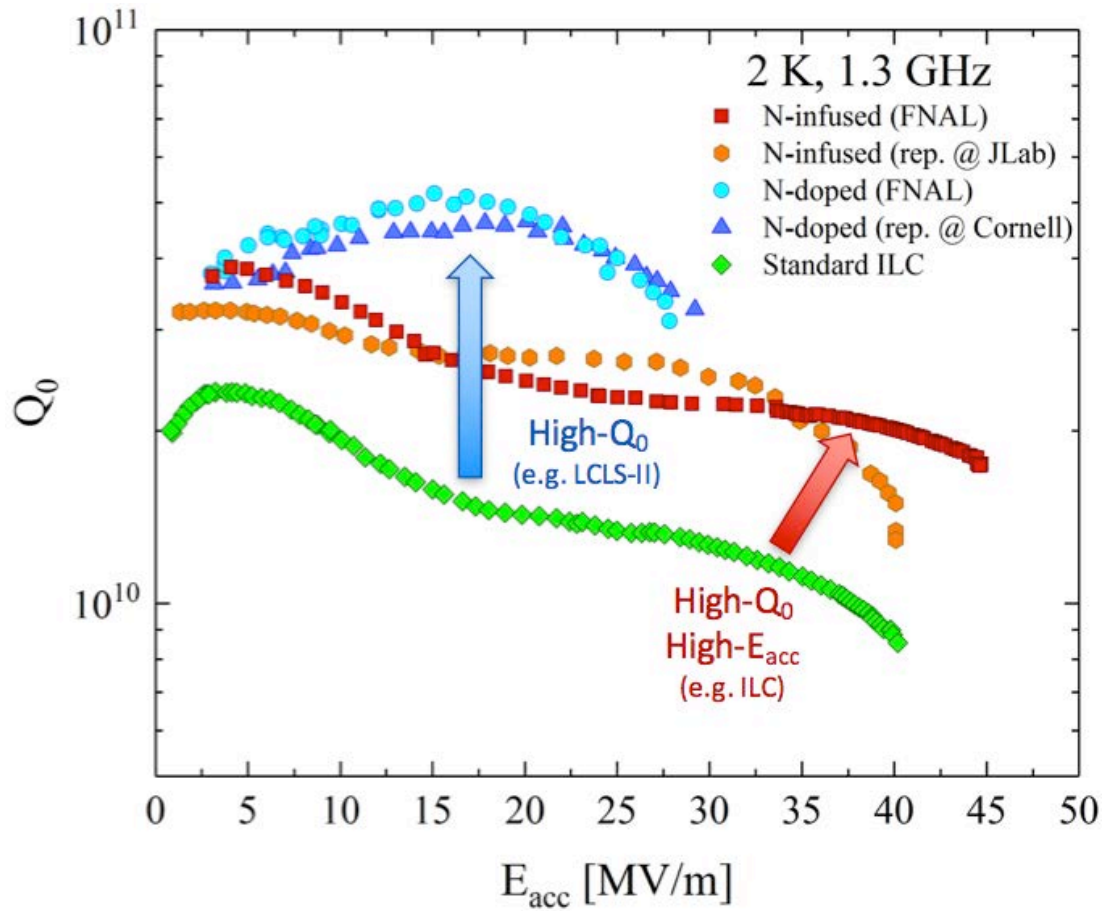


# マイスナー効果に着目した 微小磁場シールド

岩下 芳久, 栗山 靖敏 (京都大学複合研)  
不破 康裕 (J-PARCセンター)

# 背景

Sc Cavity's Q is increasing.



$$Q_0 = \frac{\omega W}{P} \propto \frac{1}{R_s}$$

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

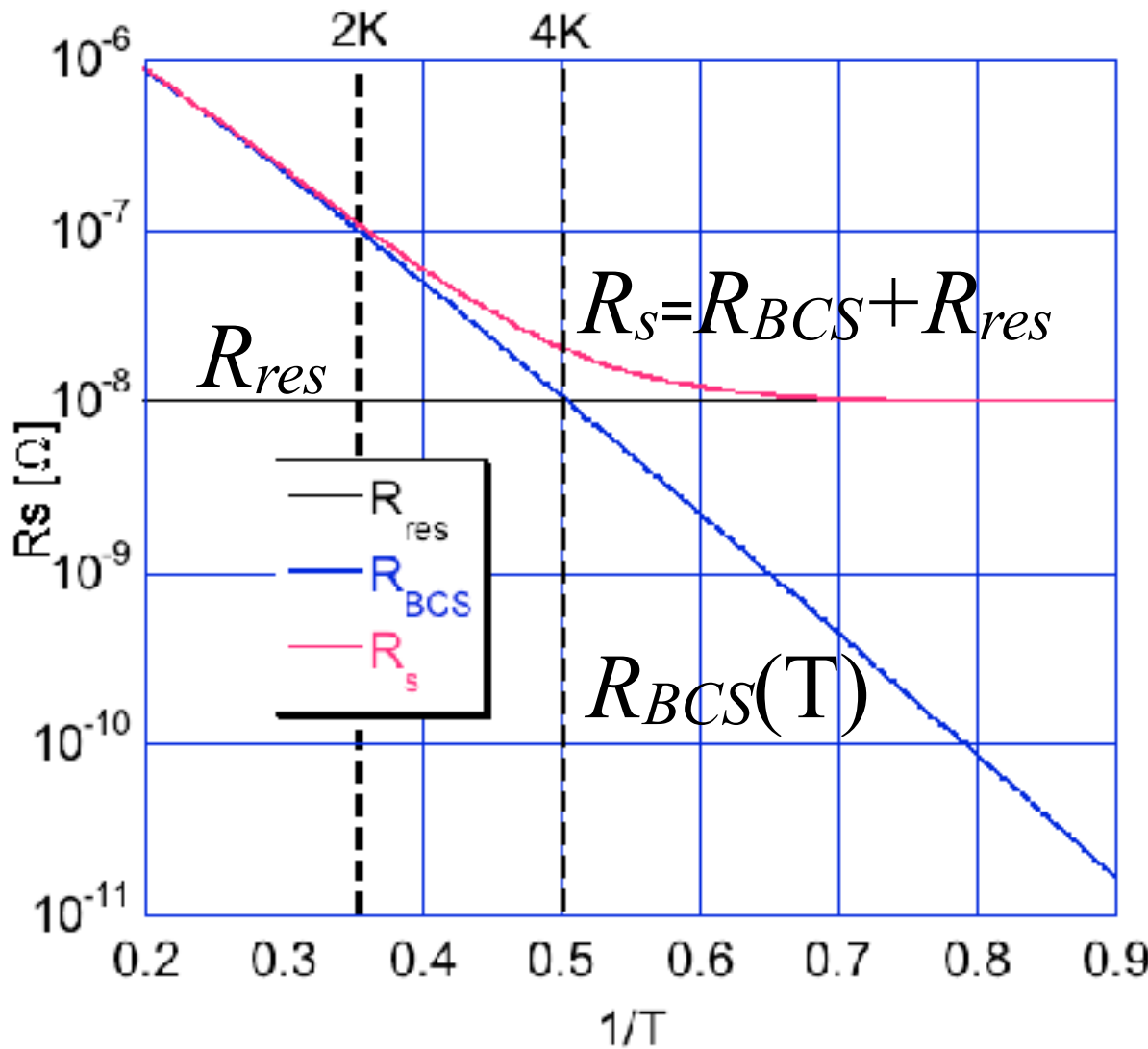
$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$

$$R_{res} = R_{impurity} + R_{defect} + R_{magnetic} + \dots$$

$R_s$ : Surface resistance

残留抵抗

# Residual Resistance has to be small



$$Q_0 = \frac{\omega W}{P} \propto \frac{1}{R_s}$$

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

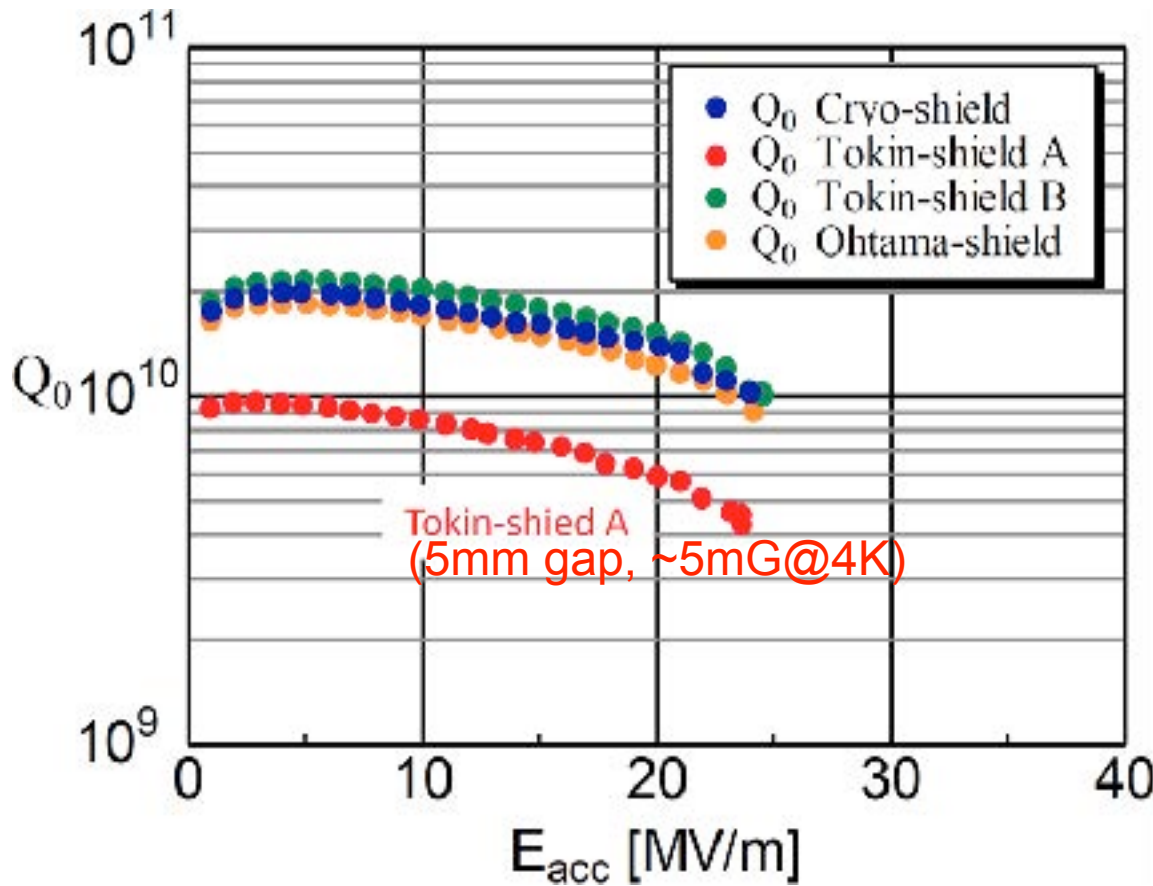
$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$

$$R_{res} = R_{impurity} + R_{defect} + R_{magnetic} + \dots$$

$R_s$ : Surface resistance

残留抵抗がネックになる

# 磁気シールドが不十分だとQが下がる



$$Q_0 = \frac{\omega W}{P} \propto \frac{1}{R_s}$$

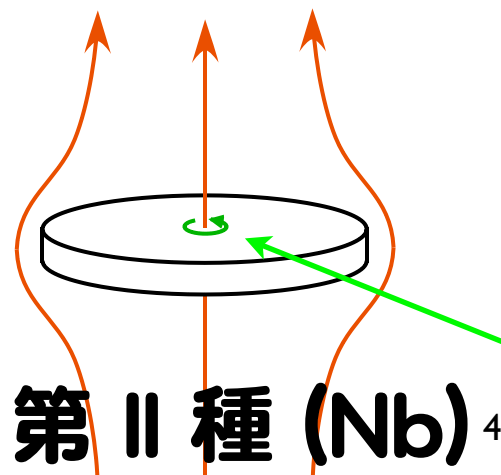
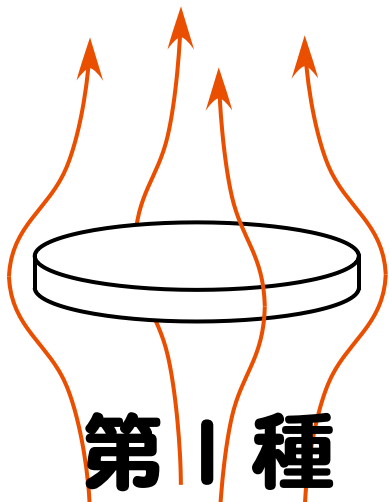
$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$

$$R_{res} = R_{impurity} + R_{defect}$$

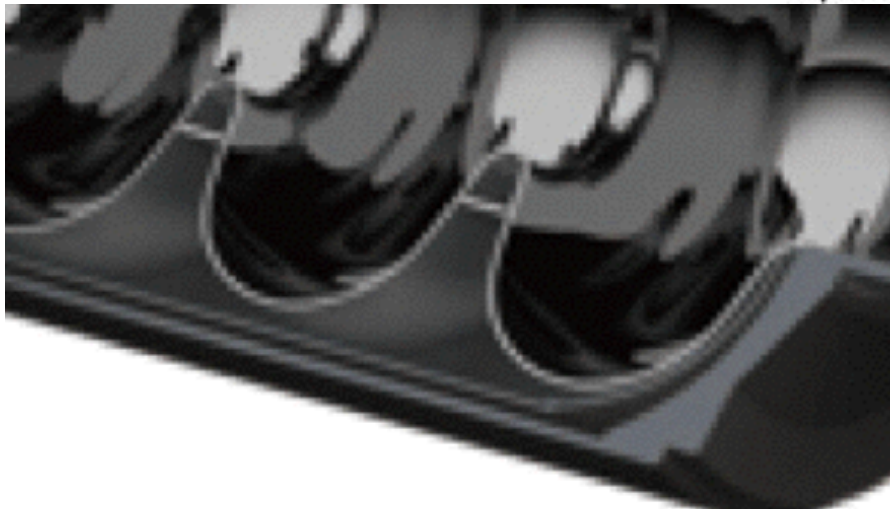
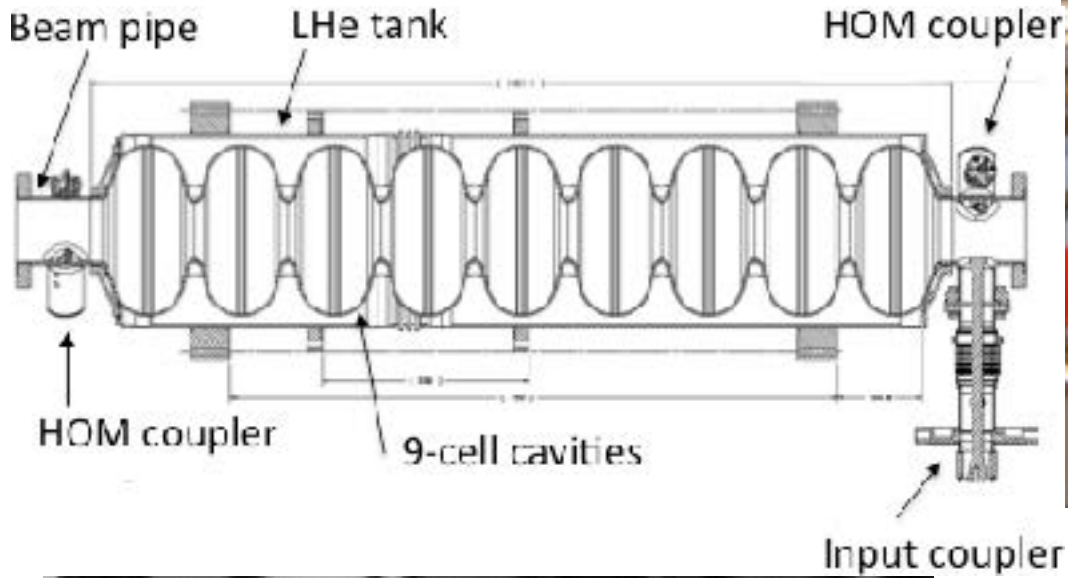
$$+ R_{magnetic} + \dots$$

$R_s$ : Surface resistance  
表面抵抗



Flux trap

# 高透磁率材による磁気シールド

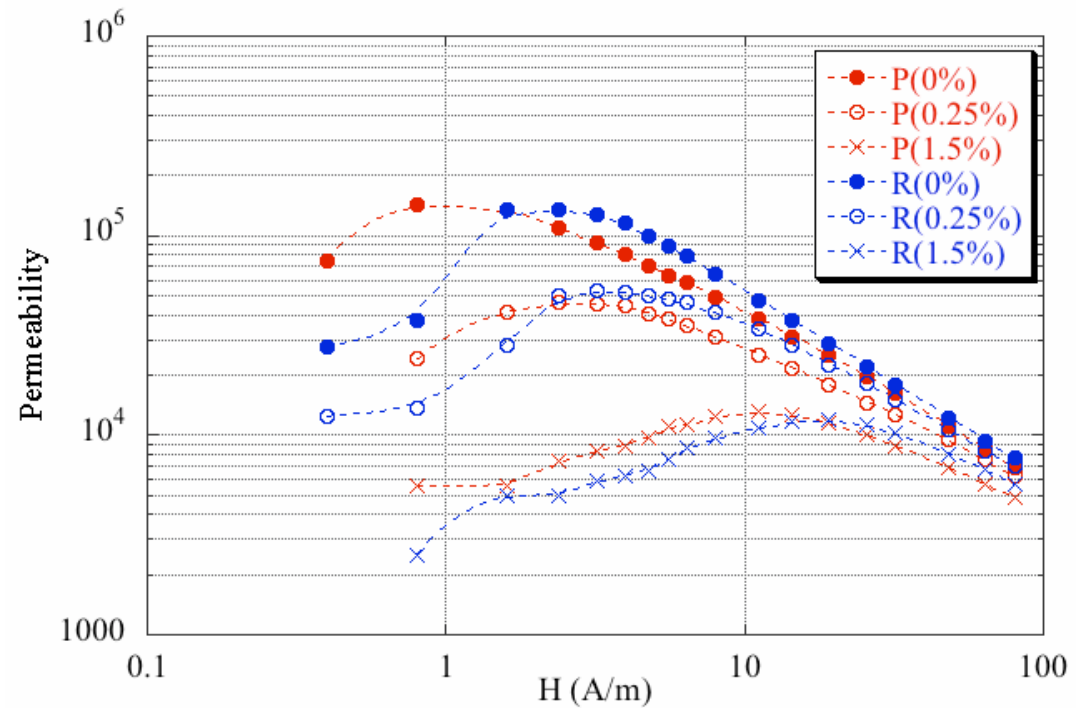
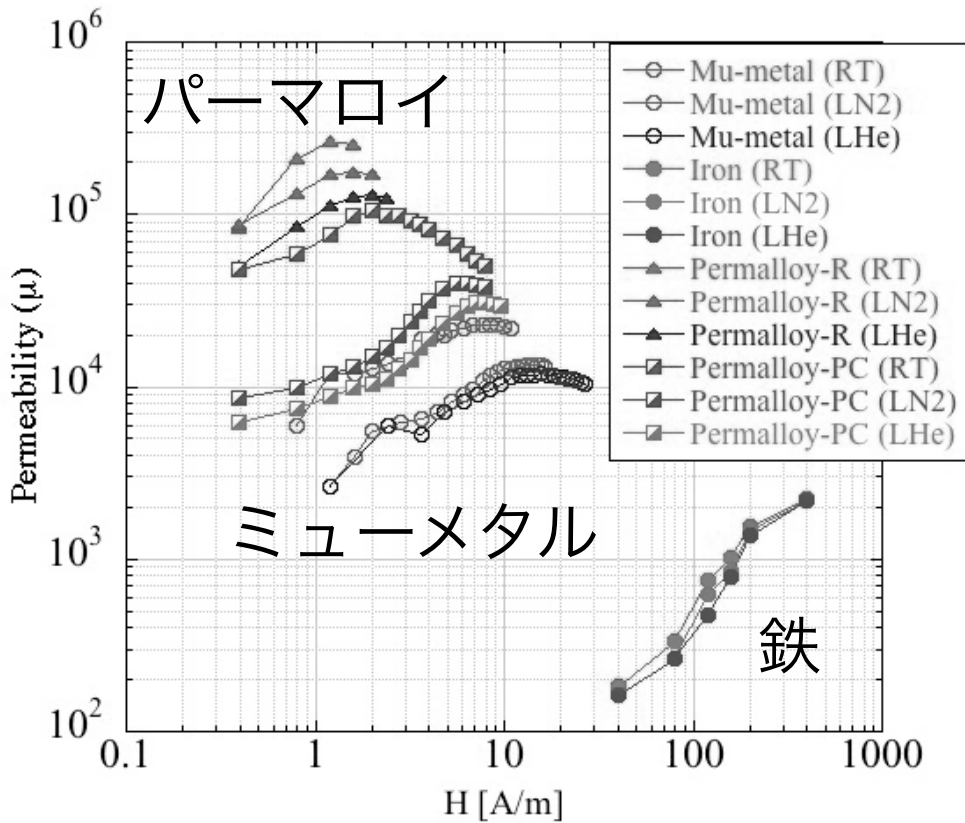


Shield in Jacket



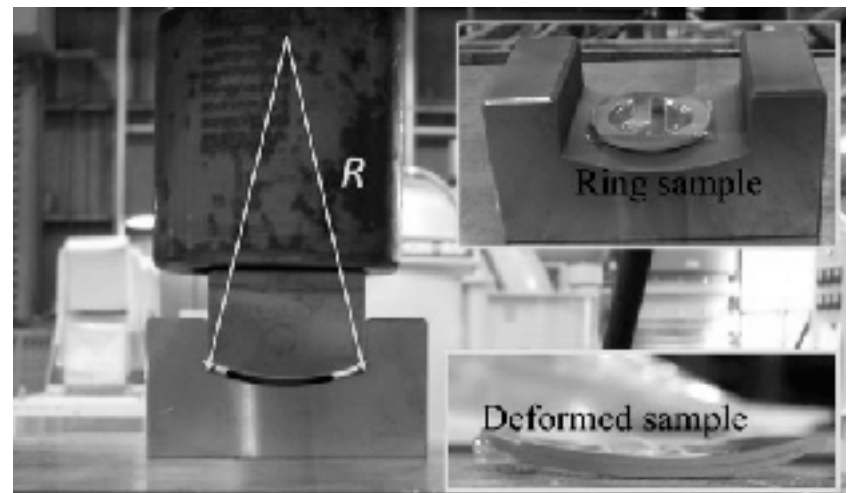
Shield around Jacket

# 高透磁率材



比透磁率  $\mu$  は  
 低磁場、  
 極低温、  
 応力印加  
 で下がる

M.Masuzawa, KEK



# マイスナー効果 (完全反磁性)



<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/180507.php>



<http://w3.matsc.kyutech.ac.jp/opencampus/f05/index.htm>

## 超伝導の大きな特徴

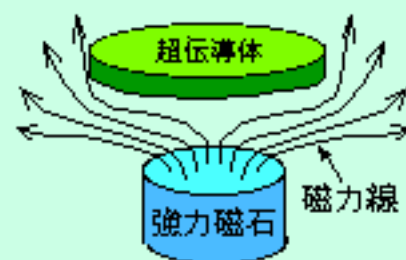
超伝導転移温度以下で  
(約-200℃以下で)

電気抵抗ゼロ

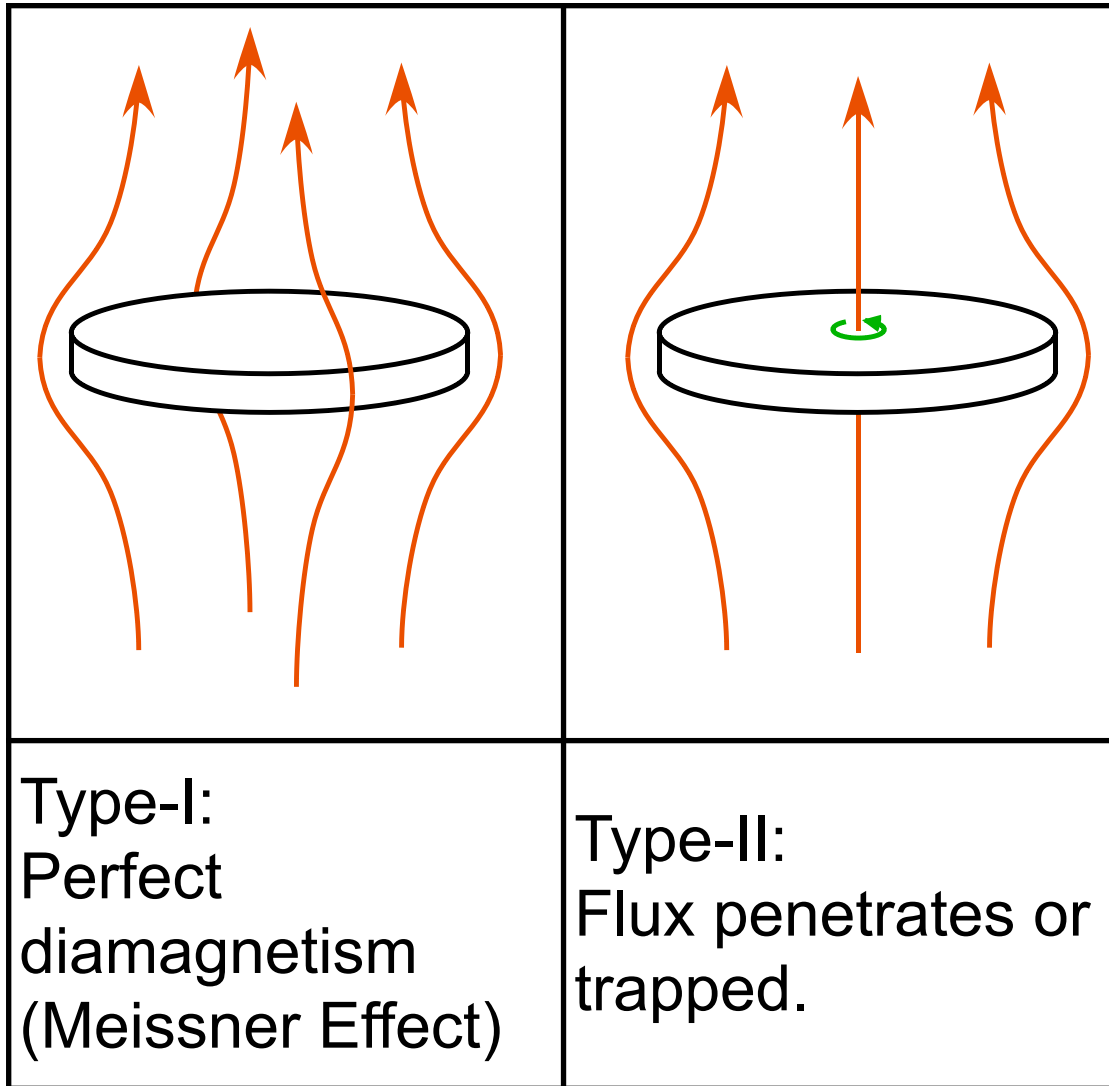


抵抗がないので、たくさんの電子を運ぶことができる

磁場を通さない  
(マイスナー効果)



# 第 I 種及び第 II 種超伝導



Type-I:  
Perfect  
diamagnetism  
(Meissner Effect)

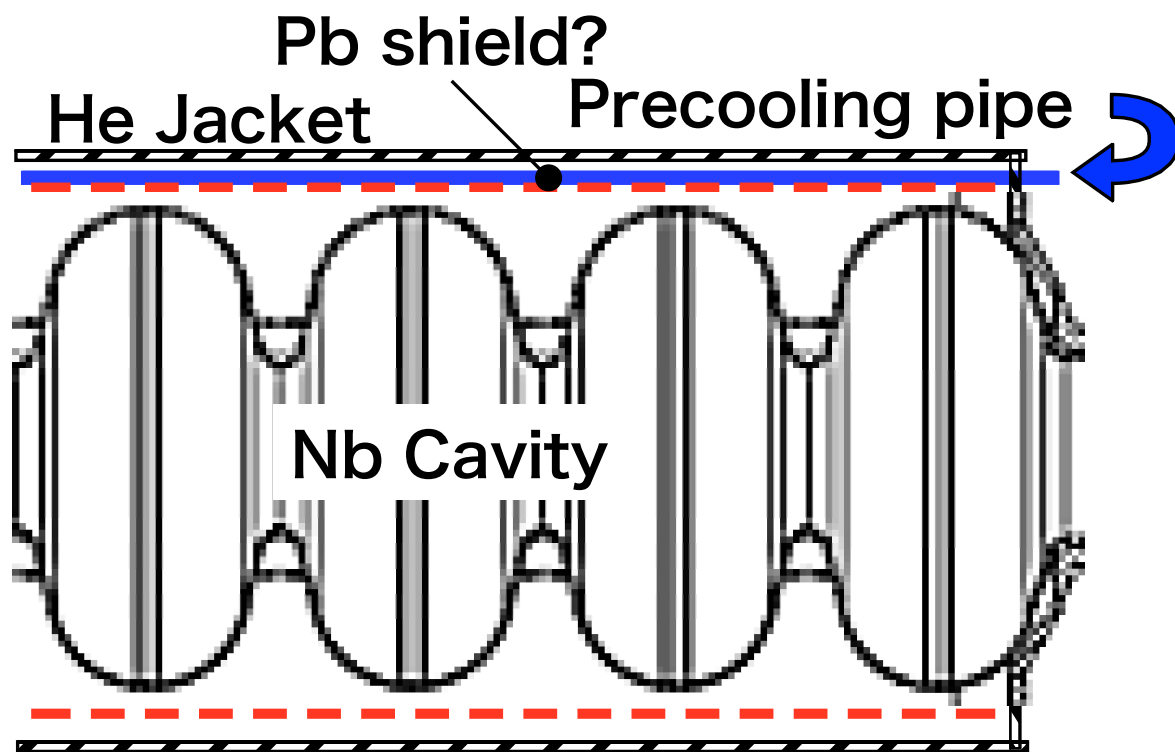
Type-II:  
Flux penetrates or  
trapped.

	$T_c$	$H_c[G]@0K$	Type
Nb	9.20	1950	II
Pb	7.20	803	I
La	5.90	1600	?
V	5.30	1020	II
Ta	4.48	830	I
Hg	4.15	412	I
Sn	3.70	309	?
In	3.40	171	I

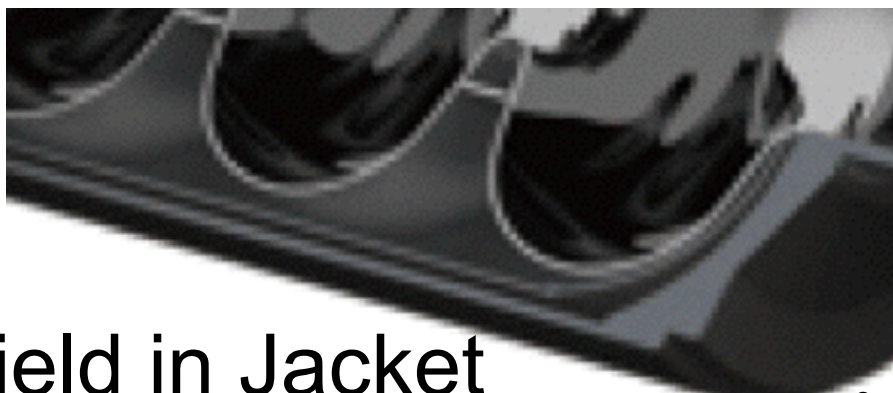
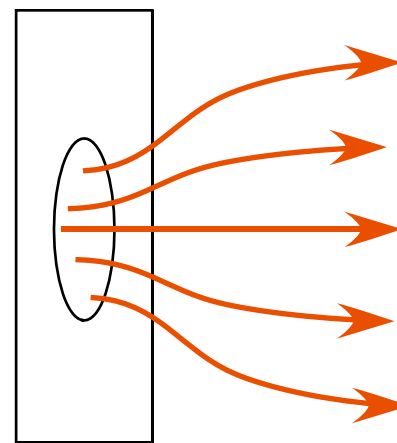
Pbの転移温度はNbより低い、薄いシートなら分厚いNbより早く冷やせる



# さて、Pb,Nbをどう磁気シールドに使うか？



予冷パイプを使って  
薄い超伝導シートを  
分厚い空洞壁より  
先に冷やす



Shield in Jacket

ビームを通さないといけないが、  
磁束は穴を通ってくるが...

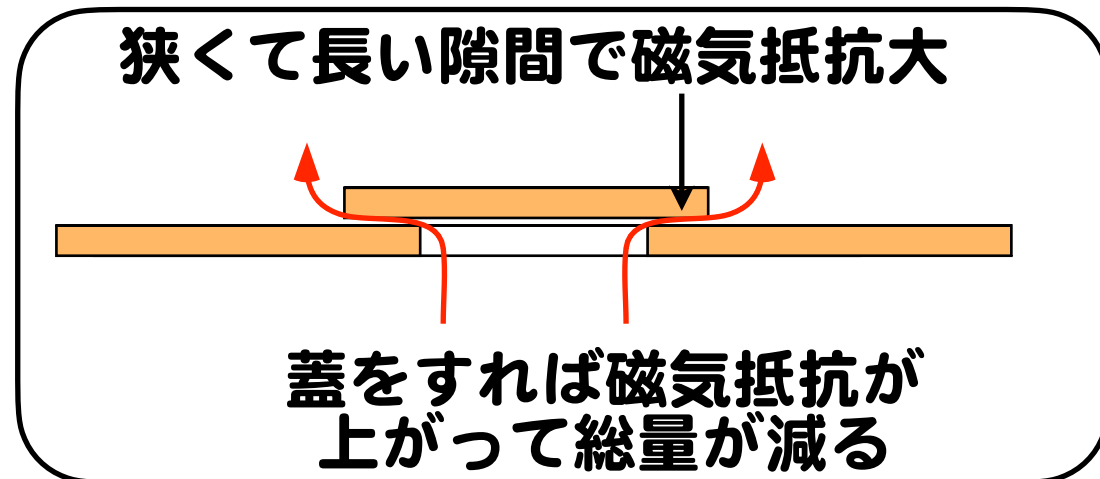
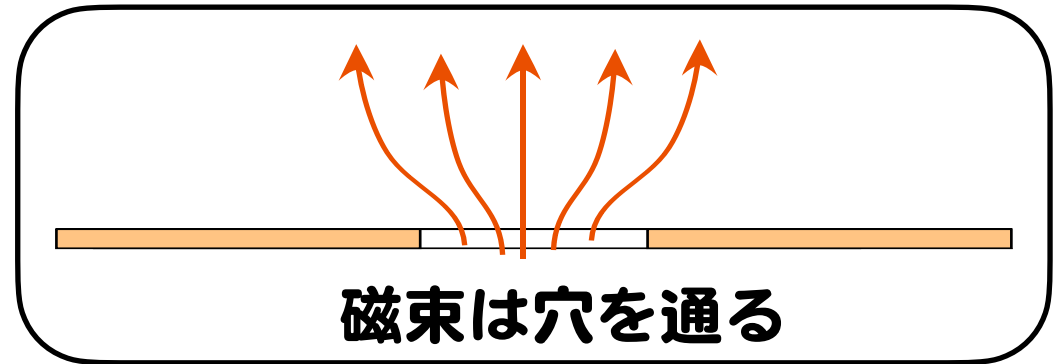
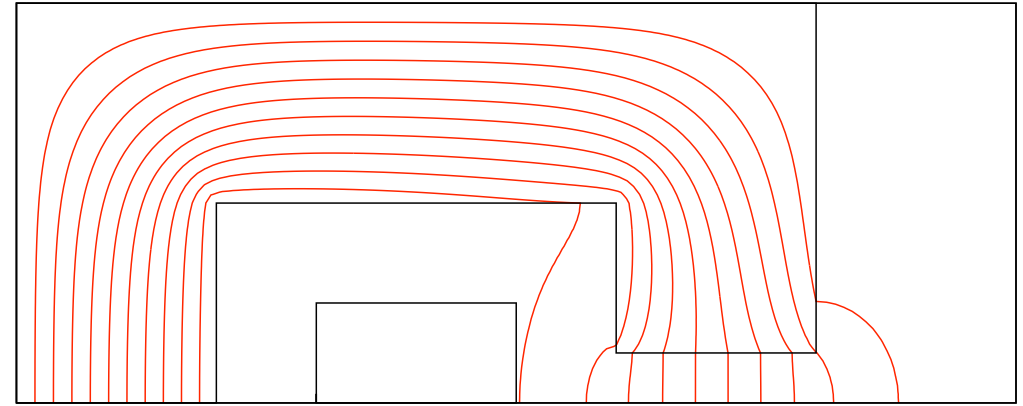
# 磁気抵抗

$$\oint_{\Gamma} H ds = I \quad \rightarrow \quad \sum_i \int_{\Gamma_i} B_i ds = \mu_0 I$$

$$\sum_i \frac{\Phi_i}{S_i} L_i = \mu_0 I \quad \rightarrow \quad \Phi \sum_i \frac{L_i}{S_i} = \mu_0 I$$

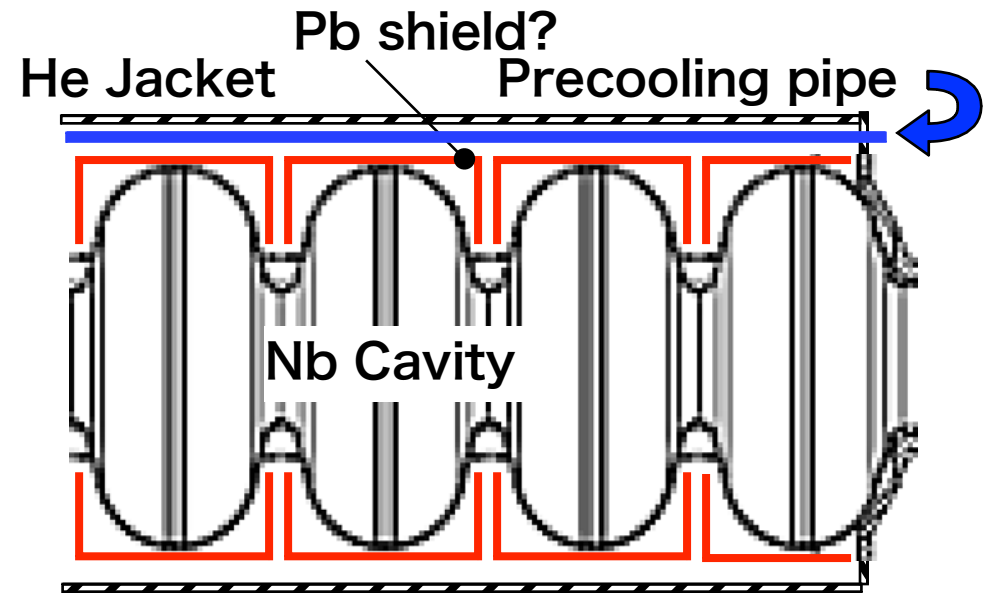
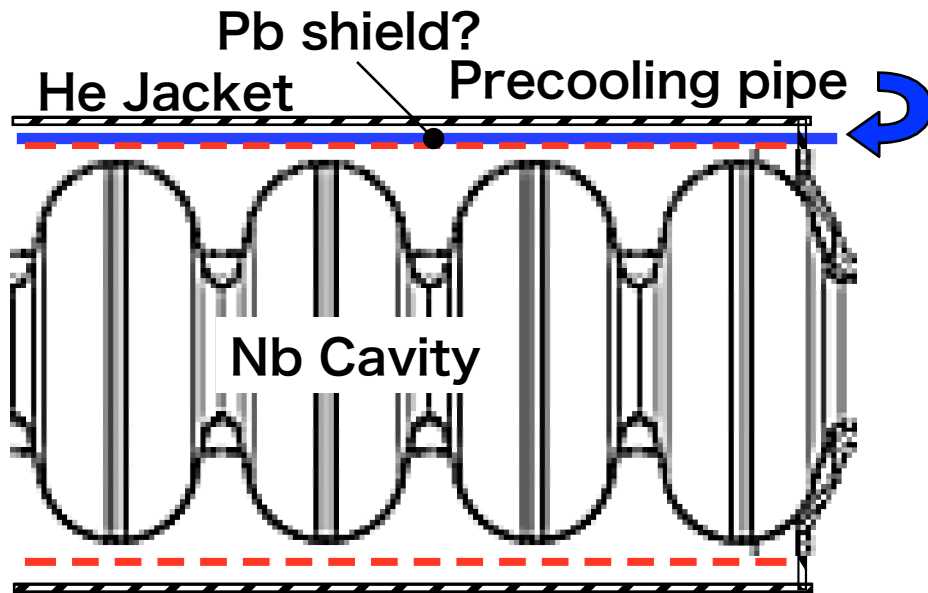
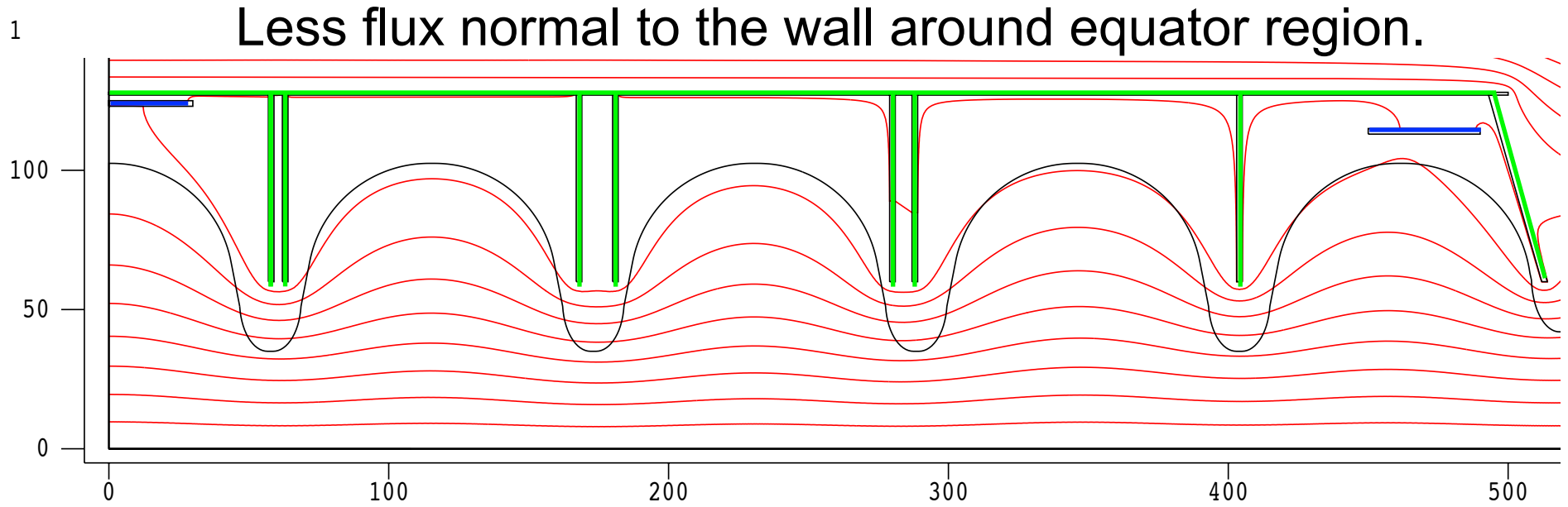
$$\Phi \sum_i \frac{L_i}{S_i} = \mu_0 I \quad \rightarrow \quad \Phi = \mu_0 I / \sum_i \frac{L_i}{S_i}$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 I}{\sum_i R_i} \quad (R_i \equiv \frac{L_i}{S_i} \text{ が磁気抵抗})$$

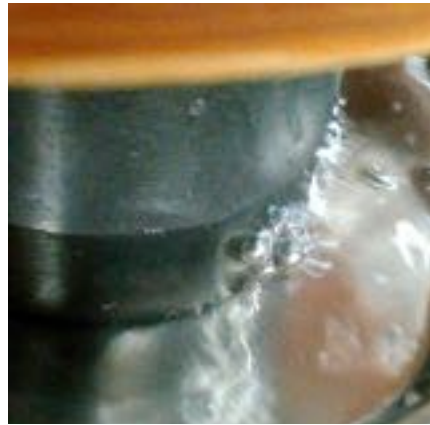


磁気抵抗は隙間の距離に反比例

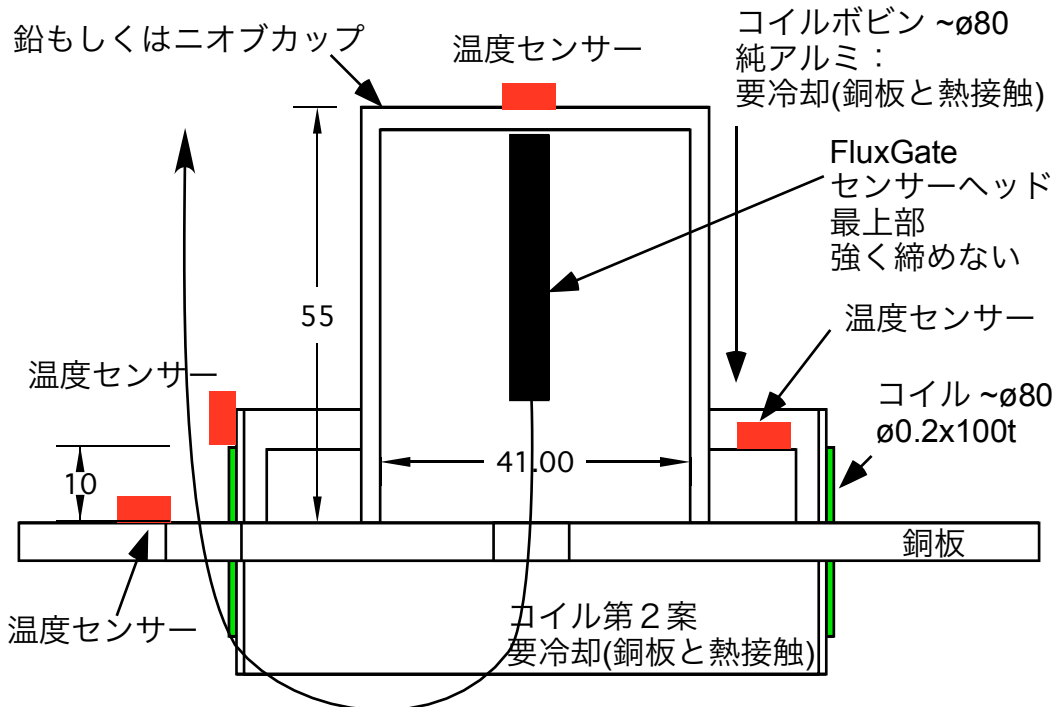
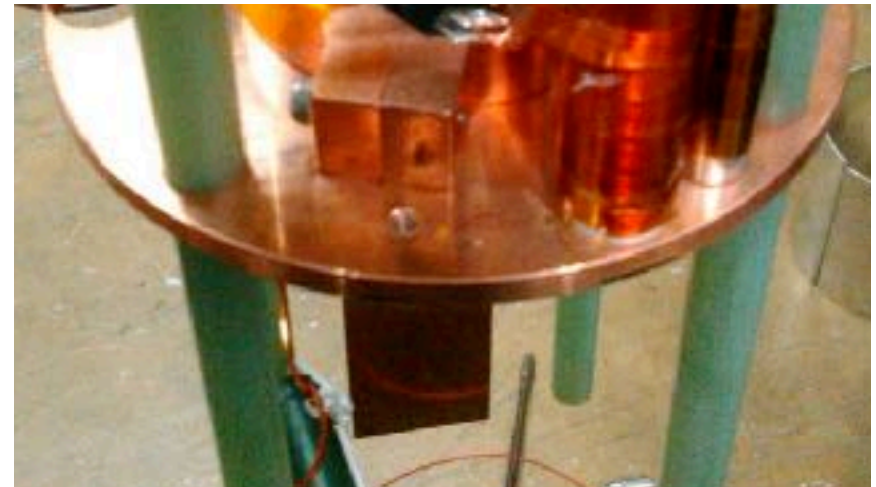
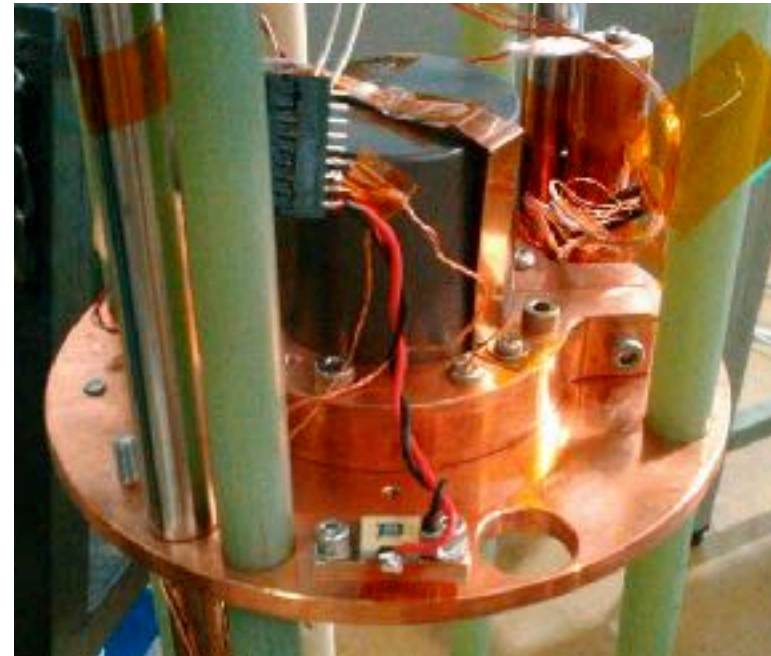
# 反磁性ならではの使い方



# 鉛(第1種)φ40カップで実験したが振るわず



最初は蓋の角に穴  
→修復



**結論：Pbは酸化、不純物混入などのせいか、第1種にに使用できない振る舞いをする。**

# 第II種のNbは使えるか？

## Flux trapping in superconducting accelerating cavities during cooling down with a spatial temperature gradient

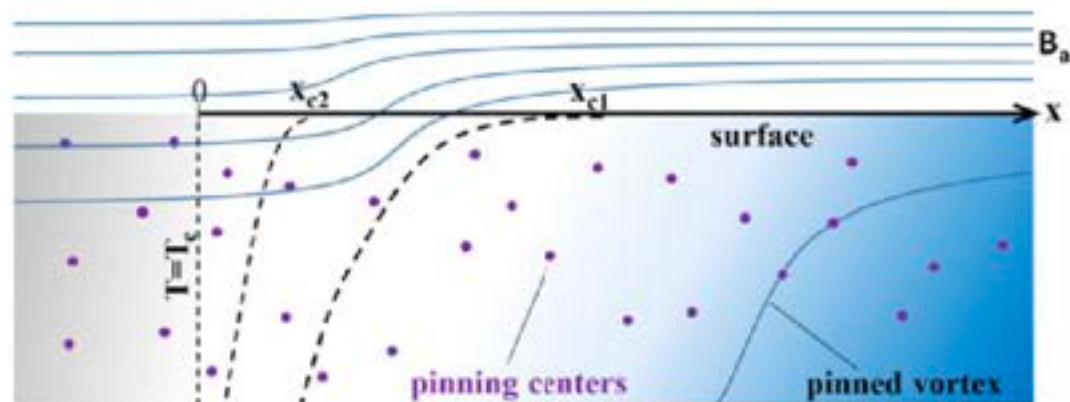
Takayuki Kubo<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki, Japan

<sup>2</sup>SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies, Hayama, Kanagawa, Japan

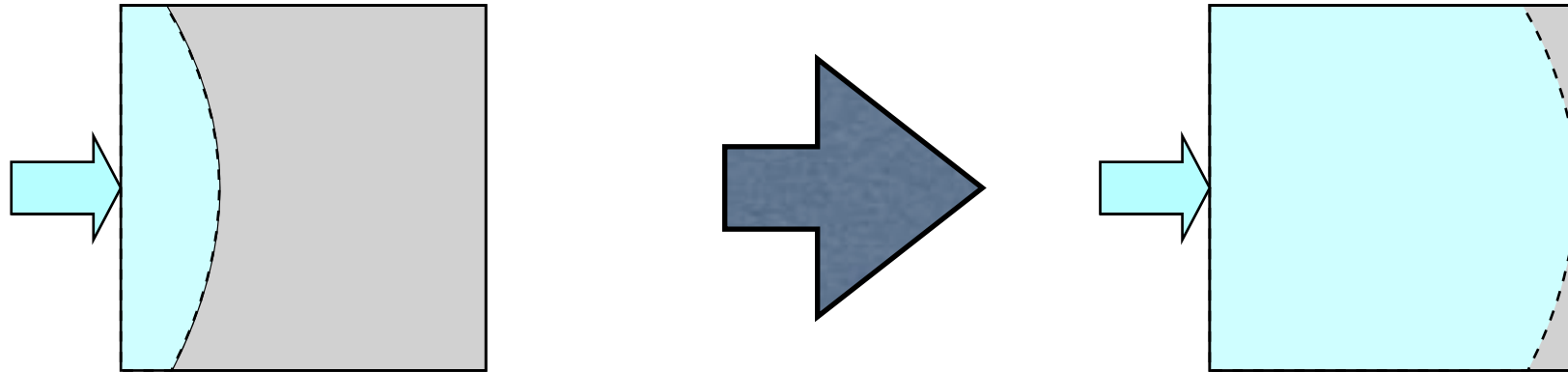
\*E-mail: kubotaka@post.kek.jp

Received March 3, 2016; Accepted April 5, 2016; Published May 24, 2016

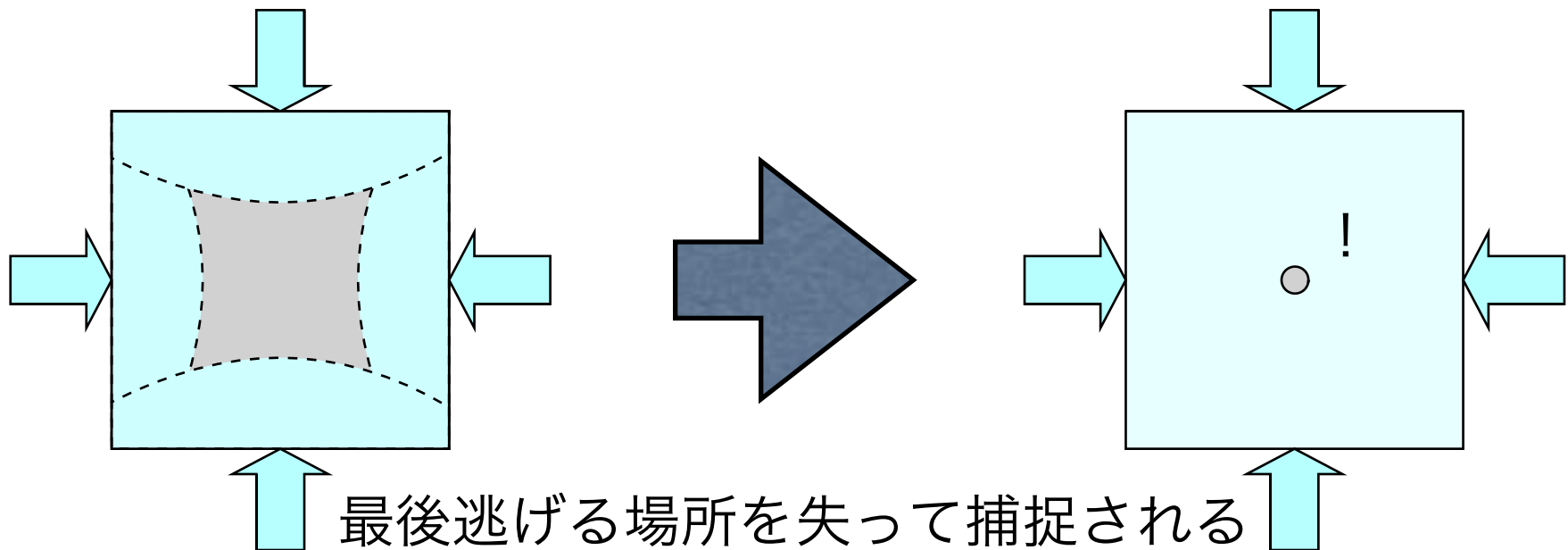


**Fig. 4.** A schematic view of the vicinity of the phase transition fronts with an ambient magnetic field parallel to the surface. The region between the two dashed curves labeled by  $x_{c2}$  and  $x_{c1}$  corresponds to the vortex state domain. The dots represent pinning centers.

# 磁束排斥(Flux Expulsion)

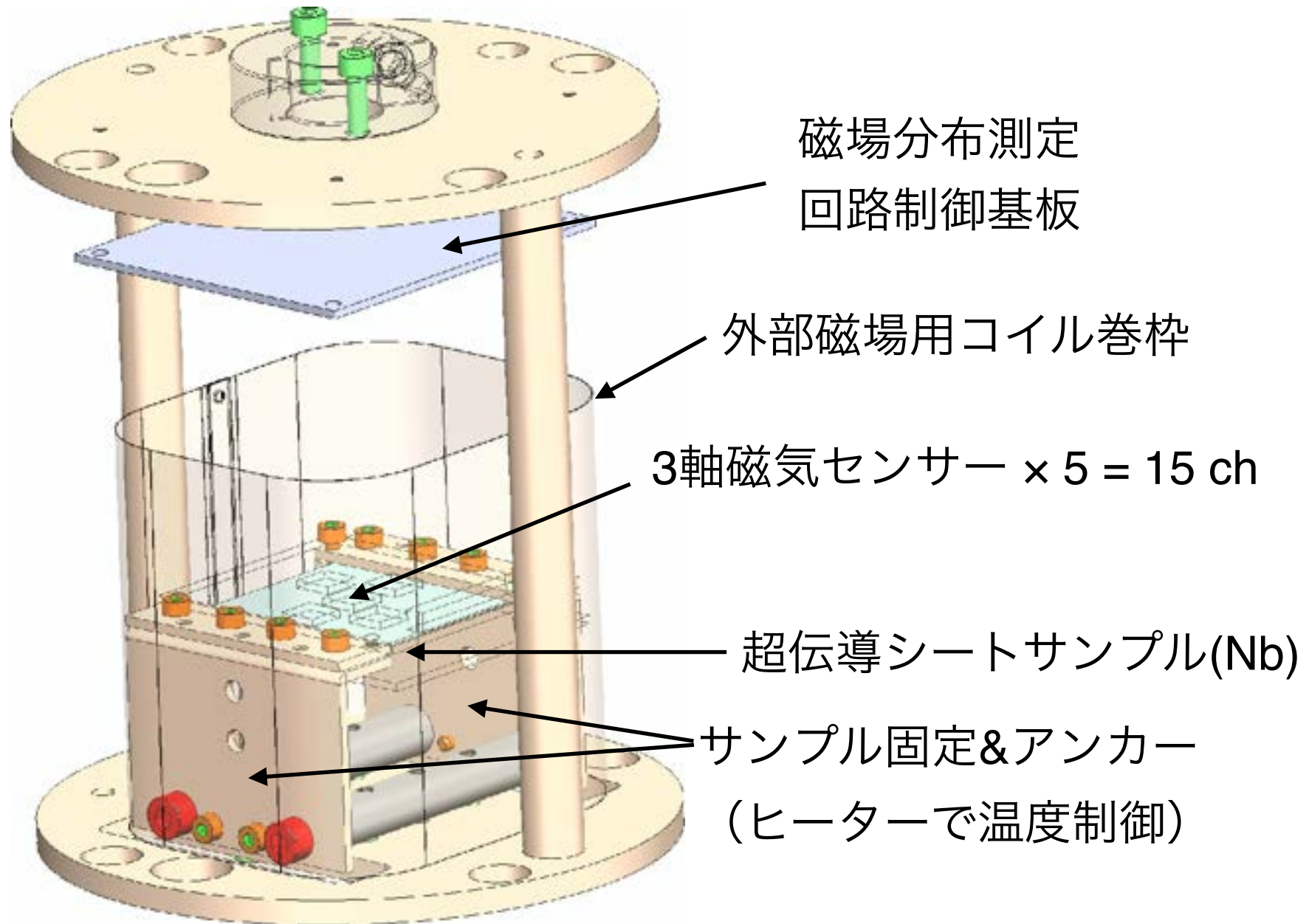


素直に右へ排斥される(追い出される)

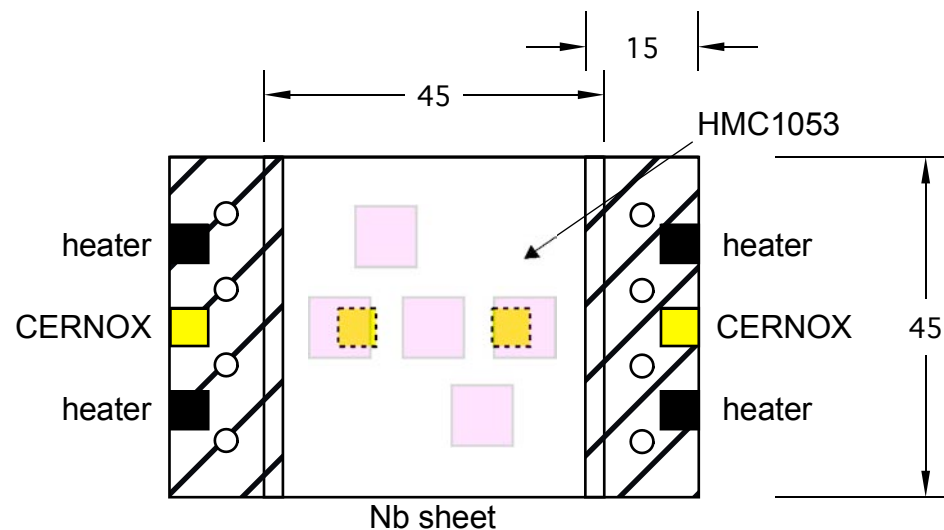
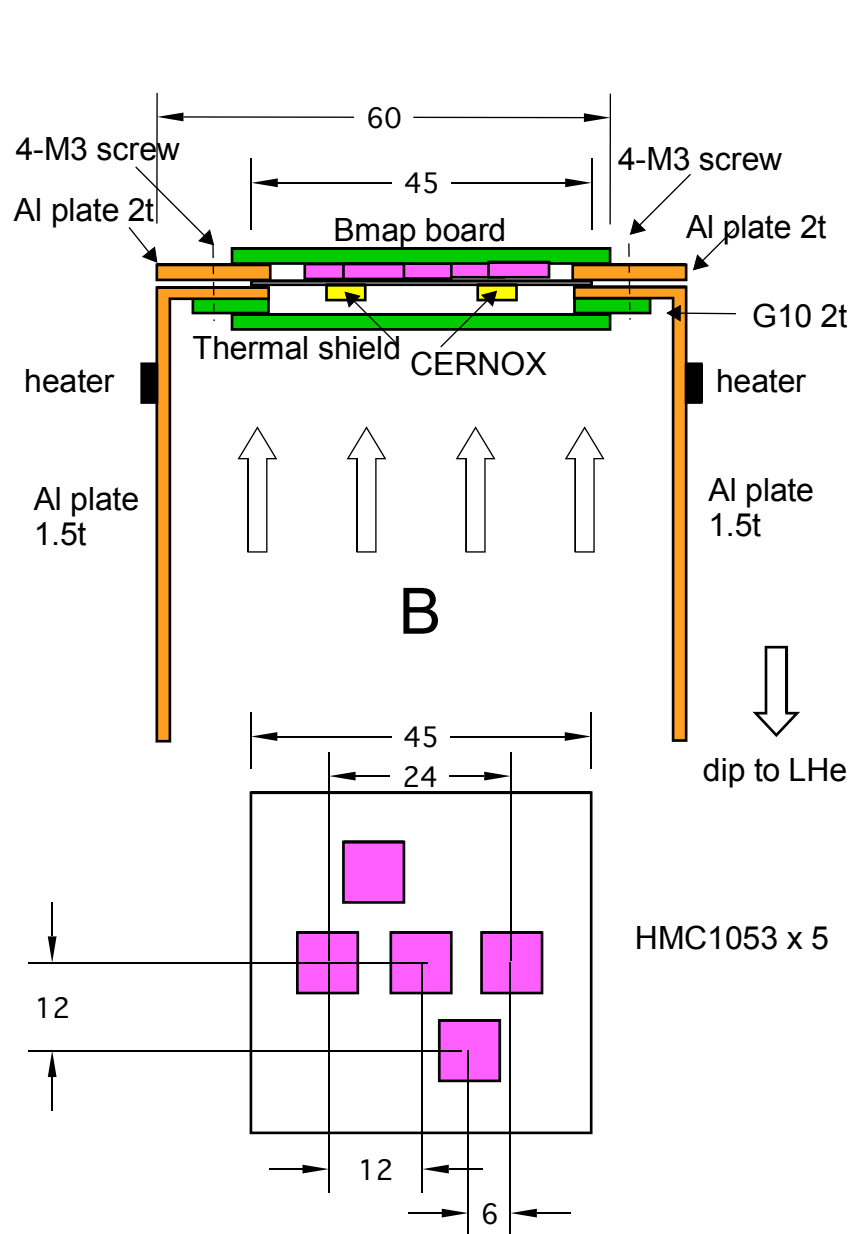


最後逃げる場所を失って捕捉される

# シート用実験装置構想



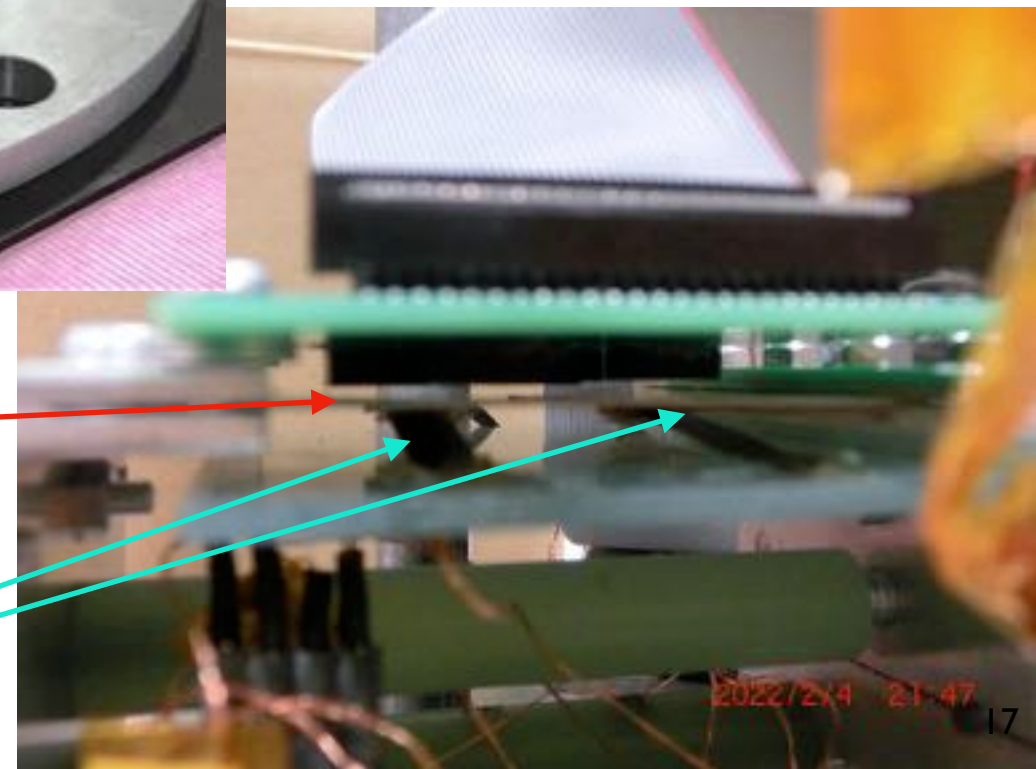
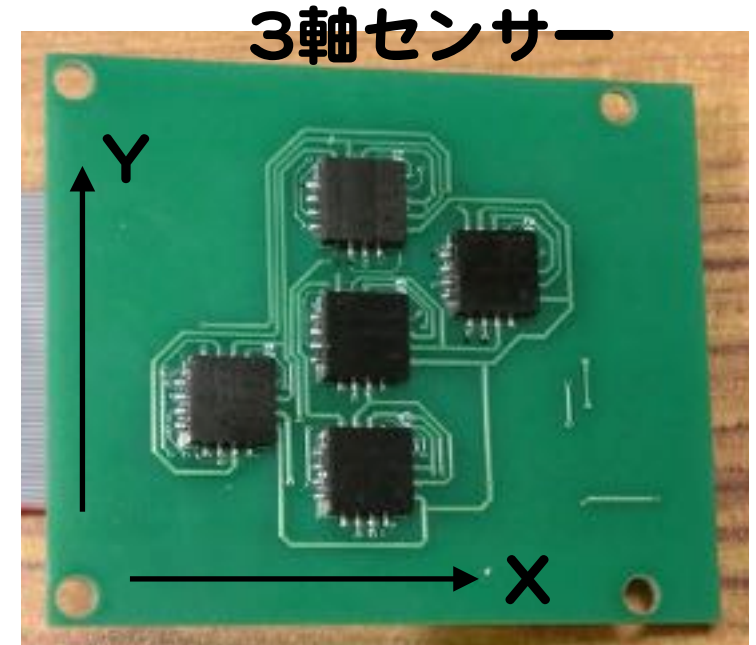
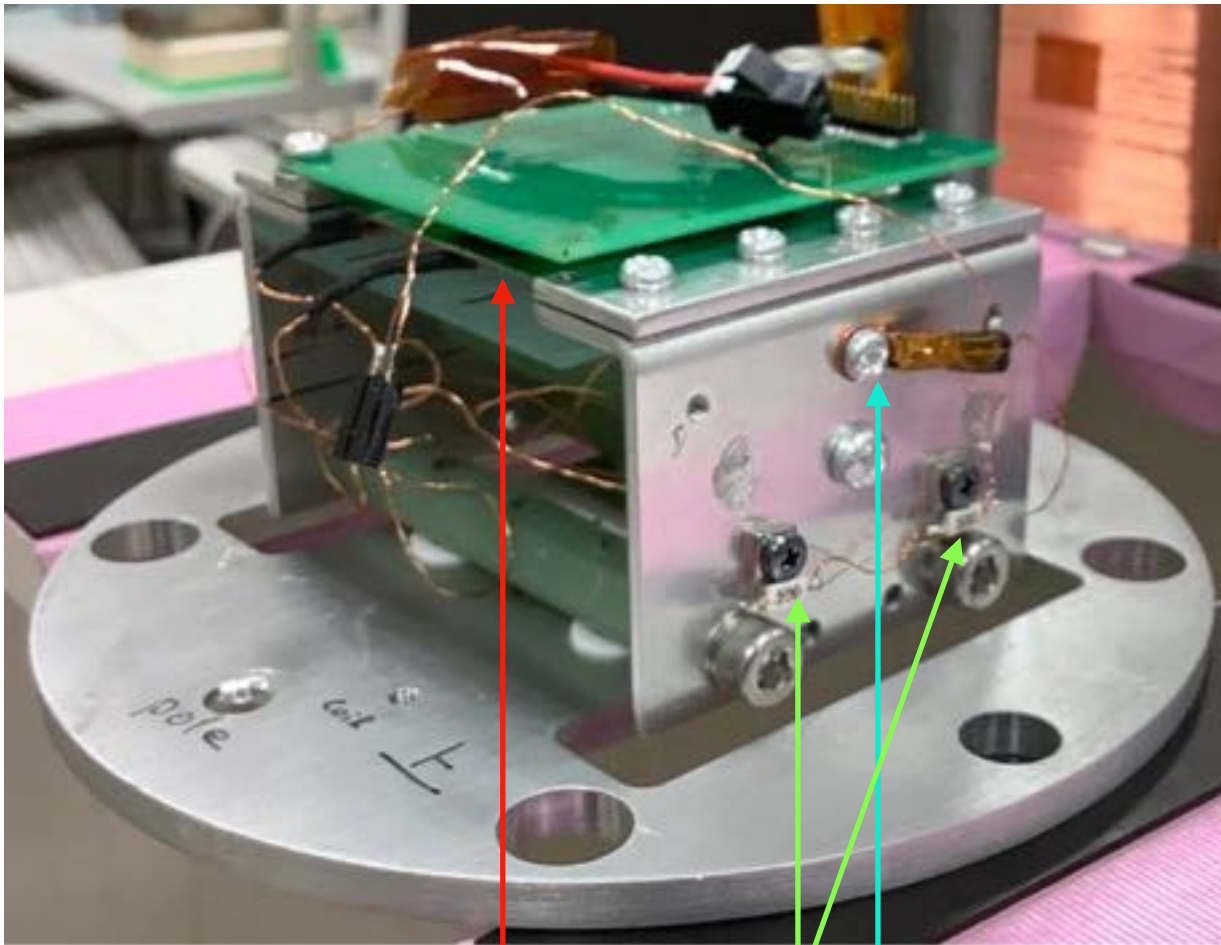
# センサー周り



- センサーボードは片持ち
- サンプルシートは両側で固定  
各々ヒータで温度制御  
CERNOX温度センサーで計測
- タブをLHe液に浸ける



# サンプルホルダー周り



サンプルシート  
Variation:  
RRR  
Anneal  
EP/BCP...

Heater

CERNOX

# 低温実験@RCNP



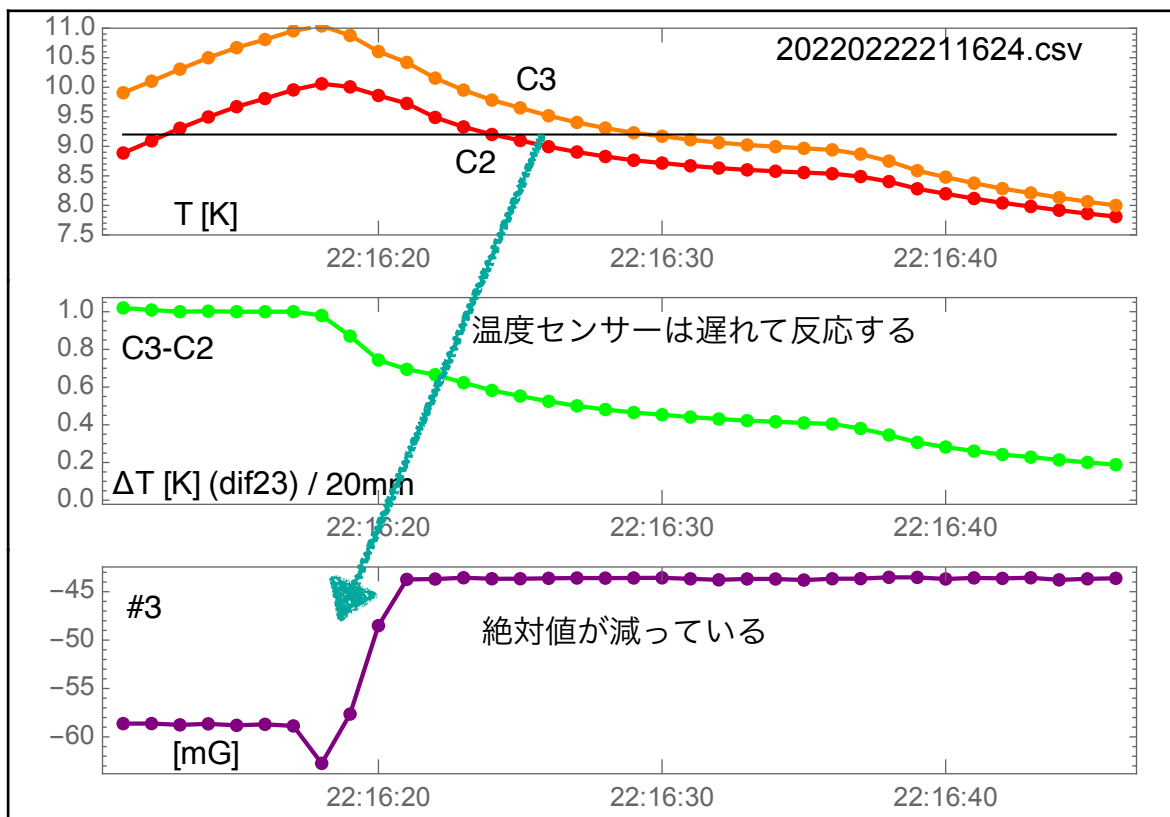
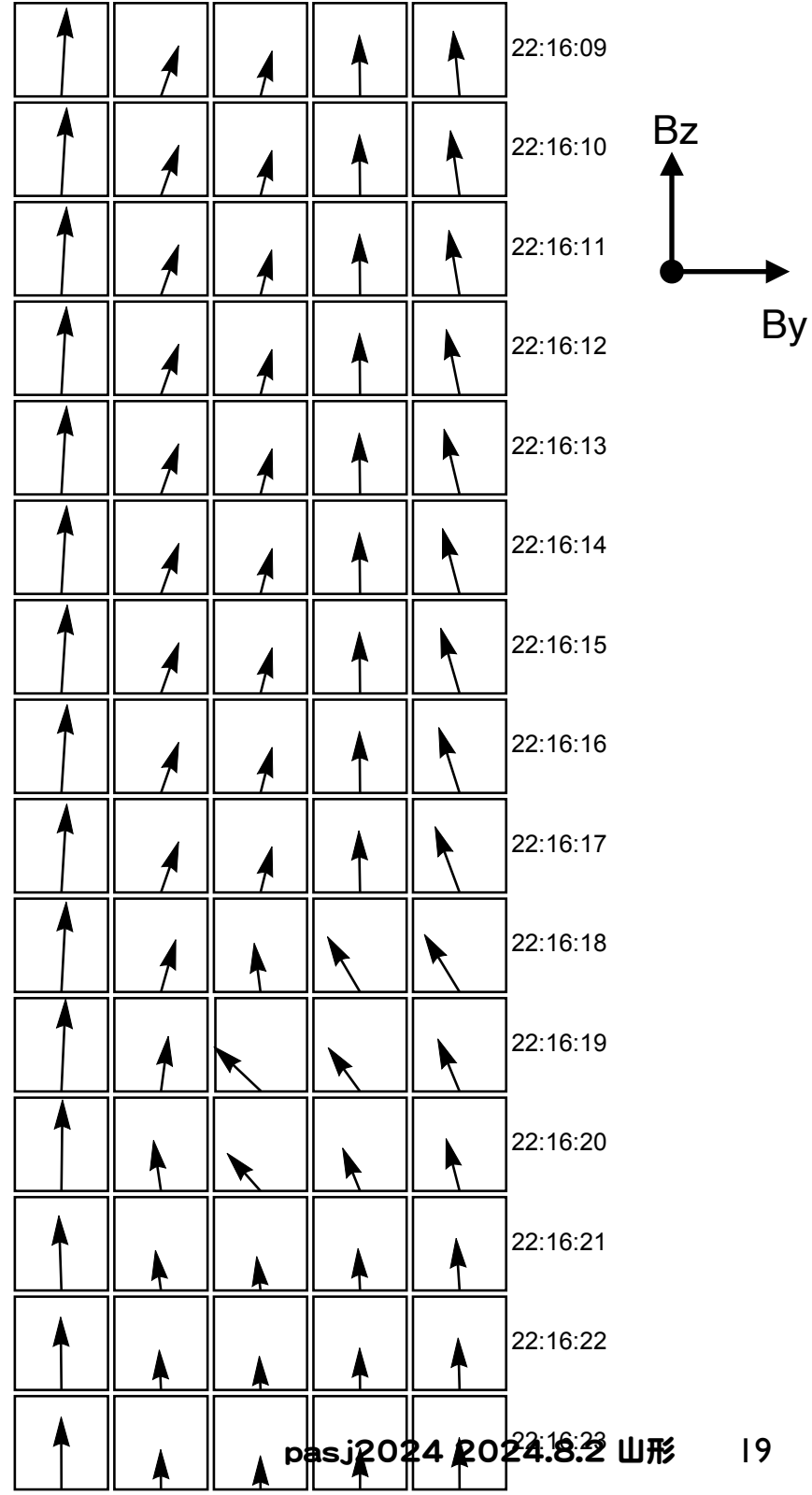
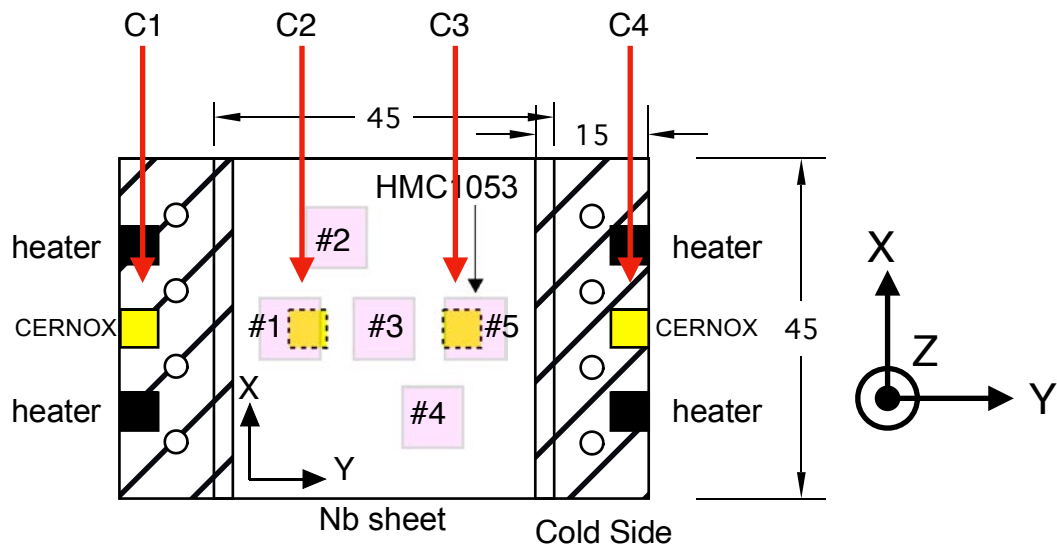
セットアップ概観

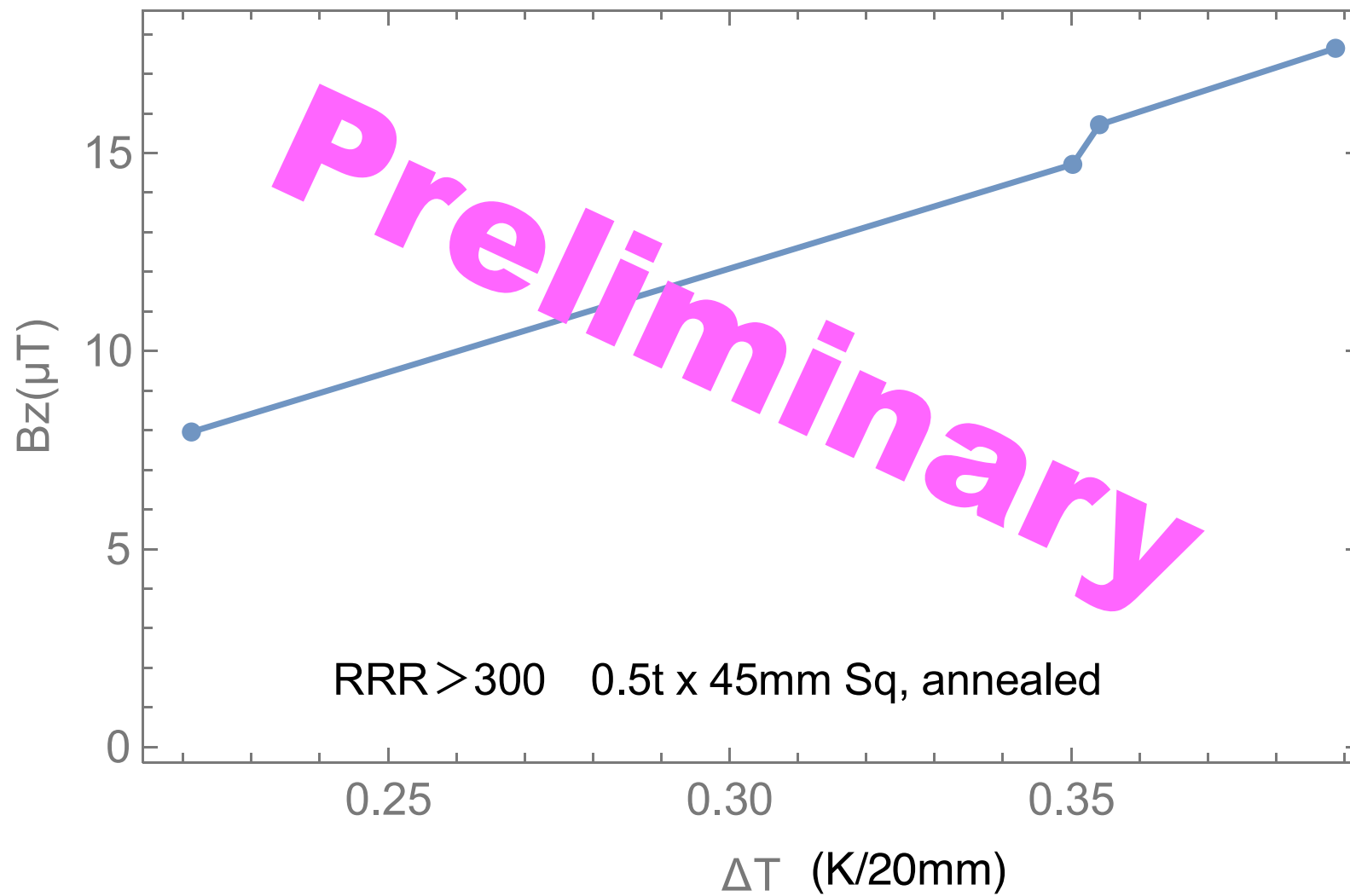


組み上げてフランジから吊す



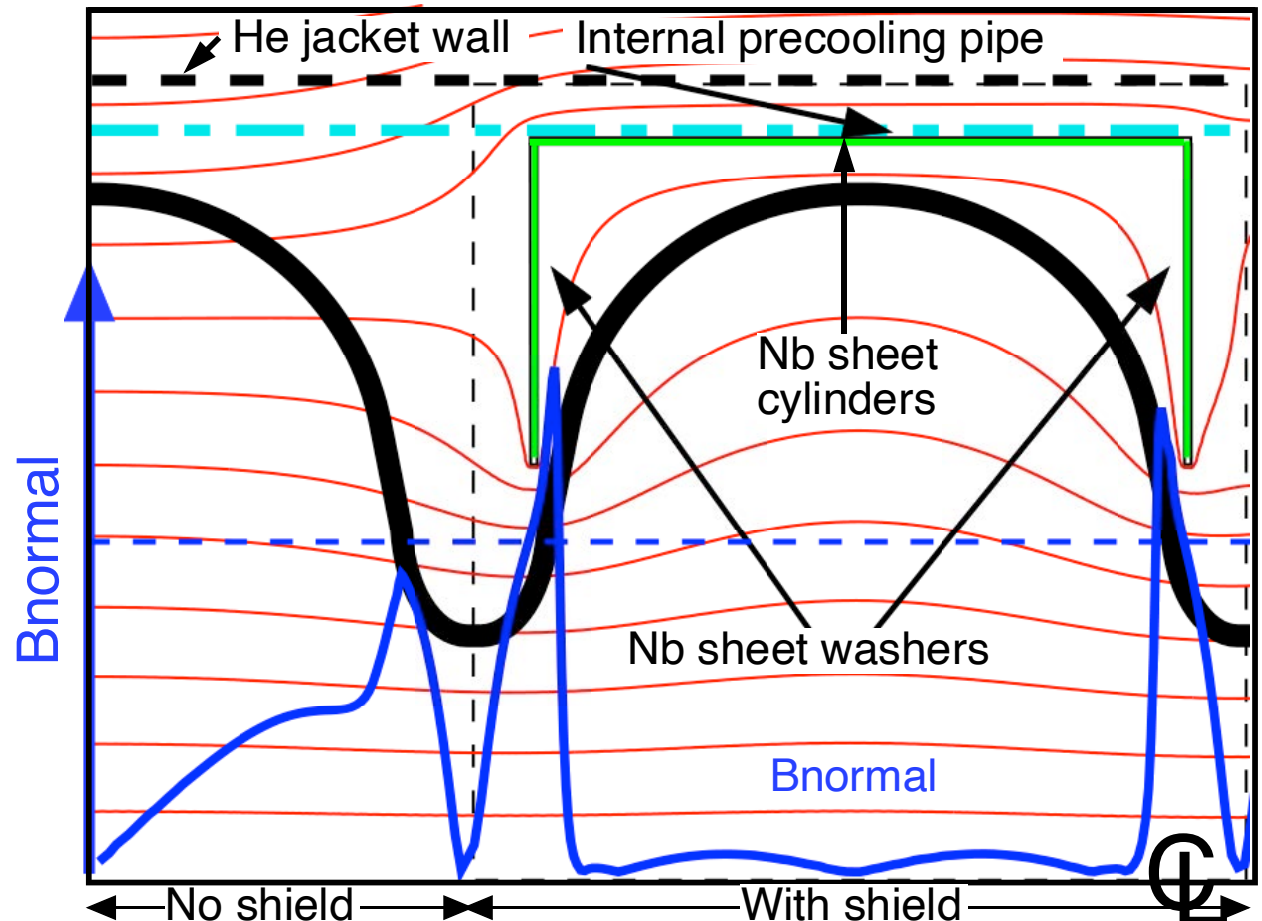
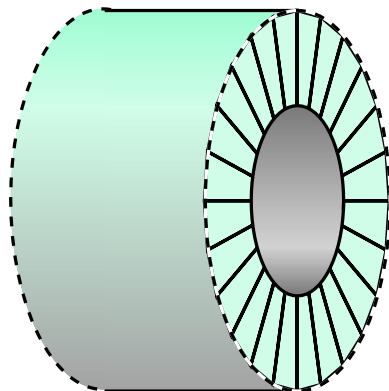
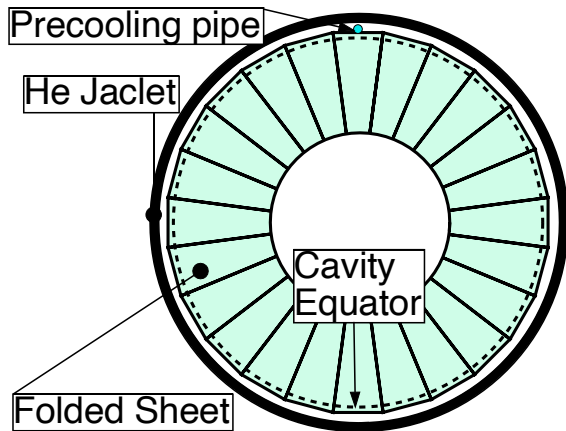
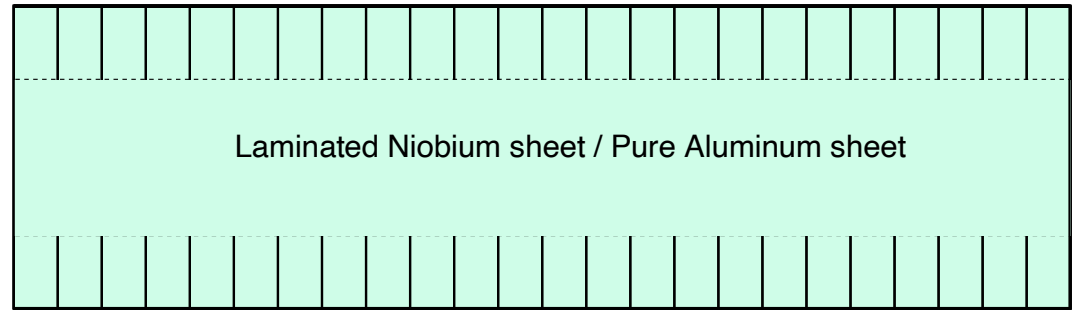
# 速報





# 実装例？

Laminate Film
Niobium sheet
5N Aluminum sheet 0.5t
Laminate Film



# Summary

- Nb (第 II 種) は超伝導転移時に周囲磁束を捕捉しうる。
- 捕捉磁束が空洞内壁から出ていると  $Q_0$  がさがる。
- $Q_0$  低下は Hi-Q になるほど影響が大きい。
- 極微小磁場の遮蔽が重要である。
- 従来の高透磁率材を使う磁気遮蔽は極低温で性能が下がりやすい、高価、取扱に注意が必要。
- Pb など第 I 種超伝導は完全反磁性 (Meissner effect) を示し、遮蔽に理想的でより低い転移温度は冷却方法の工夫で克服できる可能性がある。
- しかし、Pb は素材の生成、維持に課題がある。
- Nb は第 II 種だが、冷却方法の工夫による磁束排斥効果が期待できそうである。
- 3D 磁場分布測定予備実験で磁束が排斥されていく様子が見えた。
- 単セル空洞を使った遮蔽効果の実証試験に結びつけたい。
- 高透磁率材と完全反磁性材の組合せでより効果的な磁気遮蔽が可能であろう。
- 極微小磁場の遮蔽は他の様々な物理実験にも需要がある。