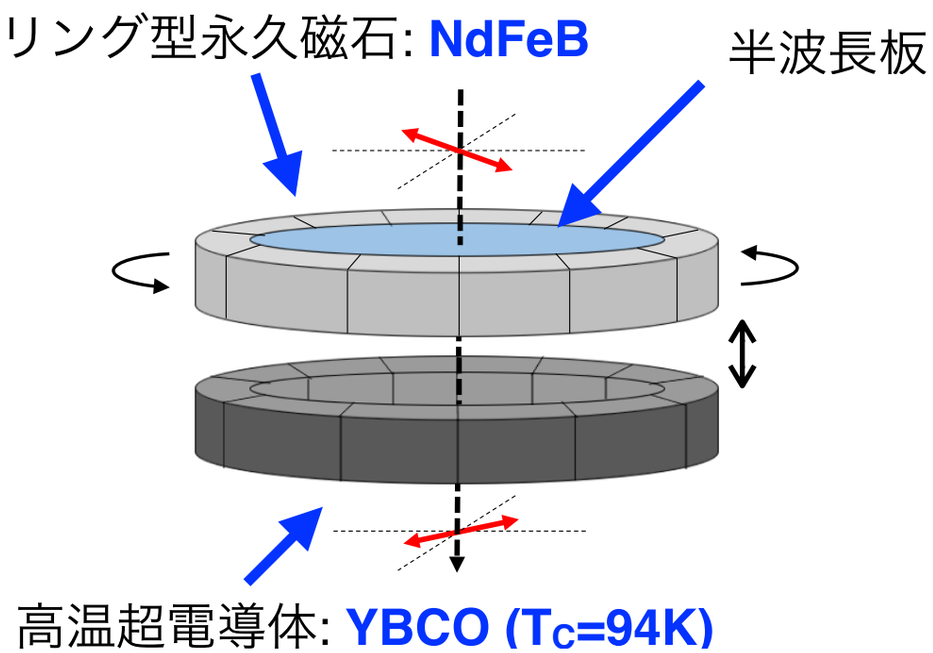
偏光変調器に対する要求

要素	直径	HWP温度	発熱量	回転数	寿命
要求値	≥ 400mm	< 10K (< 24hour)	3.5 mW	1.2 ± 0.1 Hz	3年

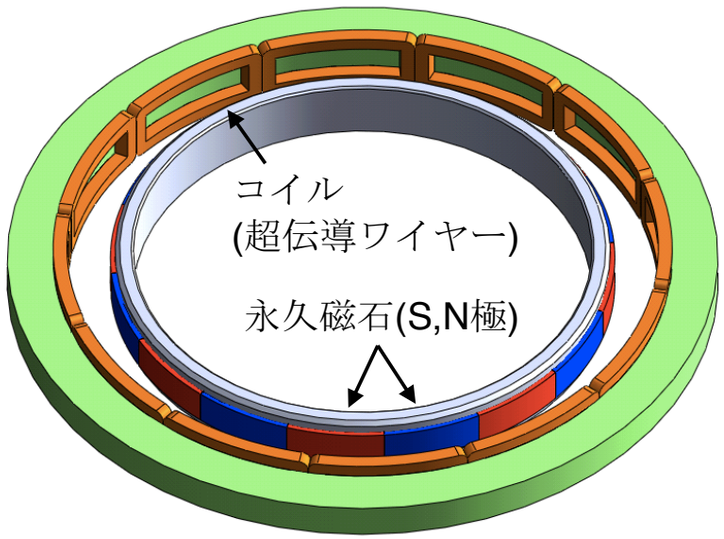
大型の半波長板を低温・低発熱を保ったまま連続安定回転

→ **超電導技術を使った完全非接触回転機構**

超電導磁気軸受

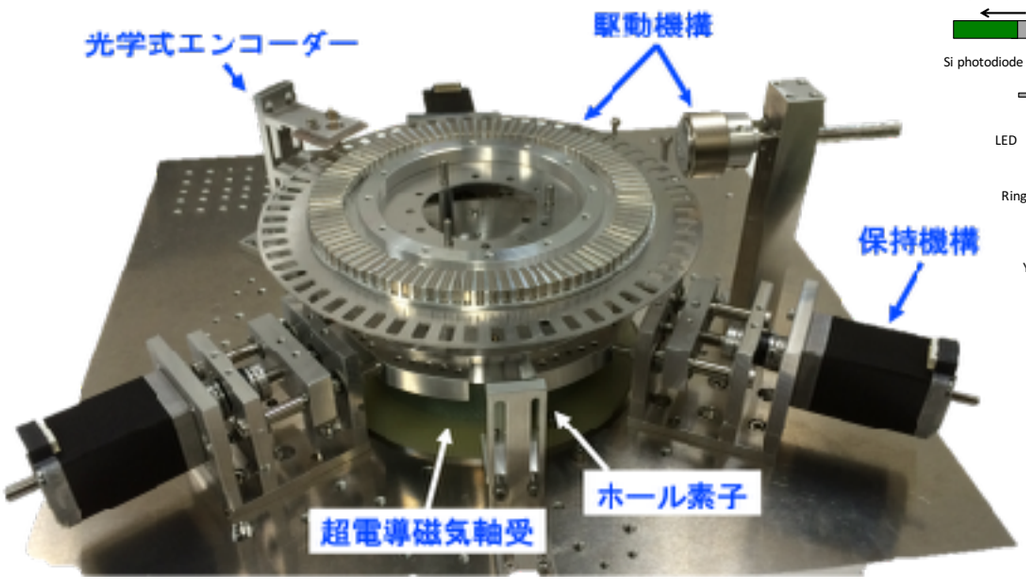


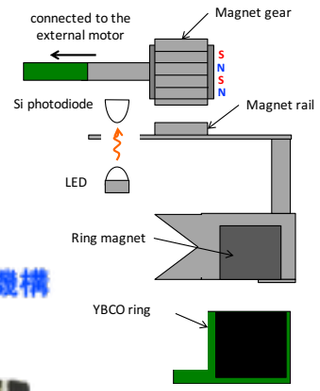
中空型同期モーター (超電導コイル)



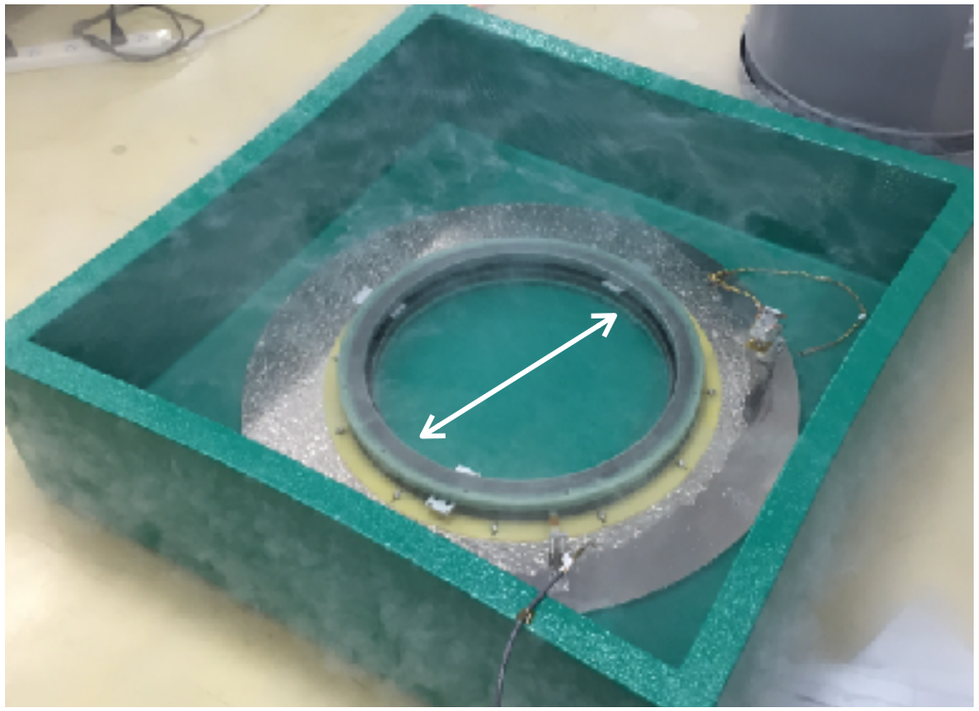
偏光変調器 プロトタイプ

小型試作機 Φ = 65 mm





大型軸受試作機 Φ = 400 mm



発熱・低温動作試験のため小型試作機・大型軸受試作機を構築

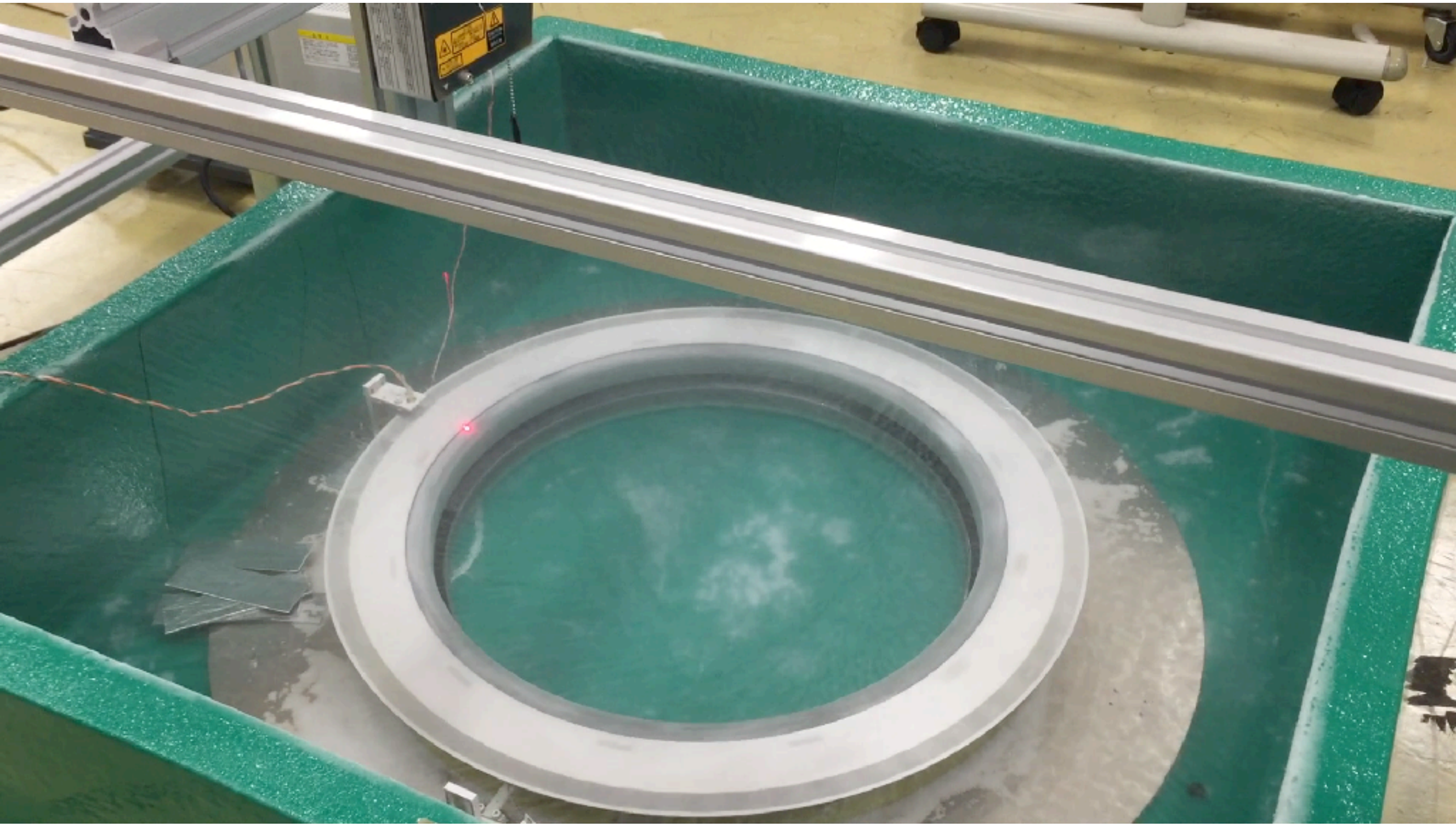
小型試作機：変調器全サブシステムの試験 (4Kクライオスタット)

大型試作機：軸受のみの動作試験 (液体窒素)

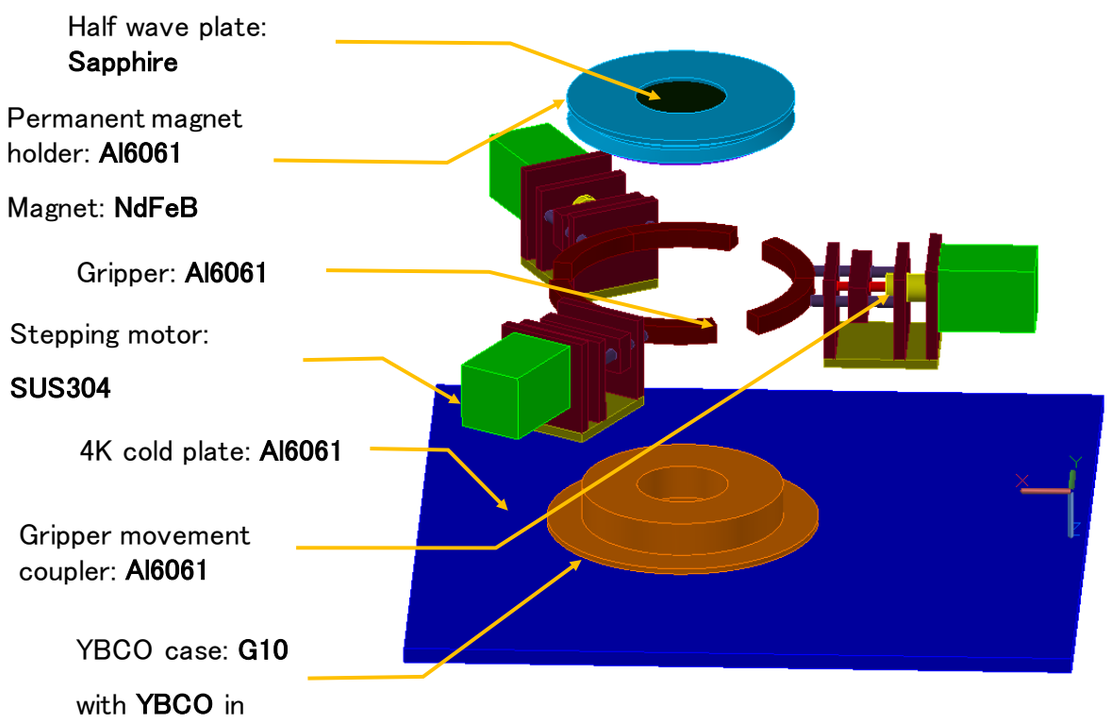
本講演の主題

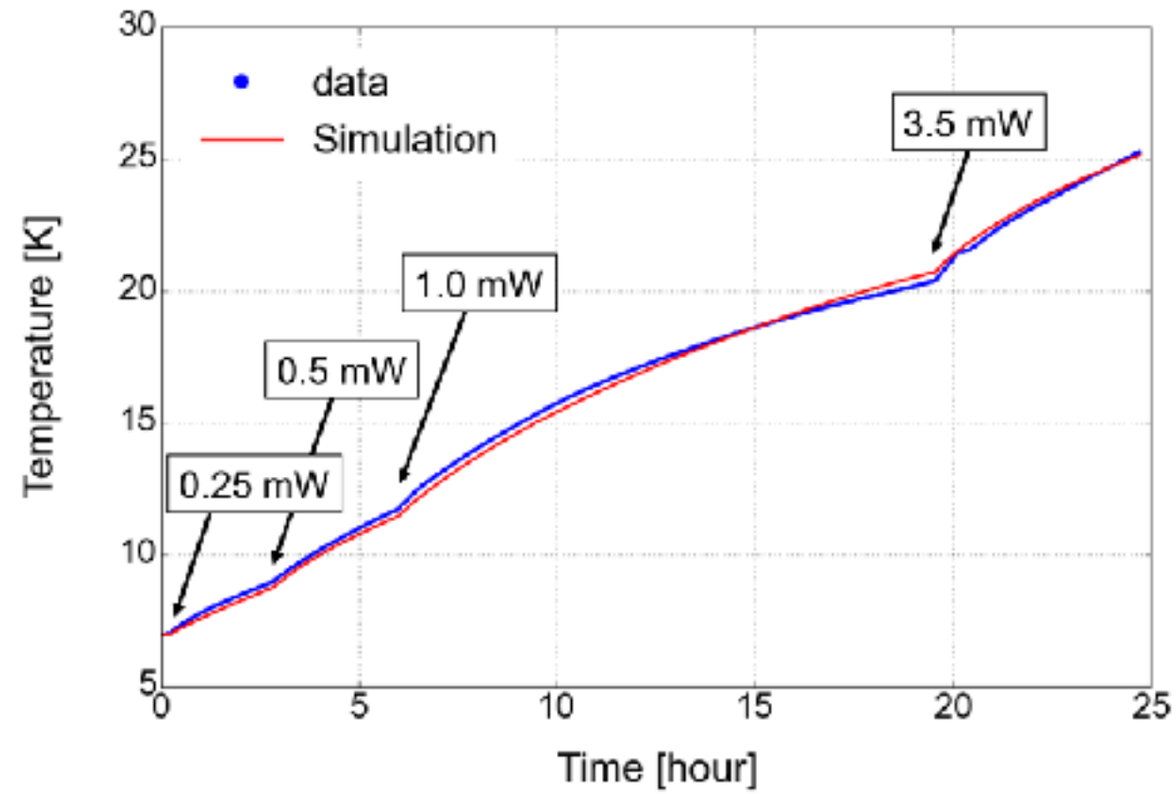
シミュレーションによる熱モデル化と発熱特性評価・改善法

Demonstration



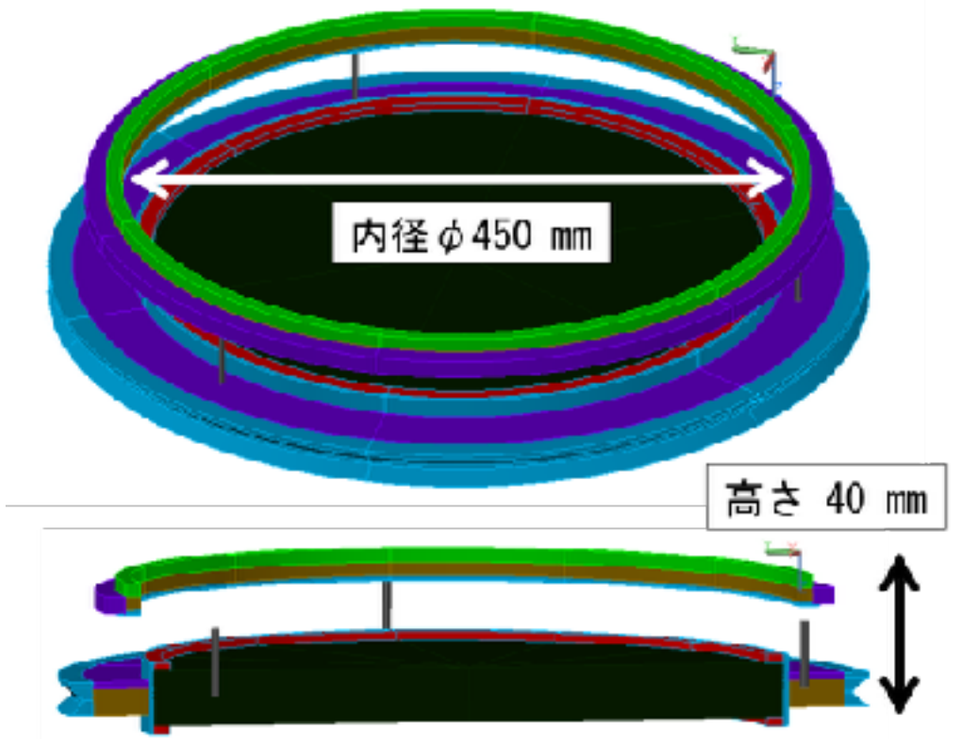
熱モデルの構築

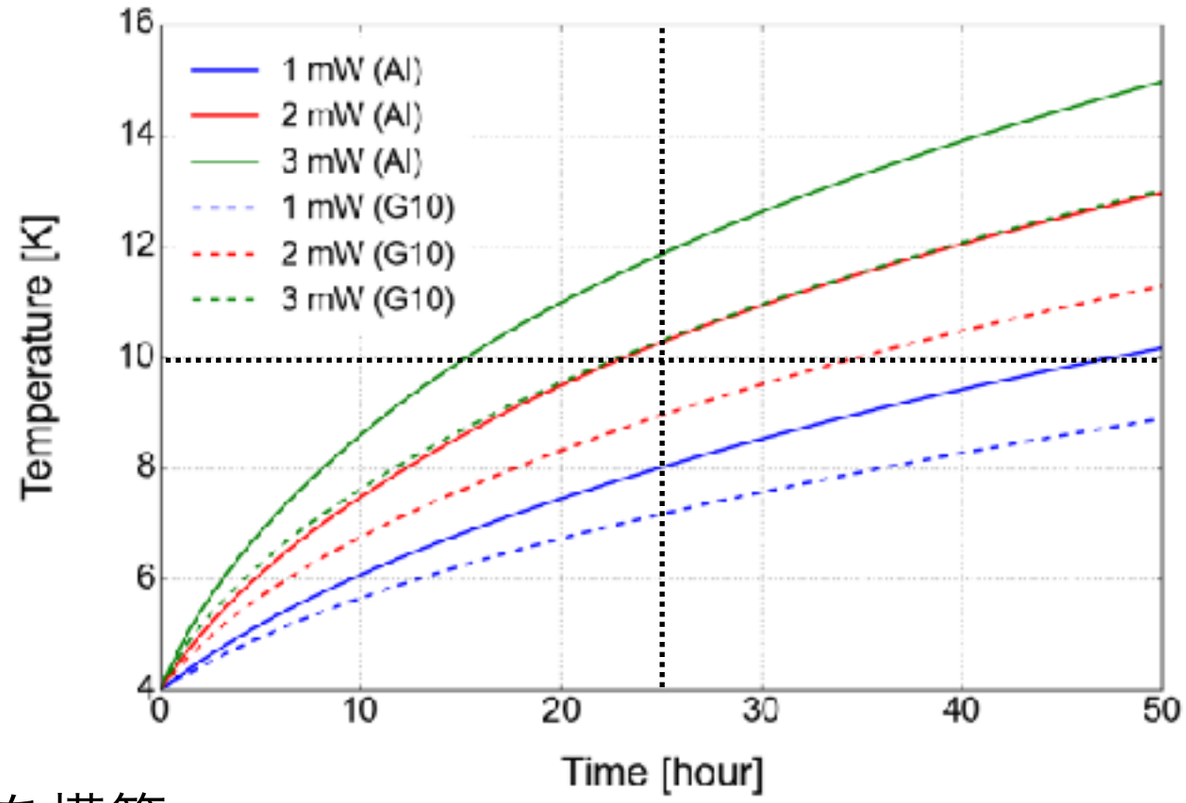




- ✓ 一定の熱量を浮上している回転体に付加。(0.25 ~ 3.5 mW)
- ✓ 小型試作機の熱解析シミュレーションを行い、実測データとの比較・校正を行った。→ 低温物性値の補正 (ネオジム磁石)
- ✓ 校正を行うことで、実測データとシミュレーションが < 3%の範囲で一致。
- ✓ 構築した熱モデルを元に実機サイズでの運用時の半波長板温度を推定。

熱モデルの構築





- ✓ 実機サイズの偏光変調器の熱モデルを構築。
- ✓ 一定の発熱を磁石に加えた時の半波長板の温度変化を推定。
  - → 磁石ホルダーの部材(熱伝導率)を変えることで、温度上昇を調整可能。
- ✓ 実際の観測では24時間ごとに冷凍機の調整のため観測を止めることを想定。
  - → 24時間以内は半波長板を10 K以下に保つ必要がある。

半波長板に付加される発熱量は2mW以下に抑えることが求められる。

(3.5mW は偏光変調器システム全体での総発熱量要求値)

発熱量の推定

- 現状の小型試作機での発熱量をスピンダウン測定から推定。

→ 自由回転時の加速度の減衰からエネルギー損失を測る。

$$\alpha = 2\pi \frac{df}{dt} = a_0 + 2\pi a_1 f$$

ヒステリシス損失　　渦電流

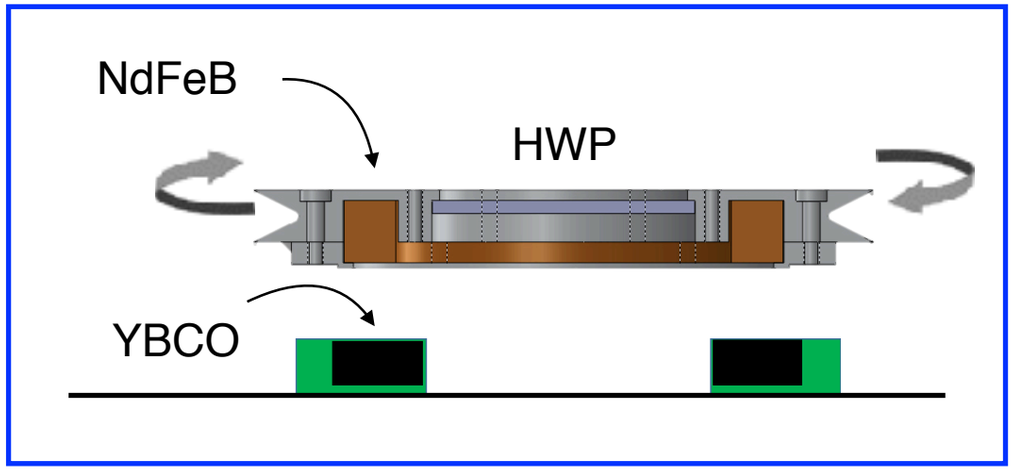
- 加速度の減衰から発熱量に変換

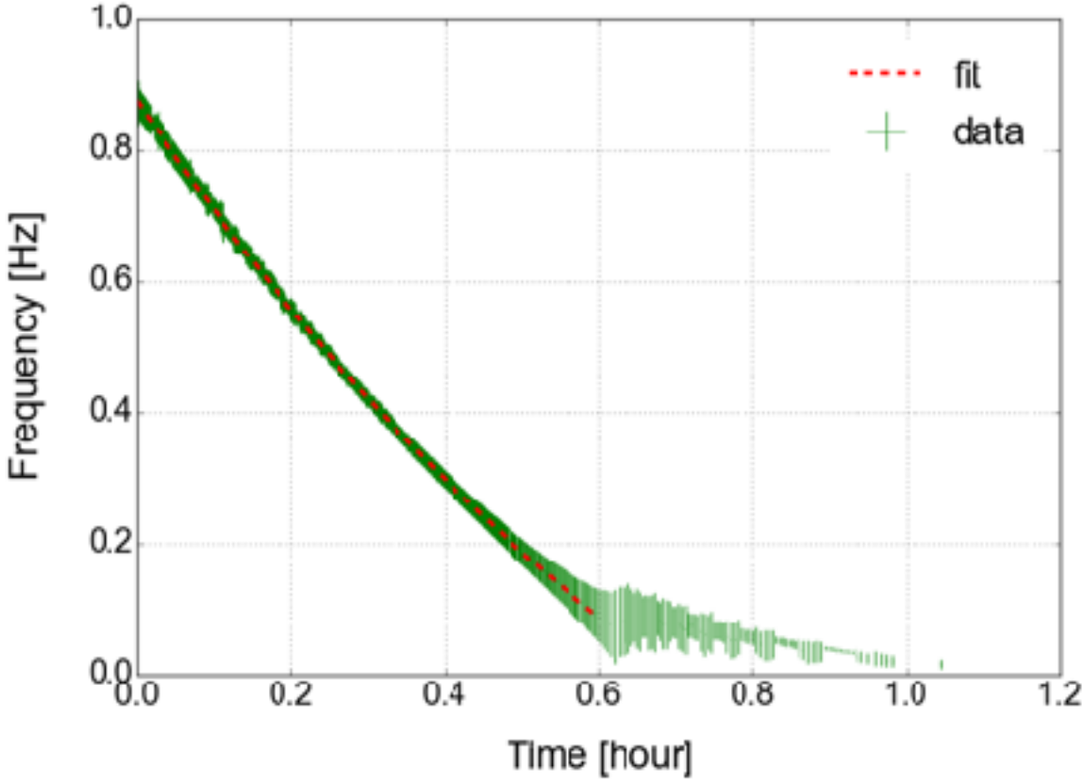
$$P = I \cdot \alpha \cdot \omega = \frac{1}{2} m r^2 \cdot \alpha \cdot 2\pi f$$

小型試作機の測定結果から、重量と外径を実機サイズにスケール

小型: 0.08mW → 実機サイズ: **16.4mW**

発熱量低減のための改善が必須。





偏光変調器の発熱源

ヒステリシス損失：

交流的磁場変位に対するエネルギー損失 = 発熱

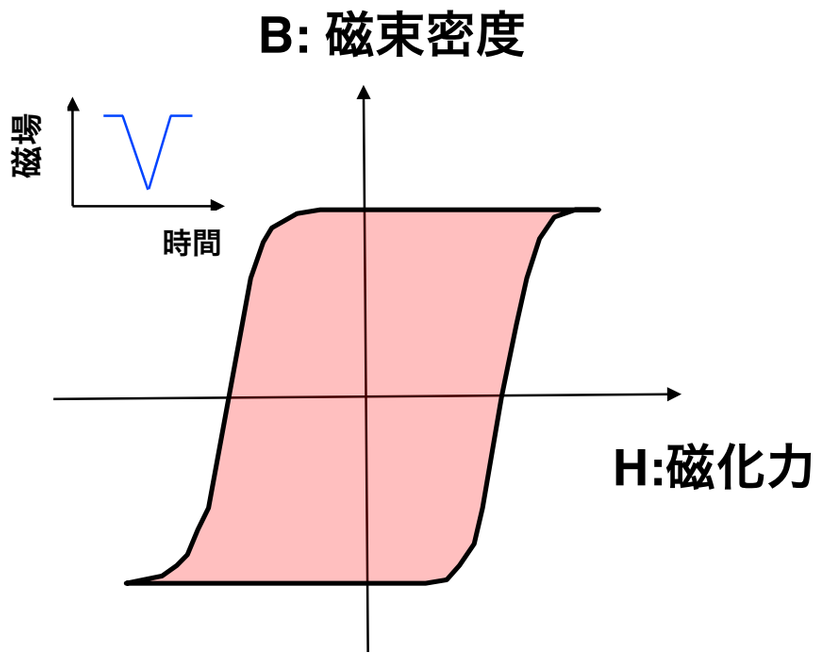
Bean's Model : 超電導磁気軸受におけるヒステリシス損失の理論モデル

$$\Delta E \propto \frac{(\Delta B)^3}{J_c}$$

⊿E: エネルギー損失

⊿B: 磁場変位

Jc: 臨界電流密度 (定数)



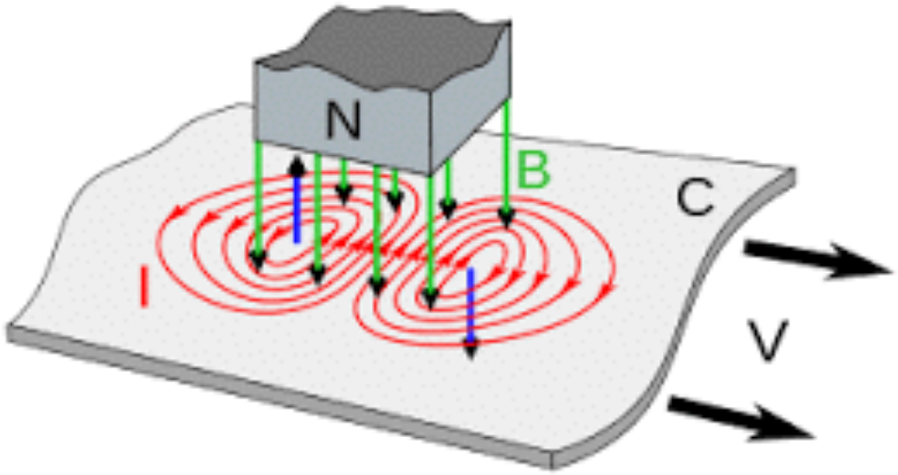
渦電流：

磁場変動に対する渦電流による発熱

$$\Delta E \propto (\Delta B)^2$$

⊿E: 発熱

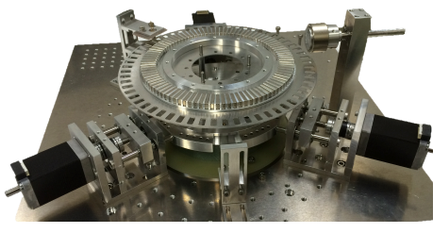
⊿B: 磁場変位

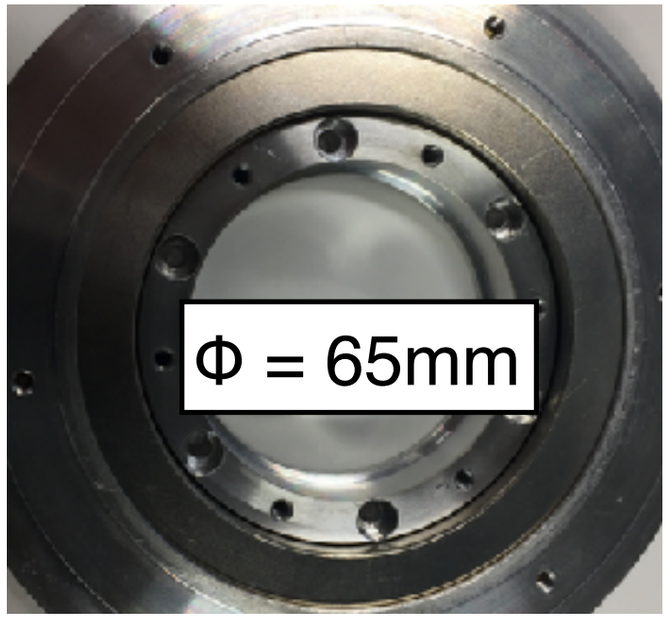


磁石の磁場不均一性が発熱の主要因

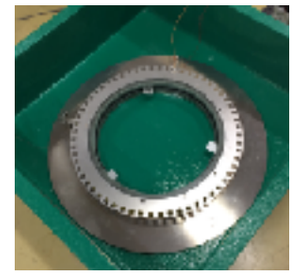
磁場一様性

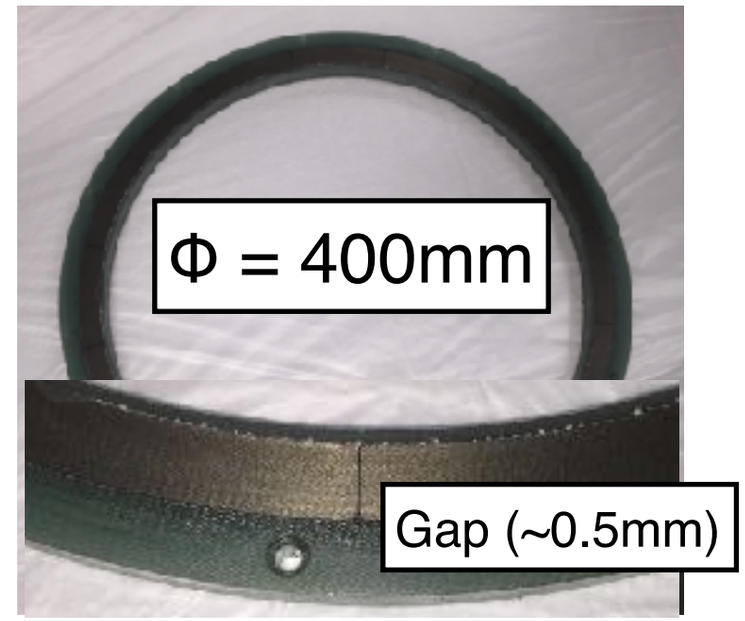
小型試作機の一体型リング磁石

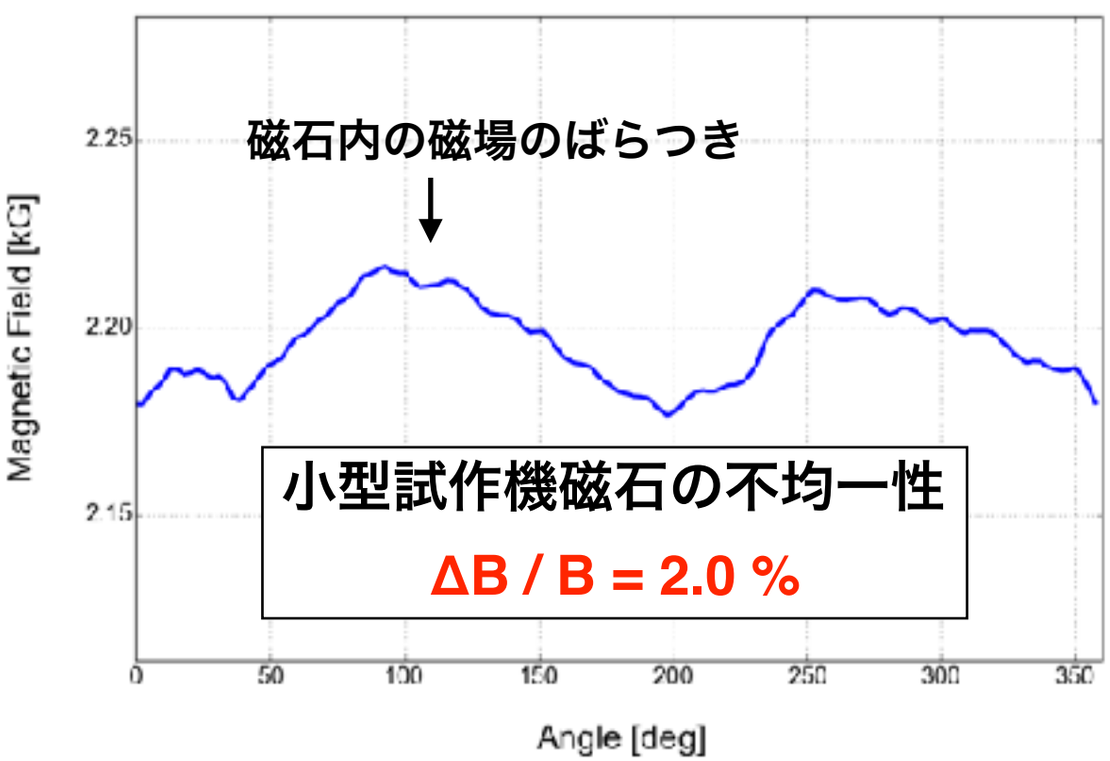




実機サイズの16分割型リング磁石

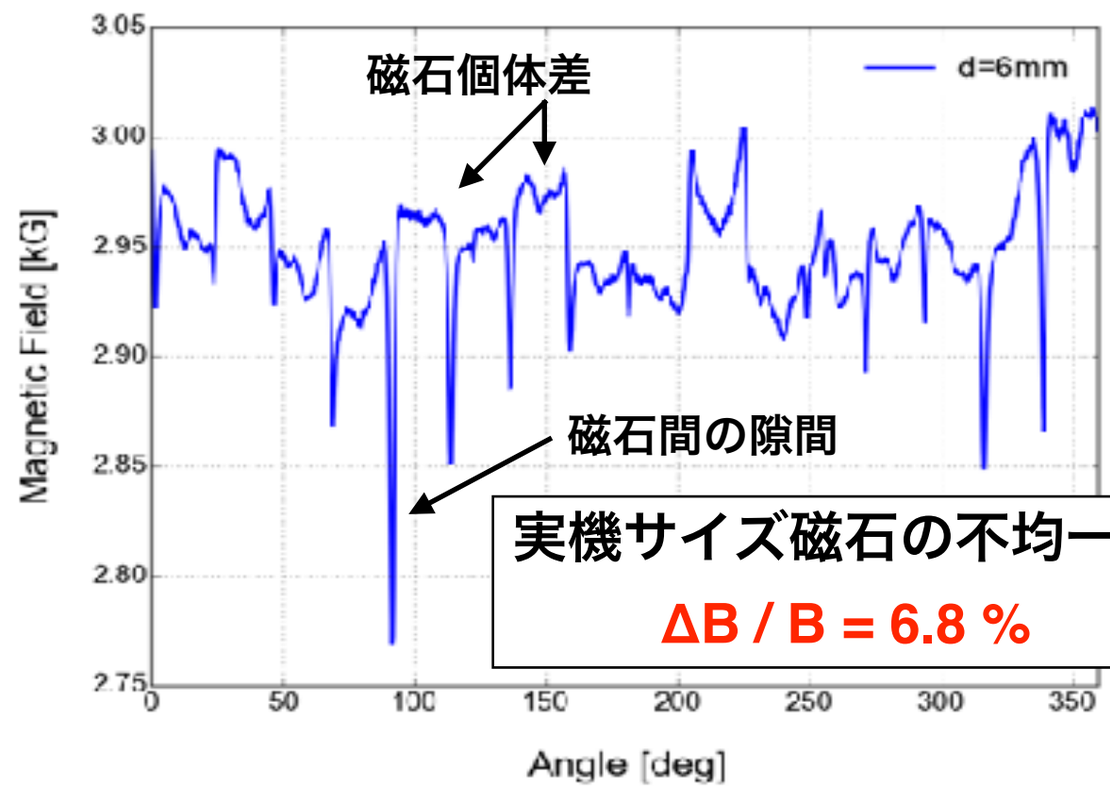






小型試作機磁石の不均一性

ΔB / B = 2.0 %



実機サイズ磁石の不均一性

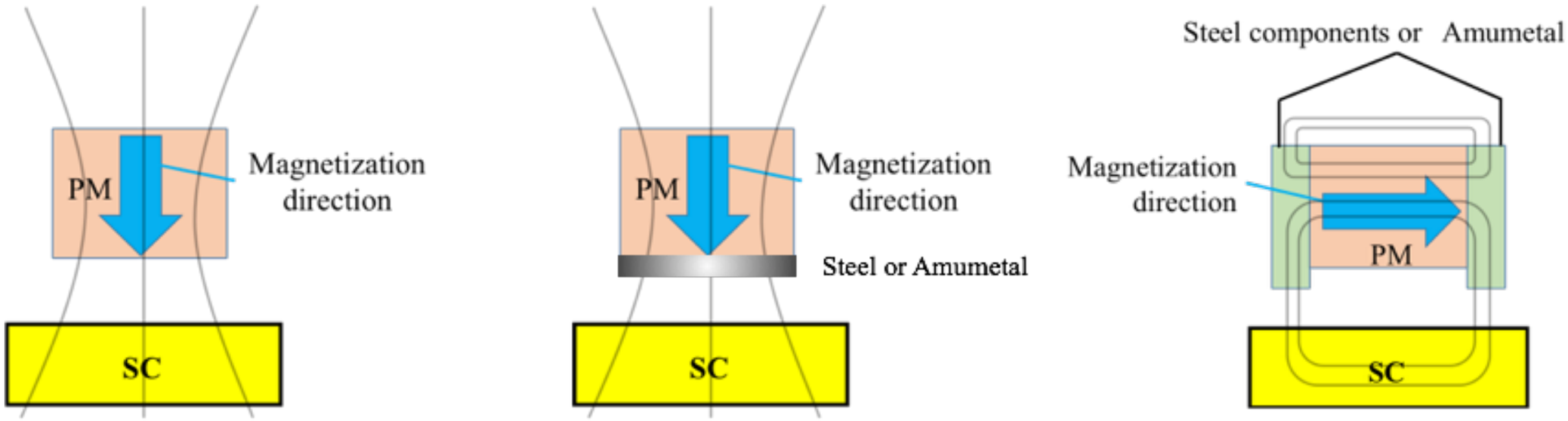
ΔB / B = 6.8 %

磁気回路の開発

磁場一様性改善のため、磁気回路の設計・解析が進行中。

Pole Piece: 磁石下面に鉄ヨークを設置

Halbach: 磁化方向を変えて、両側面に鉄ヨークを設置



回路なし　　Pole Piece　　Halbach

	磁場強度	磁場一様性	検出器への磁場漏れ
回路なし	4.0kG	5%	~ 30 G
Pole Piece	1.8kG (↓55%)	0.6%	~ 30 G
Halbach	3.5kG (↓13%)	0.8%	~ 10 G

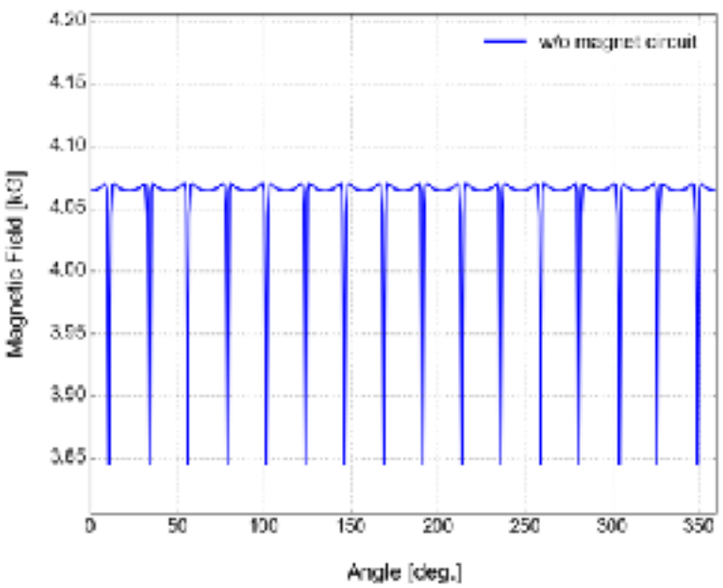
磁気回路の開発

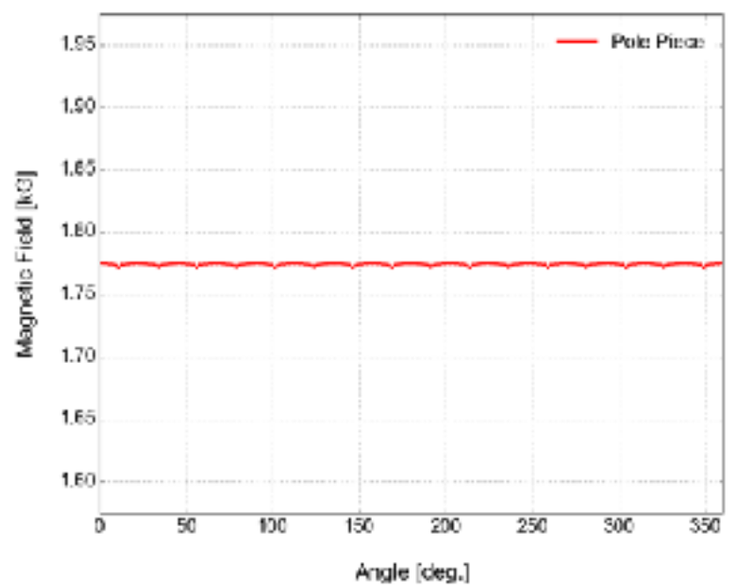
磁場一様性改善のため、磁気回路の設計・解析が進行中。

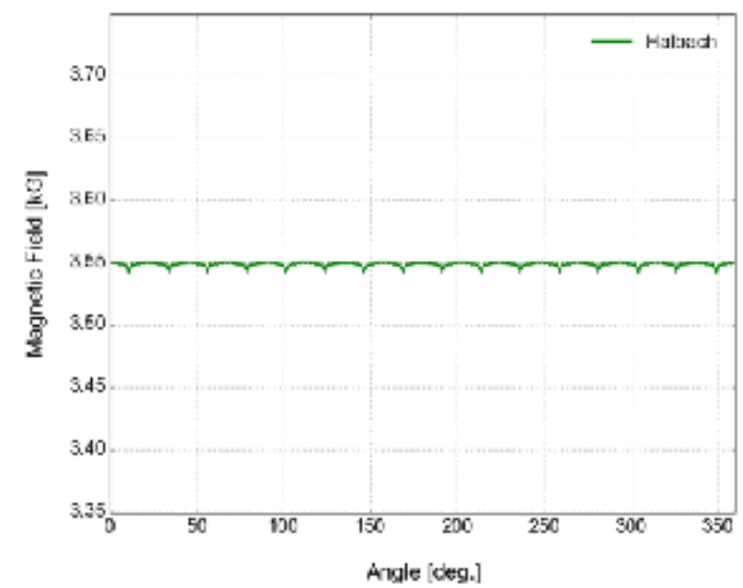
Pole Piece: 磁石下面に鉄ヨークを設置

Halbach: 磁化方向を変えて、両側面に鉄ヨークを設置

実機サイズ磁石の磁場シミュレーション結果







	磁場強度	磁場一様性	検出器への磁場漏れ
回路なし	4.0kG	5%	~ 30 G
Pole Piece	1.8kG (↓55%)	0.6%	~ 30 G
Halbach	3.5kG (↓13%)	0.8%	~ 10 G

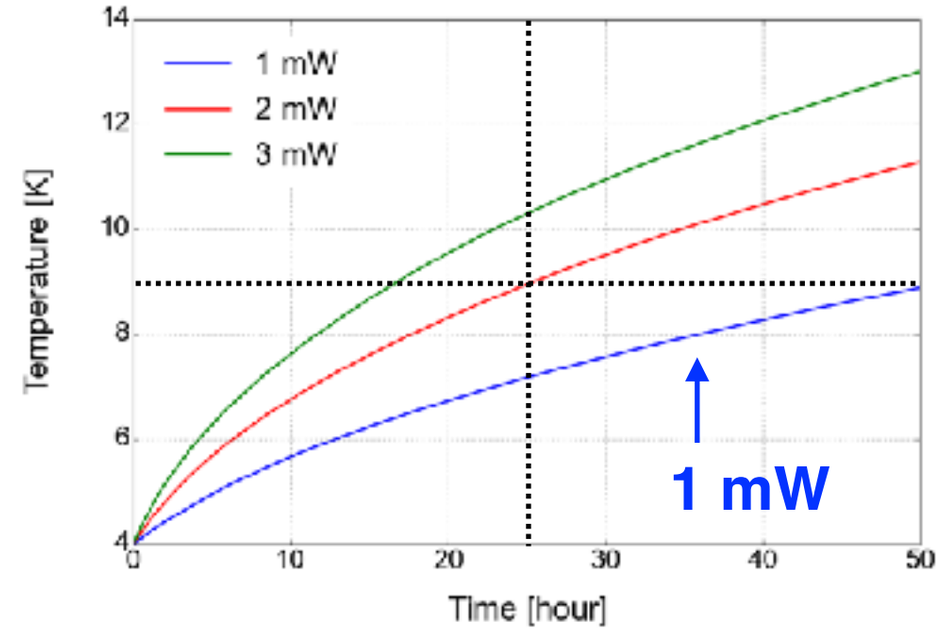
発熱の改善

磁気回路による一様性の変化：2.0% → 0.5%

小型試作機の結果を換算すると…

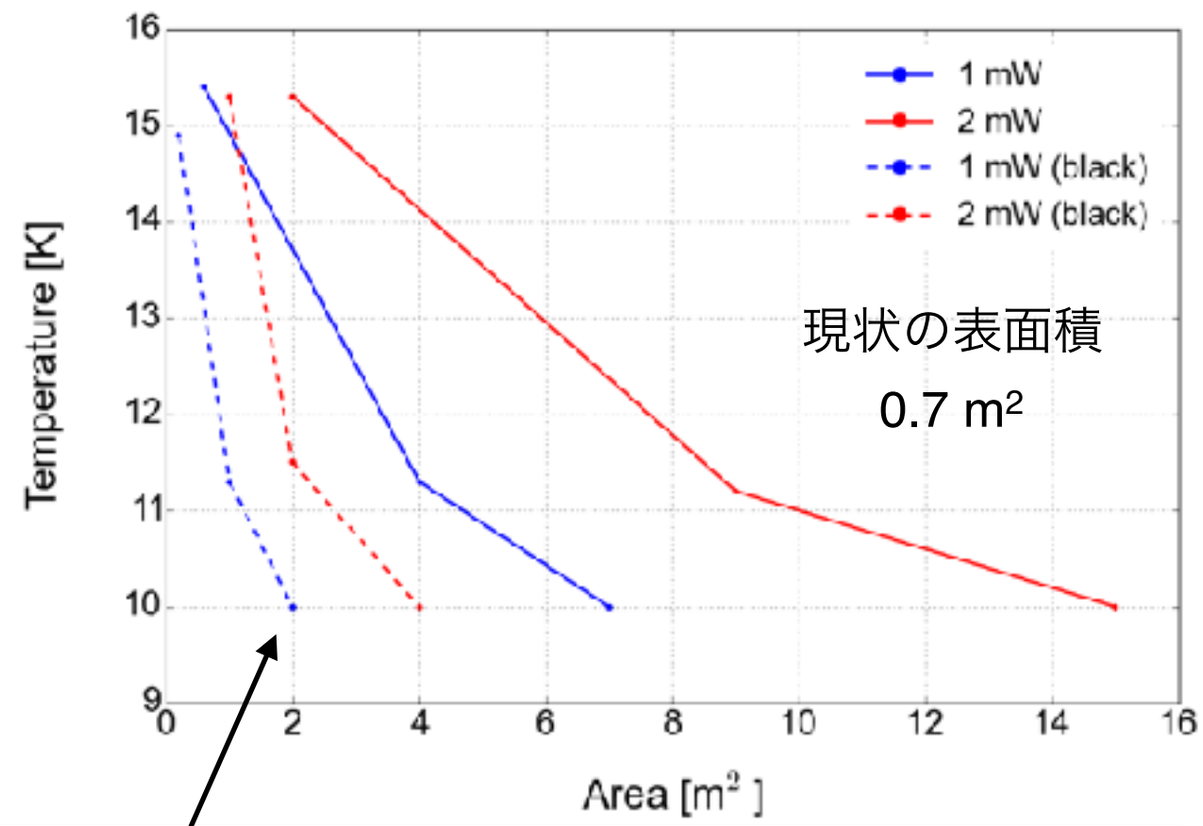
P ＝ 16.4 mW → **0.98 mW**

磁気回路の導入により発熱の要求を達成可能。



(その他の改善方法)

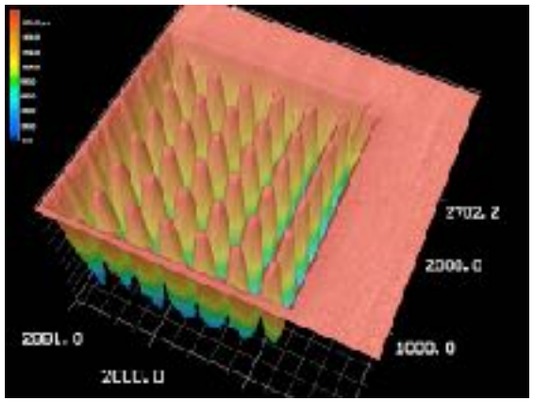
- **ΔBの低減** → 回転体の浮上高さの調整。
- **渦電流対策**
  → 回転体の材料を絶縁体に変更。
- **放射熱の増加**
  → 回転体の表面積を大きくする。
  → 回転体をブラックにする。
- **半波長板への伝熱時定数の低下**
  → 蓄冷材(体積比熱の高い材料)を付ける。
  Heガス、ErNi 等



1 mWの発熱のとき定常温度を10Kにするために必要な表面積

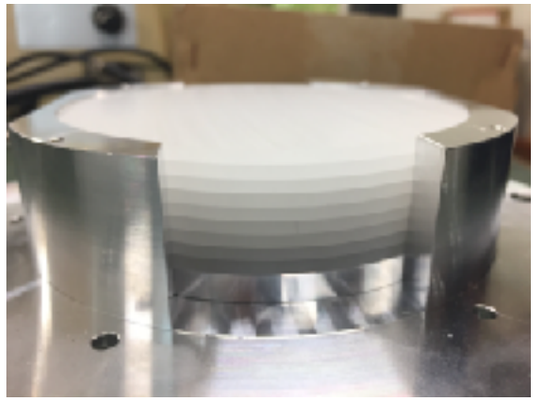
その他機器の開発状況

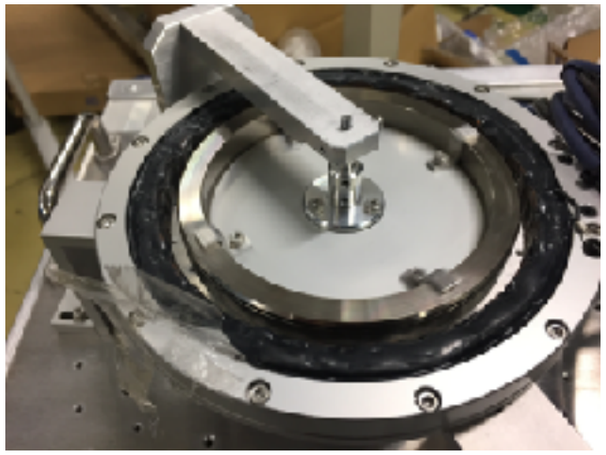
- ✓ 広帯域サファイア半波長板
- ✓ 実機サイズ用大型4Kクライオスタット
- ✓ 超電導コイル中空モーター
- ✓ 超電導コイルリニアアクチュエータ
- ✓ 高角度再構成エンコーダー
- ✓ 磁気シールド設計 etc.



モスアイ反射防止構造

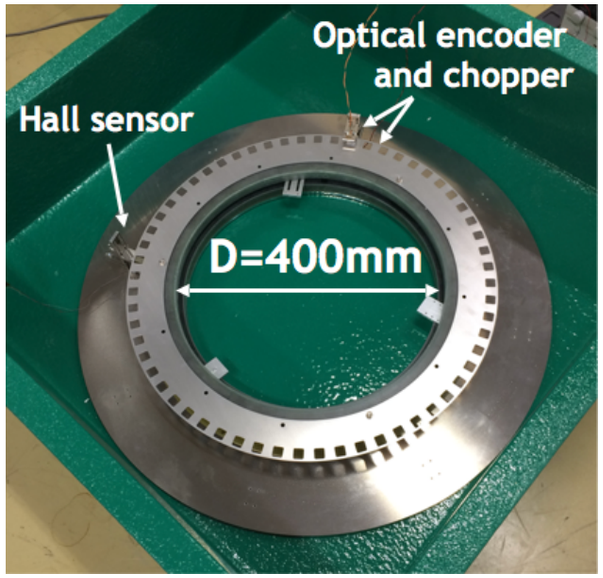
多層半波長板





中空モーター

実機サイズ
超電導磁気軸受



大型クライオスタット Φ ~ 1m

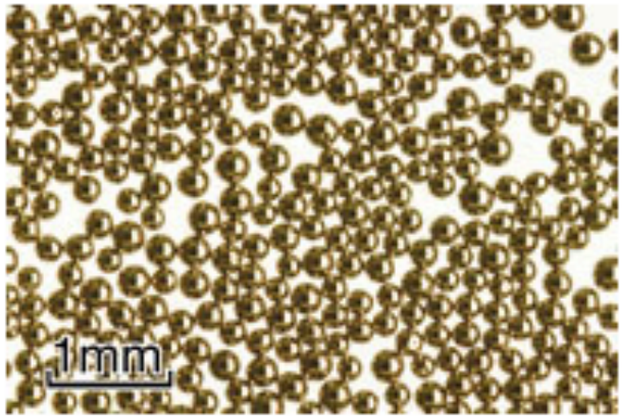
まとめ・展望

- ✓ LiteBIRDの重要ミッション機器候補である偏光変調器の開発を行っている。
- ✓ 小型試作機のシミュレーションを元に、実機の熱モデルを構築、発熱量の要求値を明確化した。
- ✓ 連続回転における超電導磁気軸受の発熱量の推定をスピンダウン測定から行った。
- ✓ 低発熱化を実現する磁気回路の設計、解析を行った。
- ✓ 小型試作機でのその他の開発を今年度で終了し、実機サイズ試作機の作成を行う予定。

BACKUP

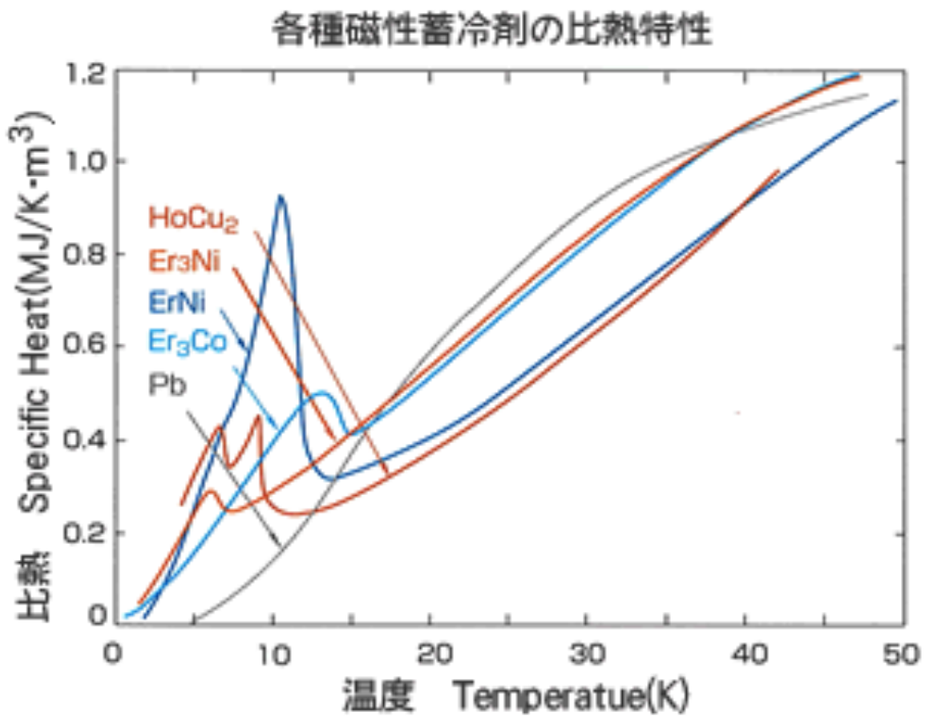
磁性蓄冷材

磁性蓄冷材



特長

- 鉛代替のため環境調和型製品
- 15K以下での磁気相転移に伴う比熱変化が大きい
- 球状粉（平均粒径100～300μm）によるガス圧力ロス低減
- 長期間動作による変形、微粉化のない球状粉



http://www.toshiba-tmat.co.jp/list/ac_ac.htm