

J-PARC muon $g - 2$ /EDM実験: 陽電子飛跡検出器冷却システムの開発

東大理^A, 東北大RARiS^B, 新大自^C, 新大理^D, 富山高専^E, KEK素核研^F, KEK機械工学セ^G,
東大ICEPP^H, 九大理^I, 九大RCAPP^J, 九大基^K, Open-It^L

佐藤太希^A, 東琉都^C, 阿波克典^I, 岡崎佑太^{F, L}, 小川真治^{F, L}, 岸下徹一^{F, L}, 久米達哉^G, 齊藤直人^{A, F},
佐々木修^{F, L}, 佐藤優太郎^{D, L}, 庄子正剛^{F, L}, 調翔平^I, 末原大幹^{H, L}, 鈴木純一^F, 須田利美^B, 清野義敬^E,
千代浩司^{F, L}, 高富俊和^G, 田中真伸^{F, L}, 土居俊介^I, 東城順治^{I, L}, 福村省三^C, 藤田陽一^{F, L}, 本多佑記^B,
本多良太郎^{F, L}, 水取雅登^I, 三部勉^{A, F, L}, 山岡広^F, 山中隆志^{K, L}, 矢村昂暉^C, 吉岡瑞樹^{J, L},
他J-PARC muon $g - 2$ /EDMコラボレーション

目次

2025/02/16

イントロダクション

- ミューオンの異常磁気モーメント ($g - 2$) と電気双極子モーメント (EDM)
- J-PARC muon $g - 2$ /EDM精密測定実験 (E34実験)

陽電子飛跡検出器と冷却システム

- 冷却システムの設計
- プロトタイプを用いた冷却システム性能の実測とその評価
- 冷却システムの実機性能予測

まとめと今後の展望

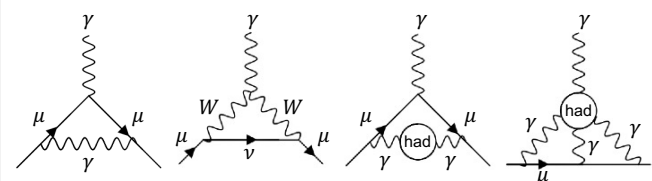
ミューオンのスピンの比例して表される物理量

$$H = -\boldsymbol{\mu}_\mu \cdot \boldsymbol{B} - \boldsymbol{d}_\mu \cdot \boldsymbol{E}$$

磁気双極子モーメント

$$\boldsymbol{\mu}_\mu = g \frac{e}{2m_\mu} \boldsymbol{s}$$

g 因子は高次の量子補正により2からずれる



$$g = 2 \left(1 + \underbrace{a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}}_{\text{quantum corrections}} \right)$$

$$\text{異常磁気モーメント } a_\mu \equiv \frac{g - 2}{2}$$

理論値と実験値の乖離



新物理、新粒子の存在を示唆

電気双極子モーメント

$$\boldsymbol{d}_\mu = \eta \frac{e}{2m_\mu c} \boldsymbol{s}$$

時間反転(T)対称性を破る物理量であり、
新物理の手がかりとして発見が期待される

- 標準理論の予測値は $\sim 10^{-38}$ e·cm
- ブルックヘブン国立研究所(BNL)による
実験からの上限值は 1.8×10^{-19} e·cm

EDMの発見はT対称性の破れを示し、
CPT保存則からCP対称性の破れとなる

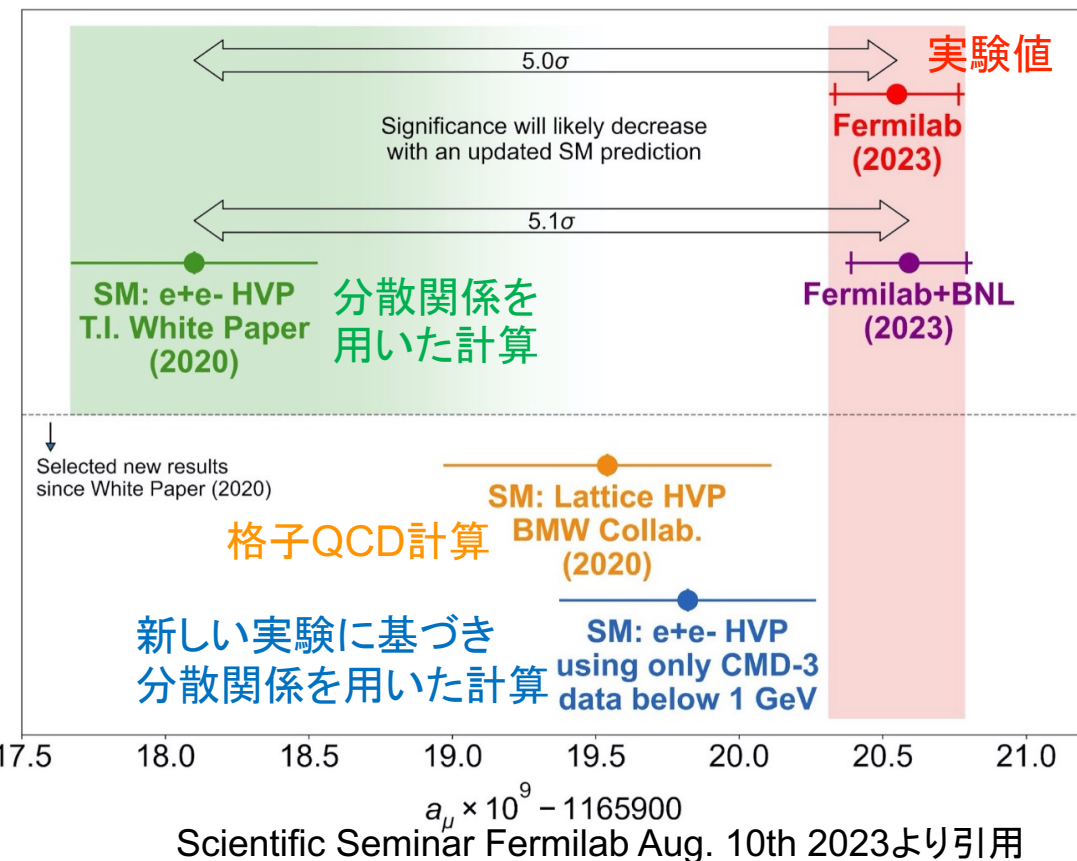


物質優勢宇宙の謎の解明

異常磁気モーメント $g - 2$

2025/02/16

ミュオンの異常磁気モーメント ($g - 2$) は実験と理論の予測値に 5σ の乖離?



$$a_\mu \equiv \frac{(g - 2)}{2}$$

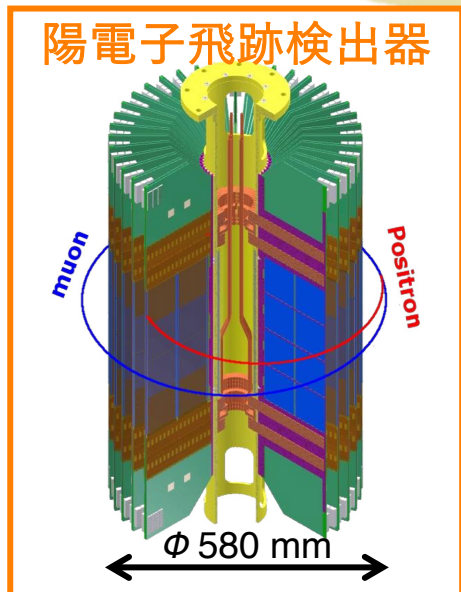
- **理論**は不定性の大きいハドロンの量子補正の計算精度が課題
 - 精度の向上と値の検証が行われている
- **実験**はBNLとFNALの結果
 - 同様の手法であり、共通の系統誤差が排除しきれていない可能性がある
 - 実験値の検証が必要

BNLとFNALとは別の手法を用いた精密測定によって実験値の独立な検証を行う
 => J-PARC muon $g-2$ /EDM精密測定実験 (E34)

独自の手法でミュオンの異常磁気モーメント ($g - 2$) と電気双極子モーメント(EDM)を精密に測定する

- 低エミッタンスのミュオンビーム
- 電場を用いないビーム収束
- コンパクトな高一様磁場 (3 T)
- 飛跡検出器による崩壊陽電子検出

100 keVまでの加速原理実証達成 (2024)
arXiv:2410.11367



先行実験の測定結果

$g-2$ $\left(\begin{array}{l} 0.54 \text{ ppm (BNL)} \\ 0.20 \text{ ppm (FNAL)} \end{array} \right)$

EDM $< 1.8 \times 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm (BNL)}$

本実験の初期目標精度

$g-2: 0.45 \text{ ppm}$

EDM: $10^{-21} \text{ e}\cdot\text{cm}$

実験値の検証と世界最高感度でのEDM探索

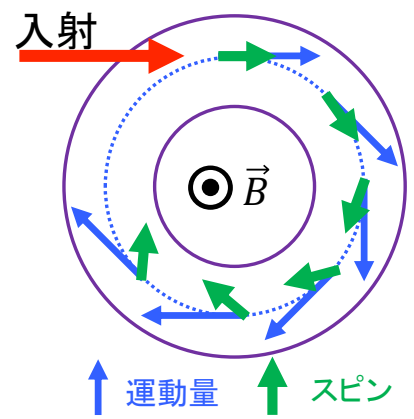
$g - 2/EDM$ の測定原理

2025/02/16

■ 静磁場中のミュオン運動量とスピンの歳差運動

先行実験: $a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0$

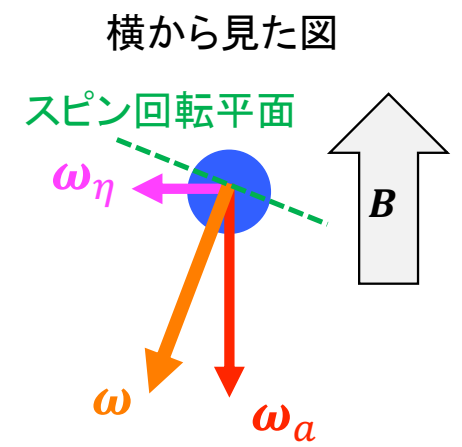
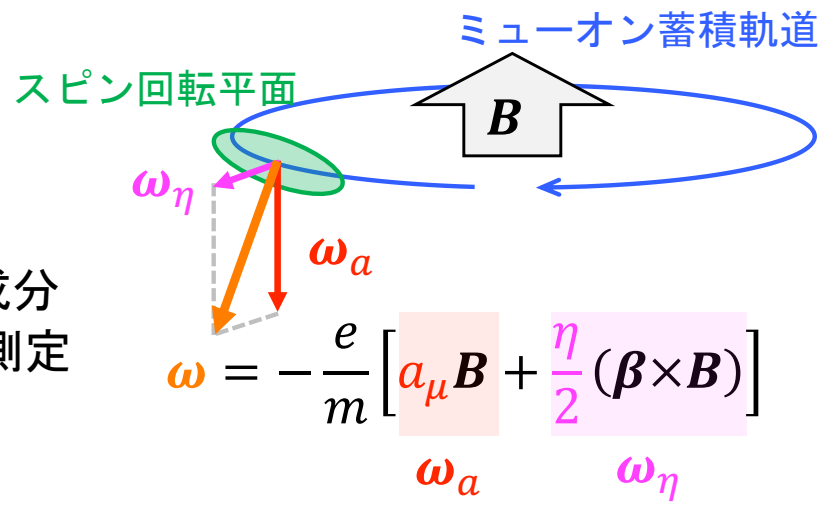
本実験: $\vec{E} = 0$



$$\text{スピン歳差運動 } \omega = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \mathbf{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\frac{\mathbf{E}}{c} + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} \right) \right]$$

ミュオンの崩壊陽電子はスピンの方向に放出されやすい
 ➤ 陽電子を検出することで ω を測定する

$E = 0$ であるため
 $g - 2$ 成分とEDM成分
 が垂直に独立して測定
 できる



- $g - 2$: ミュオンのスピン歳差運動周期 ω を精密に測定する時間精度が必要
- EDM: スピン回転平面の傾きから生まれる上下の非対称度を検出するためのセンサーの高精度アライメントが必要

陽電子飛跡検出器の要求

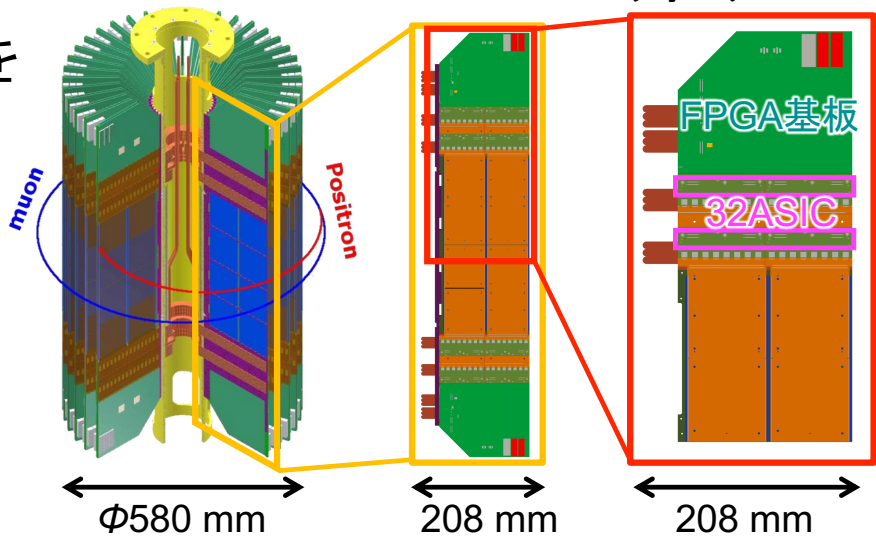
2025/02/16

- 40枚のベーンを放射状に配置
- 崩壊陽電子の位置と時間情報から飛跡を再構成する

陽電子飛跡検出器

ベーン

クォーターベーン

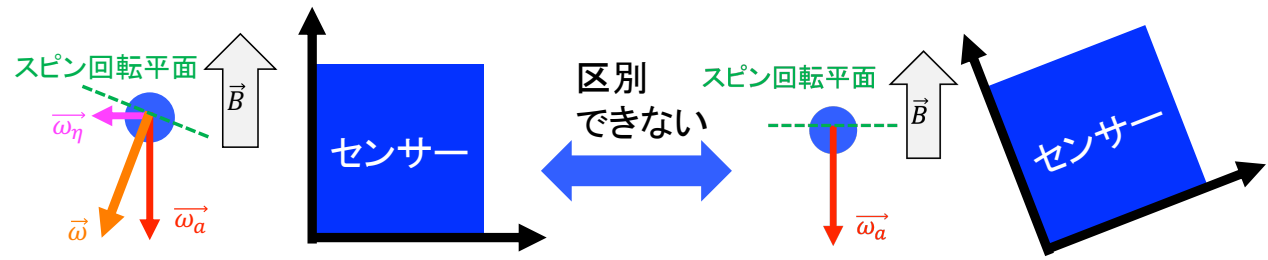


要求

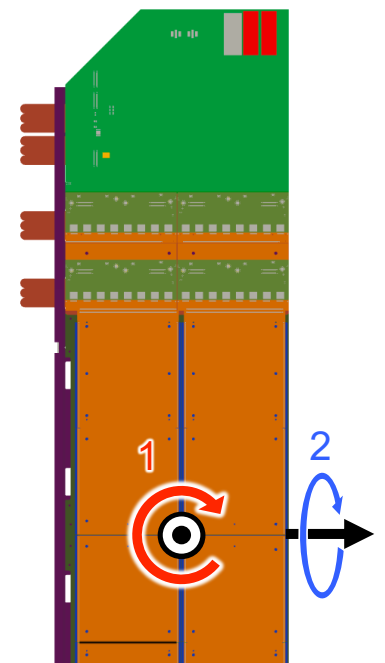
- 蓄積領域の内側の真空環境 (0.1 atm)
- 3 Tの磁場中で動作し、蓄積領域の磁場に影響を与えない
- EDM測定のための高精度アライメント

有限のEDMを正常センサーから見た系

EDM=0で傾いたセンサーから見た系



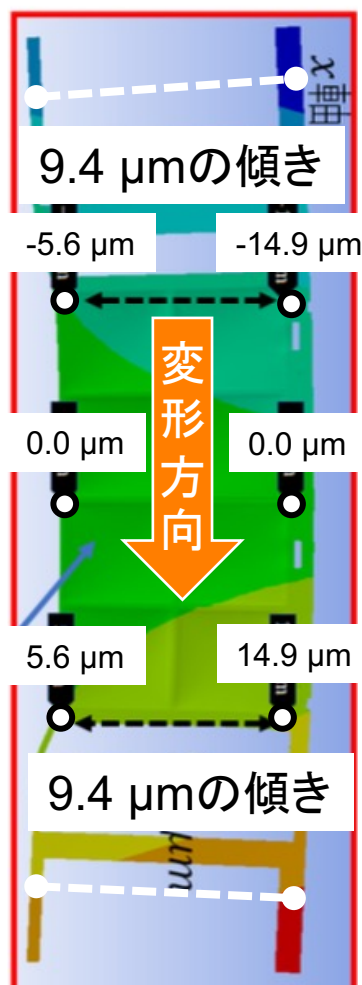
- センサーのミスアライメントはEDM測定の主要な系統誤差となる
- 目標感度 10^{-21} e·cmに要求されるアライメント精度
 1. ベーン平面回転方向: $\sim 10 \mu\text{rad}$
 2. ベーン厚み回転方向: $\sim 200 \mu\text{rad}$



センサーの熱変形とミスアライメント

2025/02/16

- 目標感度 10^{-21} ecmに要求されるアライメント精度: $\sim 10 \mu\text{rad}$
- センサーとフレームを 10°C 上げた時の変形シミュレーション
 - 熱膨張による変形の大きさが無視できない可能性



- 温度変化 10°C の熱変形: $9.4 \mu\text{m}$
- アライメント精度の要求値: $2 \mu\text{m}$ ($20 \text{ cm} \times 10 \mu\text{rad}$)
 - 定常状態の変形はアライメントシステムで測定できるが、ミスアライメントの主要因である変形を抑えることが重要

アライメント精度の要求 $2 \mu\text{m}$ に相当する
温度変化 2.1°C 以内に抑える必要がある

発熱量と冷却の必要性

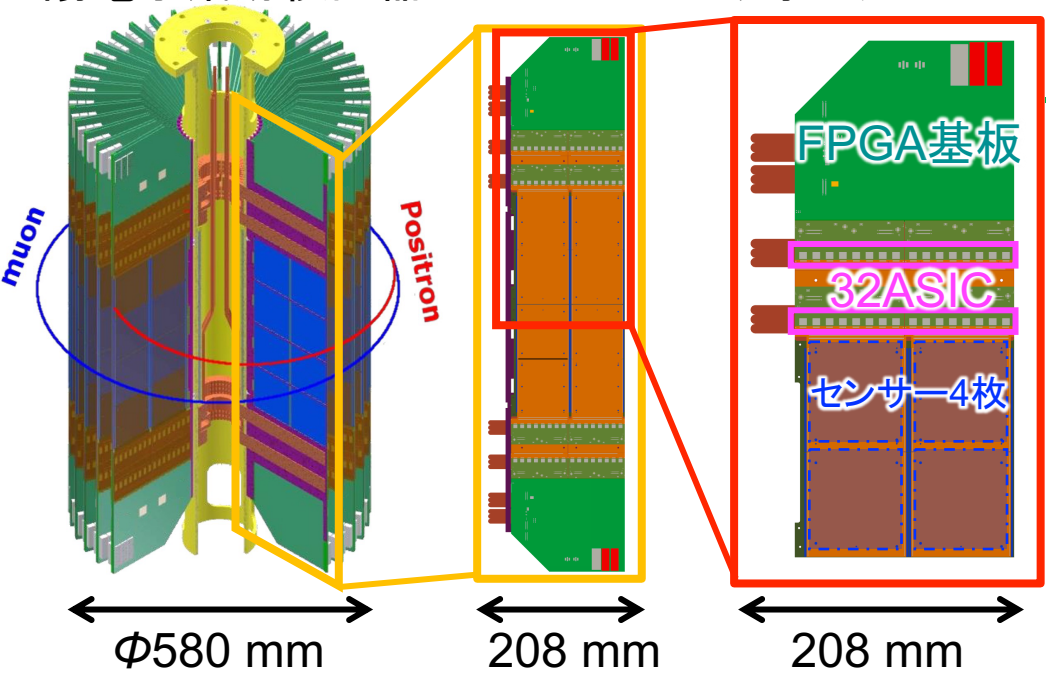
2025/02/16

陽電子飛跡検出器

ベーン

クォーターベーン

読み出しコンポーネント



- FPGA基板
- 鏡像対称のFPGA基板(裏)
- DC-DCコンバータ
- ASIC基板

1クォーターベーン: 53.6 W

(FPGA: $18.9 \text{ W} + 0.05 \text{ W} \times \#ASIC = 20.4 \text{ W}$
 ASIC $\times 32$: $0.88 \text{ W} \times \#ASIC = 28.2 \text{ W}$
 DC-DCコンバータ: 5 W/Q-Vane

1ベーン: 214 W

40 ベーン(160 Q-ベーン): 8.5 kW

センサーの信号をASICで読み出し、FPGA基板でデータ进行处理する
 読み出しコンポーネントで合計 **8.5 kW** の熱が発生する
 = こたつ約14台分

- 真空環境: 対流による冷却は起こらない
- 40枚のベーンが向かい合っているため、輻射が抑制される



動作を保証し、温度安定性の要求を満たす冷却システムが必要

冷却試験の目的

2025/02/16

温度: ICの動作上限温度以下に保つ冷却設計

(ASIC: 60 °C, FPGA: 85 °C, レギュレータ: 125 °C, SFP: 70 °C)

1. ASIC単体での冷却試験

~2021年 牛澤

- ASICの冷却システムの設計と試験

2. FPGA基板単体での冷却試験

2023年~ 佐藤

- FPGA基板の冷却システムの設計と試験

3. 16ASIC + FPGA基板での冷却試験 (センサー未搭載)

~2024年 今回の話

- 読み出しコンポーネントの冷却システムの基本設計の確認

4. ASIC + FPGA基板 + DC-DCコンバーターでの冷却試験

- 鏡像対称を含めた読み出しコンポーネントの冷却システムの最終設計

センサーの温度変化によるミスアライメント: 測定中 2 μm 以下

5. ASIC + FPGA基板 + DC-DCコンバーター + センサーでの冷却試験

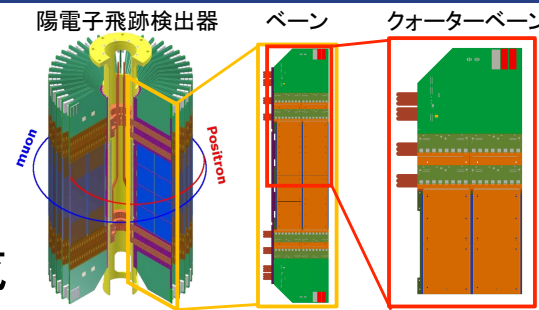
- センサーの熱膨張は 約1 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ と見積もられている
- センサーの温度安定性を測定し、熱変形の大きさを評価する
- アライメントシステムを用いて熱変形を実測してミスアライメントを評価する

冷却システムの要求と構造

2025/02/16

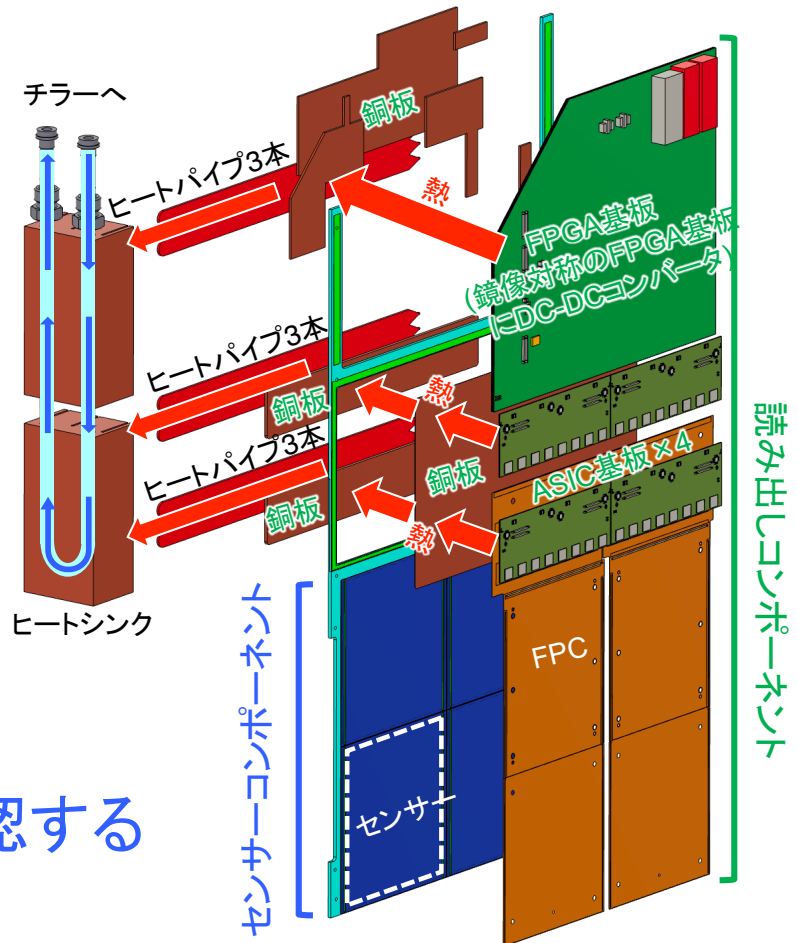
要求

- クォーターベーンの間両側の冷却システムが収まる
厚さ: 3 mm
- 蓄積磁場に影響を与えないために非磁性体の銅で構成
- ICの動作上限温度以下に保つ冷却性能
- 熱変形を抑えるセンサーの温度安定性



冷却システムの構造

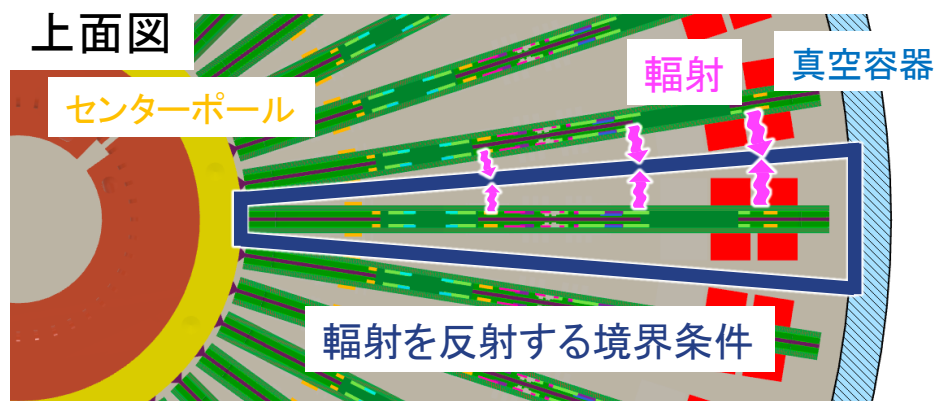
- 銅の約100倍熱伝導率の良いヒートパイプを用いてFPGA基板とASIC基板からヒートシンクに熱を輸送する
- ヒートパイプから離れた範囲は銅板を用いてヒートパイプまで熱を輸送する
- ヒートシンクは冷却水を循環させて10 °Cで一定温度に保つ



シミュレーションで冷却設計を確認する

シミュレーションの条件

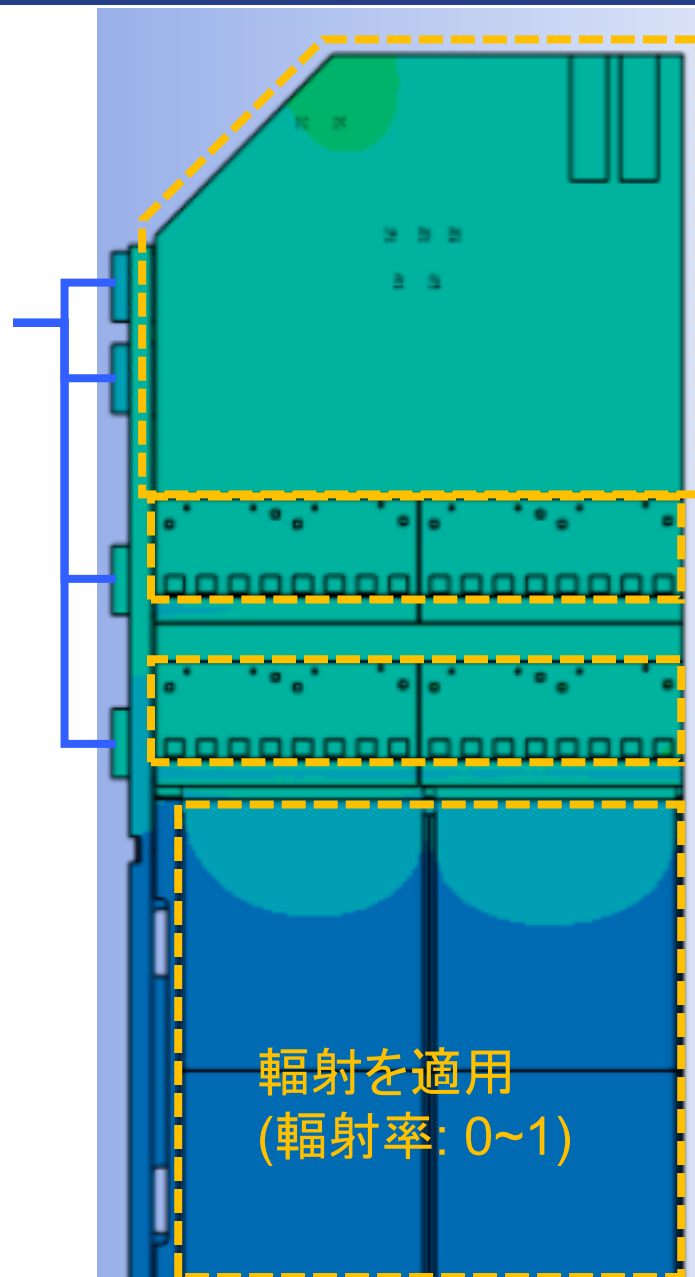
- 発熱量は実測からの計算値
- 別測定から求めたヒートパイプ温度を一定とする境界条件
- 表面積の大きい基板の上に輻射を適用
- 実機環境は40枚のベーンが向かい合う輻射の境界条件を設定



シミュレーションの不定性

- 輻射率の不定性: 0~1まで考慮
- 測定位置の不定性: 約5 mmで最大 ± 1 °C

ヒートパイプ温度を一定にする



実機環境の予想温度

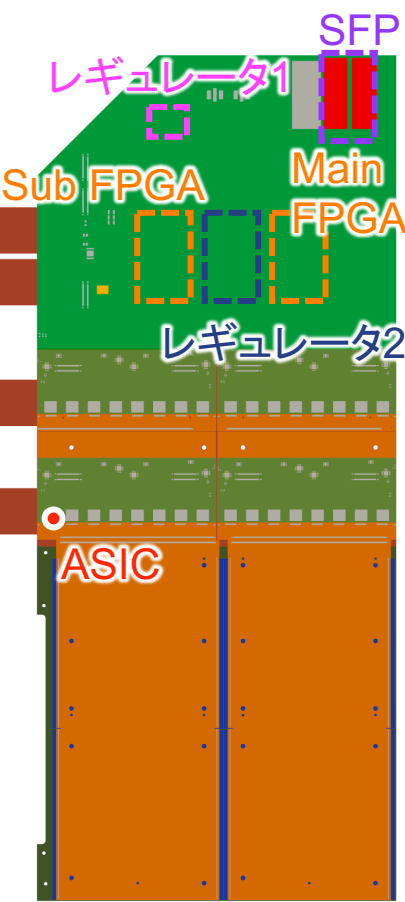
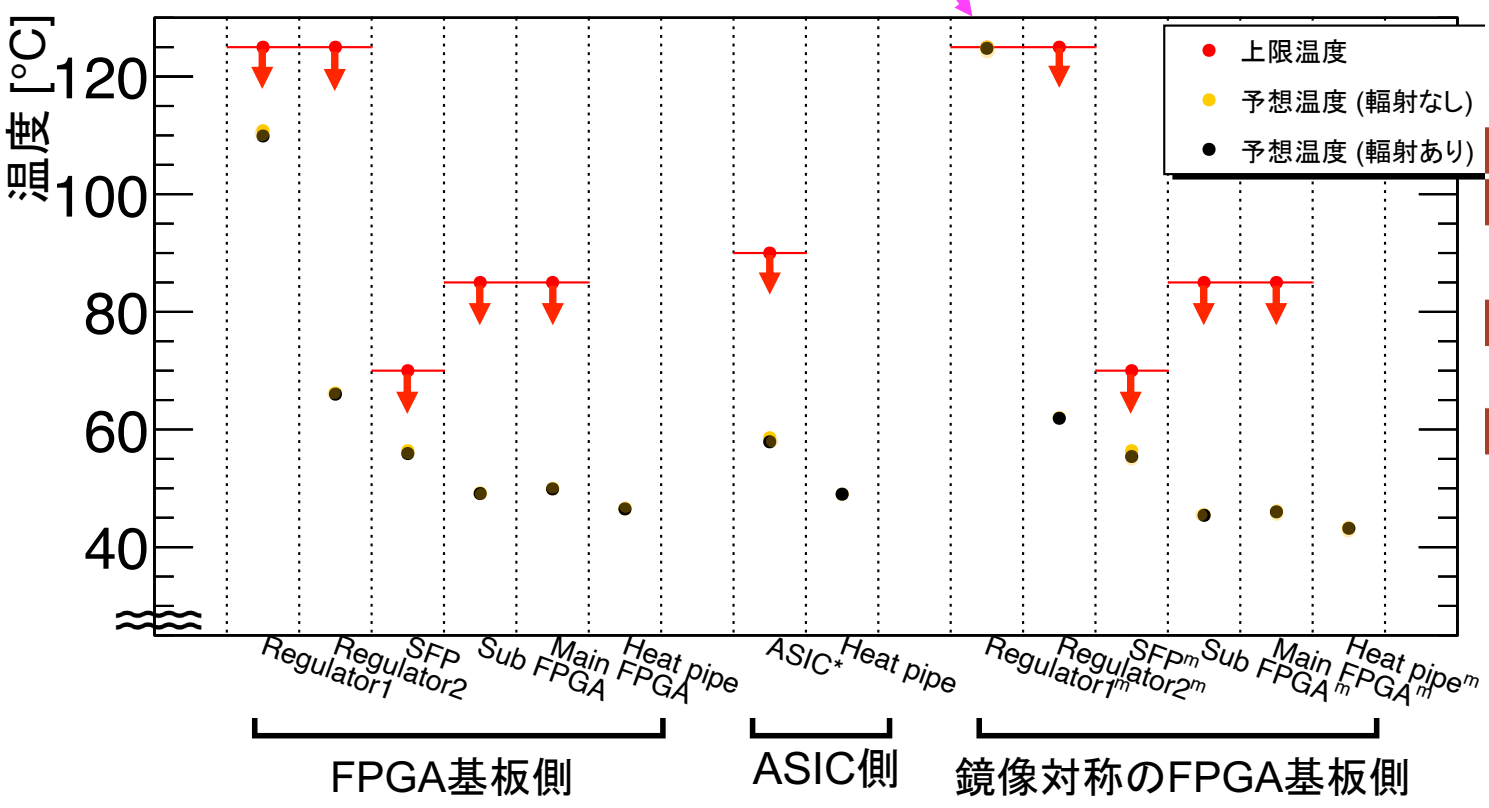
2025/02/16

40枚のベーンを含めた実機環境の予想温度を見積もった

- 実機では輻射が抑制され、影響がほとんどない
- 全てのICが上限温度以下に冷却できた
- 鏡像対称のFPGA基板のレギュレータだけ余裕がない

クォーターベーン上の位置

▼ 実機環境の予想温度

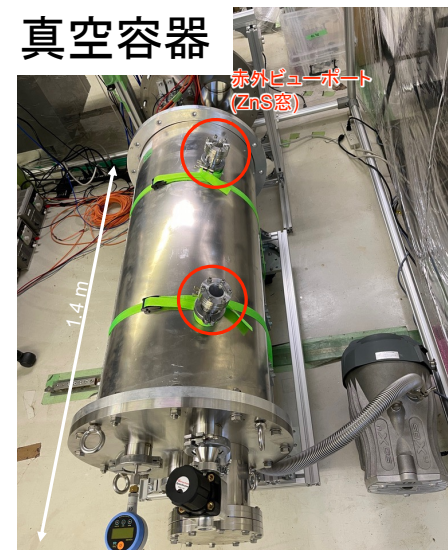


実機と同等の真空環境で冷却試験を行い、冷却システムが機能することを確認した

試験環境

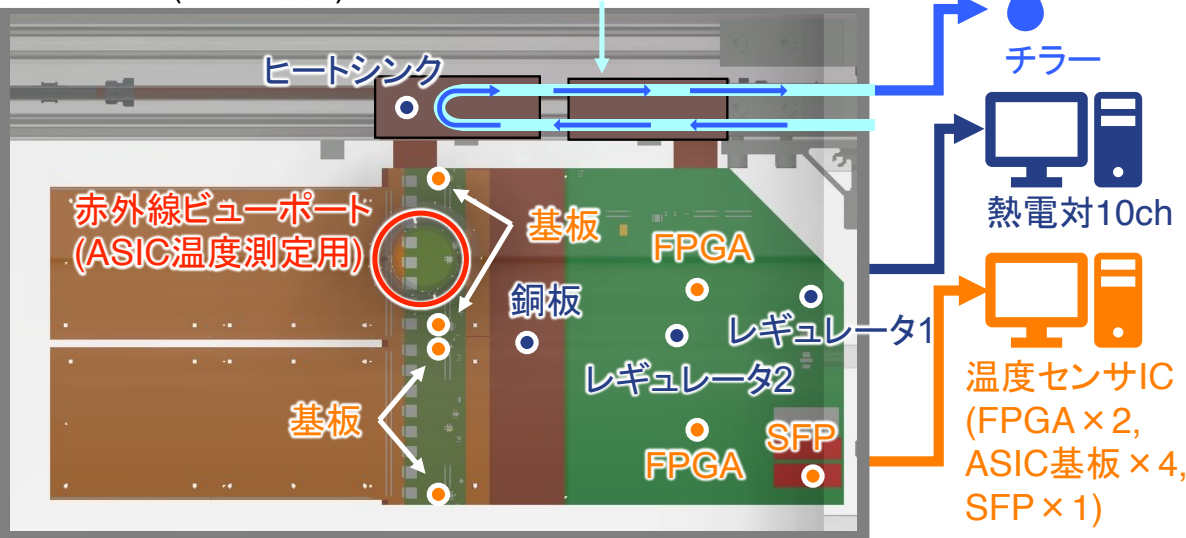
- FPGA基板 + 16ASIC (センサー未搭載)
- 真空中: 4.3×10^{-2} atm
- チラーの冷却水温度: 10 °C
- 各ICの発熱量は実機環境と変わらない
- 輻射の影響が無視できない => シミュレーションで見積もる

真空容器

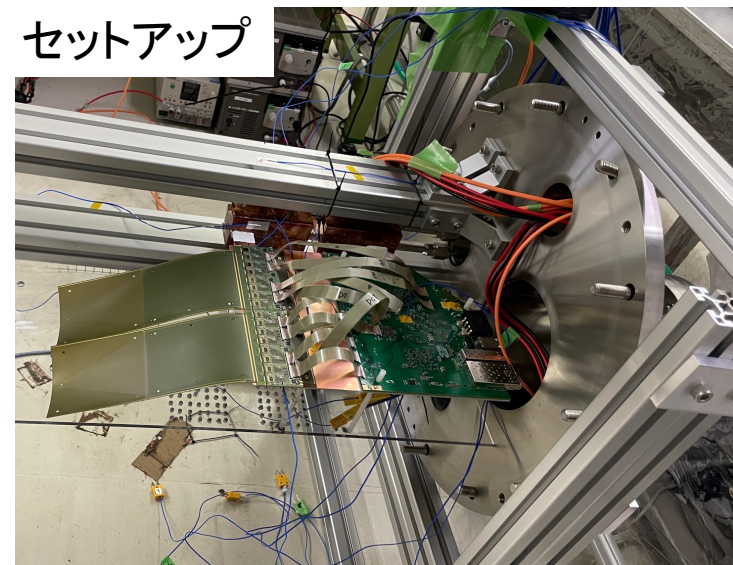


真空容器 (< 0.1 atm)

ヒートシンク: 10 °C



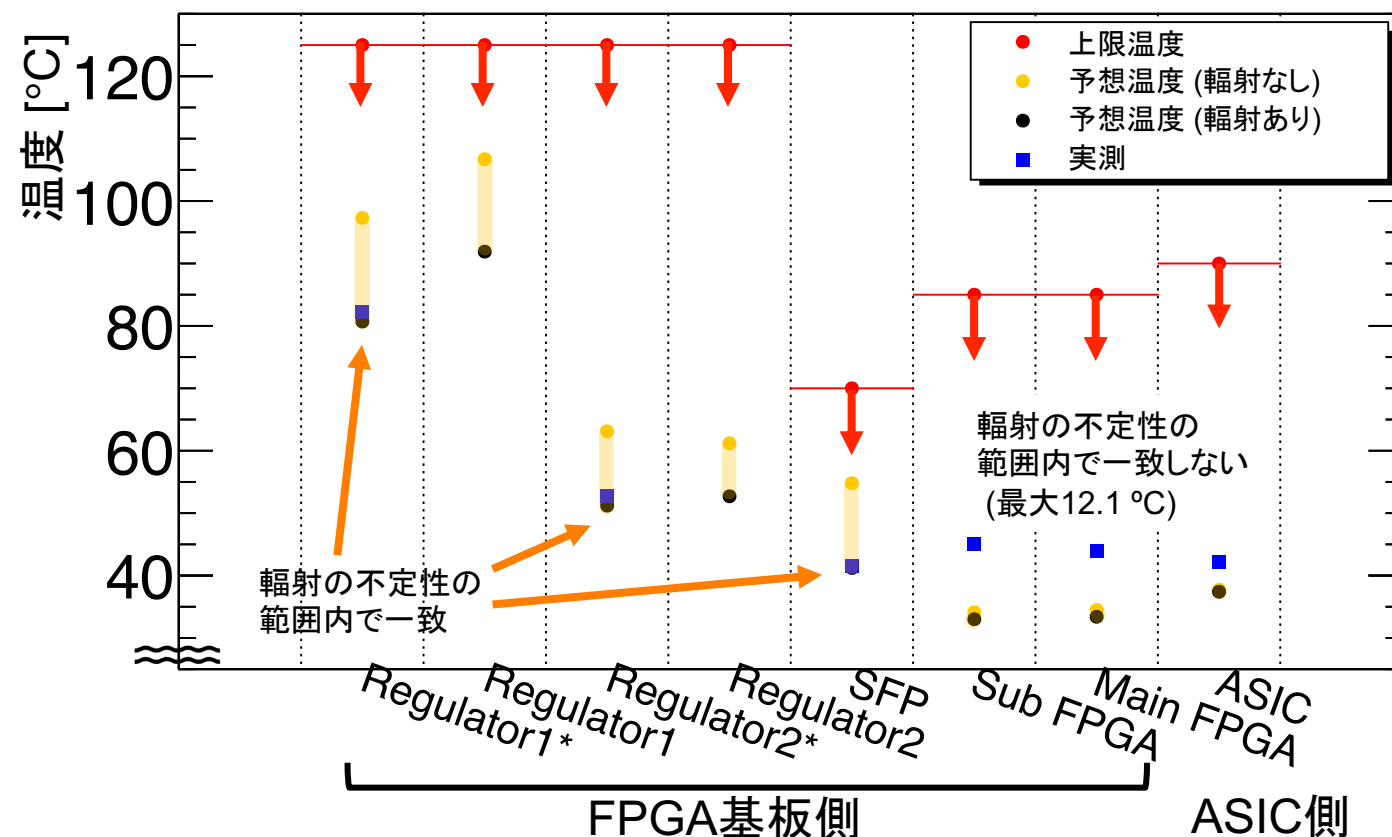
セットアップ



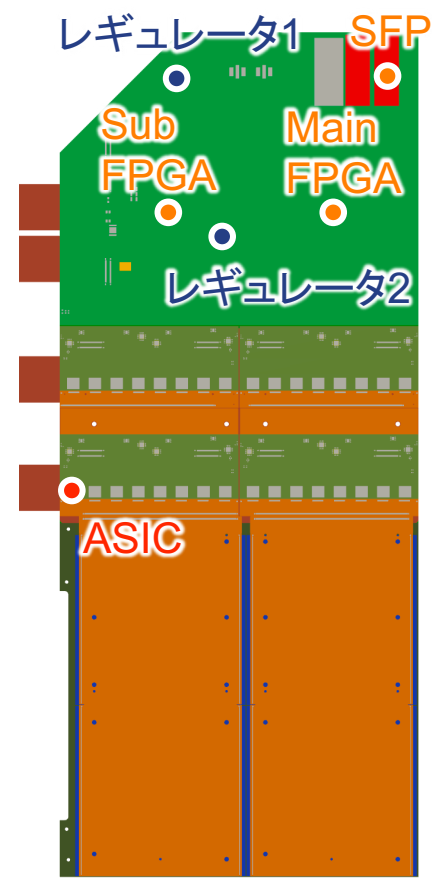
予想温度と冷却試験の比較

- 実測の結果から上限温度以下に冷却できることが確認できた
- 予想温度と一致しないICは上限温度に余裕があるため問題ないと考えられる
 - ・ 原因は接触の不定性と考えられ、実機では接着剤で対処する

▼ 試験環境の予想温度と実測



測定方法(文字色)
 温度IC (黄色)
 熱電対 (黒色)
 サーマルカメラ (青色)

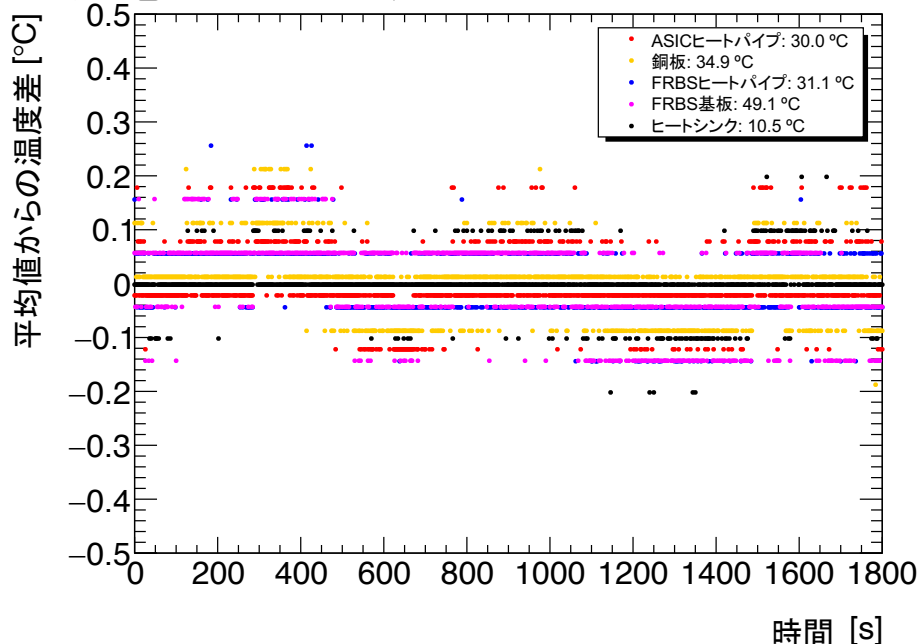


*はレギュレータのコア温度を実測することはできないため、基板上の温度から計算した推定コア温度である

温度安定性の実測結果

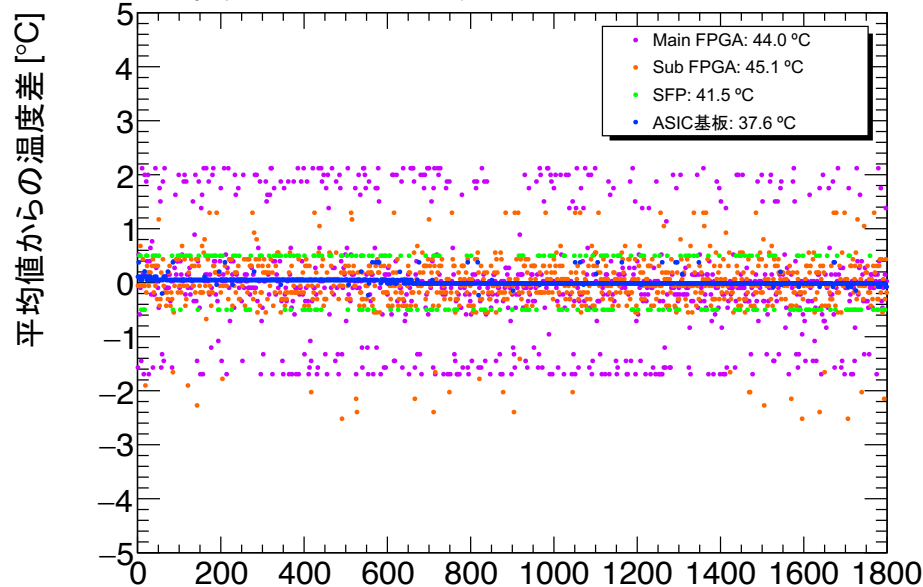
各コンポーネントの測定中30分間の温度安定性を確認した

▼ 熱電対による測定



0.3 °C以内で安定
(チラーが0.1 °C以内で制御する
周期が確認できる)

▼ 温度ICによる測定



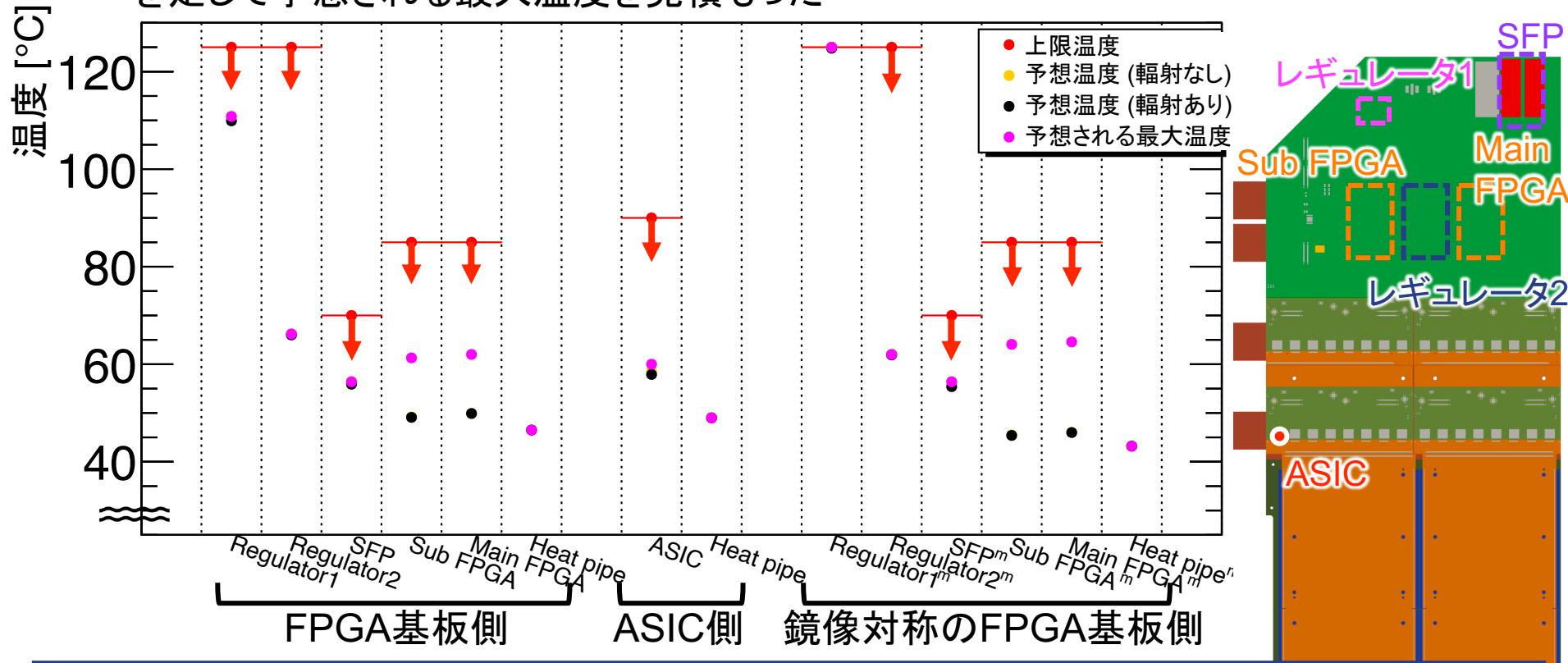
各コンポーネント	型番	精度 [°C]	時間 [s]
ASIC 基板上	TMP112A	最大 ±1	
FPGA	XC7A200T-1FFG1156C	最大 ±4	
SFP	AFBR-710DMZ	最大 ±3	

各温度ICの精度範囲でのふらつき

- 発熱量が一定であれば温度安定性は0.3 °C以内である
(別測定でヒット数依存で発熱量が変化しないことは確認している)
- センサー未搭載であるが発熱部品がないため、温度安定性の要求
2.1 °Cを十分達成できると予想される

実機予想温度の評価

実機環境の予想温度(13ページ)に実測による不一致度(FPGAとASICのみ)を足して予想される最大温度を見積もった



不一致度 FPGA: 12.1 °C ASIC: 1.4 °C 鏡像対称のFPGA: $12.1 \text{ °C} \times (18.7 \text{ W} + 10 \text{ W}) / 18.7 \text{ W} = 18.6 \text{ °C}$
 (15ページの結果から) (DC-DCコンバータの発熱量10Wを追加して発熱量でスケール)

実測との不一致度を考慮しても、全てのICが上限温度以下に冷却できることが示された
 鏡像対称のFRBSのレギュレータ1だけは上限温度に余裕がないため注意が必要である

まとめと今後の展望

2025/02/16

J-PARC muon g-2/EDM精密測定実験

- E34実験で行われるEDM精密測定のためには10 μ rad以内のアライメント精度が必要となる
- 検出器の動作を保証し、熱変形によるミスアライメントを抑えるために、発熱ICを上限温度以下に保ち、温度的に安定な冷却システムが必要である

検出器冷却システムの開発

- 実測を元にシミュレーションで冷却システムを設計し、予想温度を見積もった
- 実機に近い環境でICの上限温度以下に保ち、0.3 $^{\circ}$ C以内で十分温度的に安定な冷却システムの性能が実証できた
- 実機環境における予想温度は実測とシミュレーションの不一致度を考慮しても、鏡像対称のレギュレータ以外の冷却性能は十分であることが示された

今後の展望

- 鏡像対称のFPGA基板に関しては開発段階であるため、レイアウトの改善もしくは冷却システムの改善を検討している
- 今後、長期運用も考慮した1~2日での温度安定性測定やサーマルサイクル試験による耐久試験も実施する予定である
- 熱変形の実測やシミュレーションを用いて変形成分を解析し、EDM測定精度への影響を評価し、さらなる系統誤差の削減を目指している