

超伝導加速空洞用磁気シールドの低温測定

日本アドバンステクノロジー

植木 竜一、浅野 峰行、今田 信一、柳町 太亮、山田 浩気
ケーバック

岡田 昭和

高エネルギー加速器研究機構

土屋 清澄、増澤 美佳、宍戸 寿郎、山本 康史、加古 永治

Outline

- 1、背景
- 2、磁気シールド内の残留磁場測定
- 3、たて型性能測定
- 4、まとめ

背景

～Quality factor(Q値)～

$$Q_0 = \frac{\omega W_s}{P_d} = \frac{G}{R_s}$$

Q_0 : 無負荷Q値
 W_s : 蓄積エネルギー[W]
 P_d : 高周波損失[W]
 G : 形状因子 (277 Ω : 9セル超伝導空洞)
 R_s : 表面抵抗 [Ω]

$$Q_0 \sim 10^{10} \rightarrow R_s \text{ 28 n}\Omega \text{ 以下}$$

～表面抵抗(R_s)～

$$R_s = R_{bcs}(T) + R_{res}$$

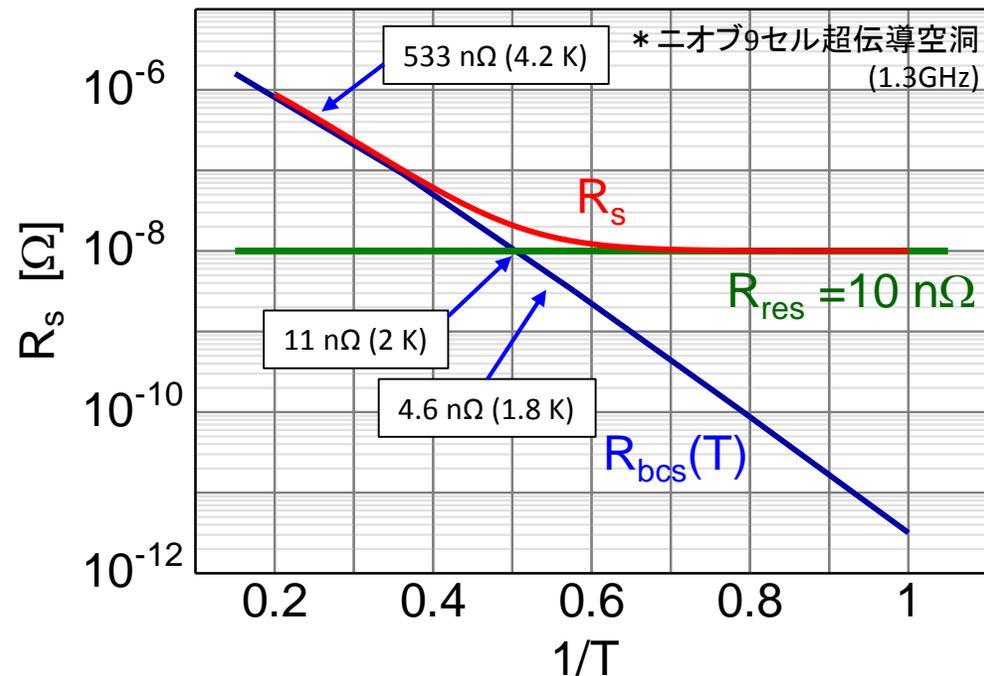
R_{bcs} : BCS理論からの抵抗
 R_{res} : 残留抵抗(温度によらず一定)

$$R_{bcs}(T) = A \frac{\omega^2}{T} \exp \left[-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \cdot \frac{T_c}{T} \right]$$

A : 定数 ω : RF周波数
 $\Delta(0)$: 0 Kにおけるエネルギーギャップ
 k_B : ボルツマン定数
 T_c : 転移温度 T : 空洞温度

$$R_{res} = R_{imp} + R_{def} + R_m + \dots$$

R_{imp} : 不純物散乱による抵抗
 R_{def} : 結晶欠陥による抵抗
 R_m : 残留磁場による抵抗



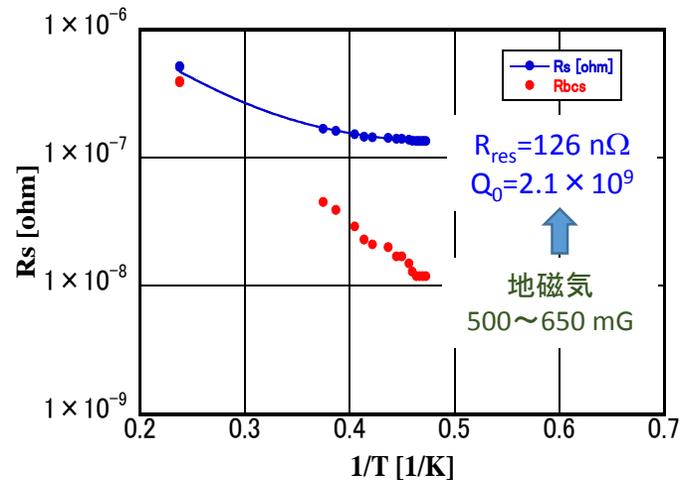
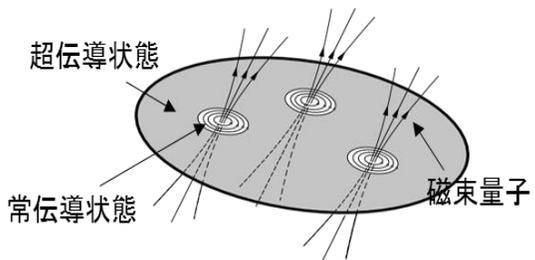
表面抵抗の温度依存性

残留抵抗をいかに小さくするかが空洞性能を向上させる鍵

背景

～残留磁場～

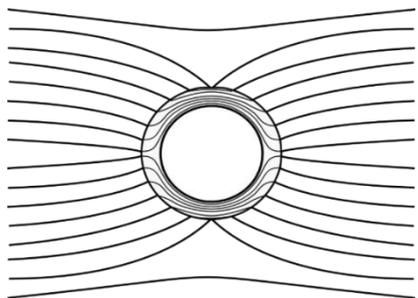
- ・空洞冷却中に外部磁場(地磁気)が
空洞の欠陥に磁束量子としてトラップ



表面抵抗の温度依存 磁気シールドなし(2008年@KEK)

～磁気シールド～

- ・空洞内に侵入する外部磁場を遮蔽し
空洞内の残留磁場を低減させる役割

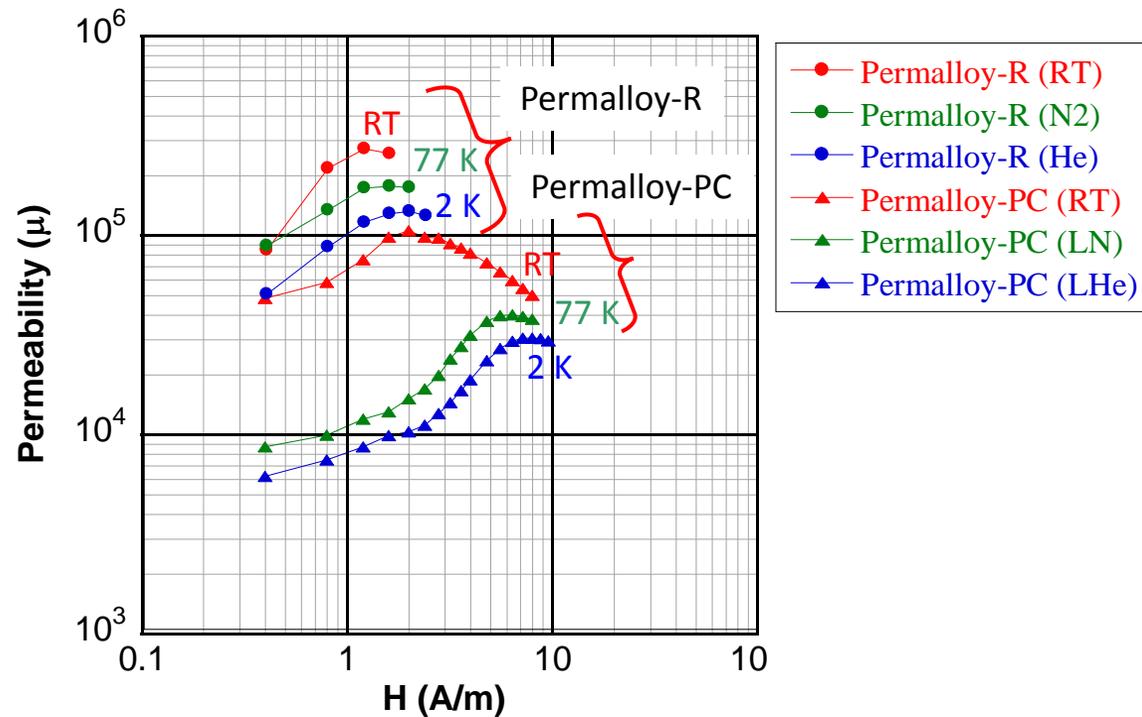


パッシブ磁気シールドの概念図

- ・パーマロイ系の材料 (Fe, Ni合金)
- ・地磁気に対して高い透磁率



～磁気シールド材の透磁率の低温劣化～



K. Tsuchiya et al. Proceeding of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland (2006) 505-507.

目的

ヘリウム温度における比透磁率が高いとされている材料で作製された磁気シールドの低温特性を調べる

1、背景

2、磁気シールド内の残留磁場測定

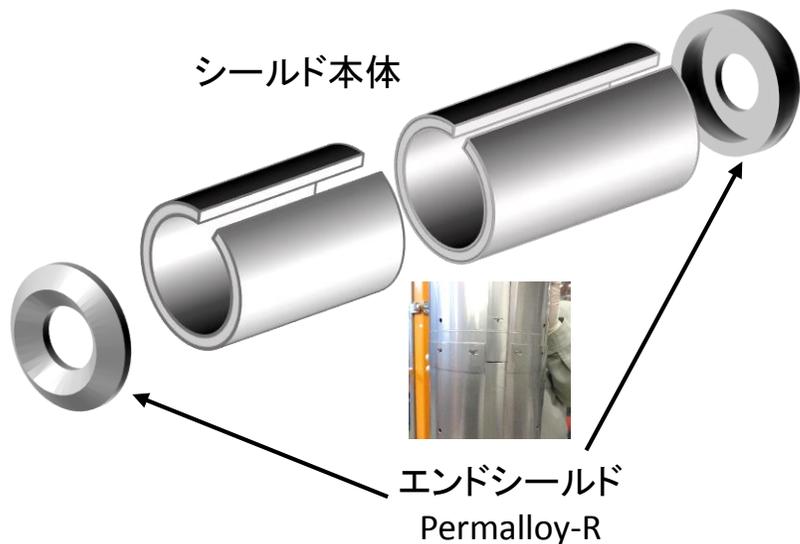
3、たて型性能測定

4、まとめ

磁気シールド

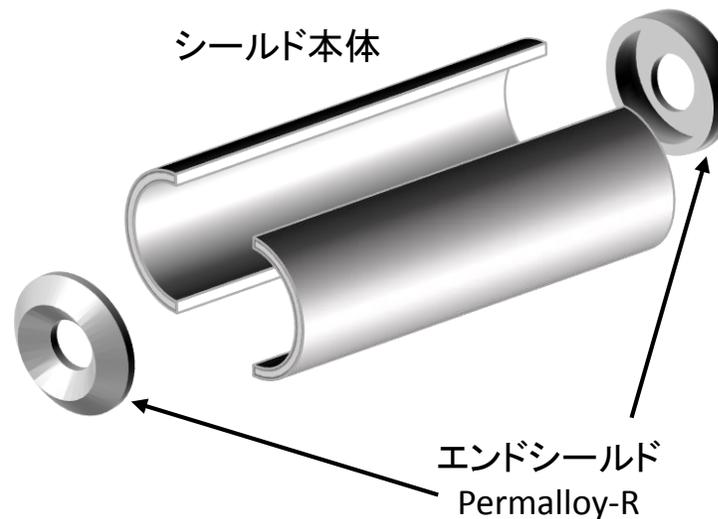
Token-shield (NECトーキン社)

材料: Permalloy-R



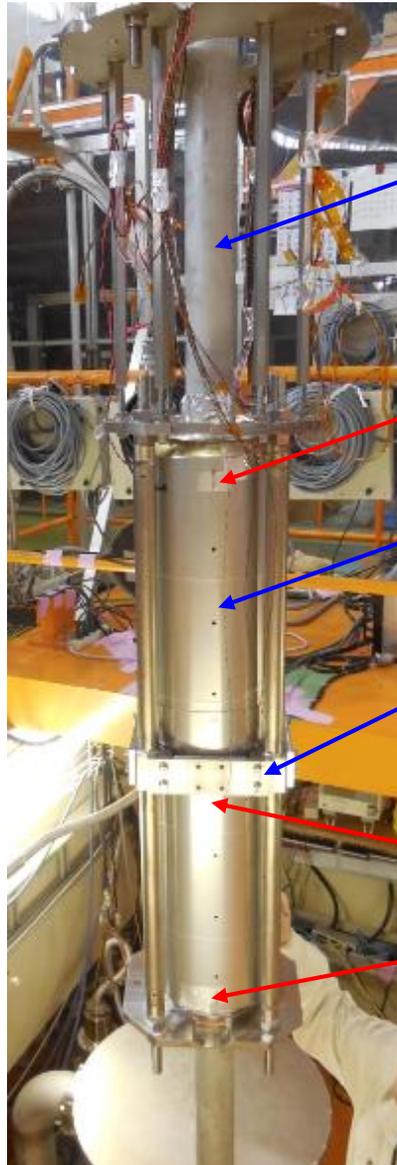
Ohtama-shield (オータマ社)

材料: VDM-7904



	L [mm]	ϕ [mm]	t [mm]	anneal [°C]
Token-shield A	976	220	1.0	1200 °C@ H ₂
Token-shield B	956	220	1.2	1200 °C@ H ₂
Ohtama-shield	956	220	1.5	1100 °C@ VAC

残留磁場測定の設定アップ



断熱真空管
(フラックスゲート)
Mag-03:Bartington

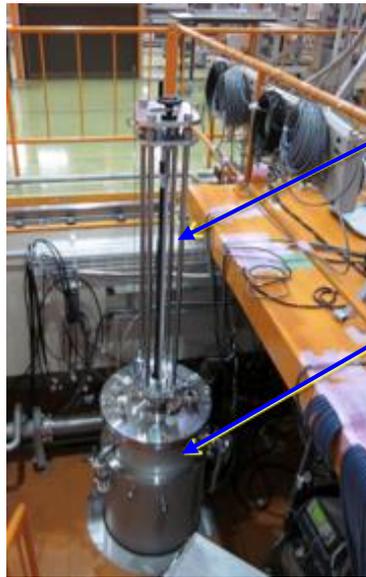
Pt-Co(上部)

磁気シールド

拘束治具

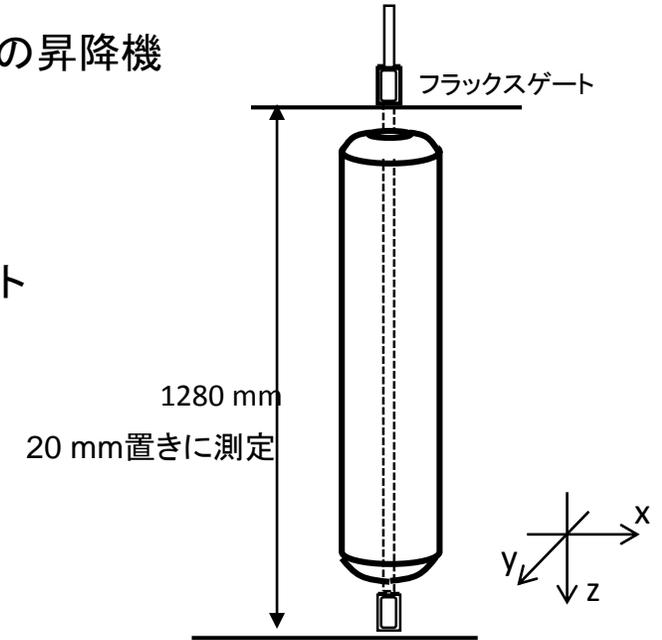
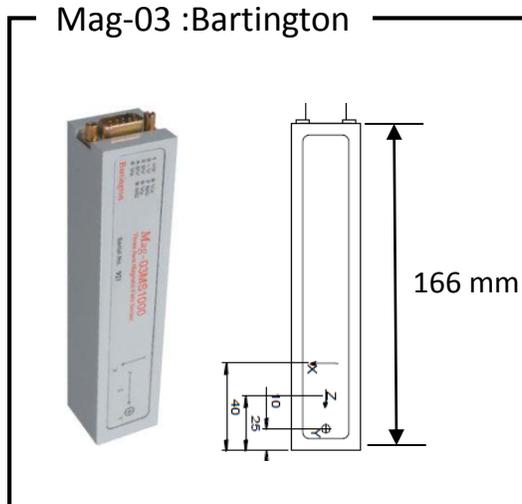
Pt-Co(中央部)

Pt-Co(下部)



フラックスゲートの昇降機

クライオスタット

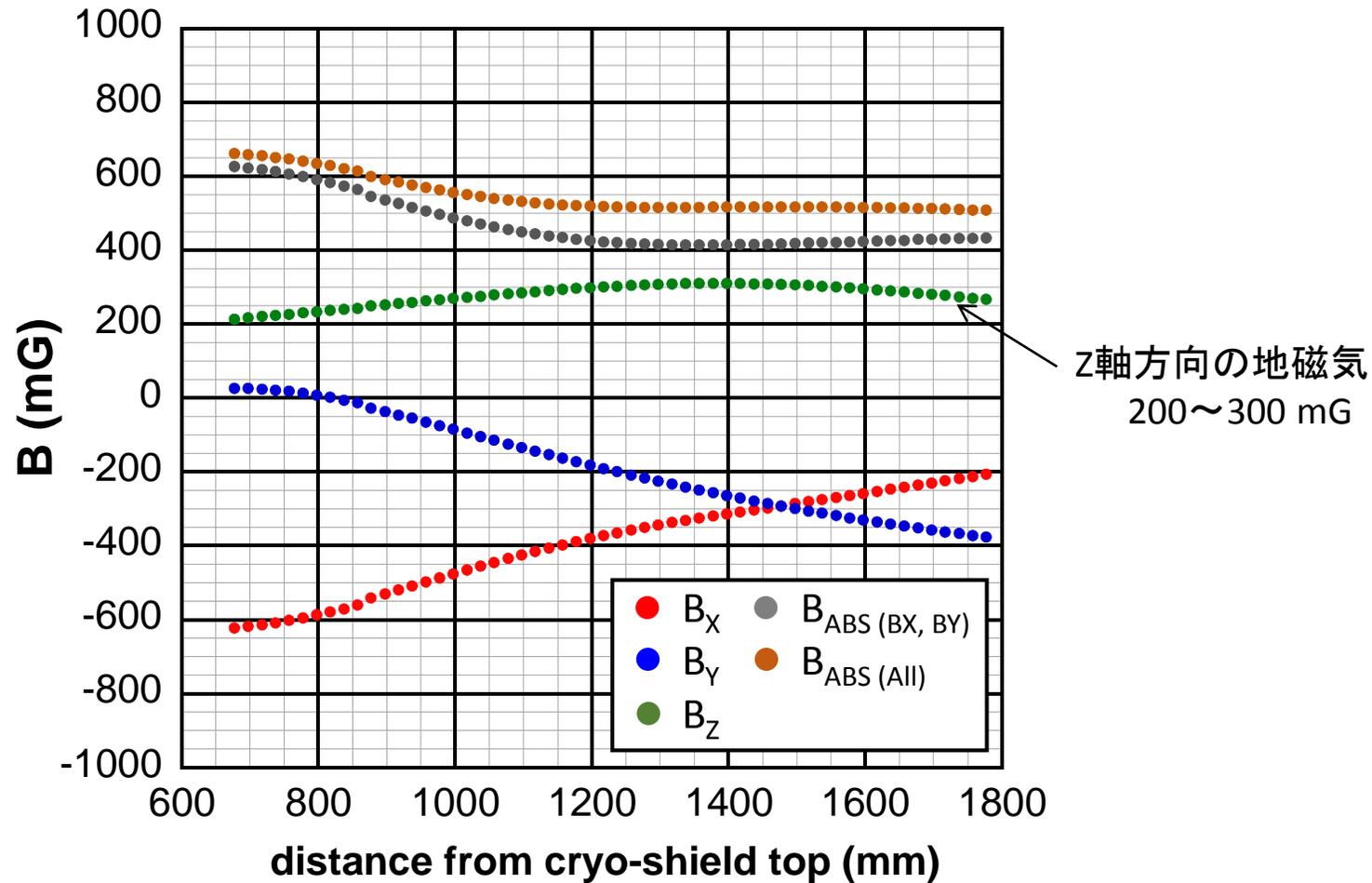


$$\text{シールド率}(S) = \frac{\text{外部磁場(地磁気)}(H_e)}{\text{シールド内残留磁場}(H_i)}$$

* 一番磁気遮蔽能力の小さいZ軸方向で計算

クライオスタット内の地磁気測定

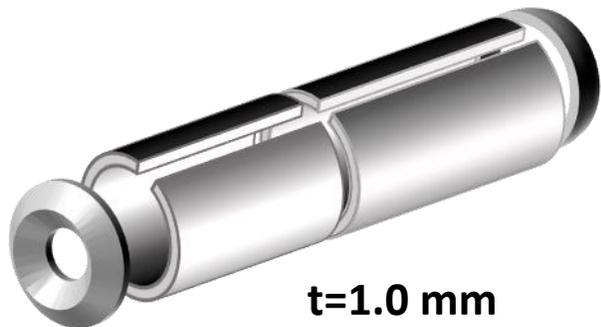
磁気シールドなしの状態での測定



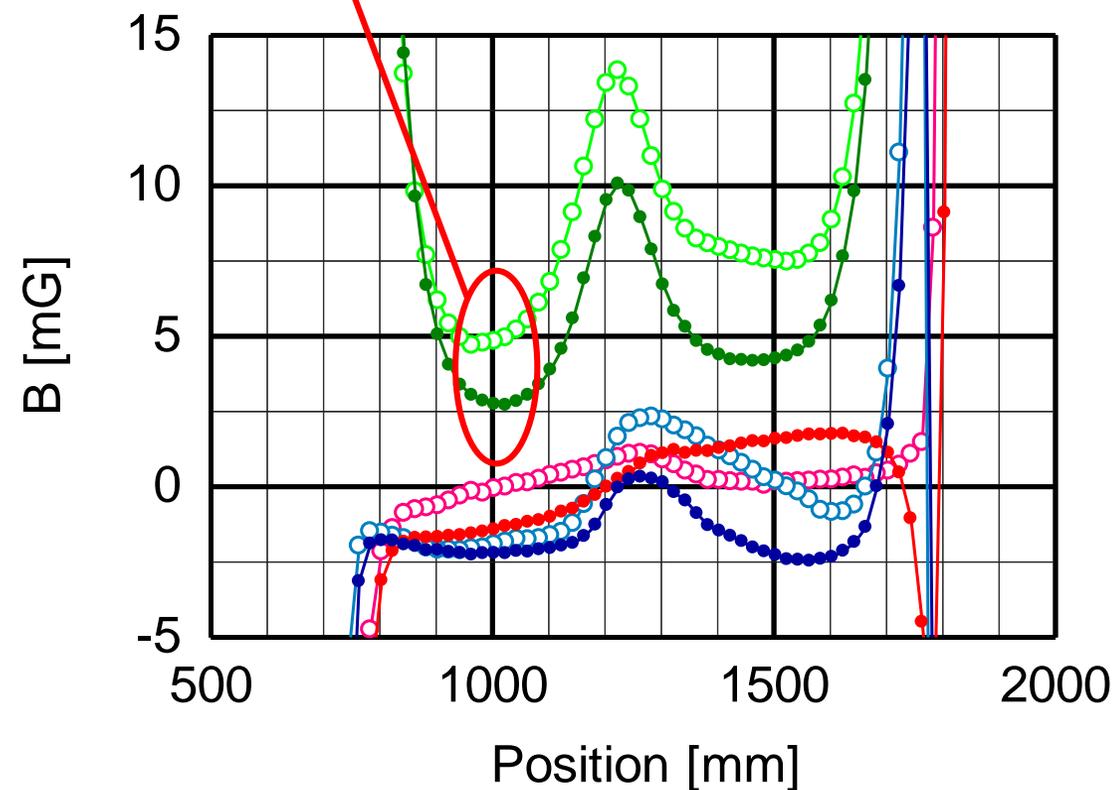
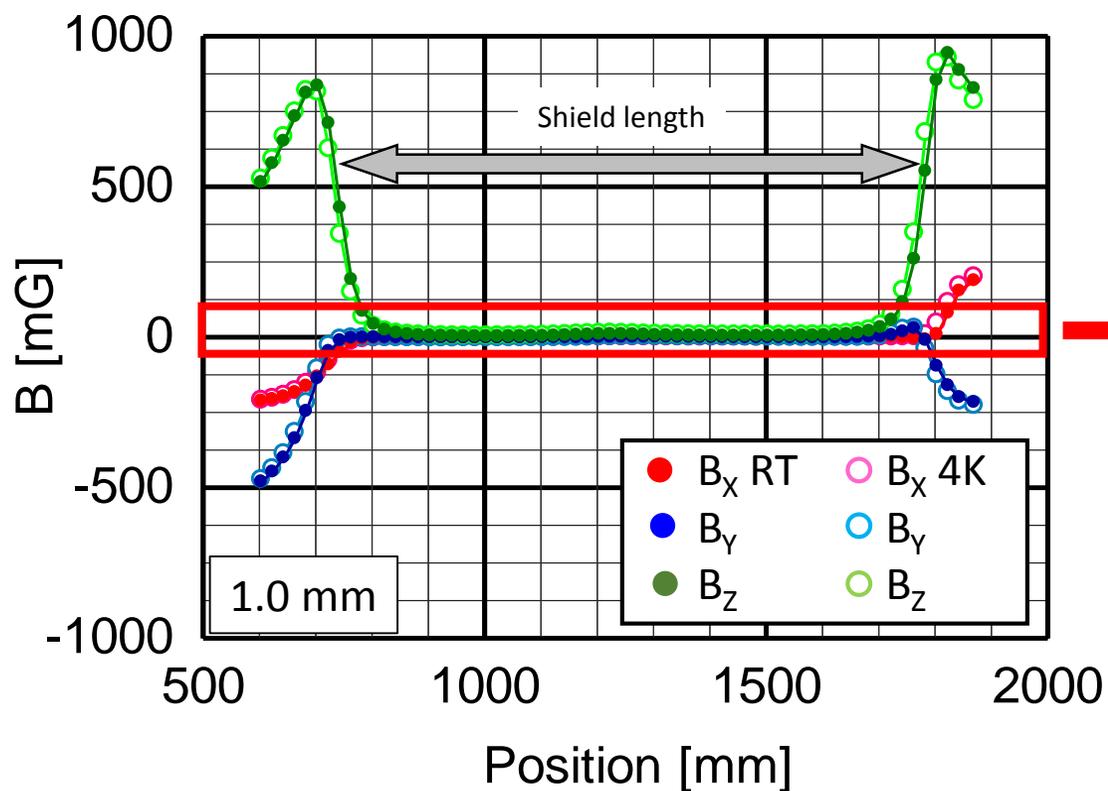
z軸方向の地磁気
200~300 mG

クライオスタット内の地磁気測定

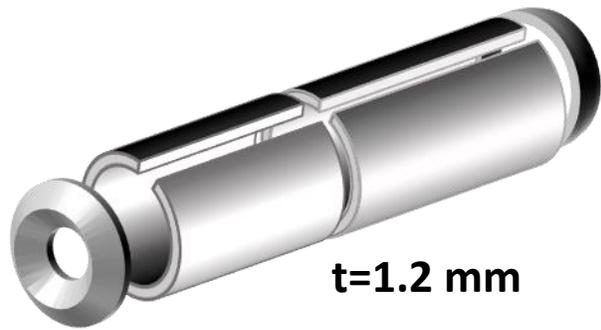
Tokin-shield A内の残留磁場



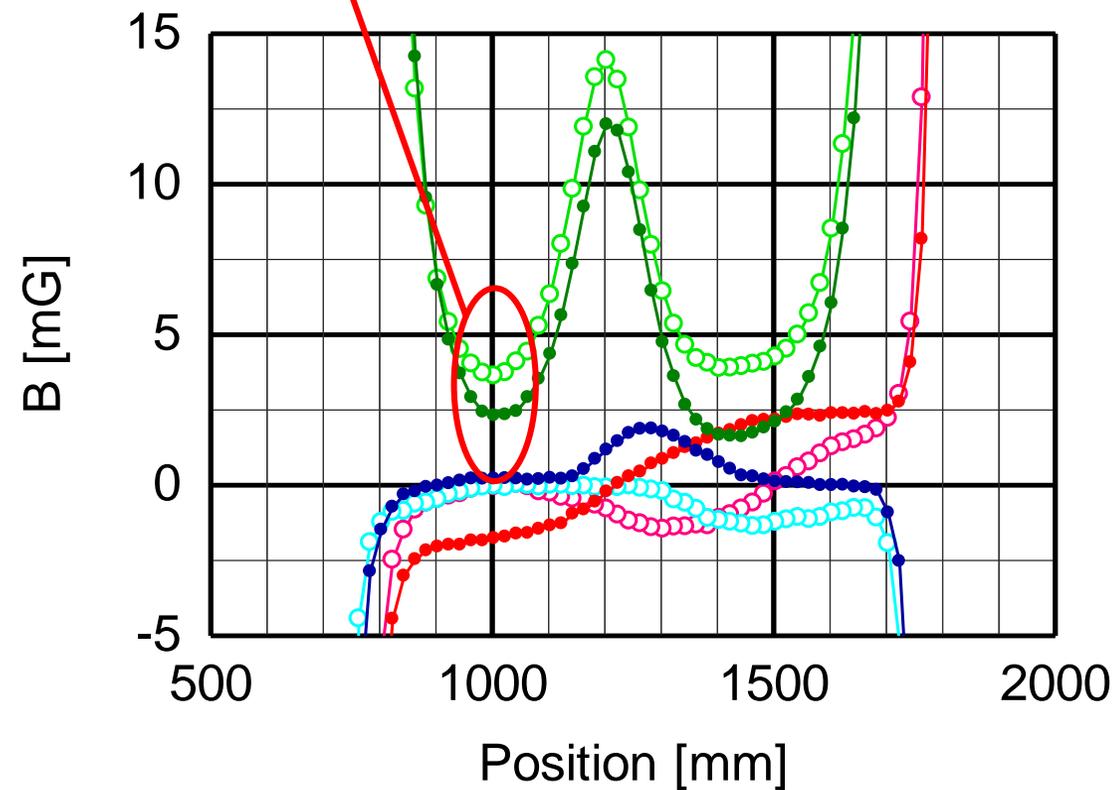
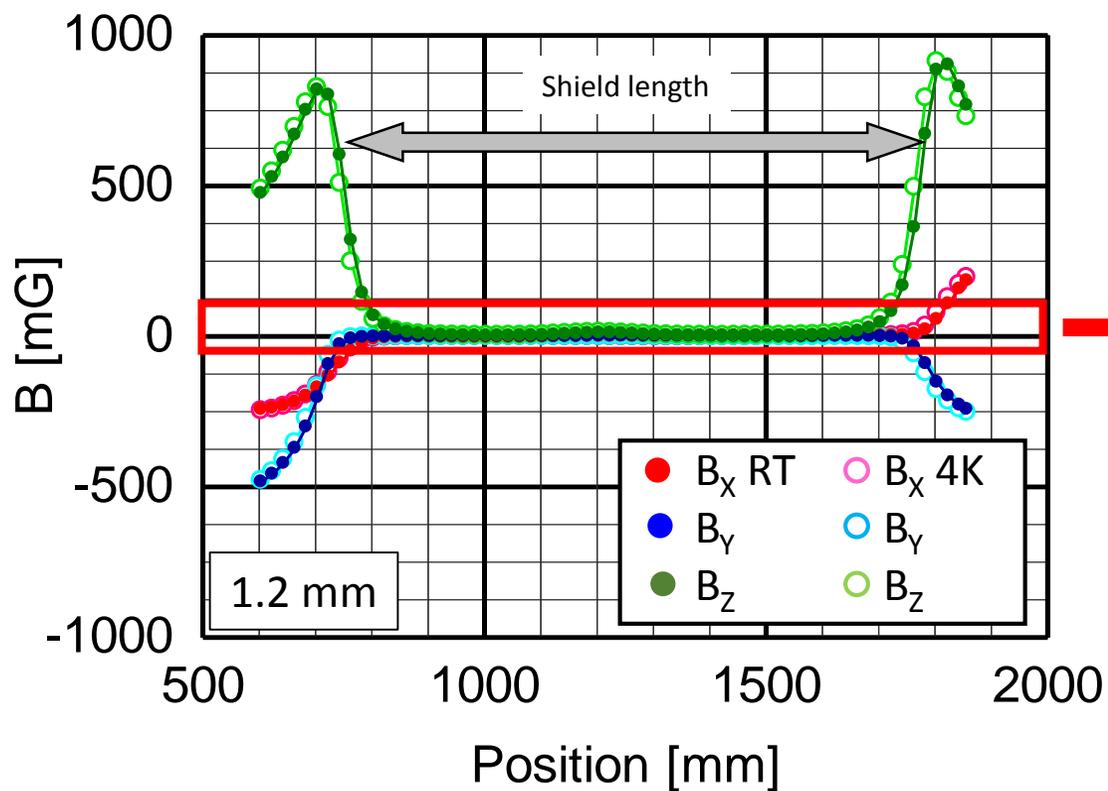
	H_e [mG]	H_i [mG]	シールド率
RT	280	2.7	104
4K	280	5.0	56



Tokin-shield B内の残留磁場



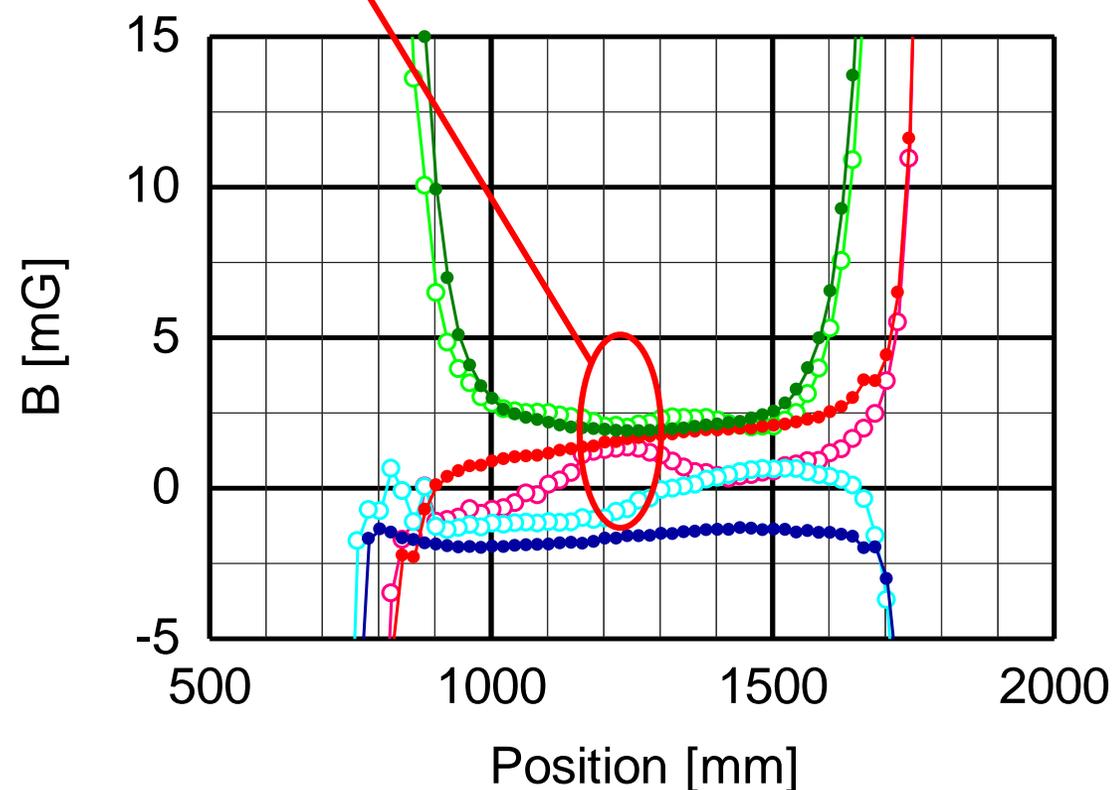
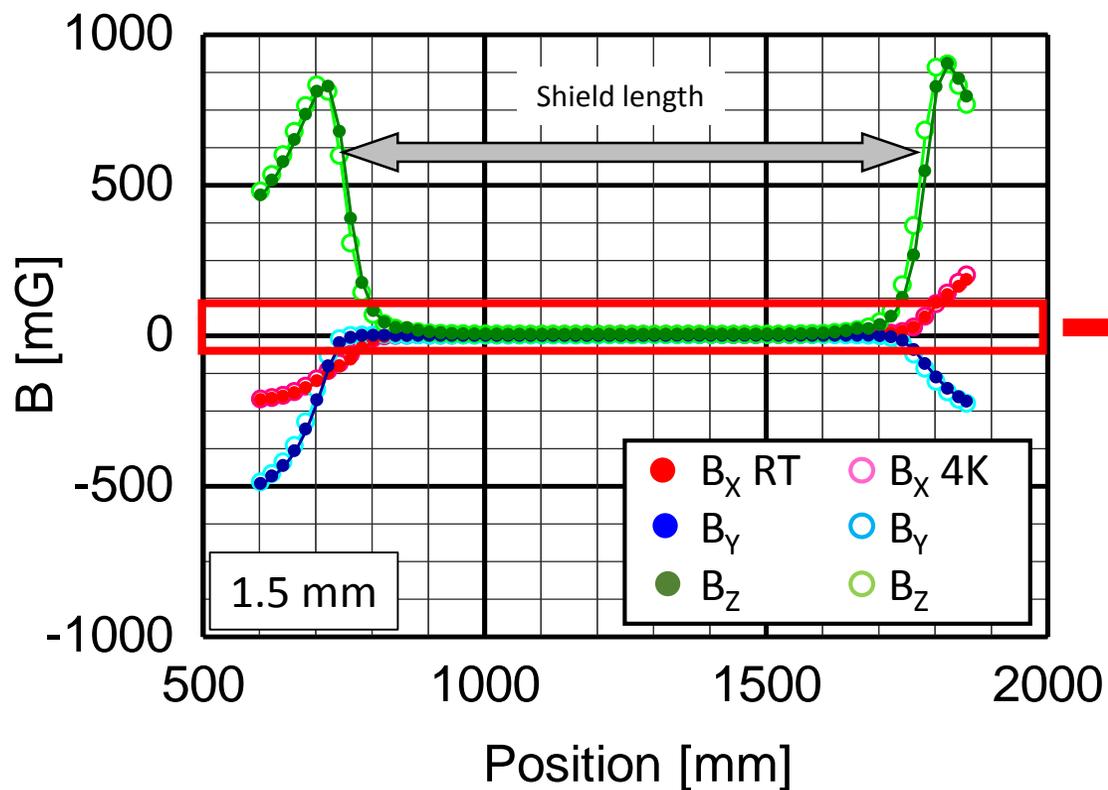
	H_e [mG]	H_i [mG]	シールド率
RT	280	2.3	122
4K	280	3.6	77



Ohtama-shield内の残留磁場



	H_e [mG]	H_i [mG]	シールド率
RT	300	1.9	158
4K	300	2.0	150



磁気シールド内の残留磁場測定

		H_e [mG]	H_i [mG]	シールド率	
Tokin-shield A (t=1.0)	RT	280	2.7	104	低温劣化
	4K	280	5.0	56	
Tokin-shield B (t=1.2)	RT	280	2.3	122	低温劣化
	4K	280	3.6	77	
Ohtama-shield (t=1.5)	RT	300	1.9	158	
	4K	300	2.0	150	

Tokin-shield

- ・低温劣化によるシールド率の低下が見られた
- ・シールド厚によるシールド率の変化
- ・継ぎ目部分からの磁場の漏れ (15 mG以下)

Ohtama-shield

- ・低温劣化は見られず

1、背景

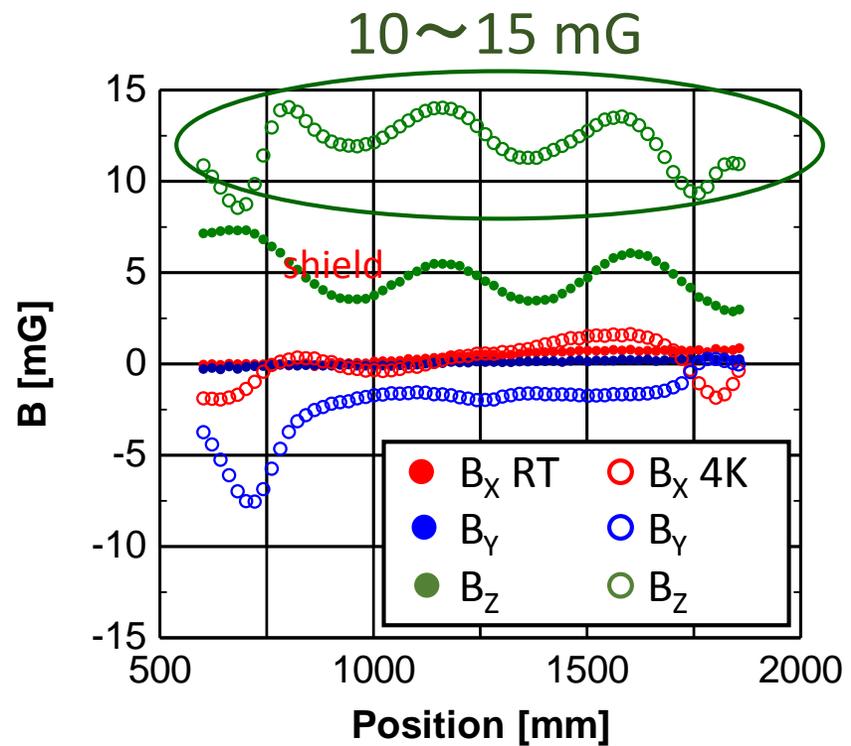
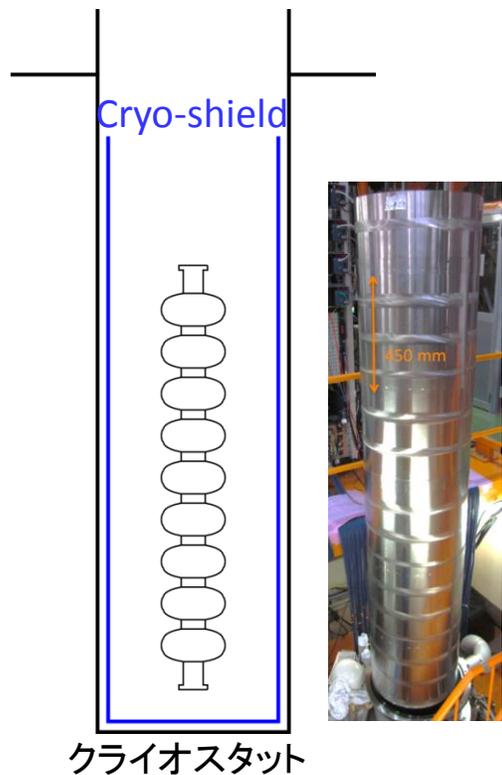
2、磁気シールド内の残留磁場測定

3、たて型性能測定

4、まとめ

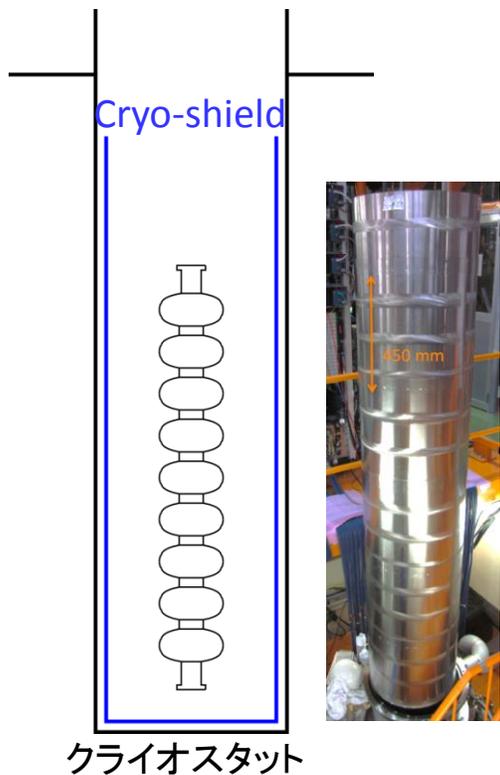
縦測定の設定アップ

・Cryo-shield

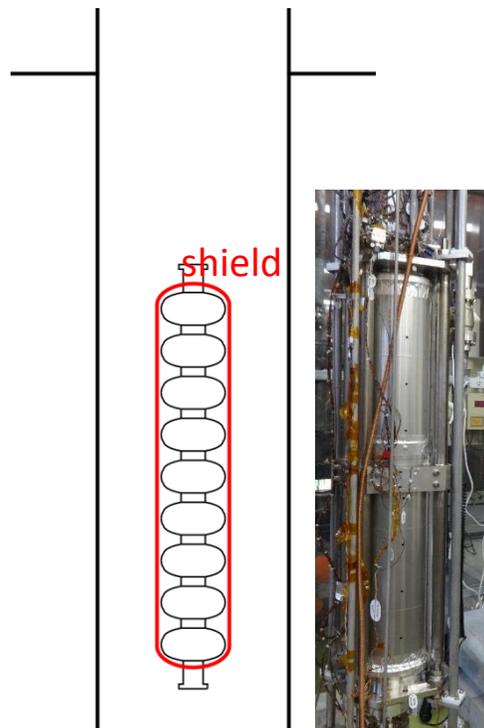


縦測定の設定アップ

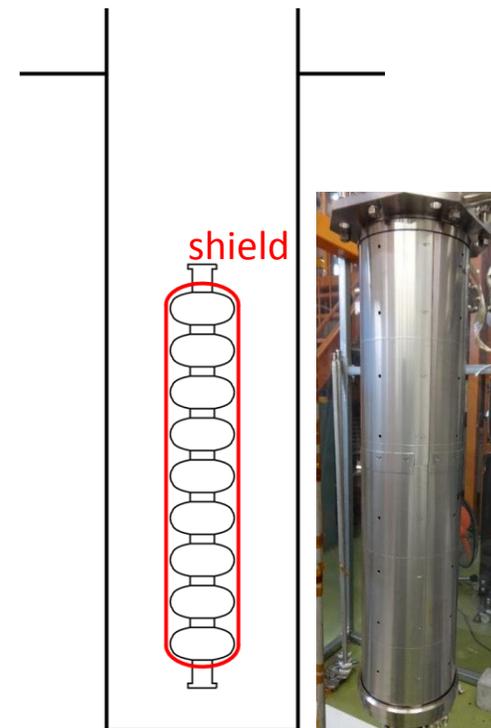
▪ Cryo-shield



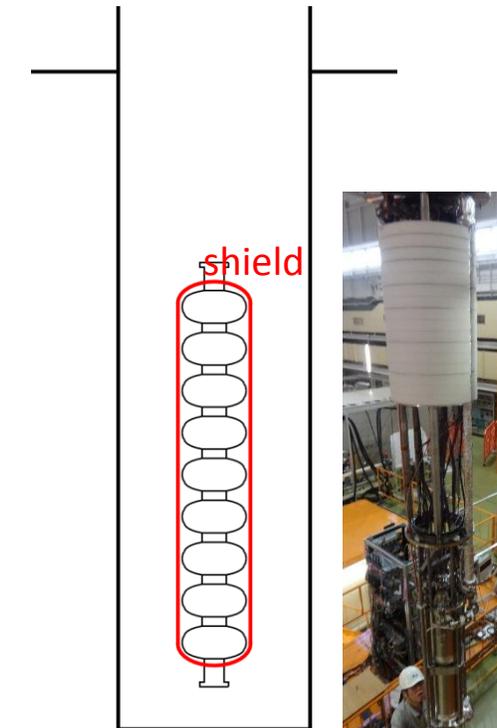
▪ Tokin-shield A



▪ Tokin-shield B



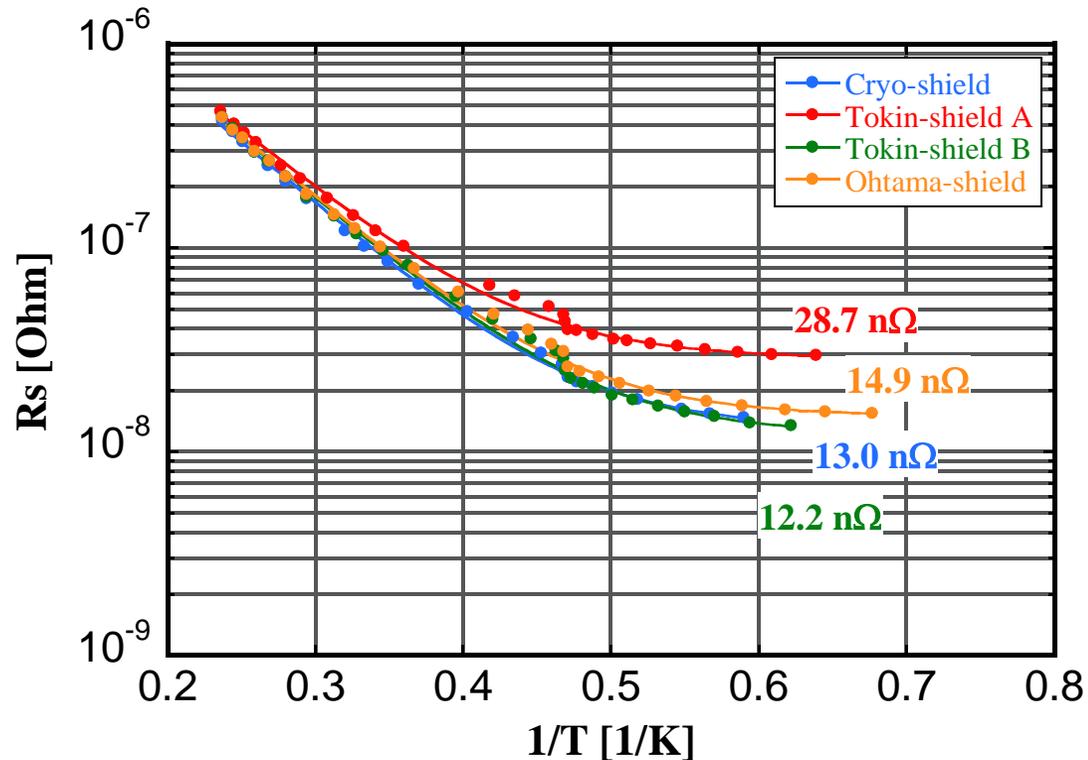
▪ Ohtama-shield



縦測定

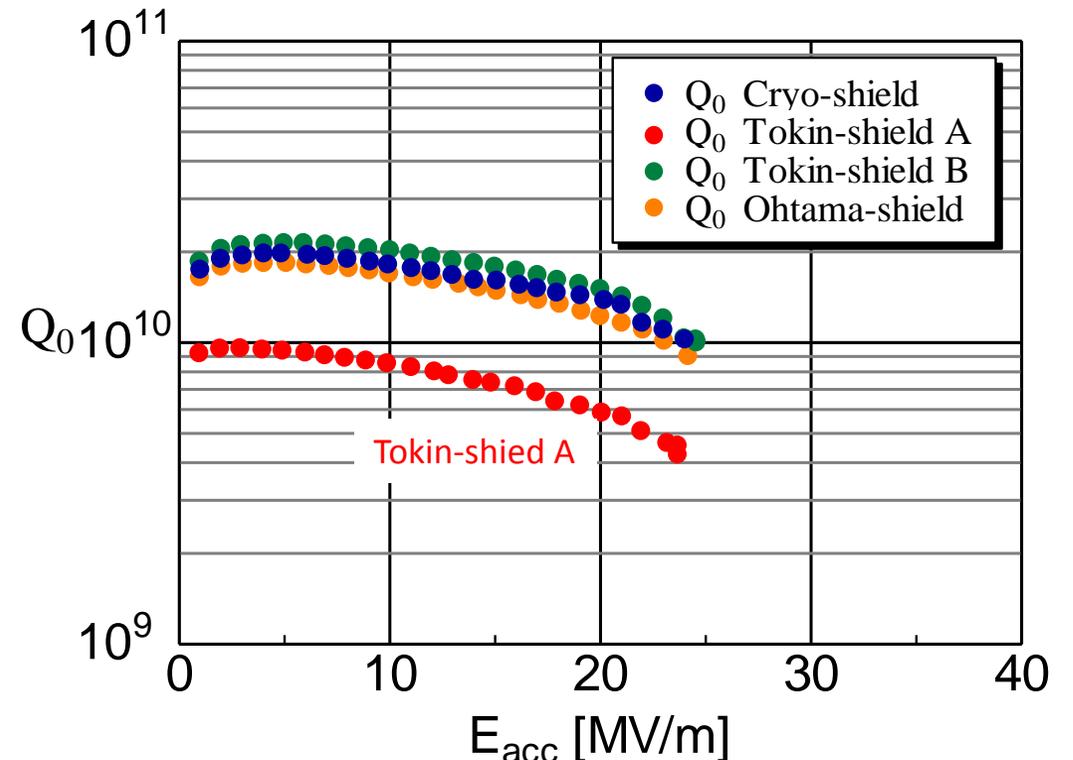
4 Kから2Kまでの表面抵抗 → 残留抵抗
2 KにおけるQスロープ

縦測定の結果



各シールドを取り付けた際の表面抵抗

- ・Tokin-shield A・・・シールドに5ミリ程度の間隙
- ・Ohtama-shield・・・わずかな隙間



各シールドを取り付けた際のQスロープ

磁気シールドと空洞の長さのミスマッチ

Token-shield、Ohtama-shieldとも、超伝導空洞の磁気シールドとして十分な性能を有している

まとめ

1、低温におけるシールド特性の変化

Token-shield 低温劣化あり シールド率1/2

Ohtama-shield 低温劣化なし

2、超伝導磁気シールドとして十分な性能

$Q_0 > 10^{10}$ @20MV/m

3、厚さ依存性 (Token-shield)

シールド率 1.0 mm 104/56

(RT/4K) 1.2 mm 122/77

4、シールドの構造や形状にも考慮が必要

・継ぎ目部分における磁場の漏れ

シールド率1/4 (3.6 → 15 mG) @4K

・取り付けの際に生じるわずかな隙間による
空洞性能の低下

	残留磁場@LHe (mG)	シールド率	Rres (nΩ)
地磁気	500~650	-----	126.0
Cryo-shield	11~14		13.0
Token-shield A (t=1.0)	5~14	56	28.7* 5 mm隙間
Token-shield B (t=1.2)	4~14	77	12.2
Ohtama-shield (t=1.5)	2~2.8	150	14.9* わずかな隙間