

J-PARC muon g-2/EDM検出器における冷却システムの開発

総合研究大学院大学

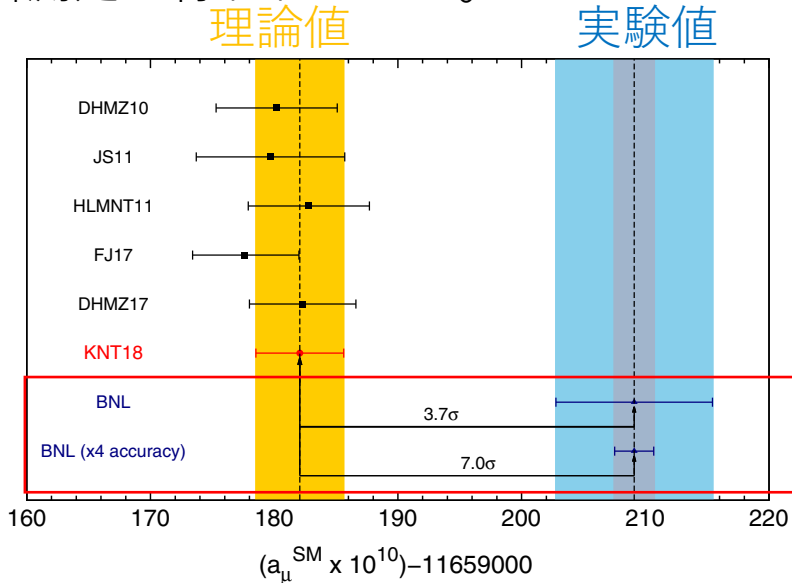
牛澤 昂大^E

東北大電子光^A, KEK素核研^B, KEK物構研^C, KEK機械工学セ^D, 総研大^E, 東大理^F, JAXA^G, 名大理^H,
九大理^I, 九大RCAPP^J, Open-It^K, IIT^L, KAIST^M

青柳泰平^A, 池田博一^{G, K}, 池野正弘^{B, K}, 上野一樹^{B, K}, 内田智久^{B, K}, Oh Jeawhan^M, 川越清以^I,
岸下徹一^{B, K}, 久米達哉^D, 高力孝^{B, K}, 齊藤直人^B, 佐々木修^{B, K}, 佐田智也^I, 佐藤伸彦^D, 佐藤優太郎^{B, K},
Jangam Viraj^L, 庄子正剛^{B, K}, 調翔平^{I, K}, 末原大幹^{I, K}, 須江祐貴^H, 須田利美^A, 千代浩司^{B, K}, 高富俊和^D,
田中真伸^{B, K}, 塚田暁^A, 堤裕樹^{I, K}, 東城順治^{I, K}, 南波和希^A, 西村昇一郎^{C, K}, 本多佑記^A, 眞玉将豊^{I, K},
三部勉^{B, K}, 村上武^{B, K}, 安田浩昌^{F, K}, 山中隆志^{J, K}, 吉岡瑞樹^{J, K}, 他J-PARC muon g-2/EDMコラボレーション

g-2

標準理論を超えた物理の探索方法の一つとして、ミューオンの異常磁気能率 (g-2) の精密測定が行われている。



g-2 理論予想値との比較[1]

アメリカのBNLの実験では、理論予想値[1]より3.7σの大きいミューオンのg-2の値が測定されている。
→新物理の兆候であるのか議論されている。

[1] A. Keshavarziet al., Phys. Rev. D **97** (2018) 114025

EDM

電気双極子能率 (EDM) は電場におけるハミルトニアン (右式) の関係から、時間反転対称性を破る。

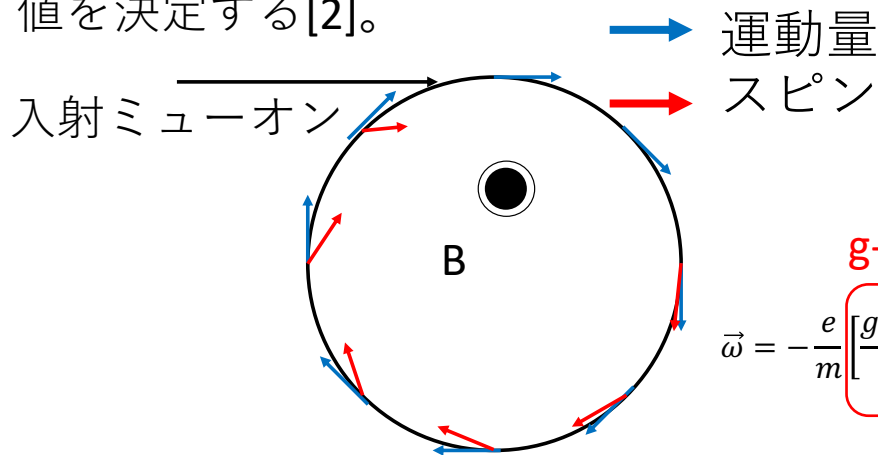
→CPT定理から有限のEDMはCP対称性の破れの証拠。

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \underbrace{\vec{d} \cdot \vec{E}}_{\text{EDM}}$$

	E	B	μ	d
C	-	-	-	-
P	-	+	+	+
T	+	-	-	-

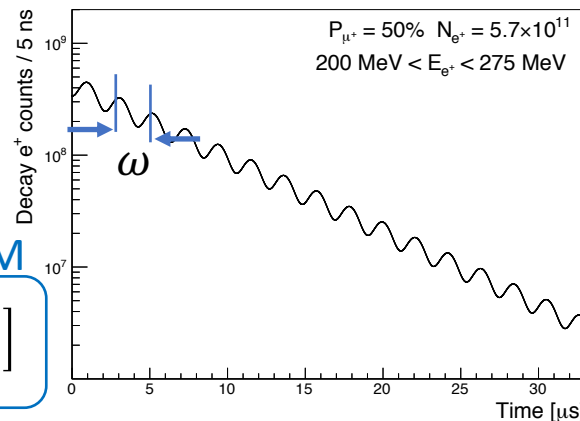
g-2

- スピン方向の時間変化と磁場の大きさから歳差運動の角周波数を計測し、g-2の値を決定する[2]。



$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[\frac{g-2}{2} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

g-2
EDM

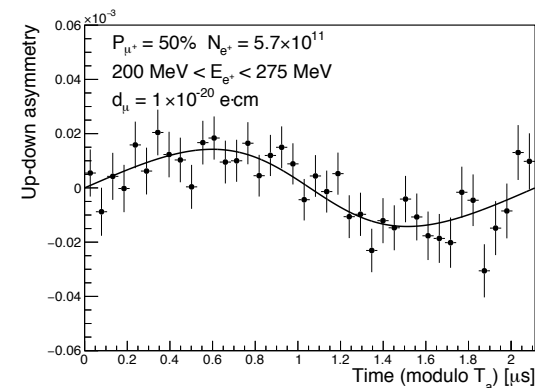


ミューオン g-2による異常歳差運動[2]

- μ^+ は崩壊時にスピン方向へ高い運動量の陽電子が放出する。
- 高い運動量の陽電子を計測することでスピンの方向を検出できる。

EDM

- EDMの測定は磁場の向きに対しての平行・反平行の非対称度を測定。



目標感度の10倍のEDMを仮定[2]

[2] arXiv:1901.03047

J-PARC muon g-2/EDM 実験

J-PARC muon g-2/EDM実験の概要

- BNL/Fermilab : $(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1}) = 0$ となる γ (マジック γ)を使用。

— BNL

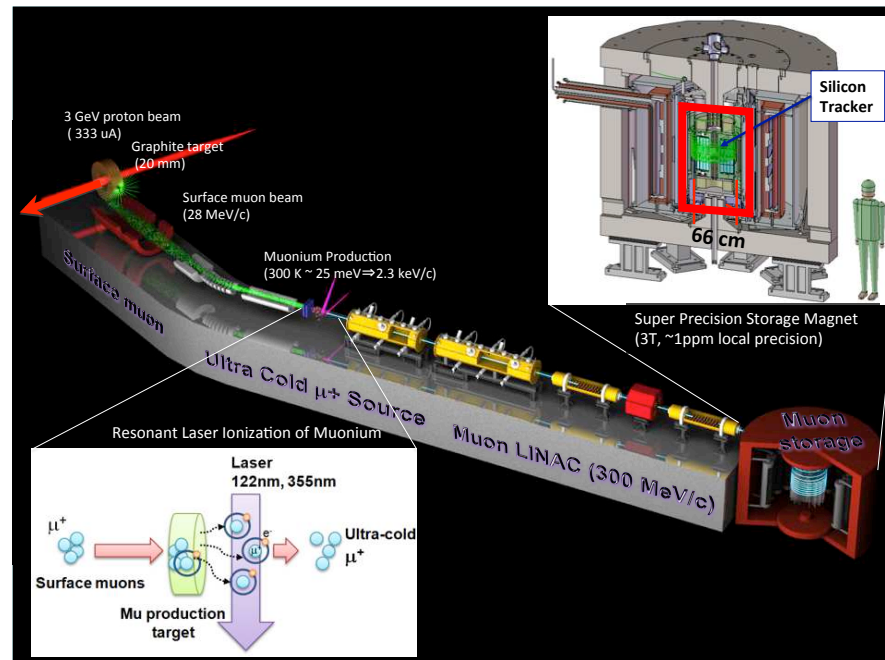
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} \right] + \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \left[\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) + \frac{\vec{E}}{c} \right]$$

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

BNL / Fermilab

ミューオン運動量	3.09 GeV/c
蓄積リングの直径	14 m
磁場強度	1.45 T

- BNL/Fermilab : 陽電子検出にカロリメータを使用。



参考 : arXiv:1901.03047

J-PARC muon g-2/EDM 実験

J-PARC muon g-2/EDM実験の概要

$$\vec{\omega} = \underbrace{-\frac{e}{m} a_\mu \vec{B}}_{\text{J-PARC}} + \underbrace{\left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}}_{\text{BNL}} + \underbrace{\left[\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) + \frac{\vec{E}}{c} \right]}_{\text{EDM}}$$

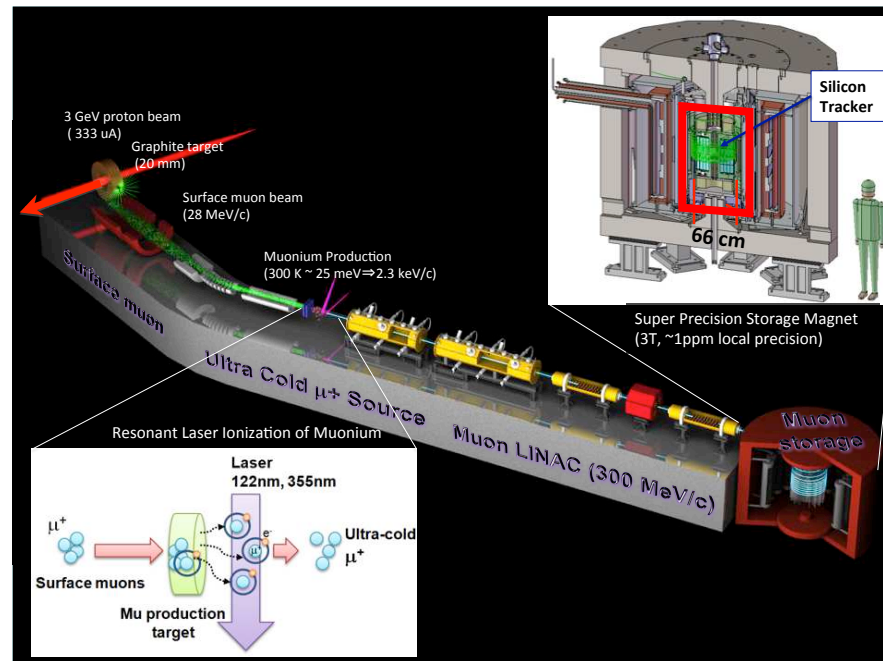
$$a_\mu \equiv \frac{g-2}{2}$$

- BNL/Fermilab : $(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1}) = 0$ となる γ (マジック γ)を使用。
- **J-PARC : 電場を用いず弱収束磁場でミュオンビームを蓄積する。(E=0)**
 - 極冷ミュオンを用いた低エミッタンス ($1\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$)ミュオンビーム (世界初のミュオン加速器) →中沢さんが説明 (次の発表)

BNL / Fermilab

ミュオン運動量	3.09 GeV/c
蓄積リングの直径	14 m
磁場強度	1.45 T

- BNL/Fermilab : 陽電子検出にカロリメータを使用。



参考 : arXiv:1901.03047

J-PARC muon g-2/EDM 実験

J-PARC muon g-2/EDM実験の概要

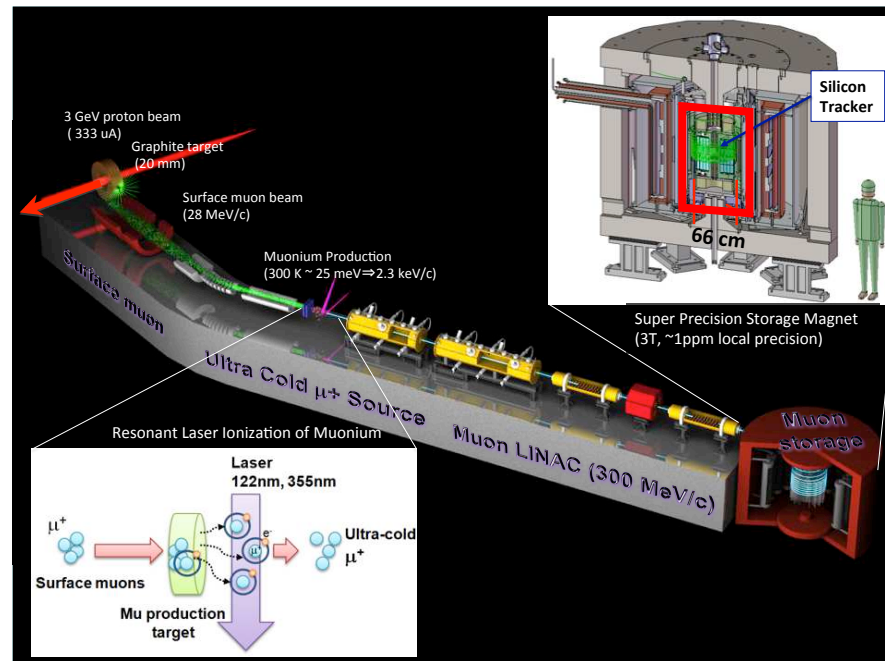
$$\vec{\omega} = \underbrace{-\frac{e}{m} a_{\mu} \vec{B}}_{\text{J-PARC}} + \underbrace{\left(a_{\mu} - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}}_{\text{BNL}} + \underbrace{\left[\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) + \frac{\vec{E}}{c} \right]}_{\text{EDM}}$$

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

- BNL/Fermilab : $(a_{\mu} - \frac{1}{\gamma^2 - 1}) = 0$ となる γ (マジック γ)を使用。
- J-PARC : 電場を用いず弱収束磁場でミュオンビームを蓄積する。(E=0)**
 - 極冷ミュオンを用いた低エミッタンス ($1\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$)ミュオンビーム (世界初のミュオン加速器) →中沢さんが説明 (次の発表)

	BNL / Fermilab		J-PARC
ミュオン運動量	3.09 GeV/c	$\xrightarrow{\times 1/10}$	300 MeV/c
蓄積リングの直径	14 m	$\xrightarrow{\times 1/20}$	66 cm
磁場強度	1.45 T	$\xrightarrow{\times 2}$	3 T

- BNL/Fermilab : 陽電子検出にカロリメータを使用。



参考 : arXiv:1901.03047

J-PARC muon g-2/EDM 実験

J-PARC muon g-2/EDM実験の概要

$$\vec{\omega} = \underbrace{-\frac{e}{m} a_\mu \vec{B}}_{\text{J-PARC}} + \underbrace{\left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}}_{\text{BNL}} + \underbrace{\left[\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) + \frac{\vec{E}}{c} \right]}_{\text{EDM}}$$

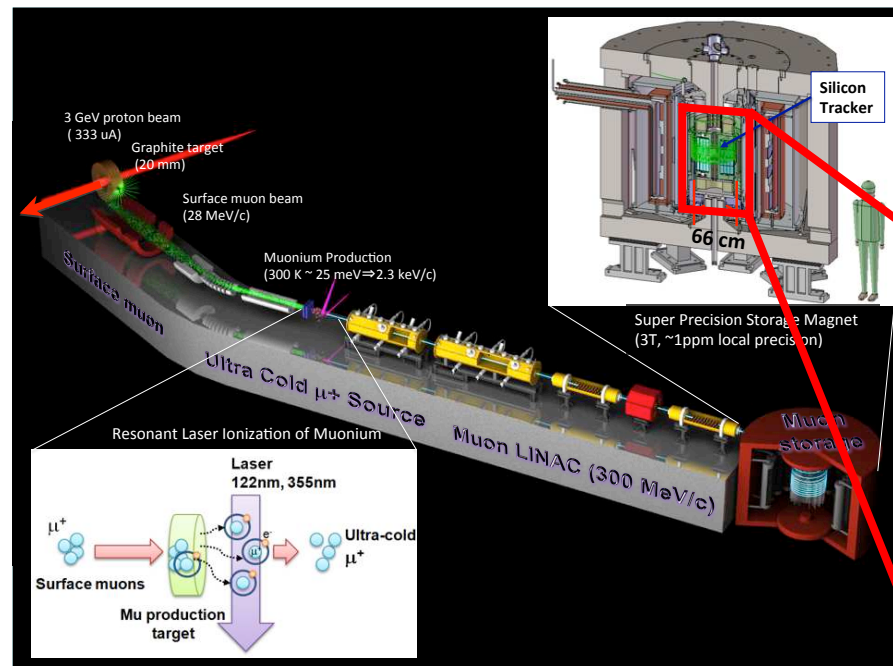
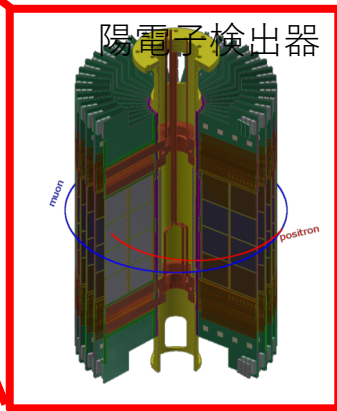
$$a_\mu \equiv \frac{g-2}{2}$$

- BNL/Fermilab : $(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1}) = 0$ となる γ (マジック γ)を使用。
- J-PARC : 電場を用いず弱収束磁場でミュオンビームを蓄積する。(E=0)
 - 極冷ミュオンを用いた低エミッタンス ($1\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$)ミュオンビーム (世界初のミュオン加速器) →中沢さんが説明 (次の発表)

	BNL / Fermilab		J-PARC
ミュオン運動量	3.09 GeV/c	$\xrightarrow{\times 1/10}$	300 MeV/c
蓄積リングの直径	14 m	$\xrightarrow{\times 1/20}$	66 cm
磁場強度	1.45 T	$\xrightarrow{\times 2}$	3 T

• BNL/Fermilab : 陽電子検出にカロリメータを使用。

- J-PARC : シリコンストリップセンサを用いた飛跡検出器を使用
 - 陽電子の飛跡の検出によりEDMを正確に測定。
 - カロリメータと比較してパイルアップの区別が行いやすい。

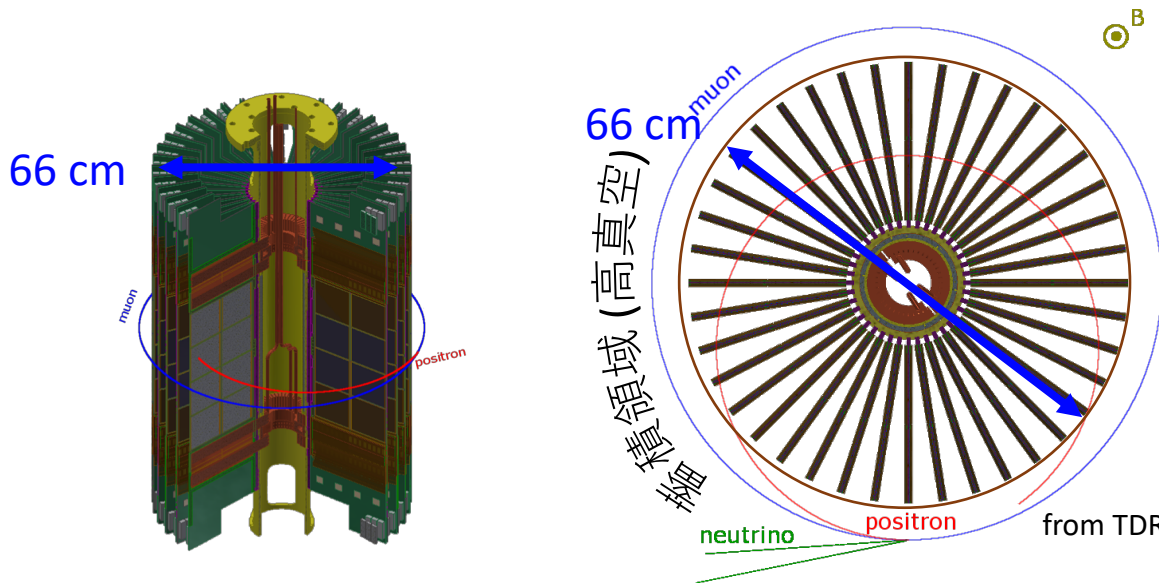


精度 : **g-2 0.1 ppm** (BNL : 0.54 ppm)、**EDM $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$** を目指す。

参考 : arXiv:1901.03047

陽電子飛跡検出器

- シリコンストリップセンサ検出器(ベーン)40枚を放射状に設置。
 - ミュオンの崩壊陽電子の軌跡をシリコンストリップセンサを用いて正確に捕捉。
- 検出器は高真空のミュオン蓄積リングの内側に薄い陽電子窓(ポリイミド)を隔てて設置。
 - 気圧差によって生じる陽電子窓へかかる力を考慮して、検出器は真空中(低真空)に設置。



検出器基本性能：

- ストリップ間隔：0.19 mm
- 読み出し間隔：5 ns
- 立ち上がり：~50 ns

磁石内の検出器領域と μ^+ 蓄積領域

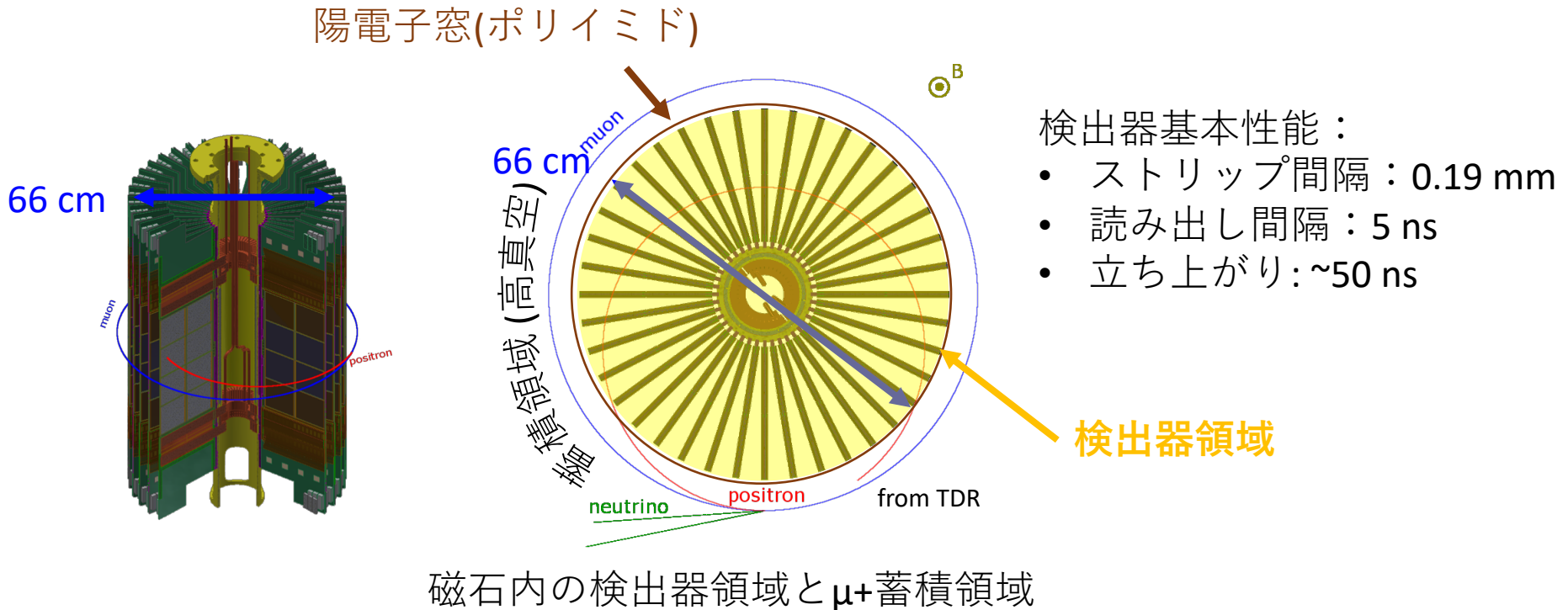
drawn by

T. Takatomi (KEK Mechanical Engineering Center), T. Yamanaka (Kyushu University)

ICEPP symposium

陽電子飛跡検出器

- シリコンストリップセンサ検出器(ベーン)40枚を放射状に設置。
 - ミュオンの崩壊陽電子の軌跡をシリコンストリップセンサを用いて正確に捕捉。
- 検出器は高真空のミュオン蓄積リングの内側に薄い陽電子窓(ポリイミド)を隔てて設置。
 - 気圧差によって生じる陽電子窓へかかる力を考慮して、検出器は真空中(低真空)に設置。



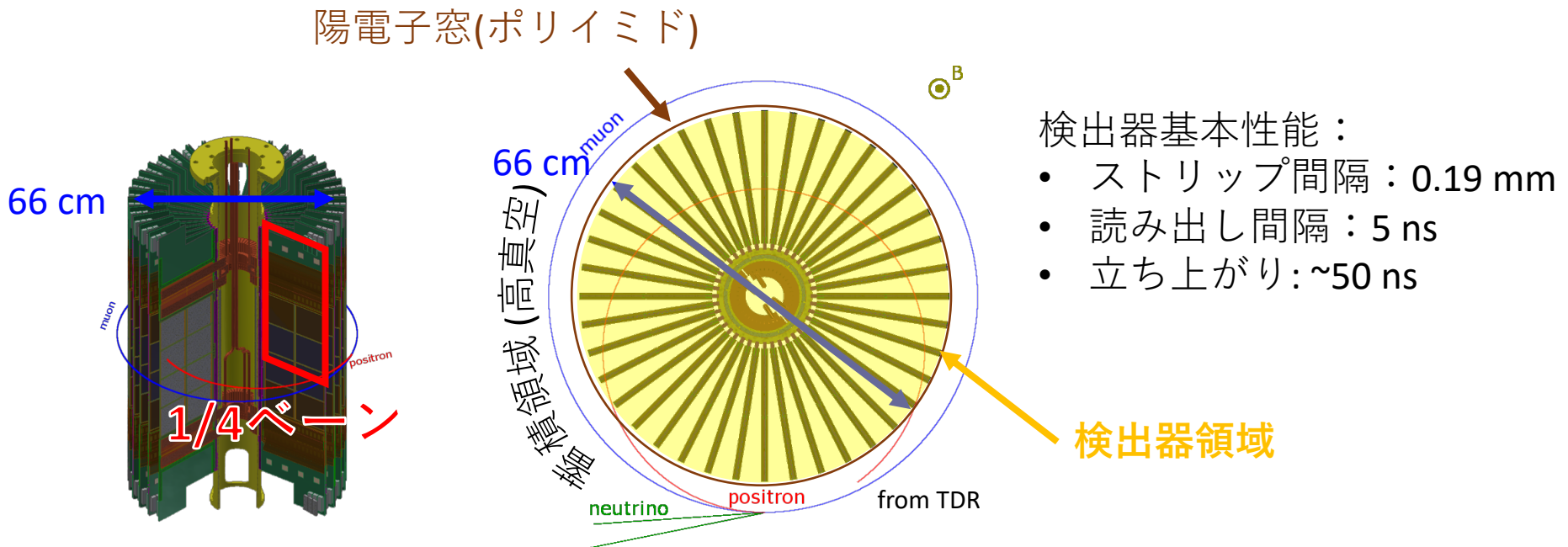
drawn by

T. Takatomi (KEK Mechanical Engineering Center), T. Yamanaka (Kyushu University)

ICEPP symposium

陽電子飛跡検出器

- シリコンストリップセンサ検出器(ベーン)40枚を放射状に設置。
 - ミュオンの崩壊陽電子の軌跡をシリコンストリップセンサを用いて正確に捕捉。
- 検出器は高真空のミュオン蓄積リングの内側に薄い陽電子窓(ポリイミド)を隔てて設置。
 - 気圧差によって生じる陽電子窓へかかる力を考慮して、検出器は真空中(低真空)に設置。



磁石内の検出器領域と μ^+ 蓄積領域

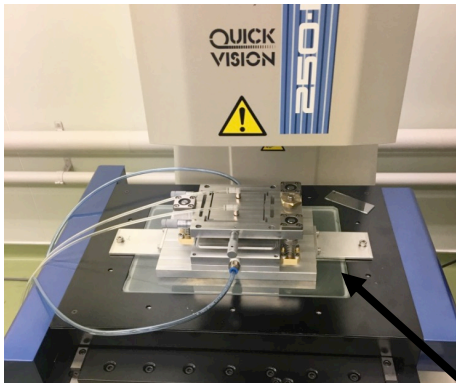
この発表では主に1/4ベーンについて説明する。

drawn by

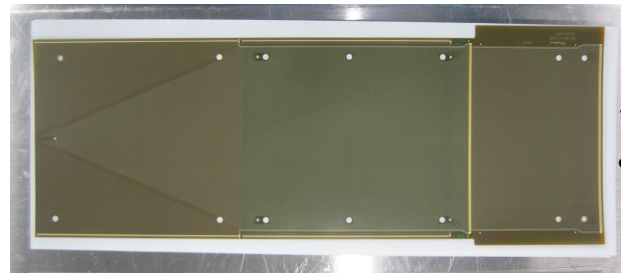
T. Takatomi (KEK Mechanical Engineering Center), T. Yamanaka (Kyushu University)

ICEPP symposium

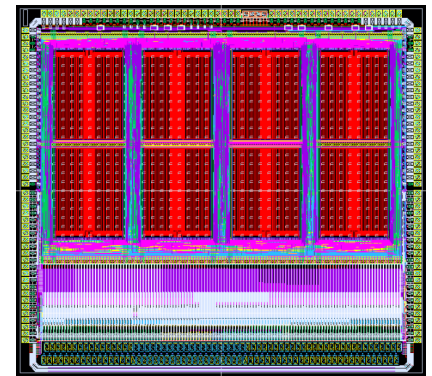
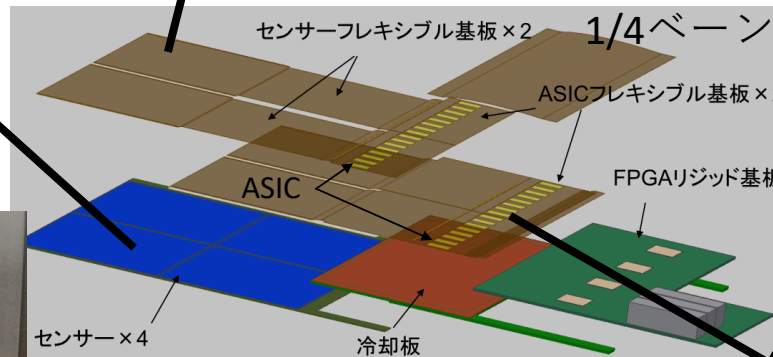
検出器の開発状況



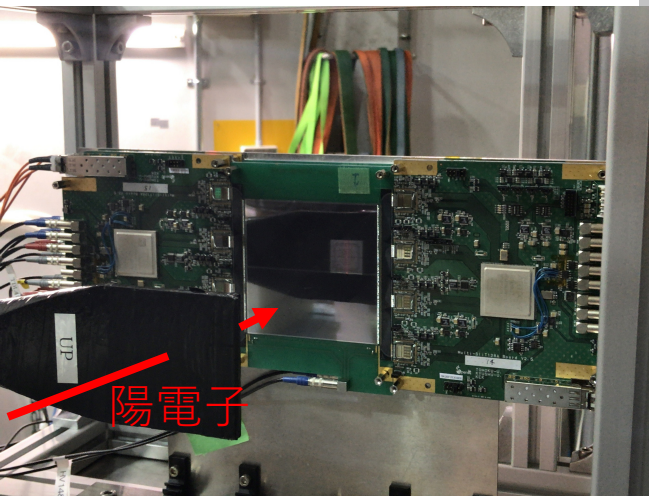
3次元測長機による
センサーの位置決め
& 接着@KEK



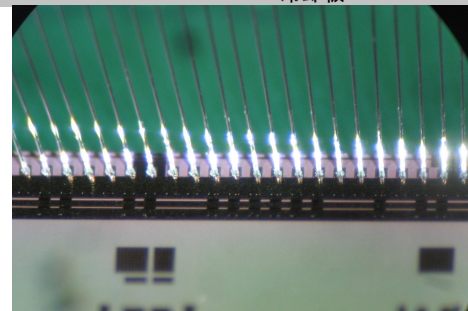
センサー用FPC(フレキシブル基板)
• 設計、製作@九大



ASIC (最終量産版 : Slit128B)の
設計、製作@KEK



Test module 2の特性試験
(閾値依存性、角度依存性)@ELPH



ワイヤーボンディング@九大

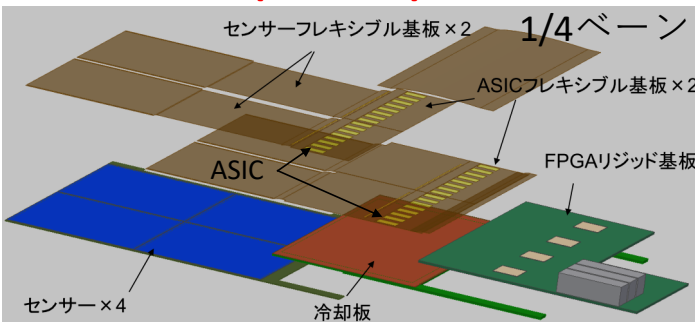
検出器の冷却

検出器の主な熱源

- ASIC : $5 \text{ mW} \times 128 \text{ ch} = 0.64 \text{ W/chip}$
- ASICの枚数 : $16 \text{ 枚} \times 2 \text{ 列} = 32 \text{ 枚}/(1/4 \text{ ベーン})$
- **1/4ベーンあたり : 20.4 W**

検出器の設置環境

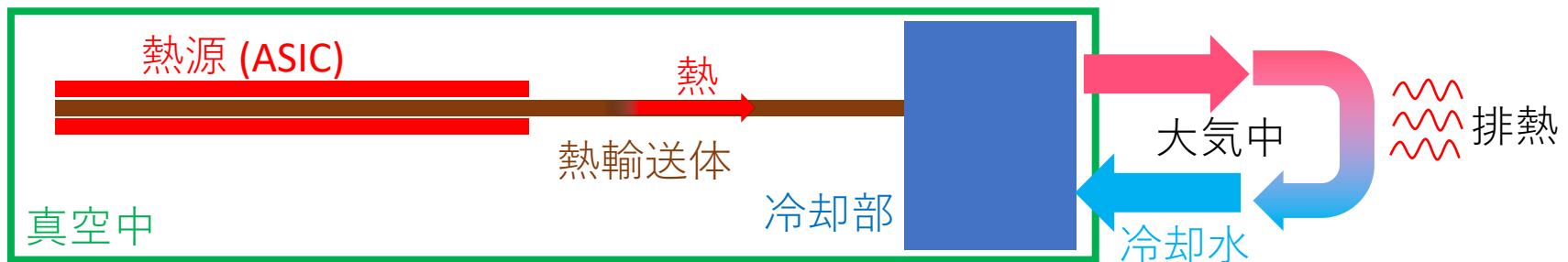
- **真空中(低真空)**に設置



真空中で動作するASICの冷却システムの開発が必要

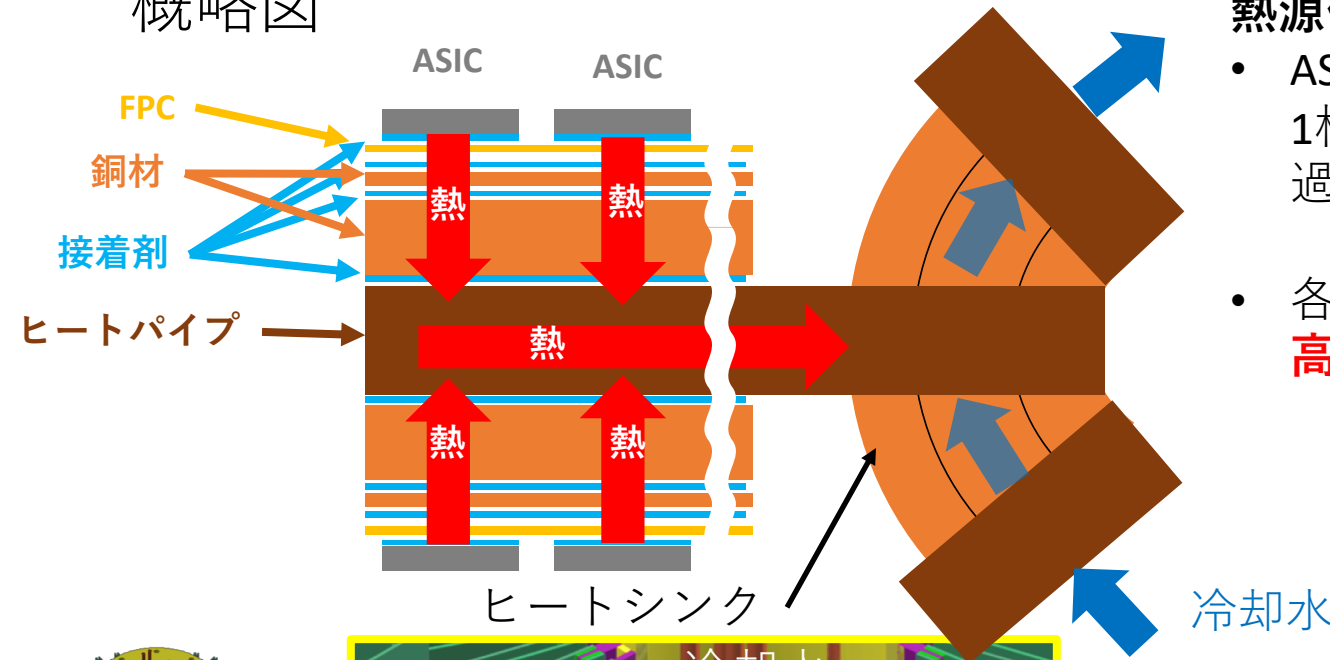
冷却システムの構想

- 発生した熱を輸送し、検出器外部での冷却を行う。
- ASIC表面の温度 $<50 \text{ }^\circ\text{C}$ で使用するよう設計。
- **冷却水 $20 \text{ }^\circ\text{C}$** で温度制御を行う。



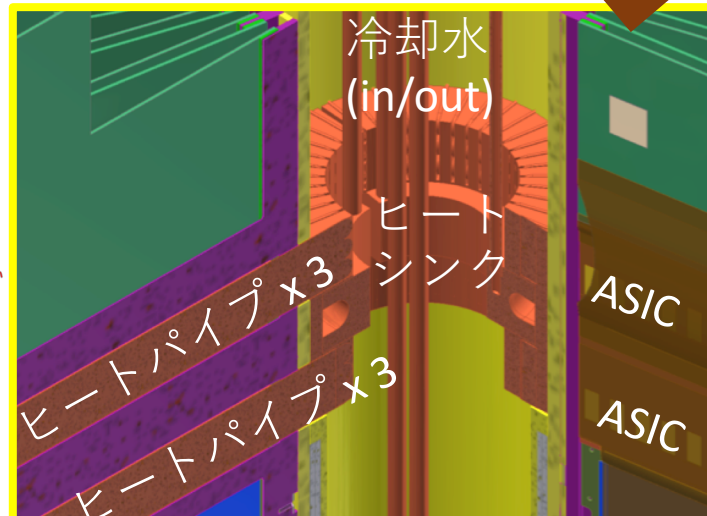
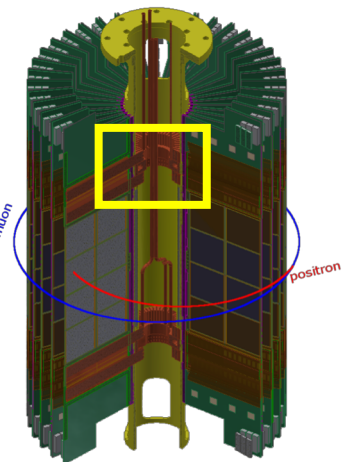
冷却システムの構造

概略図



熱源付近の構造

- ASIC-ヒートパイプ間では1枚のFPC、2枚の銅板を通過する。
- 各層の間には**熱伝導率の高い接着剤を用いる**。



検出器への組み込み

- 発生した熱は6本の**ヒートパイプ**によりヒートシンクへと輸送。
- 冷却水は中央の円柱(センターポール)を介して大気側と接続。

接着剤試験

6種の熱伝導性接着剤について熱源の温度に対して相対的に熱伝導度を比較した。

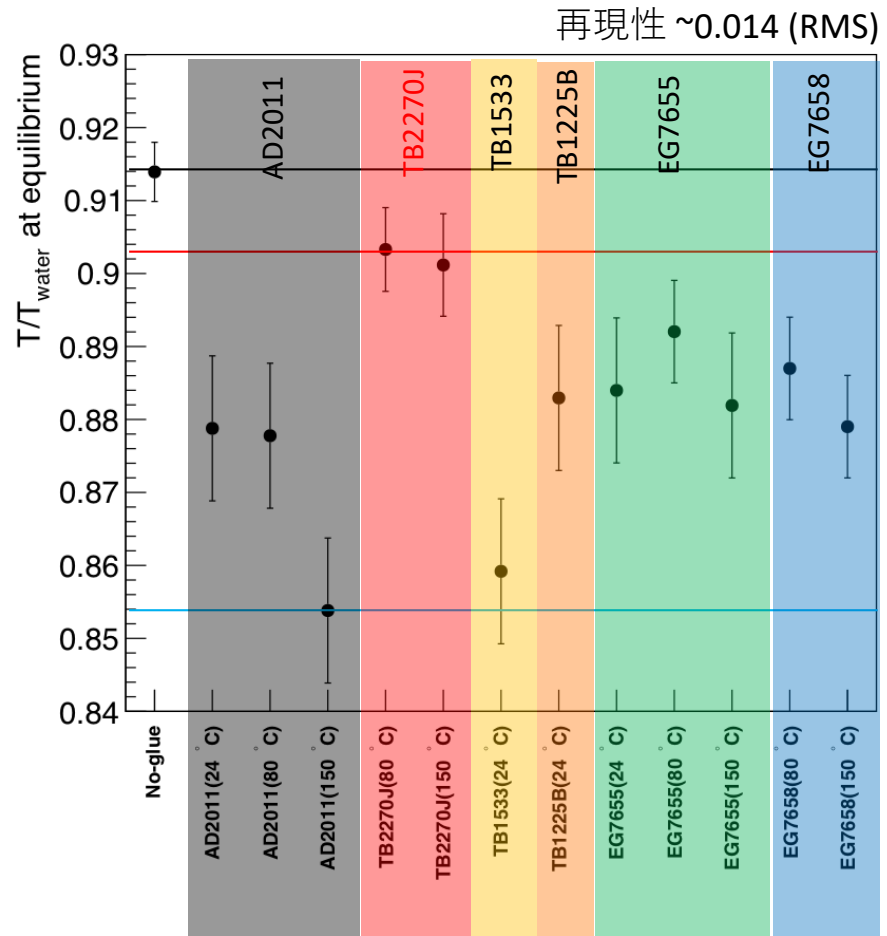
	Sample number	Sample	Curing temp. [°C]	Main component	thermal conductivity [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
エポキシ系	0	Cu	-	-	390
	1		24		
	2	AD2011	80	epoxy	
シリル系	3		150		
	4	TB2270J	80	epoxy	4.2
	5		150		
シリコン	6	TB1533	24	special polymer※	
	7	TB1225B	24	silicone	1.59
	8		24		
エポキシ系	9	EG7655	80	epoxy	1.7
	10		150		
	11	EG7658	80	epoxy	3.6
	12		150		



- 2枚の銅板を接着剤で接着
- 表面を黒く塗装 (黒体放射の測定のため)
- 銅板の下部を熱水に浸け、上部の温度を赤外線カメラで測定

set up prepared by T. Takatomi
(KEK Mechanical Engineering Center)

サンプル上の温度/熱水温



この測定から**TB2270J (スリーボンド、エポキシ系)**を用いて製作することにした。

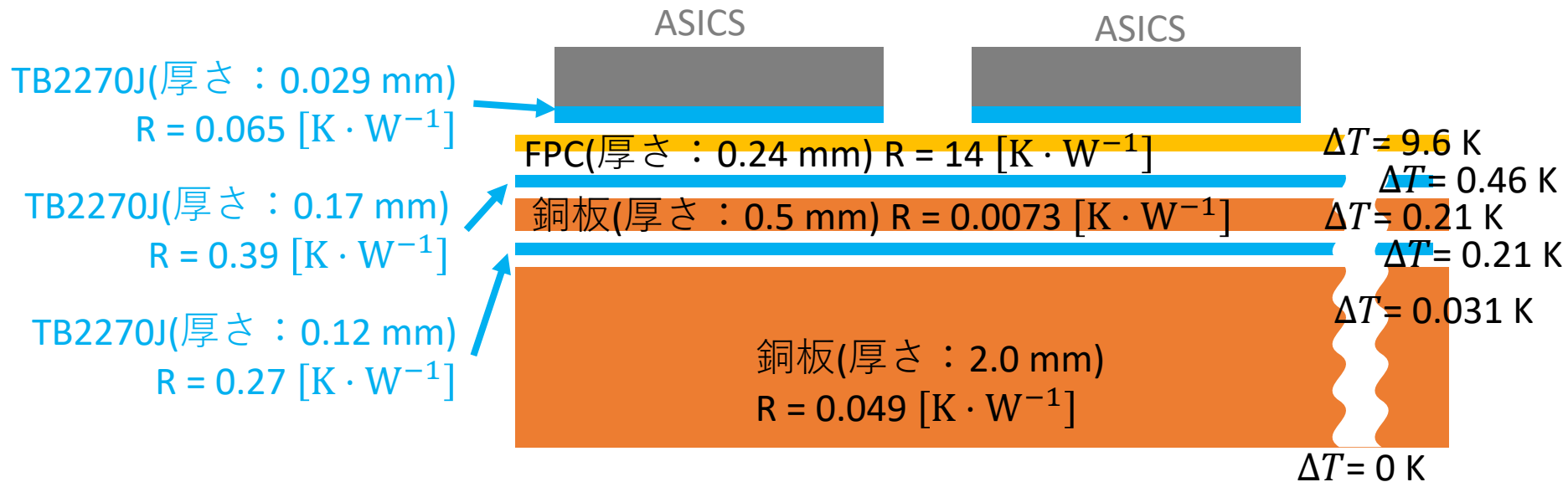
熱源の熱抵抗の見積もり

ASIC – 銅板間の熱抵抗、温度差の見積もりを行った。
見積もりには以下の計算式を使用。

$$\text{熱抵抗 } R[\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] = \frac{L[\text{mm}]}{\sigma[\text{W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot A[\text{mm}^2]}、\text{温度差 } \Delta T[\text{K}] = R[\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \cdot Q[\text{W}]$$

L:伝熱長 (厚み)、 σ :熱伝導率、A:伝熱面積、Q:熱量

伝熱面積はASIC(7 mm x 15 mm)を使用



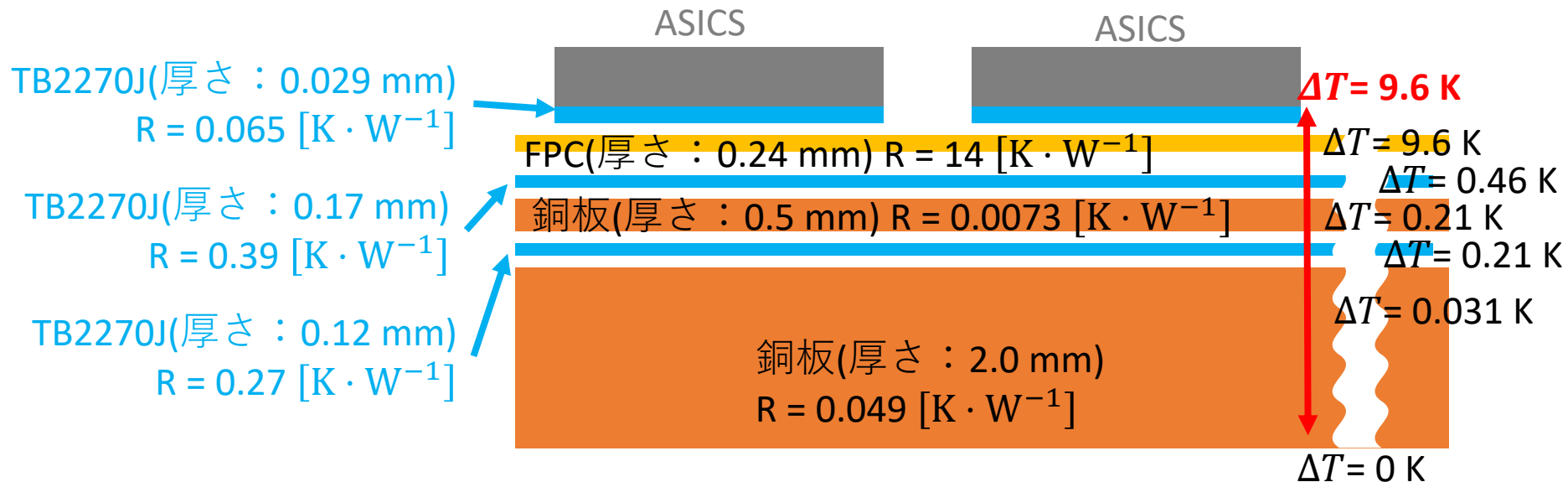
熱源の熱抵抗の見積もり

ASIC – 銅板間の熱抵抗、温度差の見積もりを行った。
見積もりには以下の計算式を使用。

$$\text{熱抵抗 } R[\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] = \frac{L[\text{mm}]}{\sigma[\text{W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot A[\text{mm}^2]}、\text{温度差 } \Delta T[\text{K}] = R[\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \cdot Q[\text{W}]$$

L:伝熱長 (厚み)、 σ :熱伝導率、A:伝熱面積、Q:熱量

伝熱面積はASIC(7 mm x 15 mm)を使用

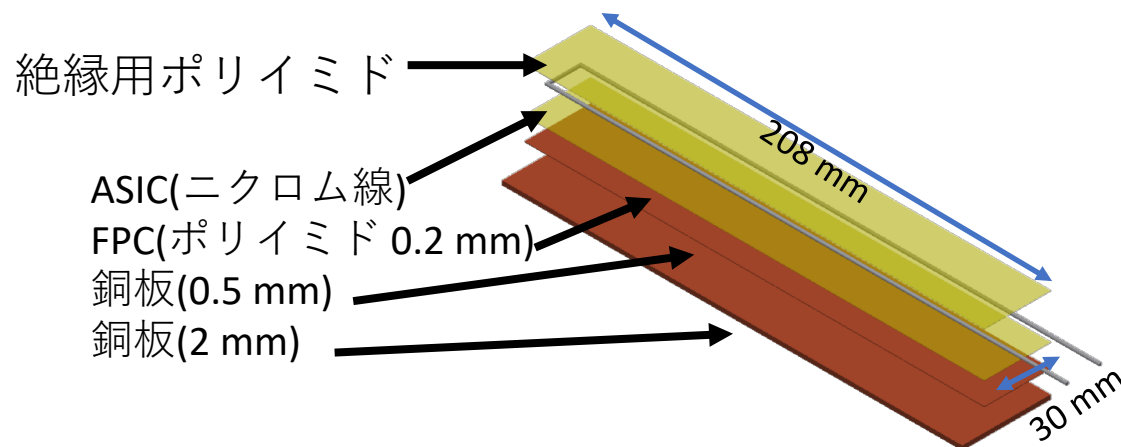
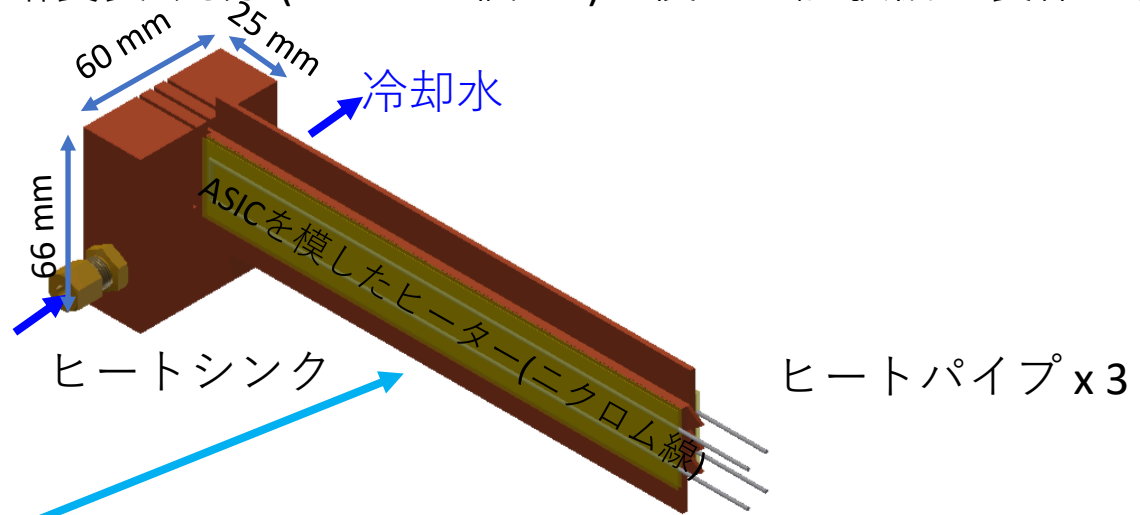
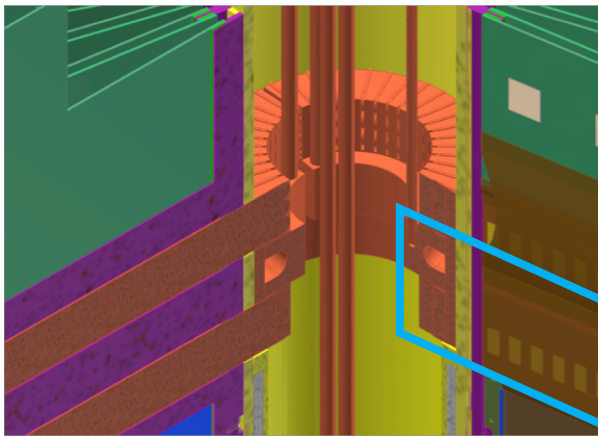


ASIC – 銅板間では9.6 Kの温度差が生じる。

熱輸送部の評価

実際の冷却システムの読み出し回路裏表1列分 (ASIC x 16個 x 2) を模した試験機を製作し、次の事項について調査する。

- ヒートパイプの熱輸送の効果
- ASIC表面温度の測定



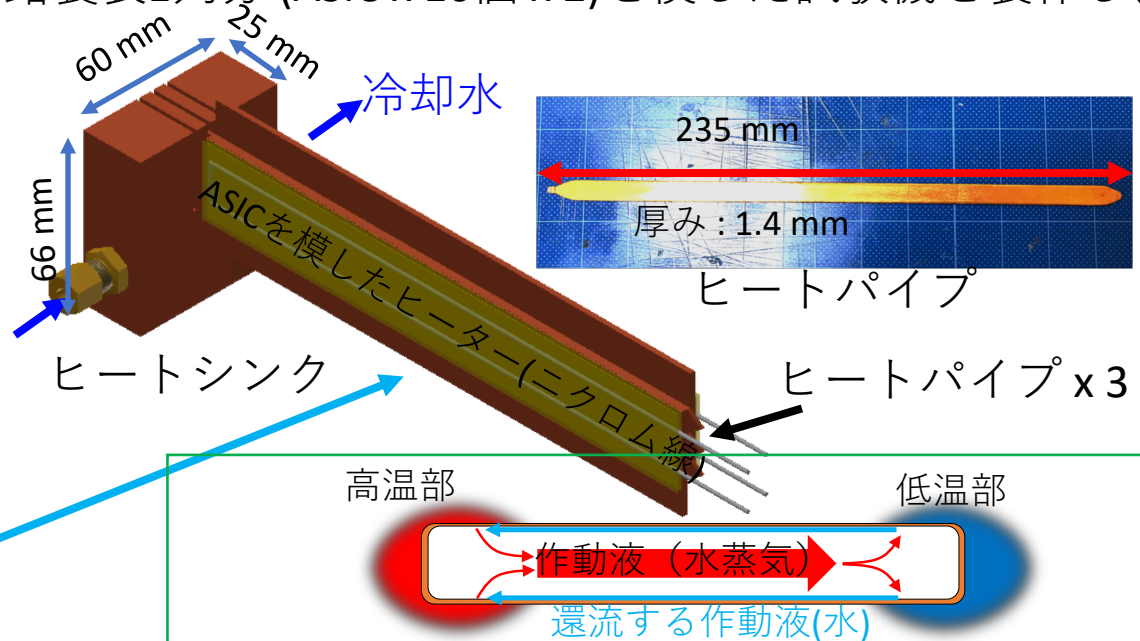
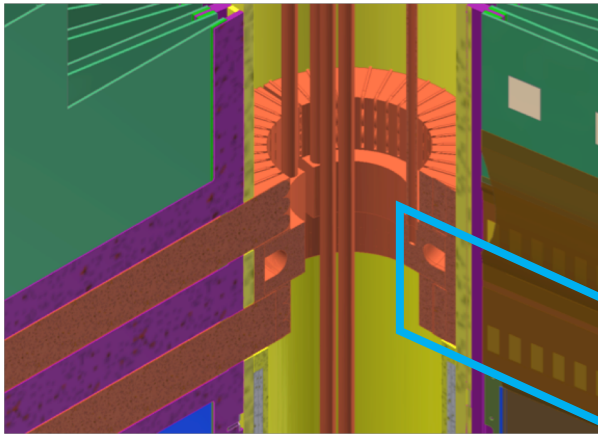
熱源の作成

- **実機スケール**に近づけ製作
- 接着は**TB2270J**を使用。

熱輸送部の評価

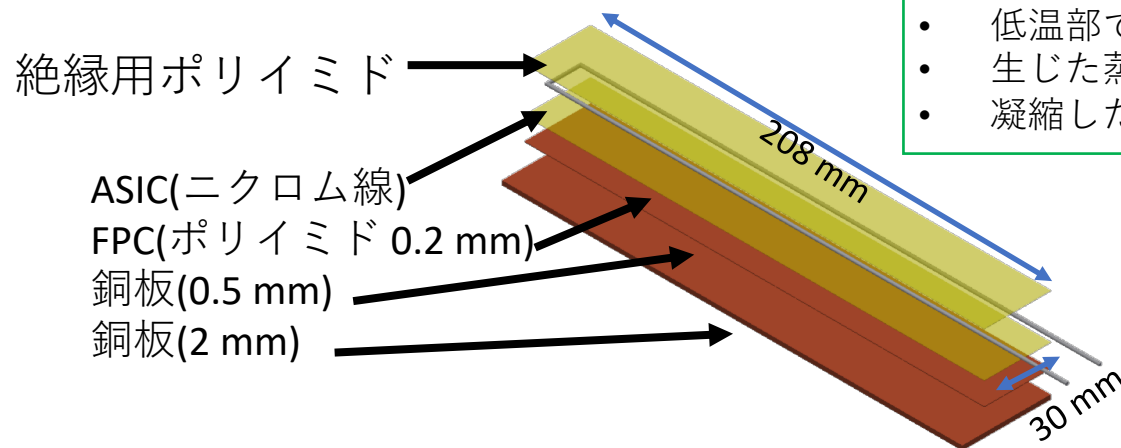
実際の冷却システムの読み出し回路裏表1列分 (ASIC x 16個 x 2) を模した試験機を製作し、次の事項について調査する。

- ヒートパイプの熱輸送の効果
- ASIC表面温度の測定



ヒートパイプの動作原理

- 高温部では作動液が蒸発をすることで熱を奪う。
- 低温部では作動液が凝縮し熱を放出。
- 生じた蒸気圧で作動液の蒸気が移動。
- 凝縮した液は内側のウィックの毛細管現象で還流する。

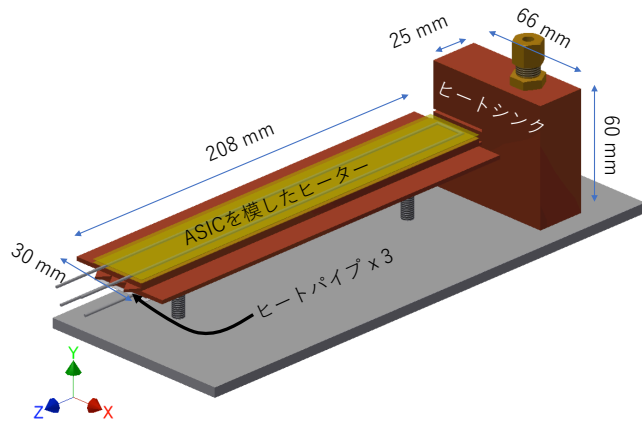


熱源の作成

- **実機スケール**に近づけ製作
- 接着は**TB2270J**を使用。

熱輸送部の評価方法

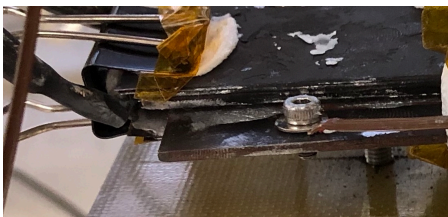
- 冷却水の温度制御を冷却水循環装置（チラー）で行う。
- 赤外線カメラでも測定が行えるように黒体塗料を塗布。
- ヒーターには定電流を流しASICの熱を再現。



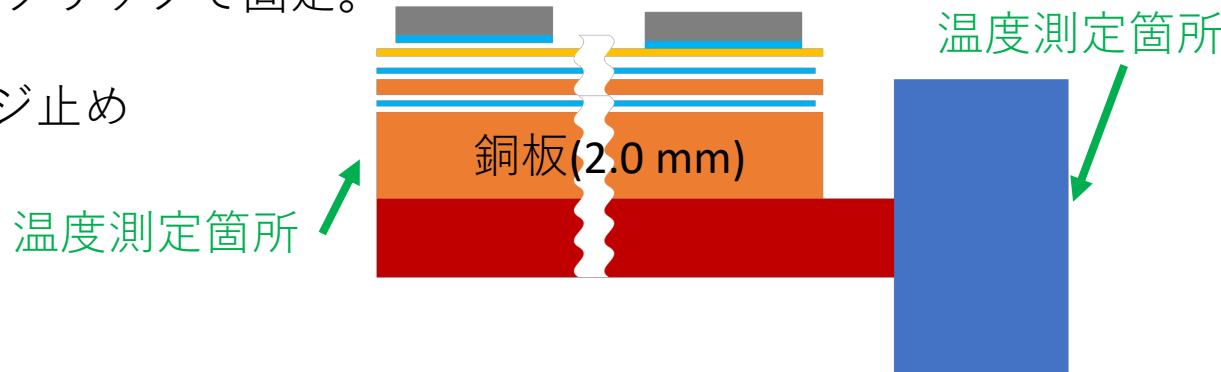
manufactured by T. Takatomi
(KEK Mechanical Engineering Center)

- 3本のヒートパイプをグリス(熱抵抗： $4.9 \times 10^{-3} \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ (厚み：0.2 mmを仮定))塗布後、ヒーターで挟み、クリップで固定。

- 熱電対は銅板(2.0 mm)にネジ止め
- 気圧 $3.9 \times 10^{-4} \text{ atm}$ にて評価



熱電対(T型)

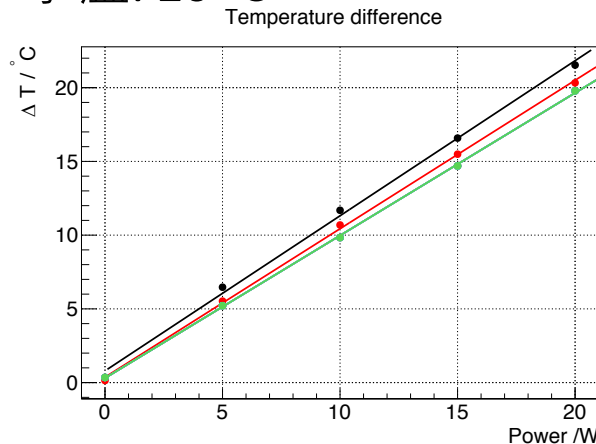


温度差の測定

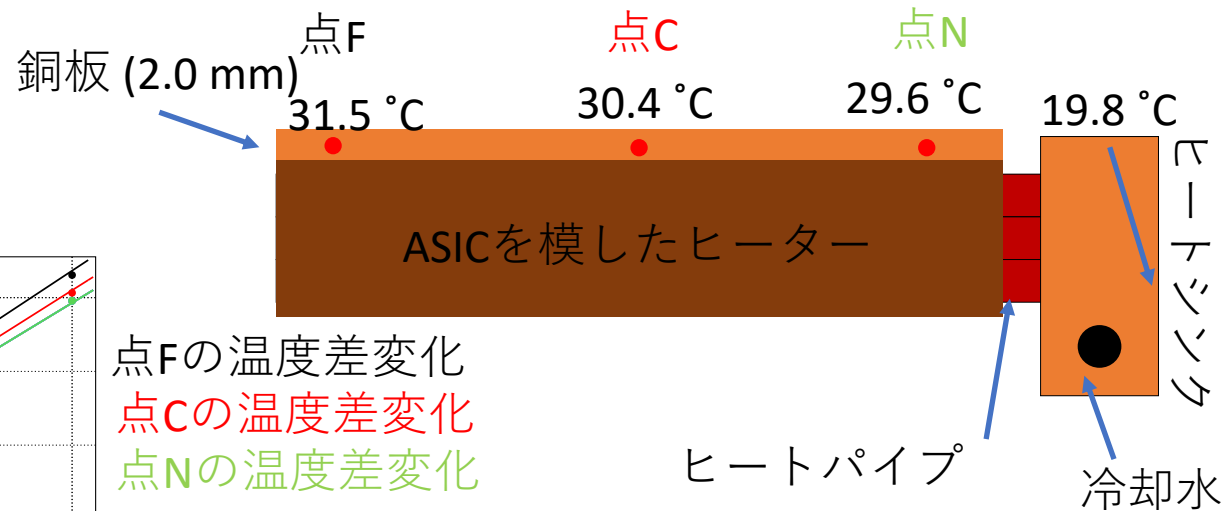
ヒーターに10 Wを流して6時間測定を行い最終到達温度を銅板(2.0 mm)上の点について調べた。

コンディション:

- 室温: 21.8 ~ 22.4 °C
- 湿度: 55 %
- 水温: 20 °C



点Fの温度差変化
点Cの温度差変化
点Nの温度差変化



電力 $Q = 10 \text{ W}$ 導入時、ヒートシンク上と銅板上では最小で、14.7 Kの温度差 ΔT が生じた。

→左図より、銅板 - ヒートシンクの熱抵抗値 $R = \frac{\Delta T}{Q} = 0.97 \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}]$

→この熱抵抗の内訳を調査した。

銅板－ヒートシンク間の熱抵抗値

電力値を変えそれぞれの点での温度差の平均値を求め、以下の式から熱抵抗を傾きから算出した。

$$\Delta T = R \cdot Q$$

ΔT : 温度差、 R : 熱抵抗、 Q : 導入電力

コンディション:

室温: 18.0 °C

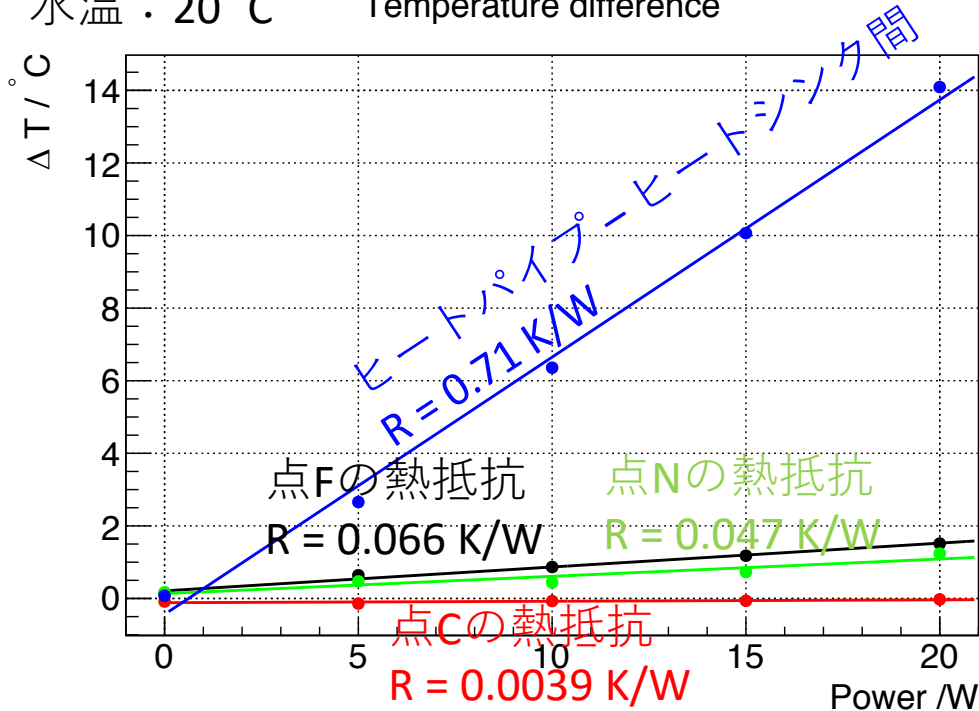
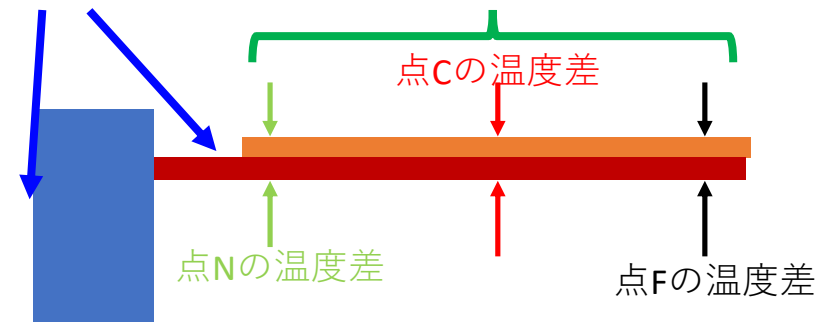
湿度: 35 %

水温: 20 °C

Temperature difference

ヒートパイプ－ヒートシンク
間の温度差

銅板－ヒートパイプの
温度差を3点で測定

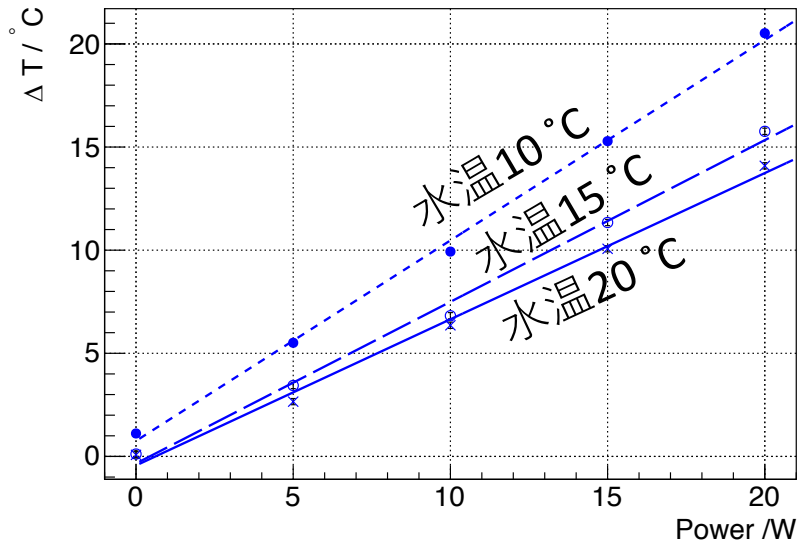


ヒートパイプ－ヒートシンク間での熱抵抗が最も大きく見えている。
→熱コンタクトorヒートパイプの特性
→冷却水温による熱抵抗変化の調査

熱抵抗の冷却水温度依存性

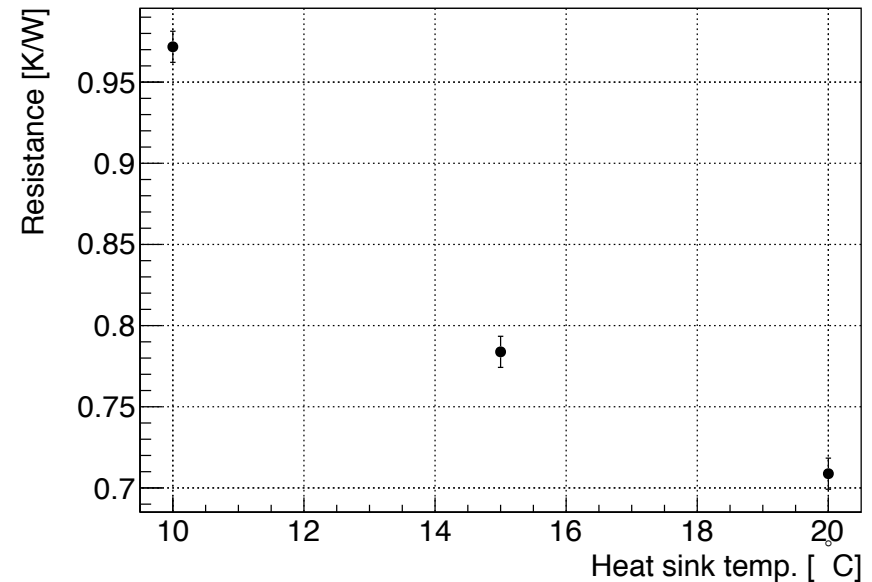
冷却水の温度を20 °C, 15 °C, 10 °C, と変化させたときのヒートパイプーヒートシンク間の熱抵抗の変化を調べた。

Temperature difference



ヒートパイプーヒートシンク
温度の水温度依存性

Heat Resistance



熱抵抗の水温度依存性

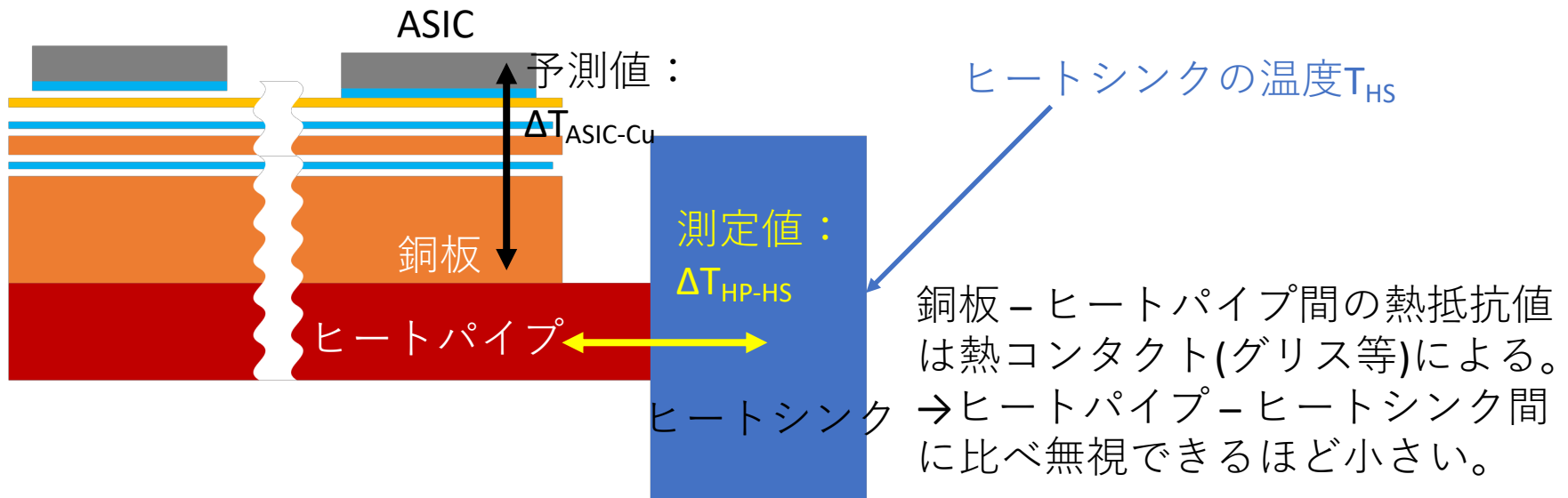
熱コンタクトによる抵抗は水温に依らない。

→ヒートパイプの特性が傾きの変化として現れている

→ヒートパイプは**冷却水の温度に依存**して熱抵抗値が変化する。

熱輸送評価の結果

熱源(ASIC) – 銅板間の予測値 $\Delta T_{\text{ASIC-Cu}}$ 、ヒートパイプ – ヒートシンク間の測定値 $\Delta T_{\text{HP-HS}}$ から、ASIC表面上の温度を予想 (20 W)。



ヒートシンクの温度 T_{HS} [°C]	$\Delta T_{\text{ASIC-Cu}}$ [°C]	$\Delta T_{\text{HP-HS}}$ [°C]	$T_{\text{HS}} + \Delta T_{\text{ASIC-Cu}} + \Delta T_{\text{HP-HS}}$ [°C]
20	9.6	14	43.6
15	9.6	15	39.6
10	9.6	19	38.6

ASIC表面上の予想温度

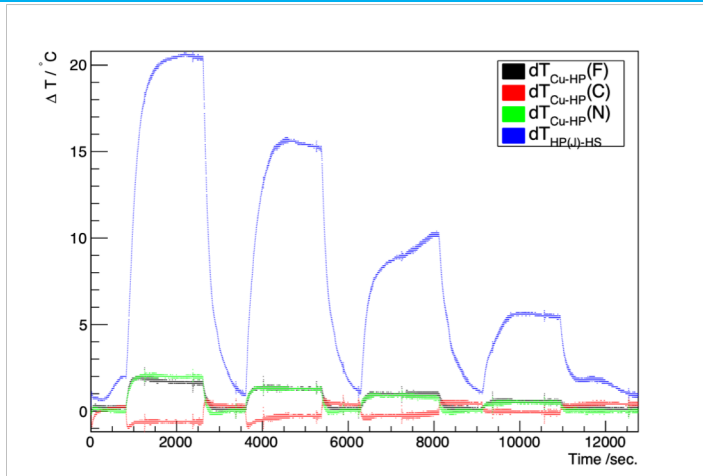
- **10 °C ~ 20 °Cの温度においてASIC上で50 °C未満の要件を満たしている。**
- 今後は、20度以上でも試験を行いヒートパイプの熱輸送効率変化を系統的に理解する。

- ミューオンg-2の実験は新物理の探索において重要な実験である。
- J-PARC muon g-2/EDM実験において真空中で動作するASICの冷却システムの開発が必要。
- ASIC – ヒートパイプ間の接着剤
 - FPC – 銅板間はTB2270Jを使用する。
- ASIC上で50 °C未満にするという要件は冷却水 10 °C ~ 20 °Cにおいて満たしている。
- 今後は、20度以上でも試験を行いヒートパイプの熱輸送効率変化を系統的に理解する。

< 予定 >

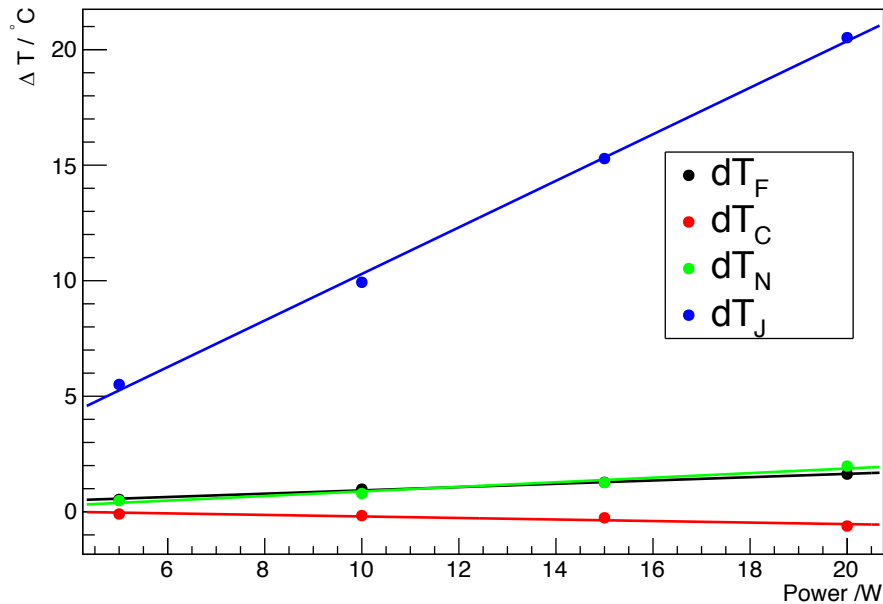
- 冷却水20 °C以上の温度でヒートパイプの熱抵抗値の変化を調べる。
- ASIC表面上の温度の測定を行う。
- 冷却システムの最終案決定。

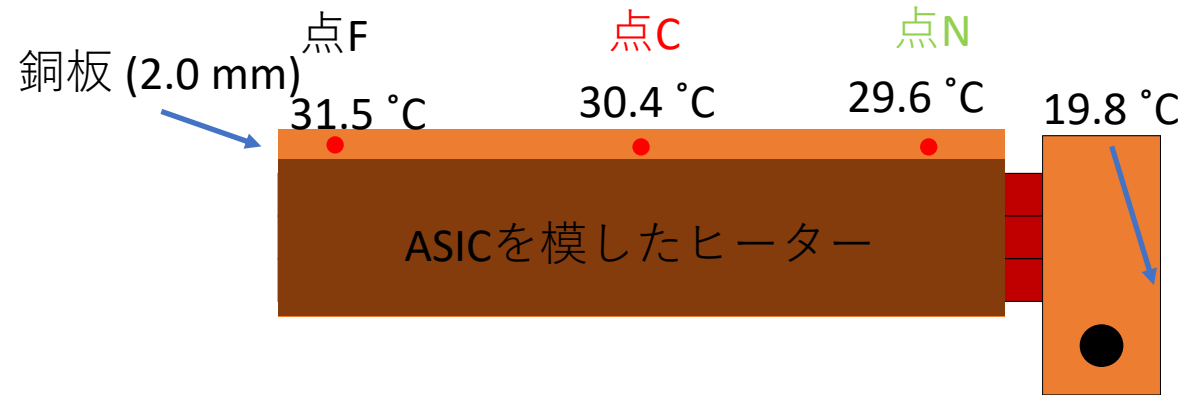
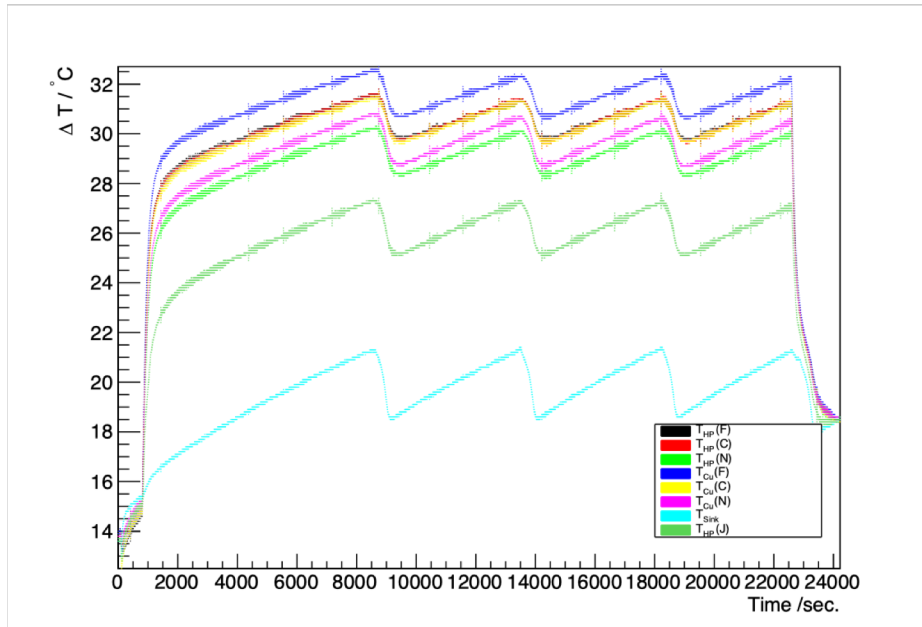
Back up



それぞれの測定点の温度差

Temperature difference





熱伝導性接着剤

主に 3 種の接着剤:

Araldite (AD****), ThreeBond (TB****), PrimaBond (EG****)

The glue-test was used below glues.

Sample number	Sample	Curing temp. [°C]	Main component	thermal conductivity [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
0	Cu	-	-	390
1		24		
2	AD2011	80	epoxy	
3		150		
4		80		
5	TB2270J	150	epoxy	4.2
6	TB1533	24	special polymer※	
7	TB1225B	24	silicone	1.59
8		24		
9	EG7655	80	epoxy	1.7
10		150		
11		80		
12	EG7658	150	epoxy	3.6

エポキシ系

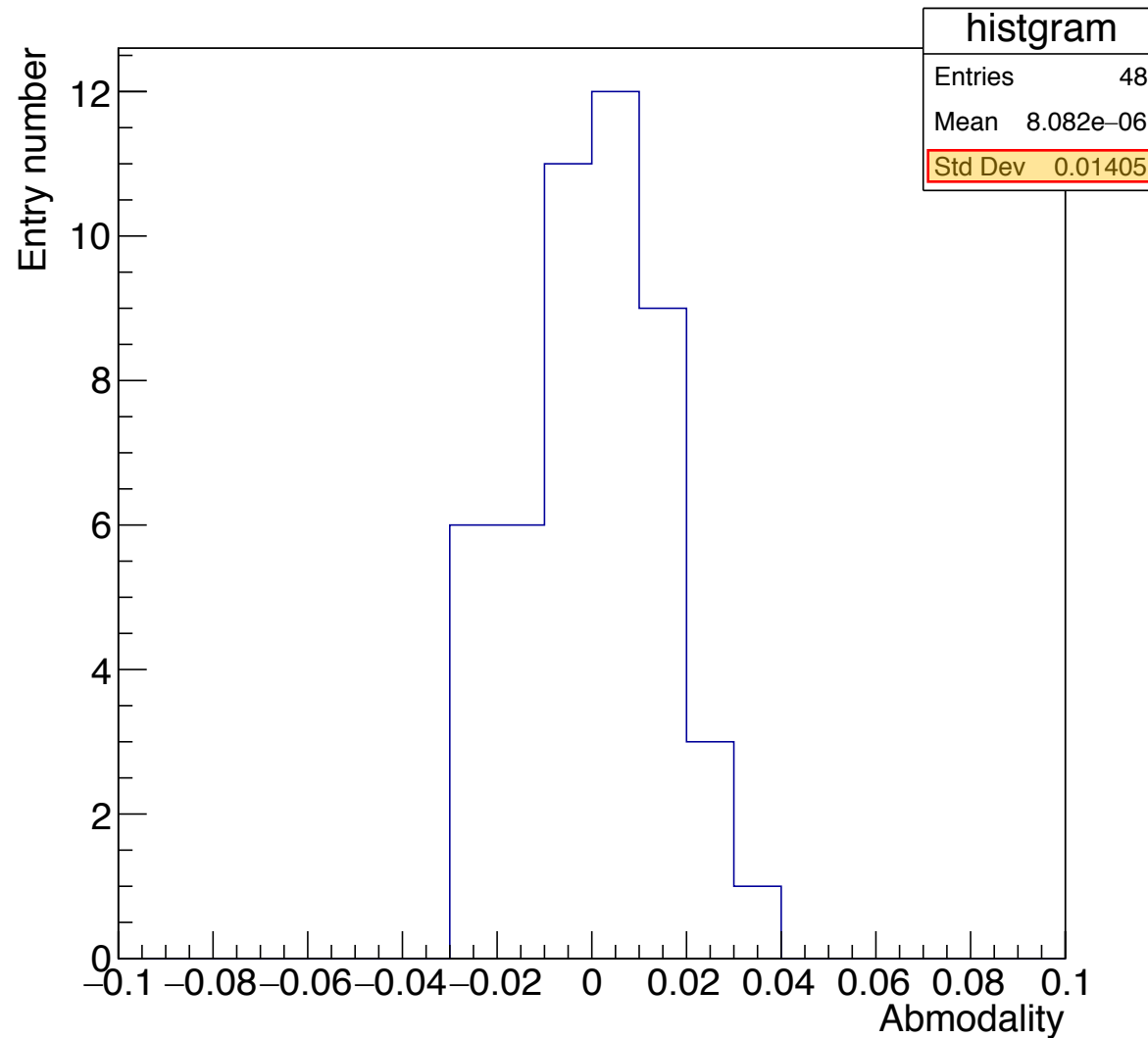
シリル系
シリコーン

エポキシ系

※compound silyl group

RMSの決定 (熱伝導性接着剤)

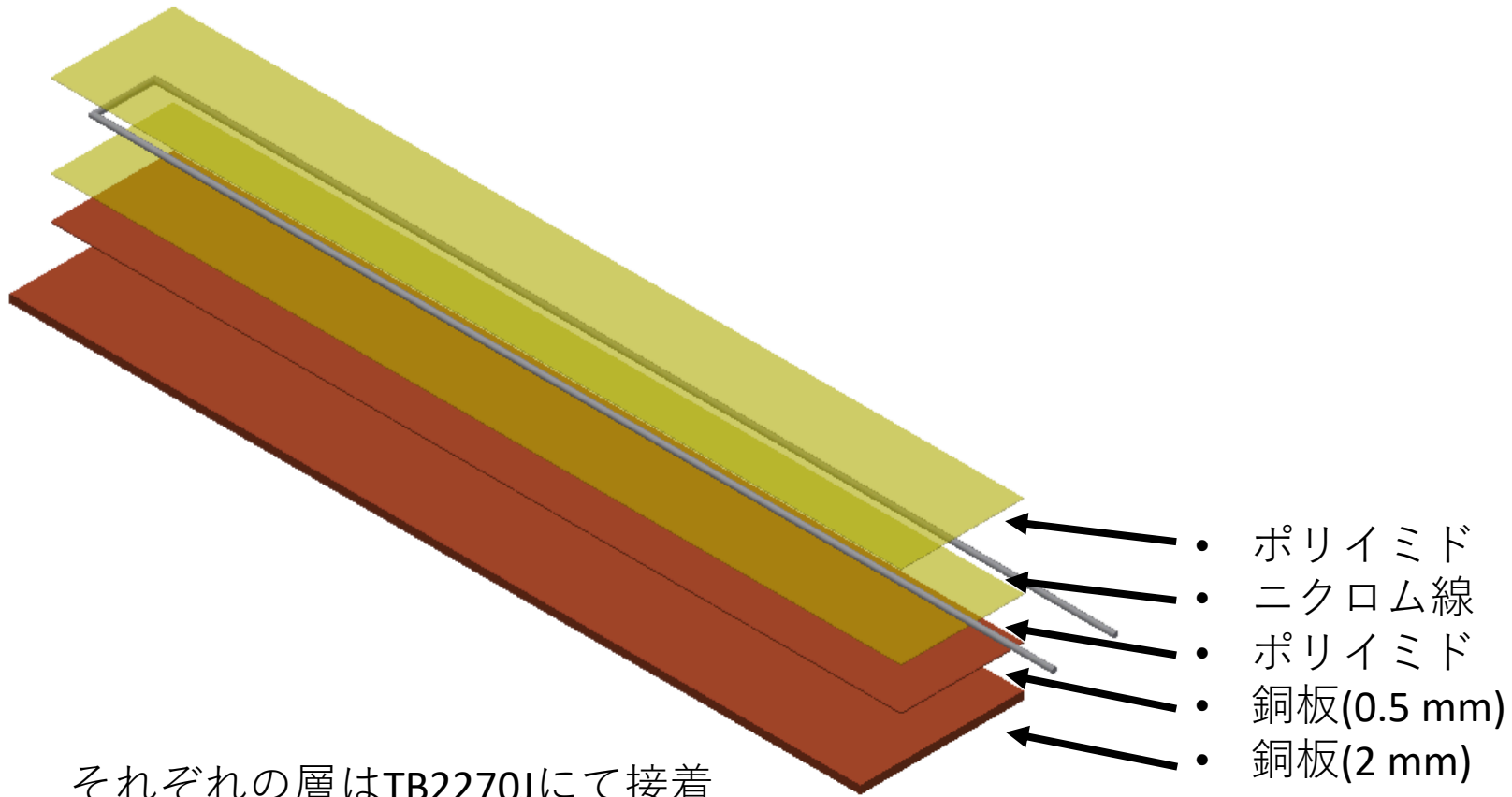
dispersion



すべてのサンプルにおいて同じ
測定誤差を含んでいると仮定



RMS : 0.014



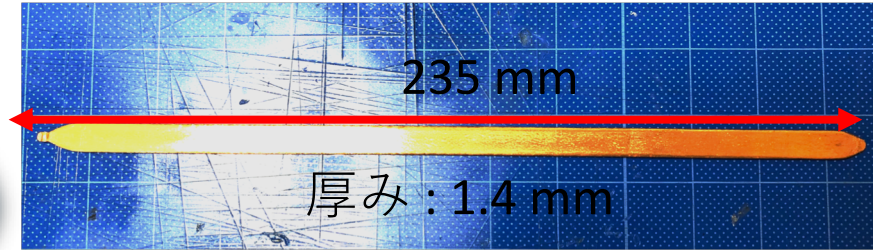
ヒートパイプとは

高温部

低温部



ヒートパイプの原理



ヒートパイプ

<原理>

- 高温部では作動液が蒸発をすることで熱を奪う。
- 低温部では作動液が凝縮し熱を放出。
- 生じた蒸気圧で作動液の蒸気が移動。
- 凝縮した液は内側のウィックの毛細管現象で還流する。

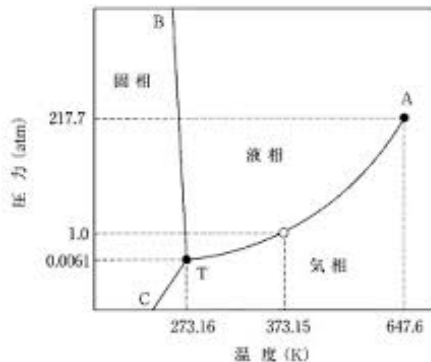


図6-2 水の相図 (概略図)

ヒートパイプ中の状態変化