

# KEKにおけるNbN多層薄膜 超伝導体の下部臨界磁場測定

井藤隼人<sup>A)</sup>, 早野仁司<sup>B)</sup>, 久保毅幸<sup>B)</sup>, 佐伯学行<sup>B)</sup>, 片山領<sup>B)</sup>,  
岩下芳久<sup>C)</sup>, 頓宮拓<sup>C)</sup>, 伊藤亮平<sup>D)</sup>, 永田智啓<sup>D)</sup>

A) SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

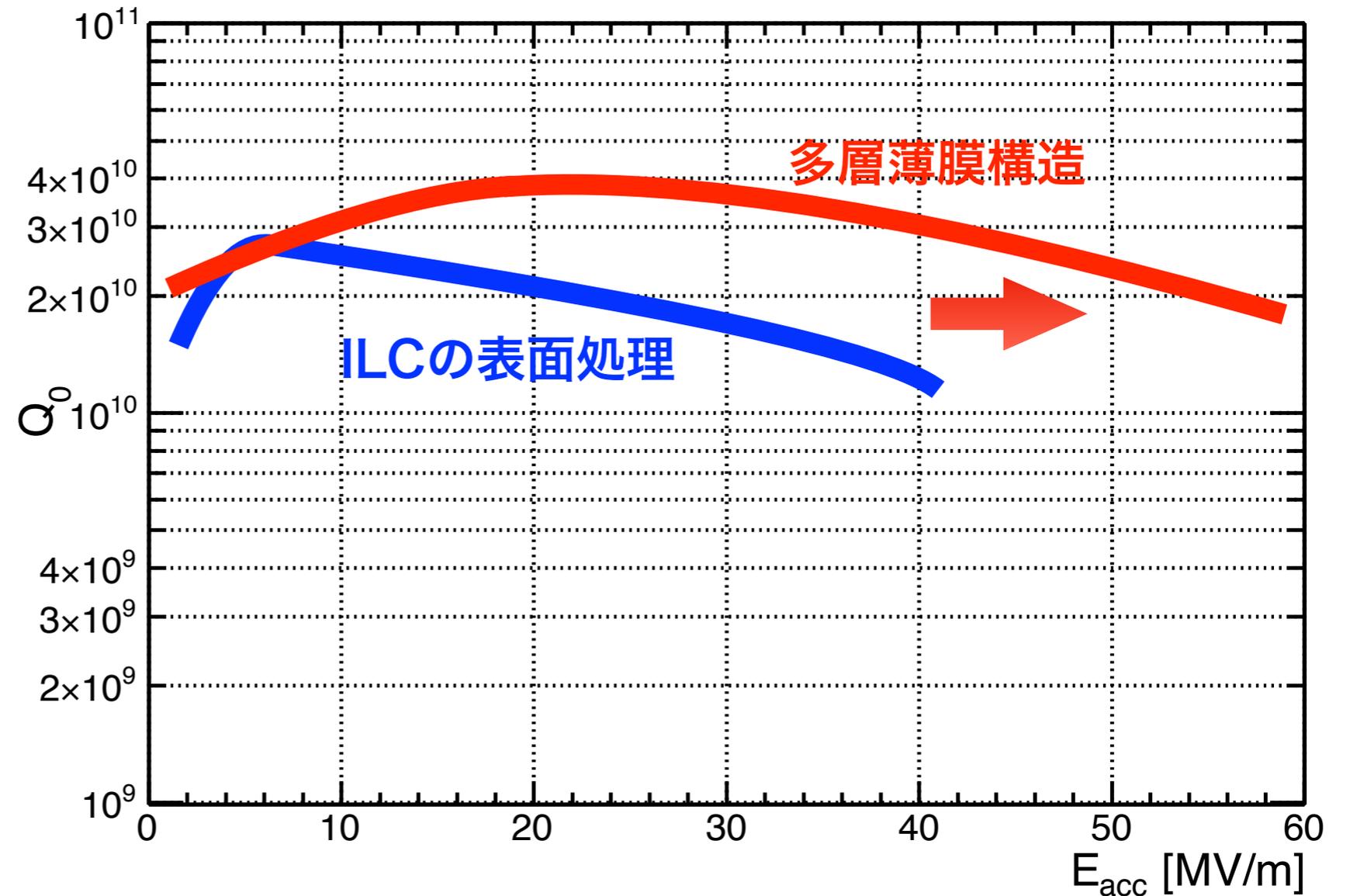
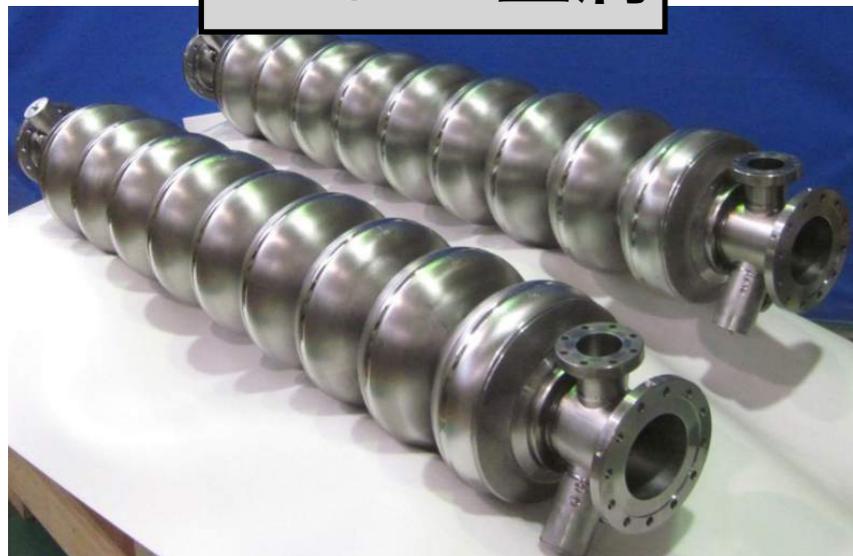
B) KEK

C) Kyoto University, ICR

D) ULVAC, Inc.

# 超伝導加速空洞

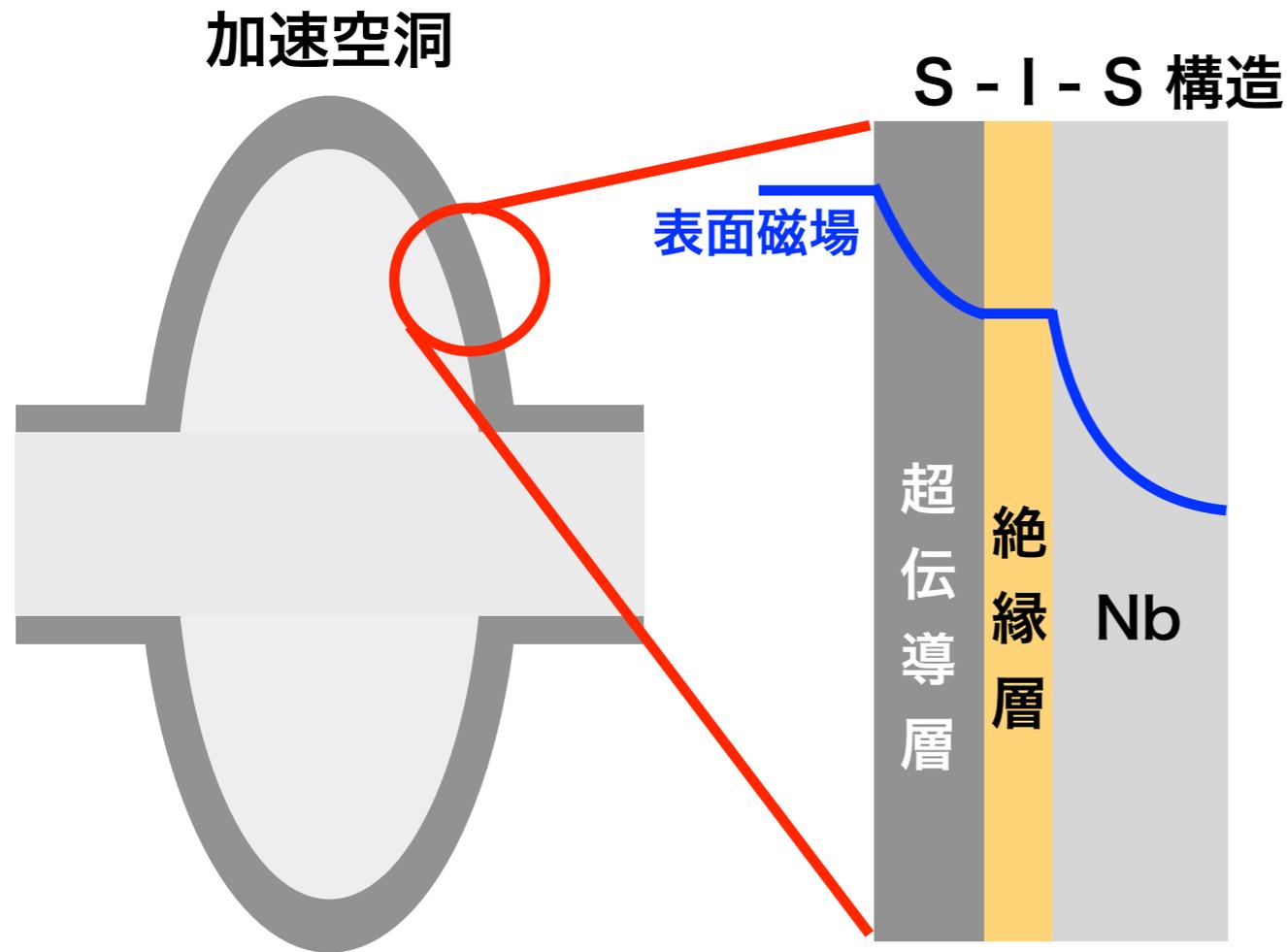
TESLA空洞



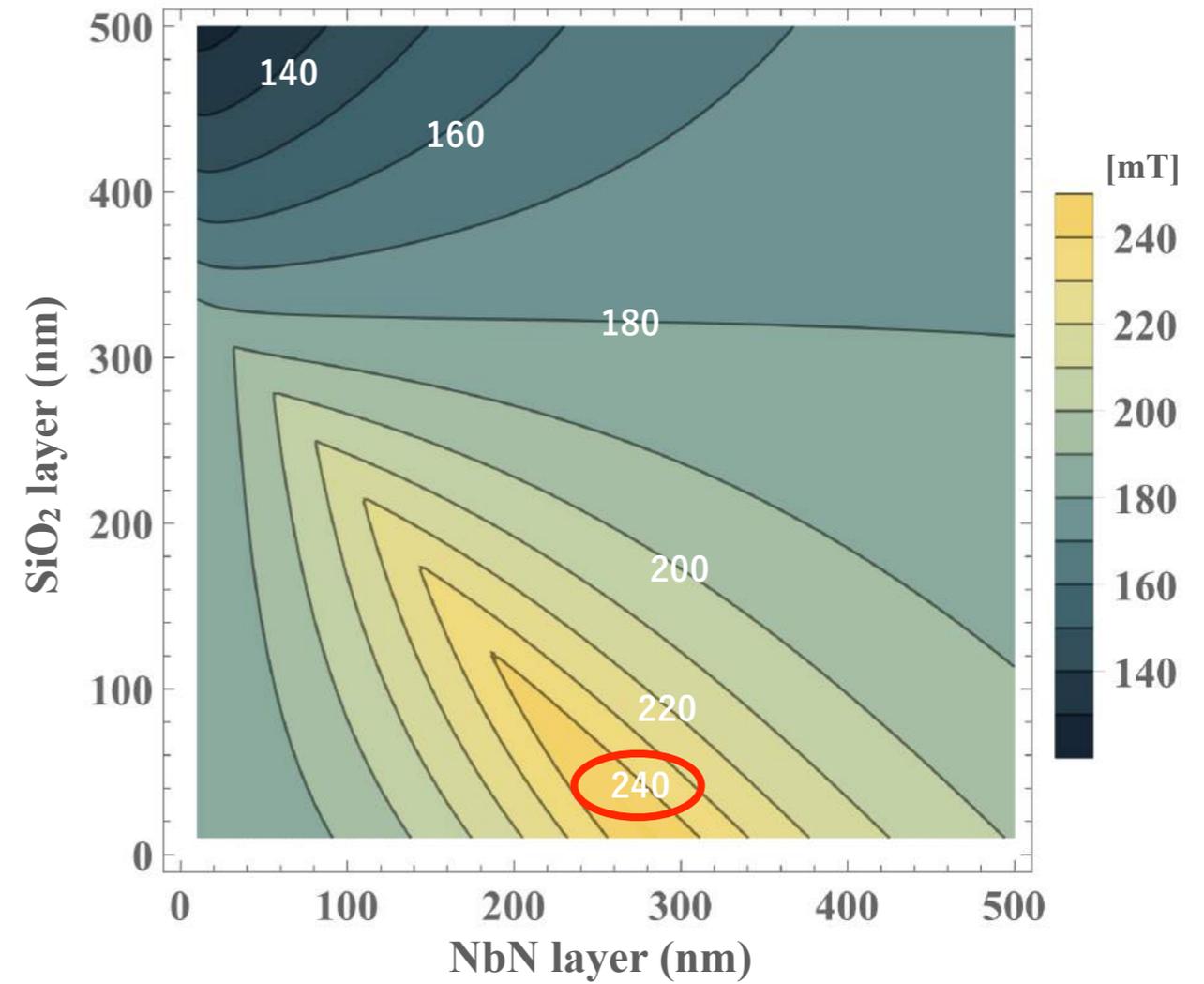
Nbの臨界磁場 $H_c \sim 200$  mT  
->45 MV/m に相当

Nb材料の本質的限界に近い

# S-I-S 多層薄膜構造



NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb 構造

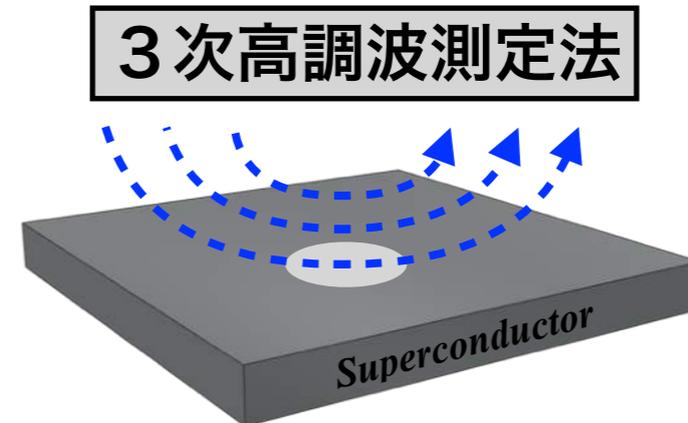
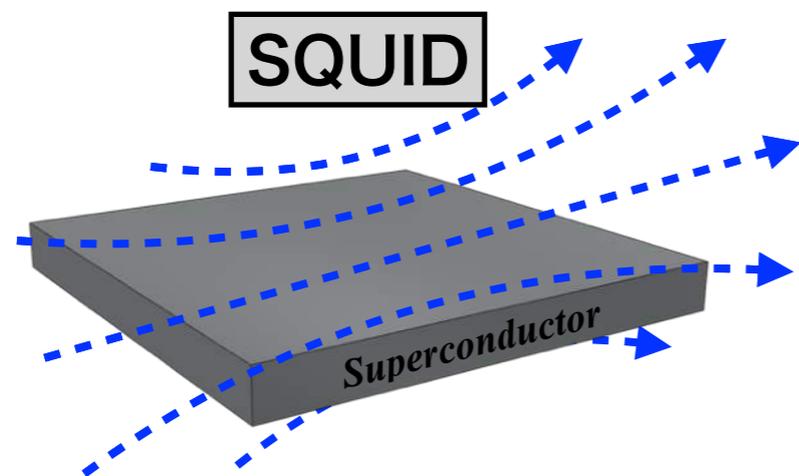


多層薄膜構造を施すことでより高い臨界磁場を実現

「磁束侵入磁場」と呼ぶこととする。

# 研究目的

3次高調波測定システムを構築し、多層薄膜構造による磁束侵入磁場の向上を検証し、原理実証を行う。



## メリット

- 片面に局所的に磁場をかける。  
→ エッジの効果がない。空洞内の壁面にかかる磁場を再現。

# 京都大学、KEK での独立測定

アルバック社が NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプルを製作。

京都大学



THPI001 を参照



NbN 400 nm サンプル

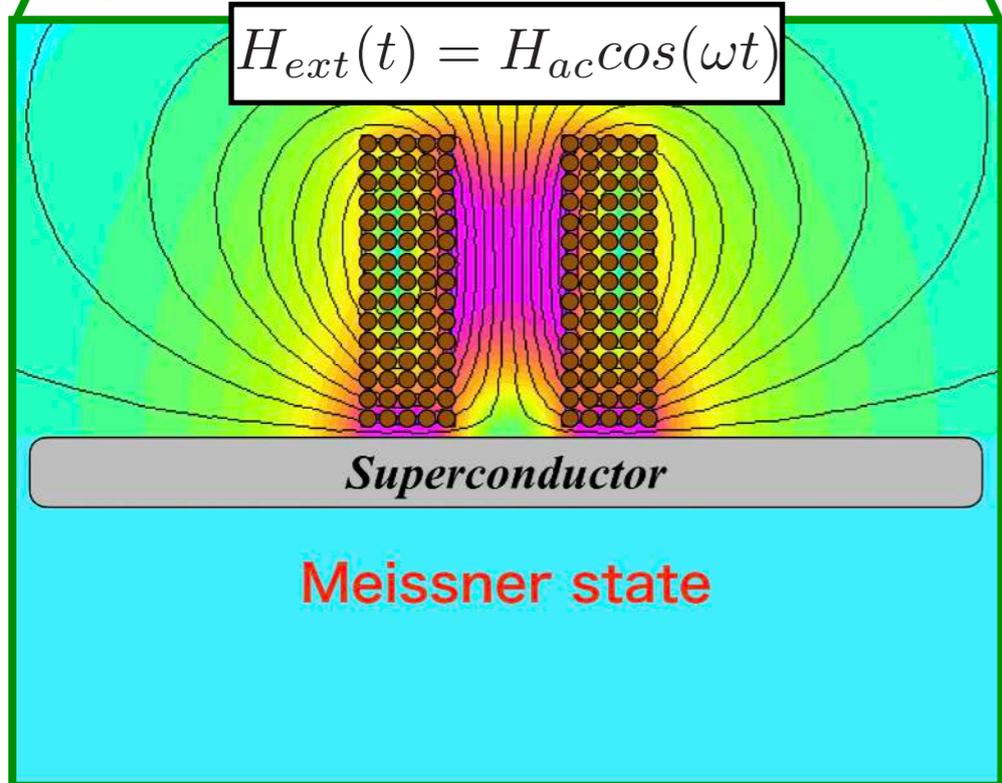
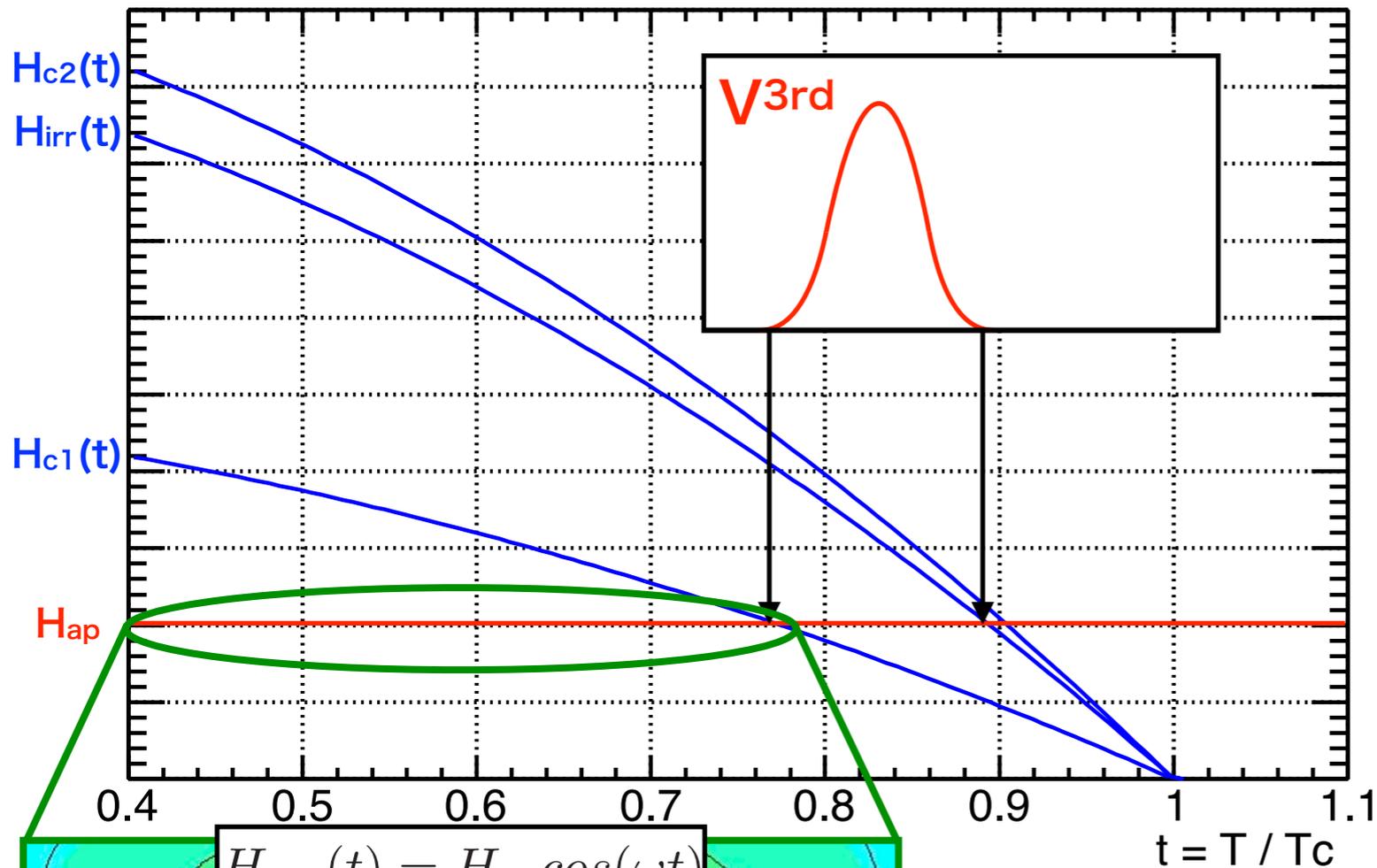
KEK



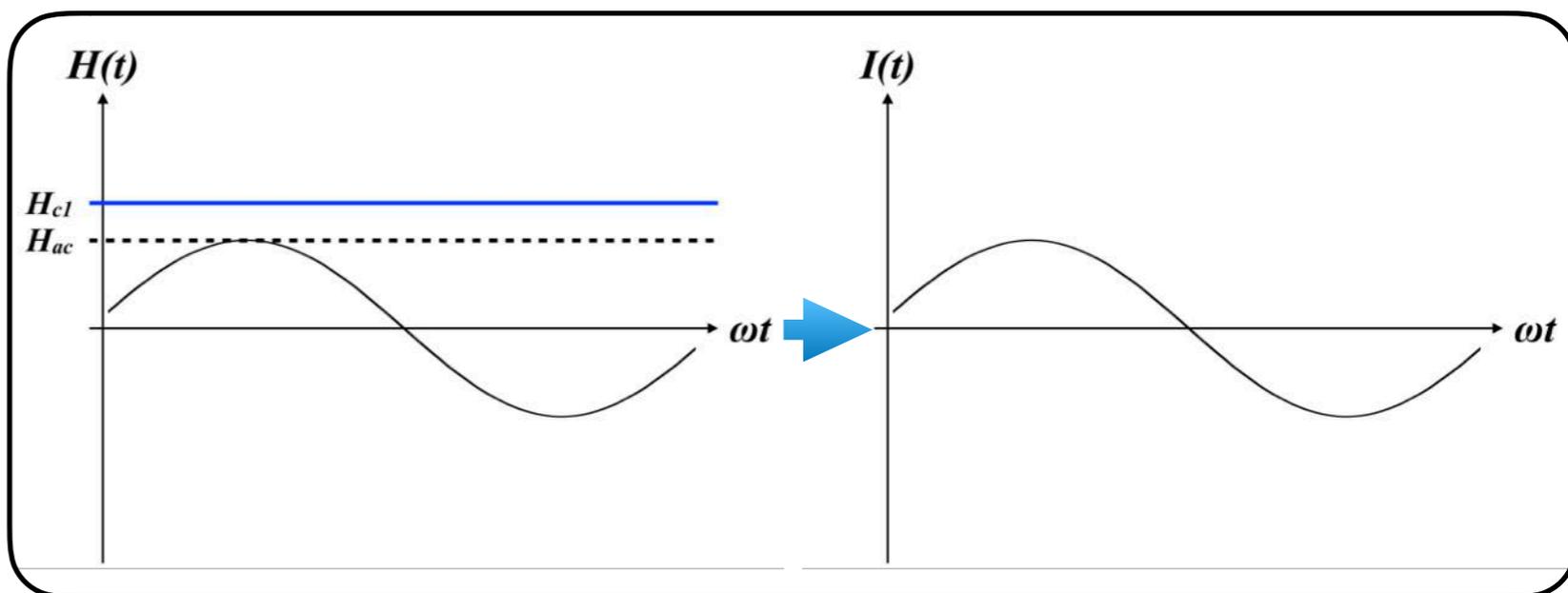
京都大学と KEK で独立に測定。

KEK での 3 次高調波測定結果について報告する。

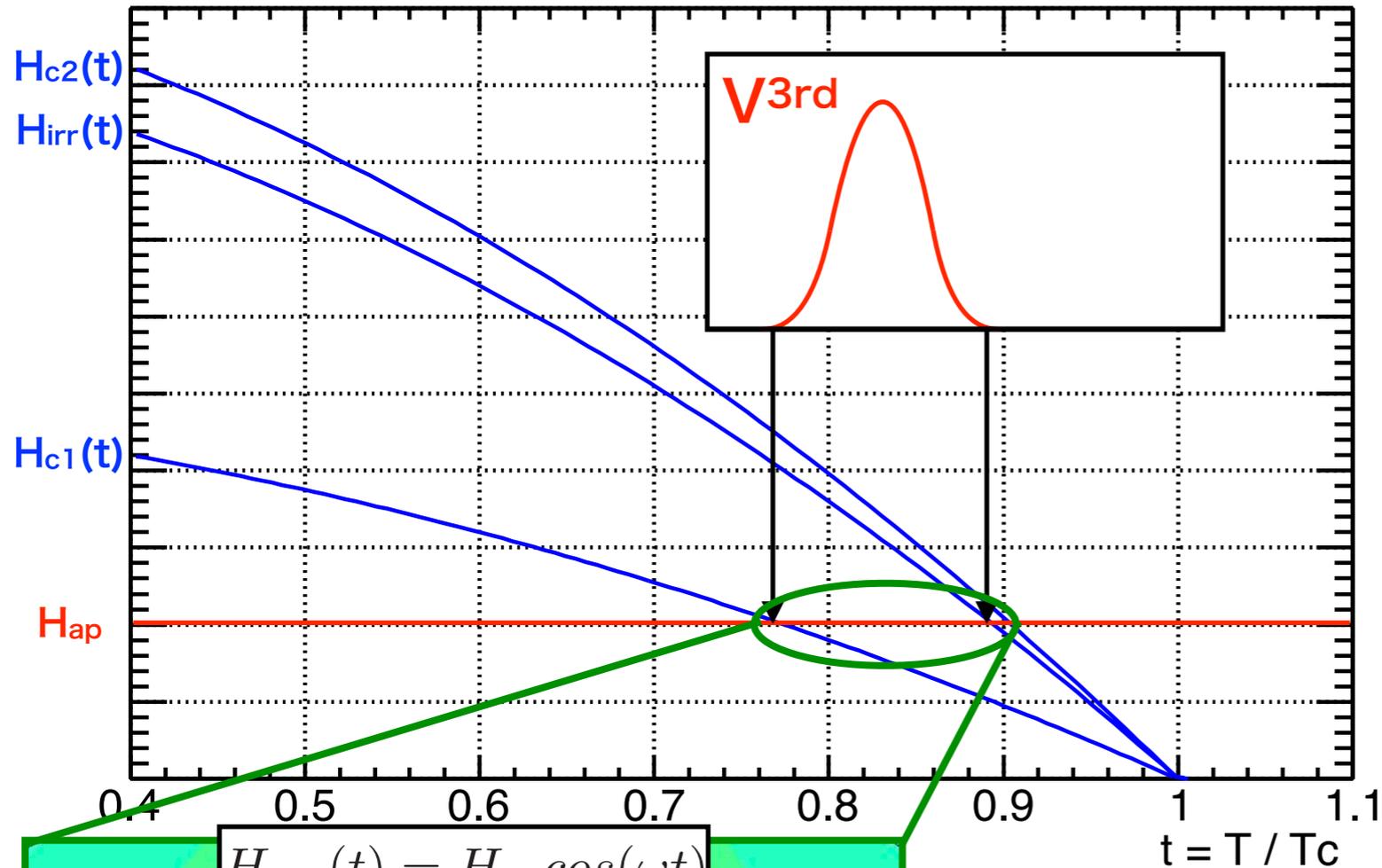
# 3次高調波発生原理



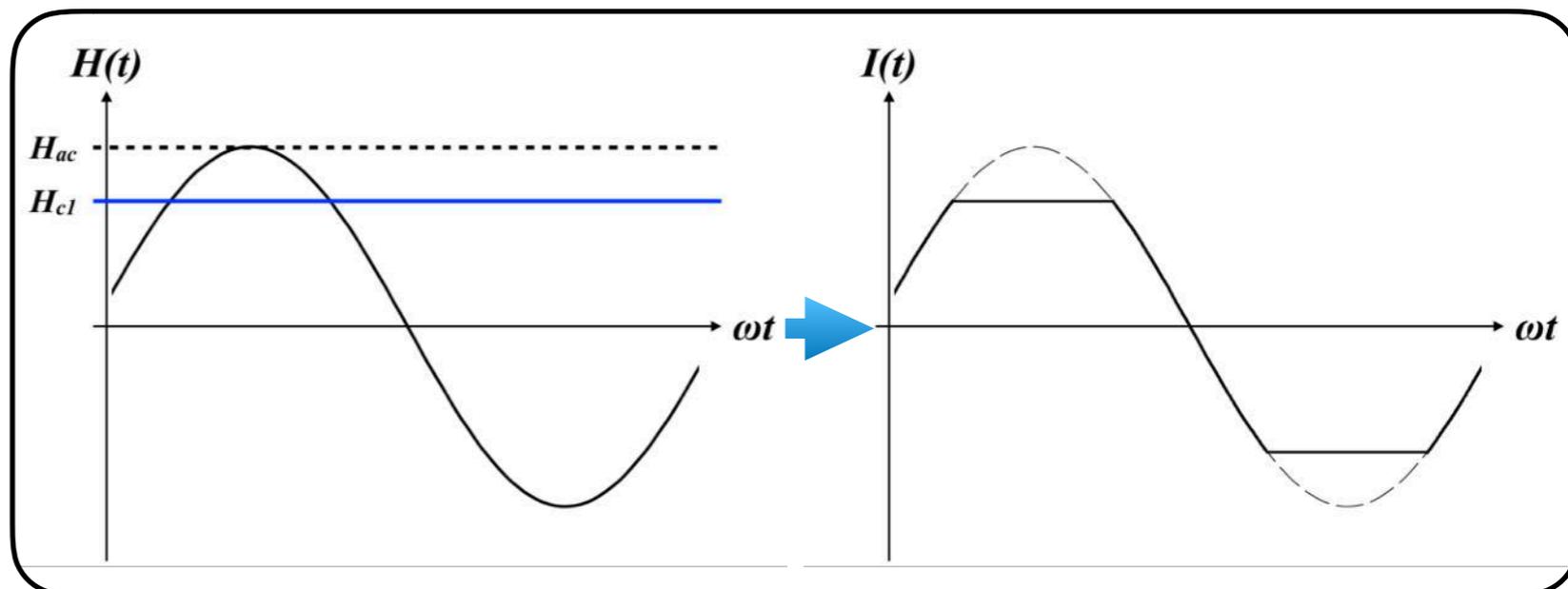
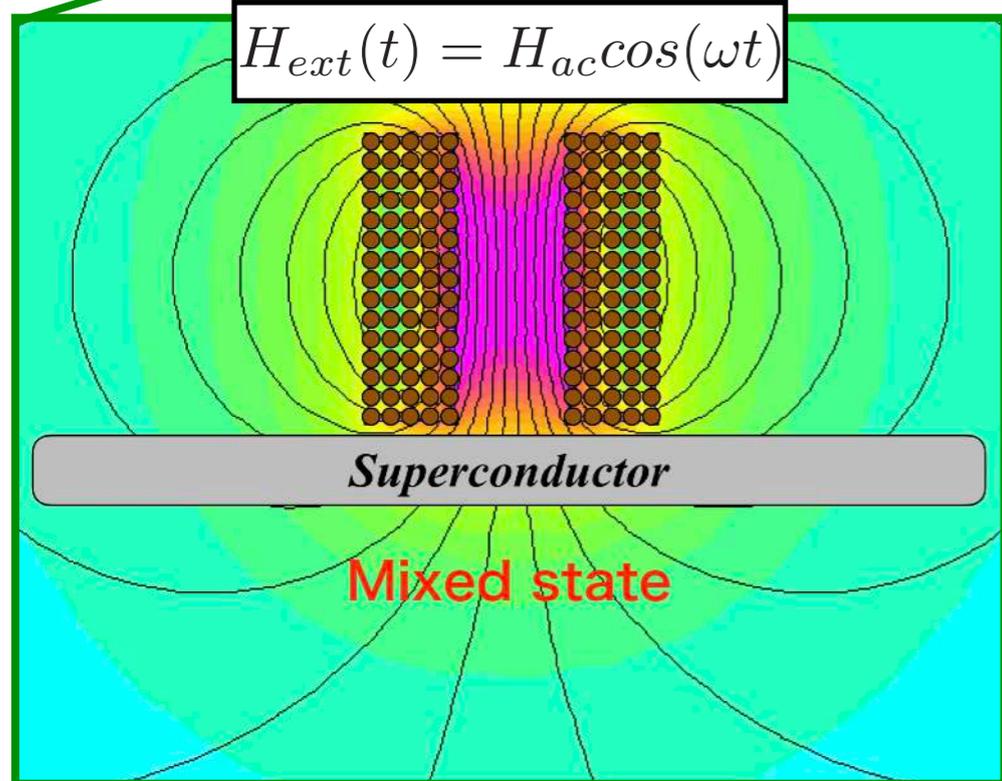
- コイルは遮蔽電流とコイル自身に流れる交流電流の両者から電圧が誘導される。
- $H_{ac} < H_{c1}$   
 → 完全反磁性、マイスナー状態。遮蔽電流は  $H_{ac}$  に対して完全に追従できている。  
 → 3次高調波成分は誘導されない。



# 3次高調波発生原理

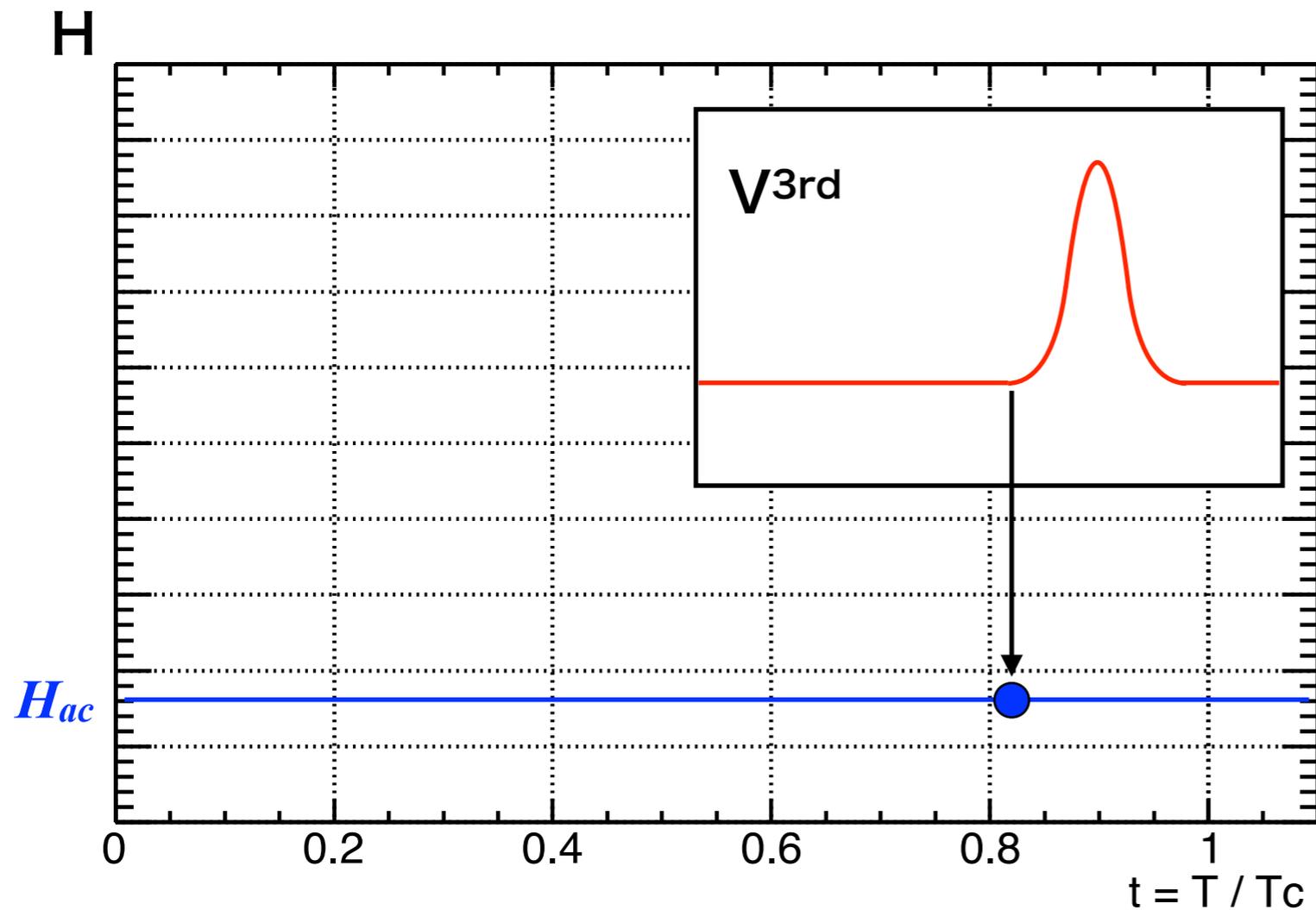


- コイルは遮蔽電流とコイル自身に流れる交流電流の両者から電圧が誘導される。
- $H_{c1} < H_{ac}$   
 → 磁束が超伝導体内に侵入し始める。遮蔽電流は飽和する。  
 → 3次高調波成分が誘導される。

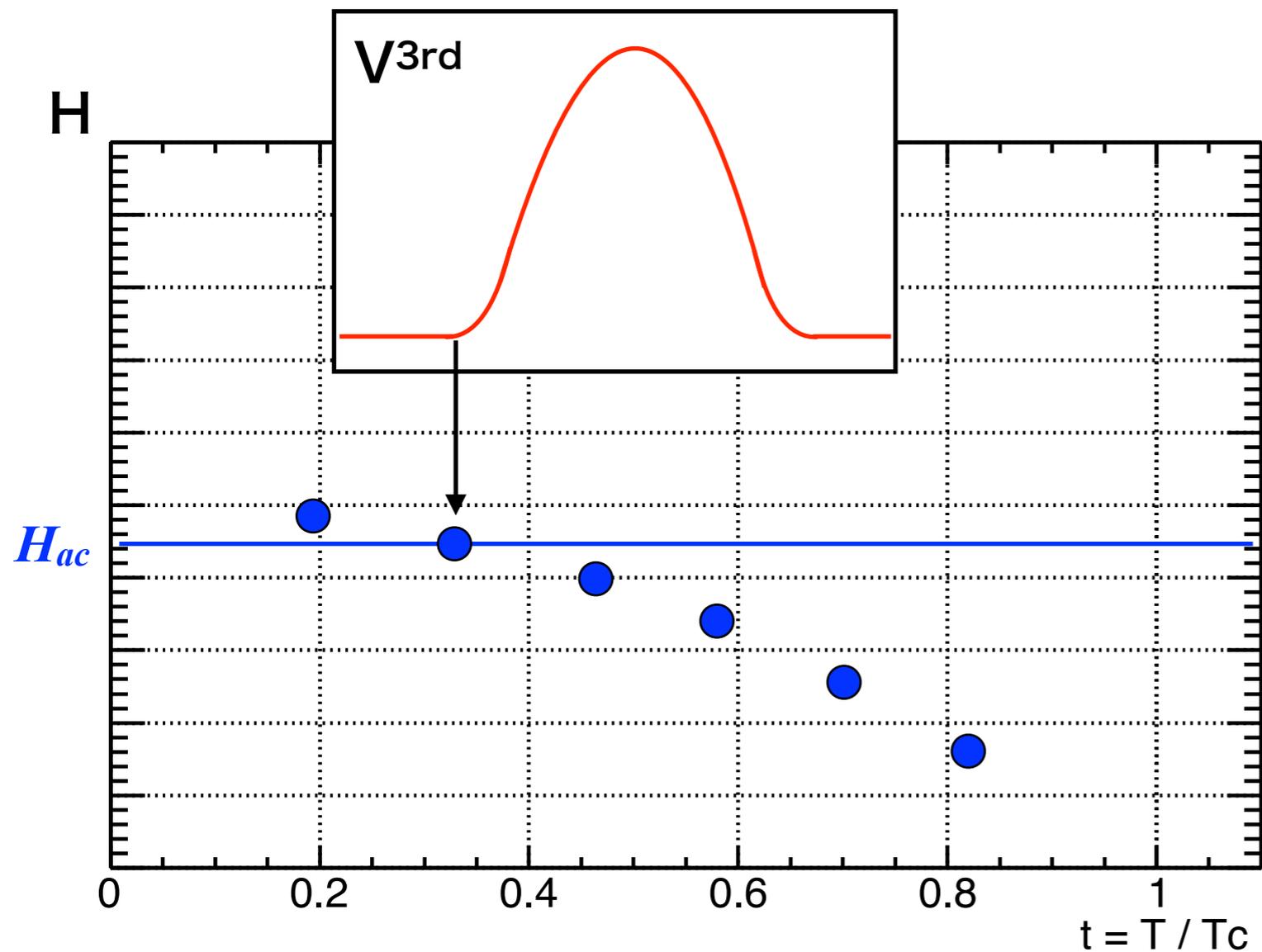


# 磁束侵入磁場の測定原理

- 3次高調波成分が大きく変化したときのサンプルの温度と交流磁場  $H_{ac}$  の値をプロットする。

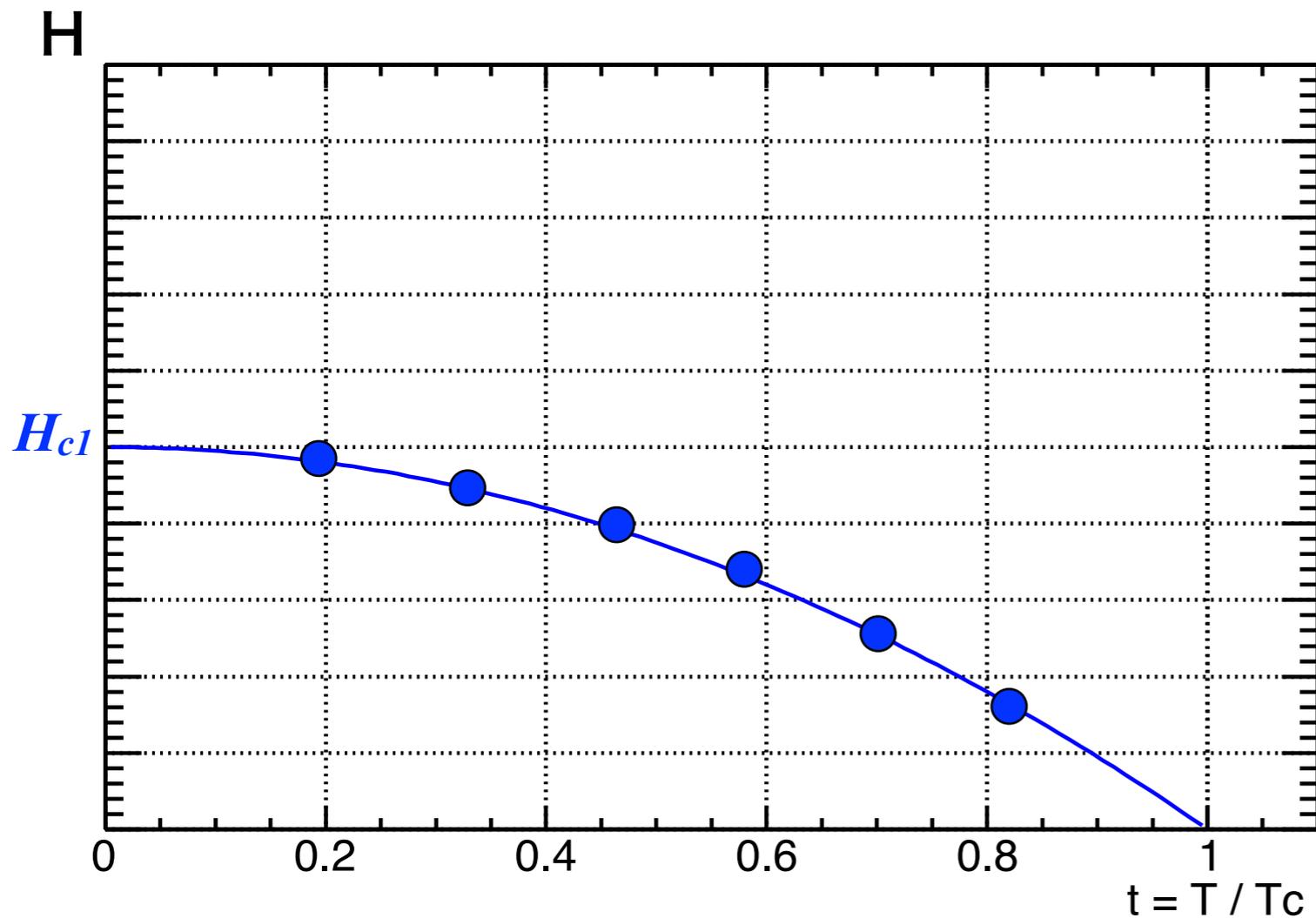


# 磁束侵入磁場の測定原理



- 3次高調波成分が大きく変化したときのサンプルの温度と交流磁場  $H_{ac}$  の値をプロットする。
- 様々な交流磁場の値で測定を繰り返し替えます。

# 磁束侵入磁場の測定原理



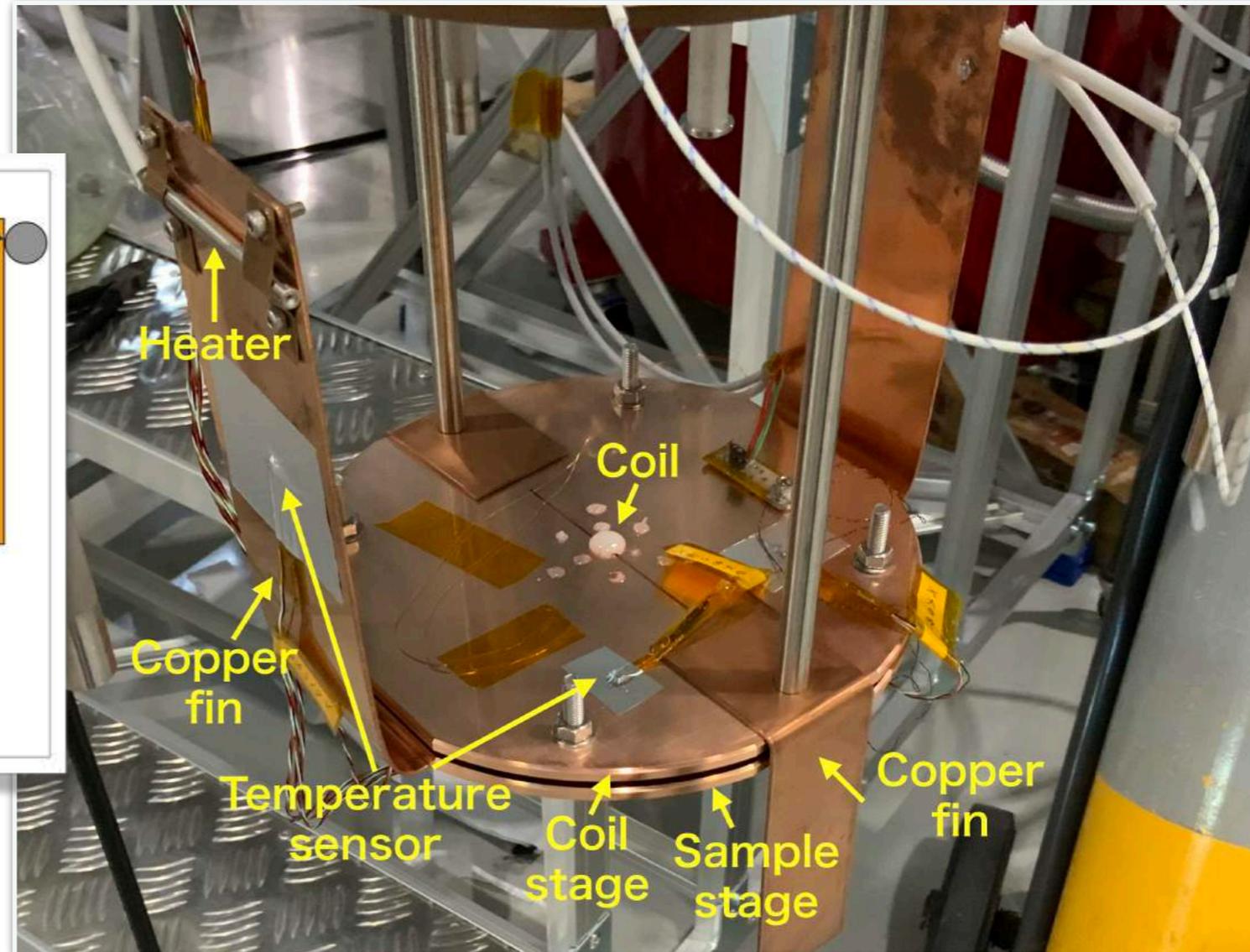
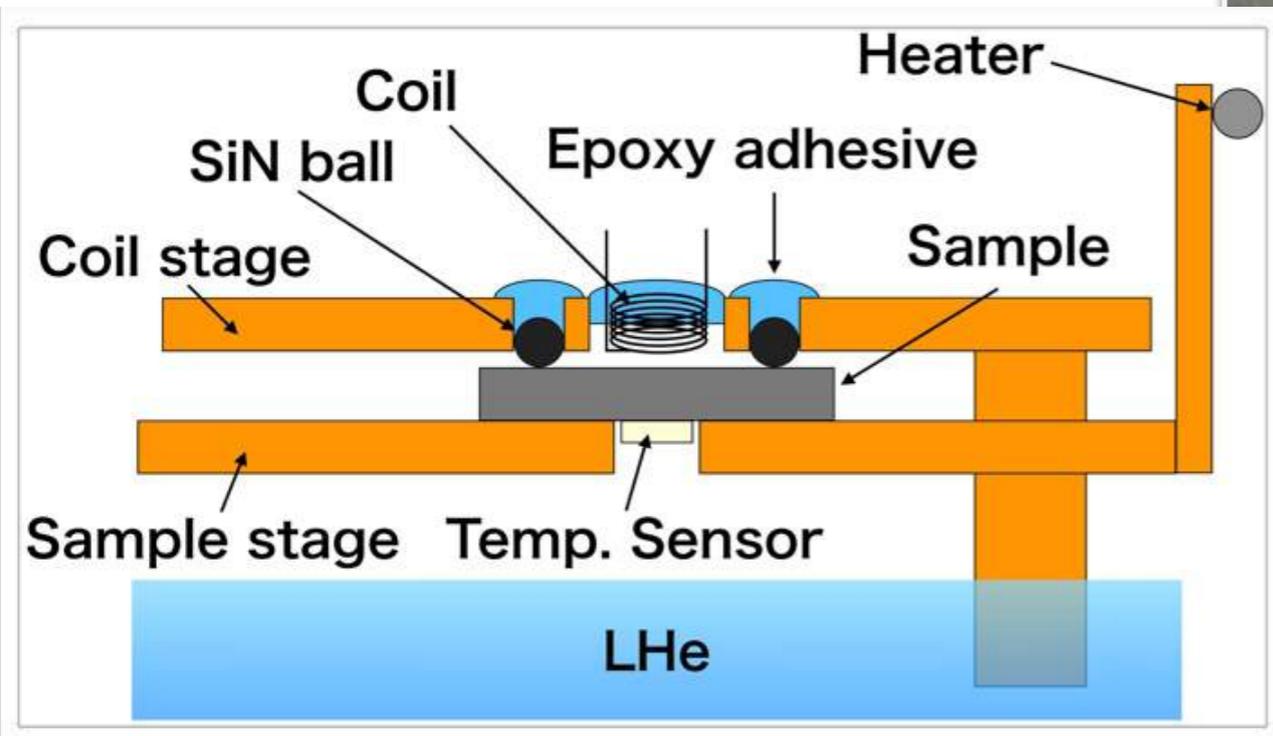
- 3次高調波成分が大きく変化したときのサンプルの温度と交流磁場  $H_{ac}$  の値をプロットする。
- 様々な交流磁場の値で測定を繰り返し替えます。

$$H_{c1}(t) = H_{c1}(0) \times \left\{ 1 - \left( \frac{t}{T_c} \right)^2 \right\}$$

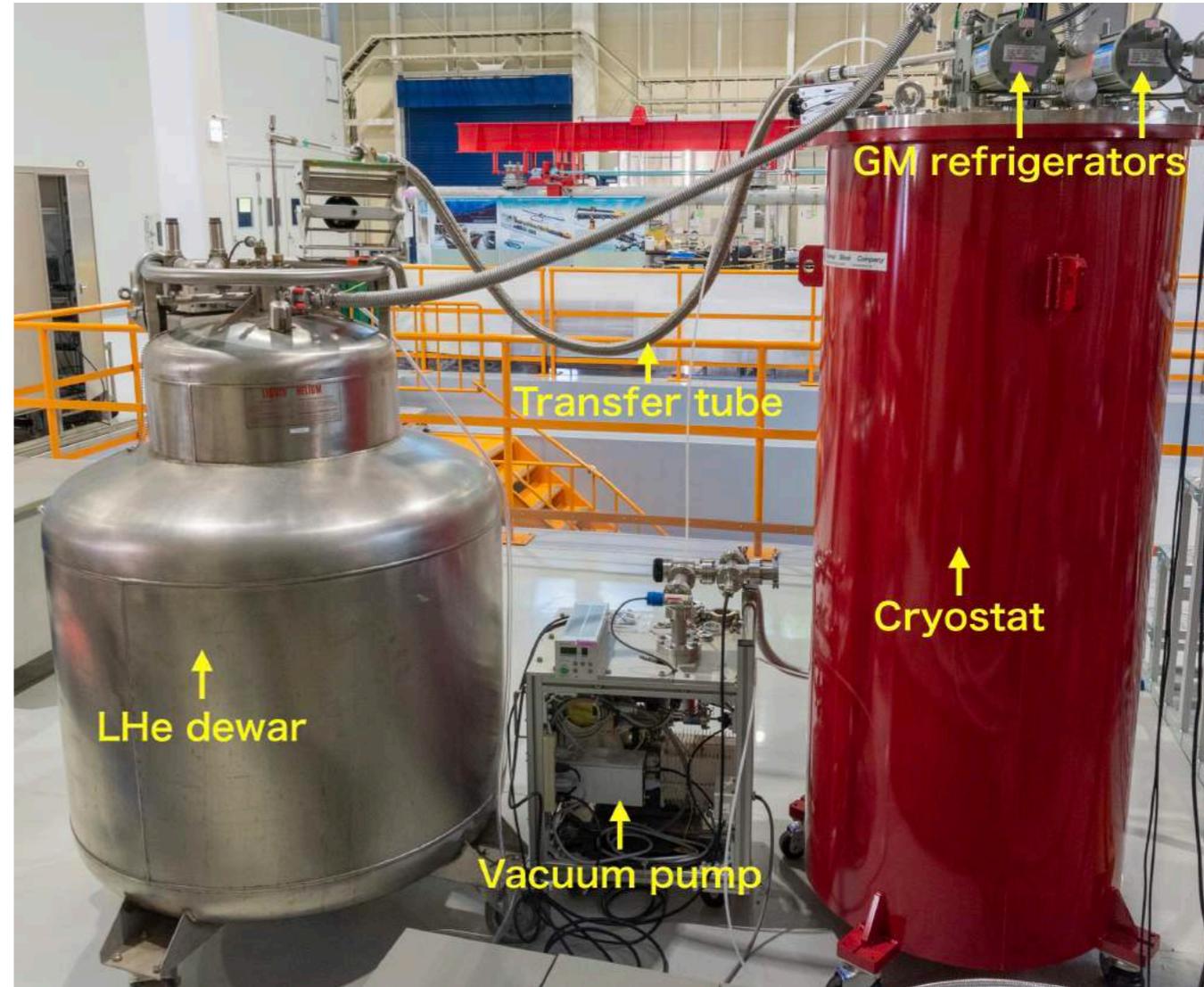
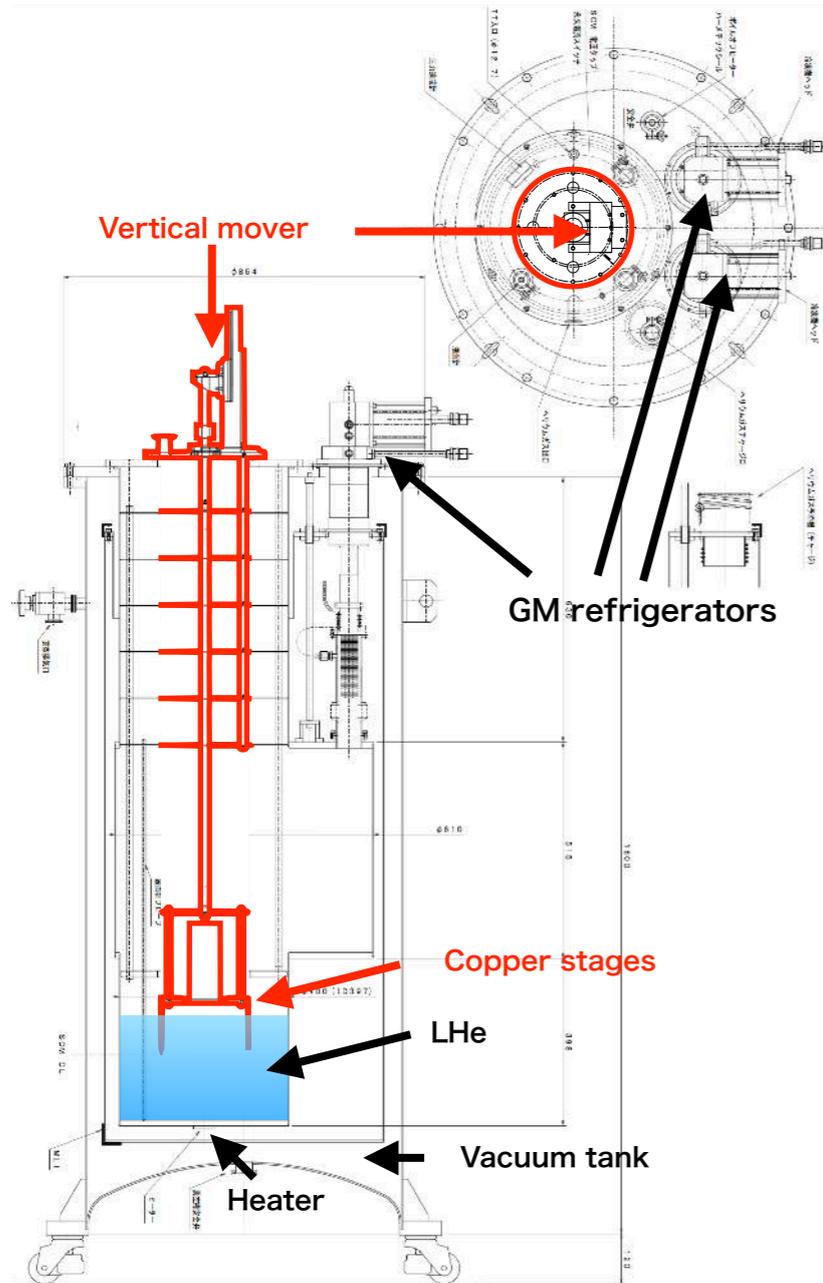
- 上式でフィッティングすることで、 $H_{c1}(0)$  の値を見積もる。

交流磁場の値はNbに対する実験結果を用いて校正を行う。

# 銅ステージ

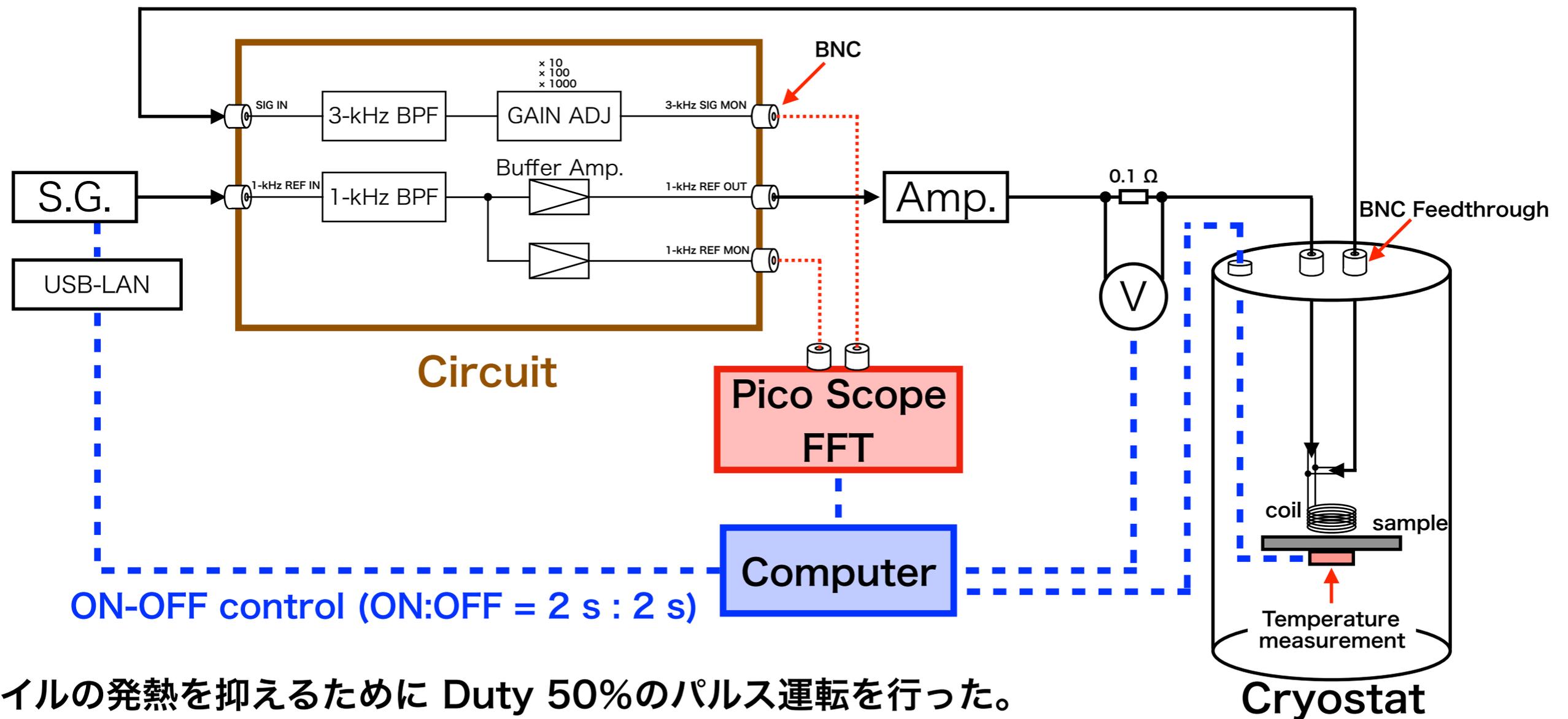


# クライオスタット

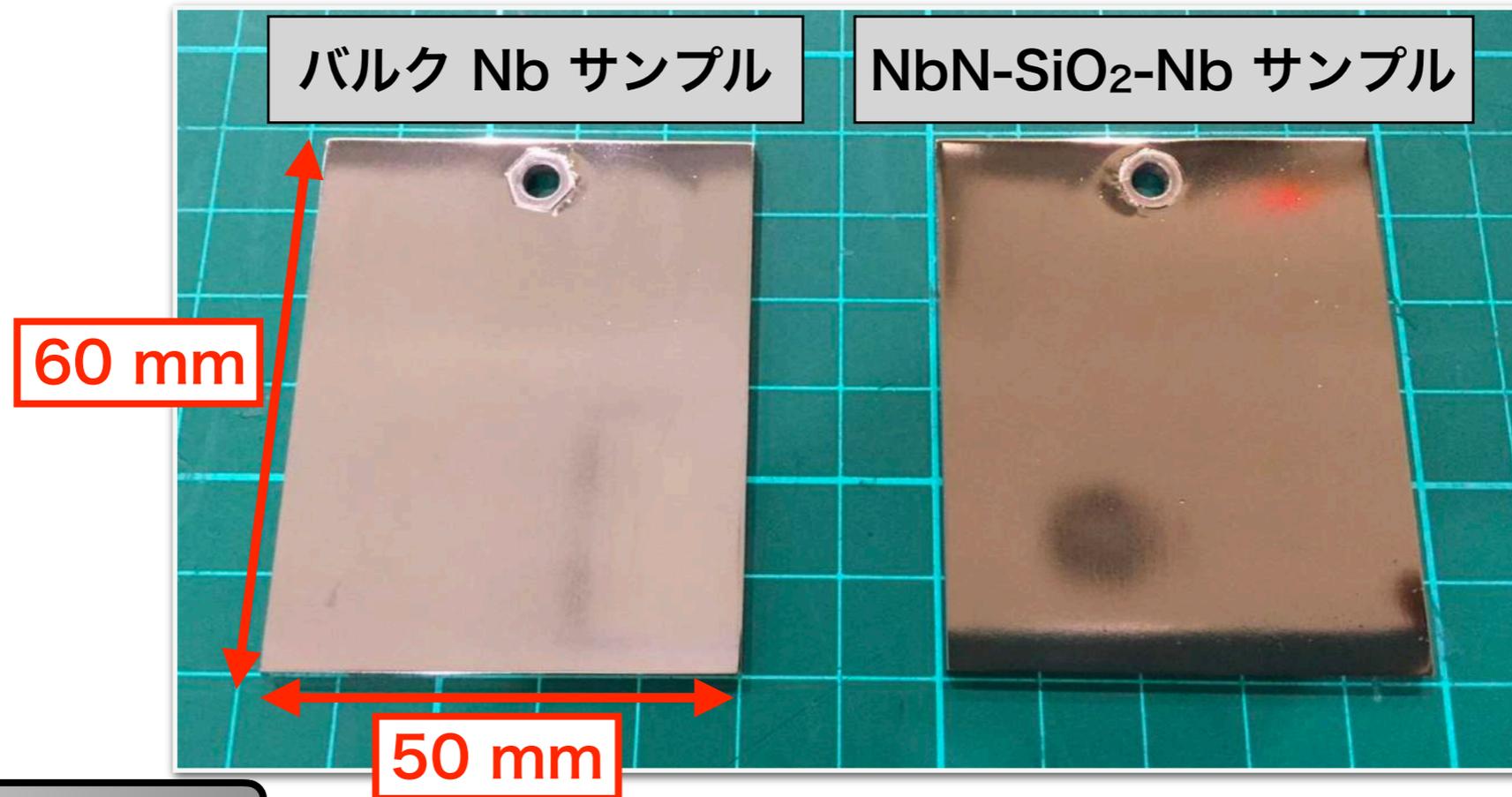


# 測定手順

1. 磁場を印加しない状態でサンプルを4.2 Kまで冷却。その後コイルを用いて1 kHz の交流磁場を印加。
2. ヒーターを用いてサンプルをゆっくりと昇温( $< 0.1$  K/min)。
3. コイル両端電圧に対して、フーリエ変換を用いて3次高調波成分(3 kHz)を検出。
4. 3次高調波成分が急激に変化した点での温度と磁場強度からサンプルの磁束侵入磁場を測定する。



# 測定サンプル



## バルクNbサンプル

スポンジ研磨材で  
表面の傷取り

EP1  
100 $\mu$ m

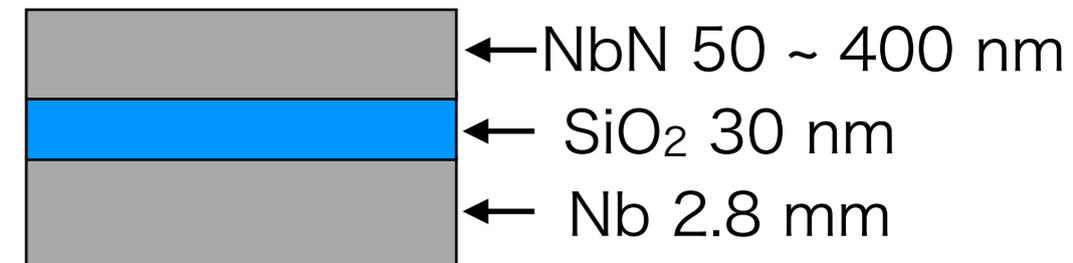
750 $^{\circ}$ C  
4時間アニール

EP2  
20 $\mu$ m

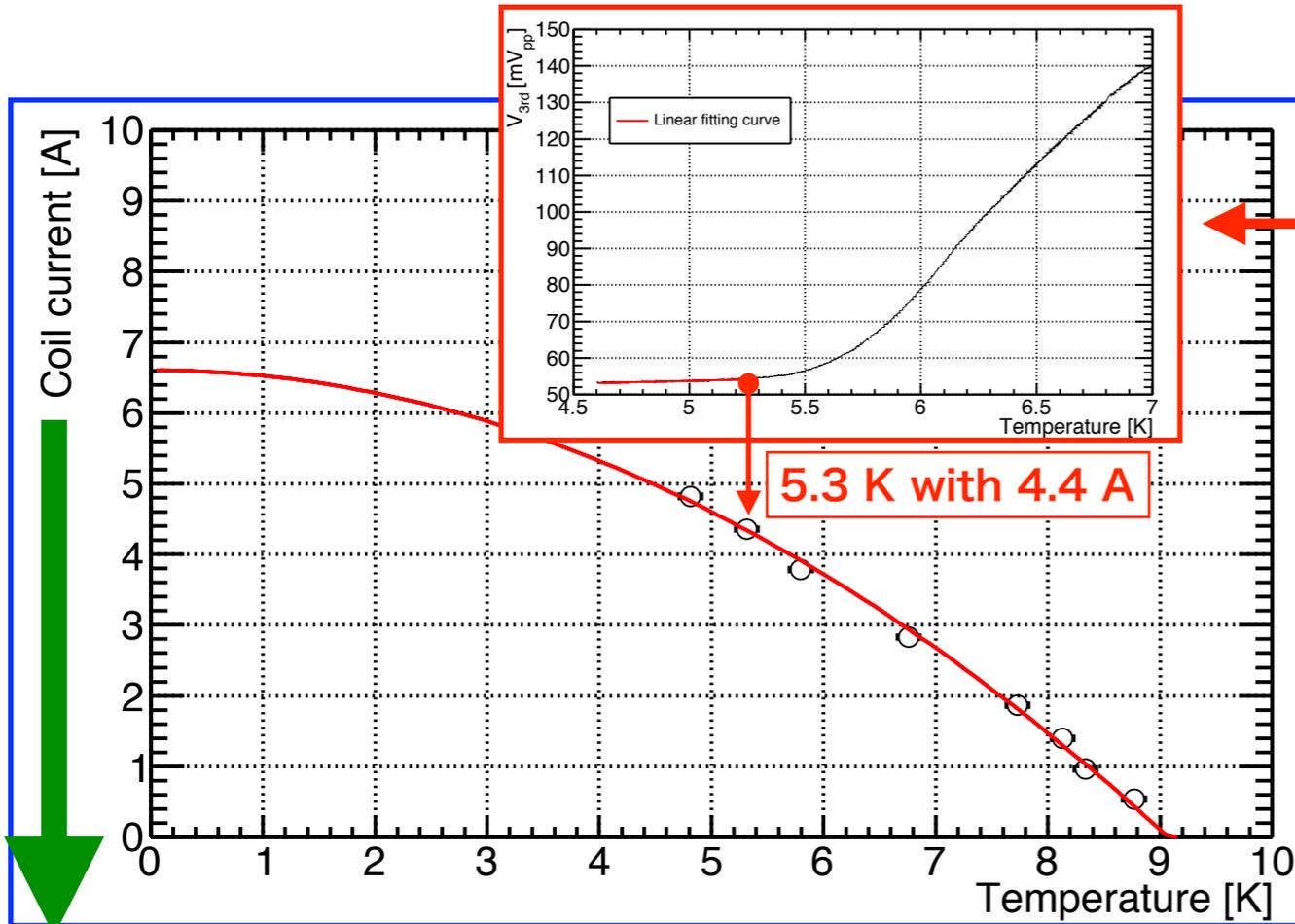
FM20で  
超音波洗浄

## NbN-SiO<sub>2</sub>-Nbサンプル

ULVAC 社によって DC マグネトロンスパッタリングを用いて SiO<sub>2</sub> 層そして NbN 層が成膜される。(NbN = 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 nm の 7 サンプル、SiO<sub>2</sub> は 30nm で固定)



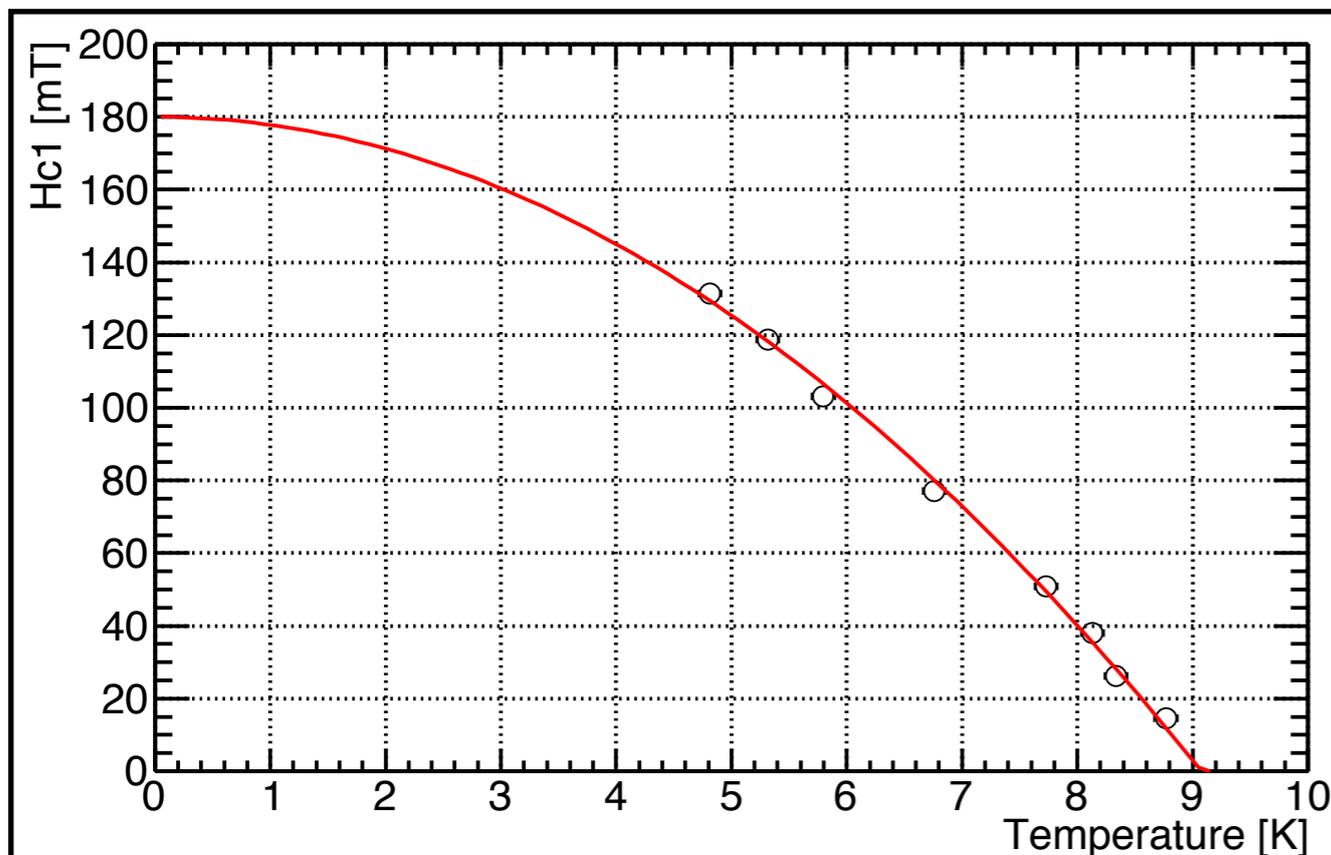
# 測定結果(バルク Nb サンプル)



フィッティング関数と各測定点との差分に関する分布を求め、 $3\sigma$ 離れた最初の測定点の温度を磁束侵入開始温度とした。

様々な電流値で測定を繰り返し、以下の関数でフィッティング

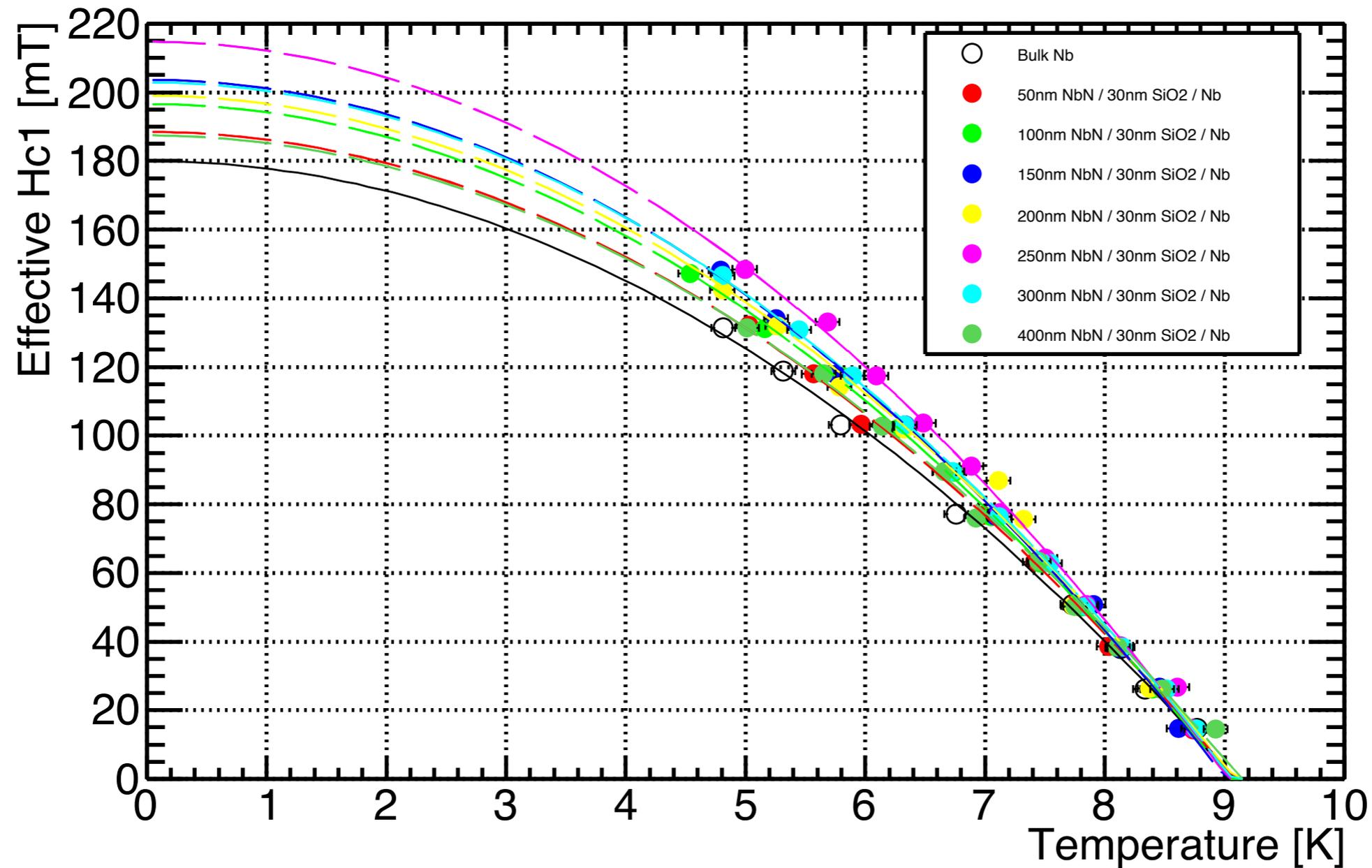
$$f(t) = a \times \left\{ 1 - \left( \frac{t}{b} \right)^2 \right\}$$



0 K 切片での電流値をNbの  $H_{c1} = 180$  mT に変換。

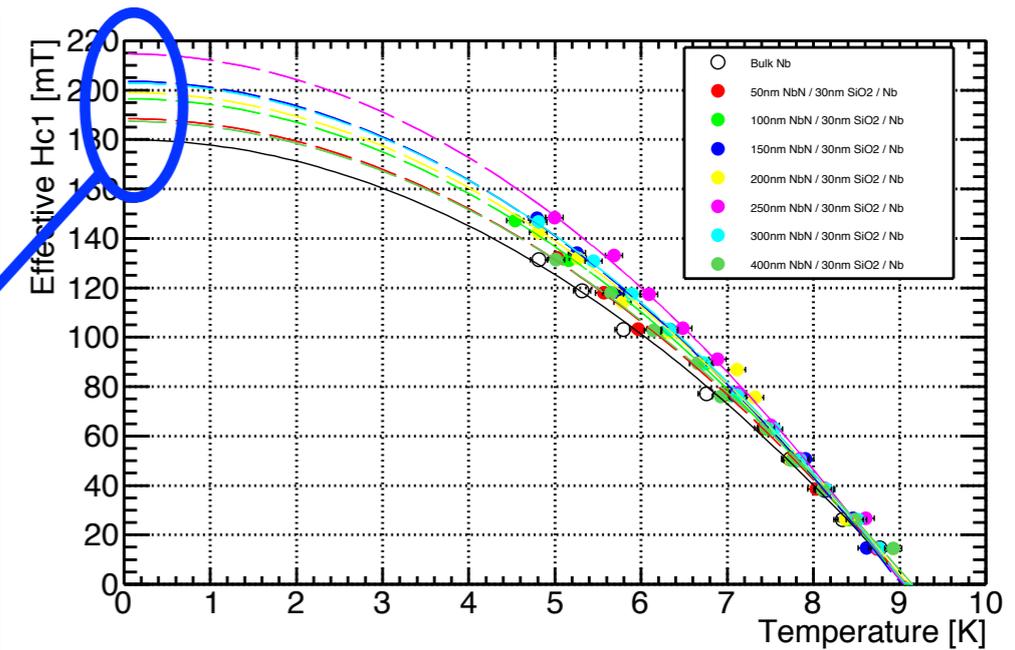
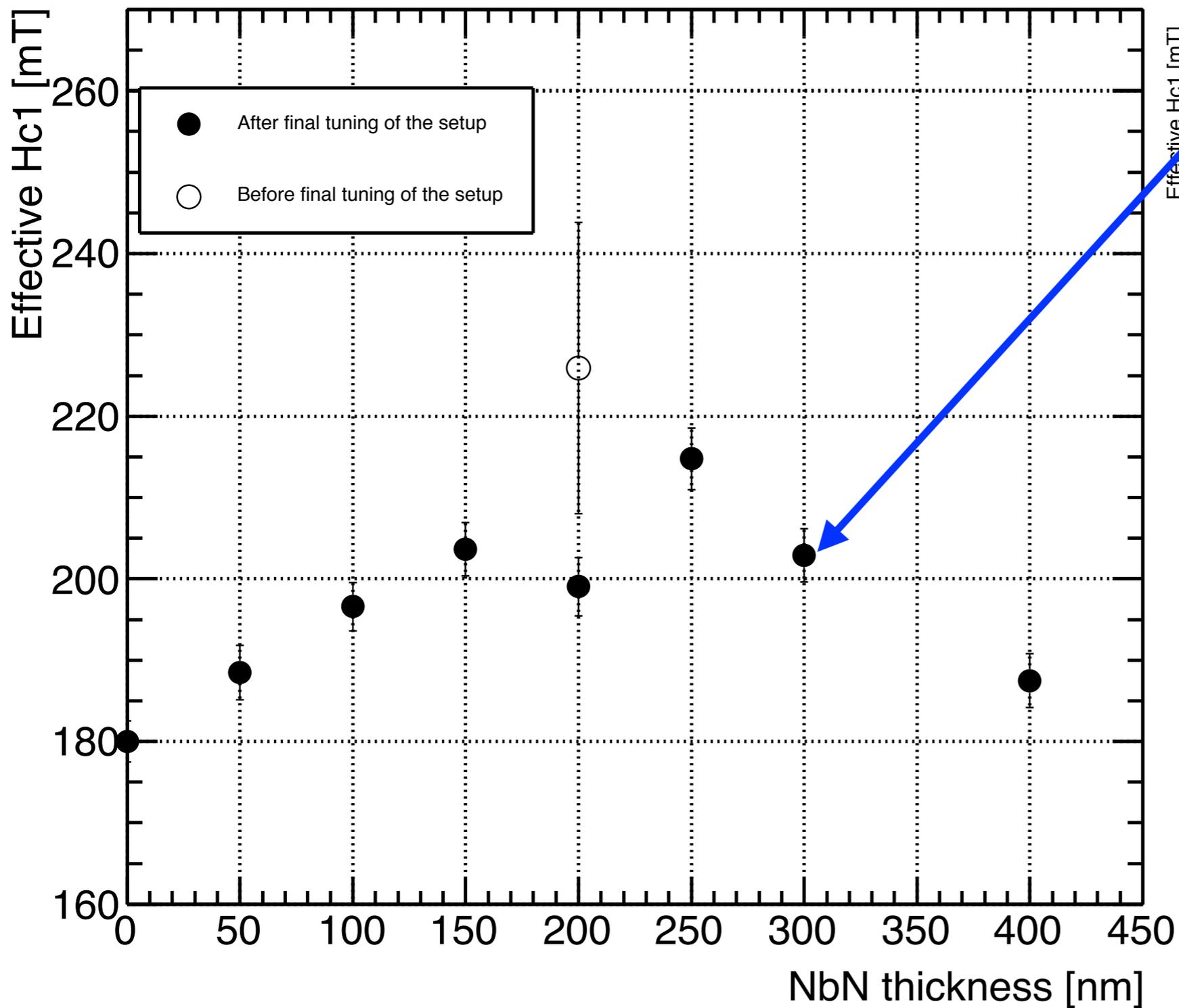
# 測定結果(NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプル)

NbN 厚さ 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 nm  
の7サンプルについて測定を行った。



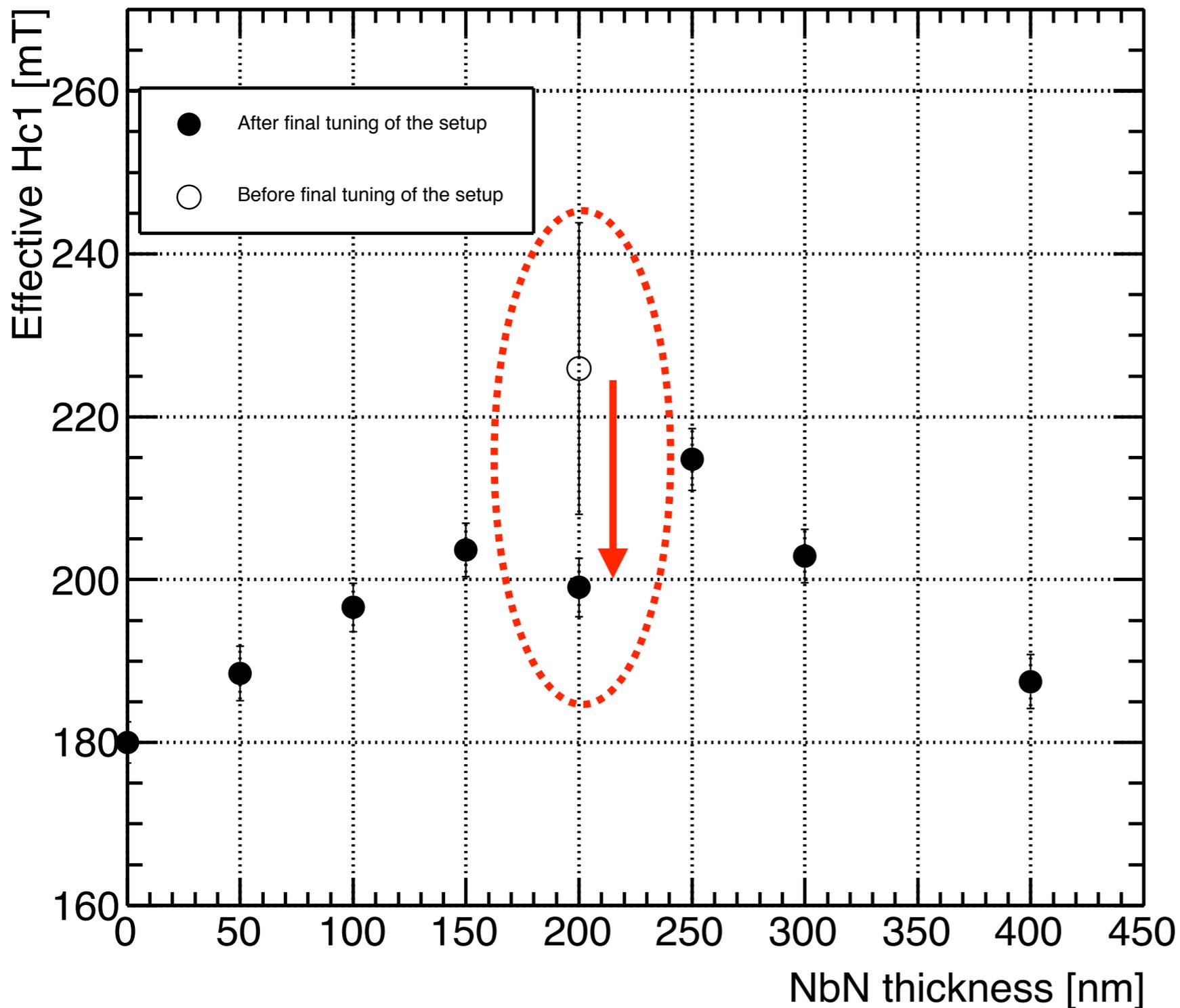
NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb 多層薄膜構造による磁束侵入磁場の増加  
を確認した。

# 測定結果(NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプル)



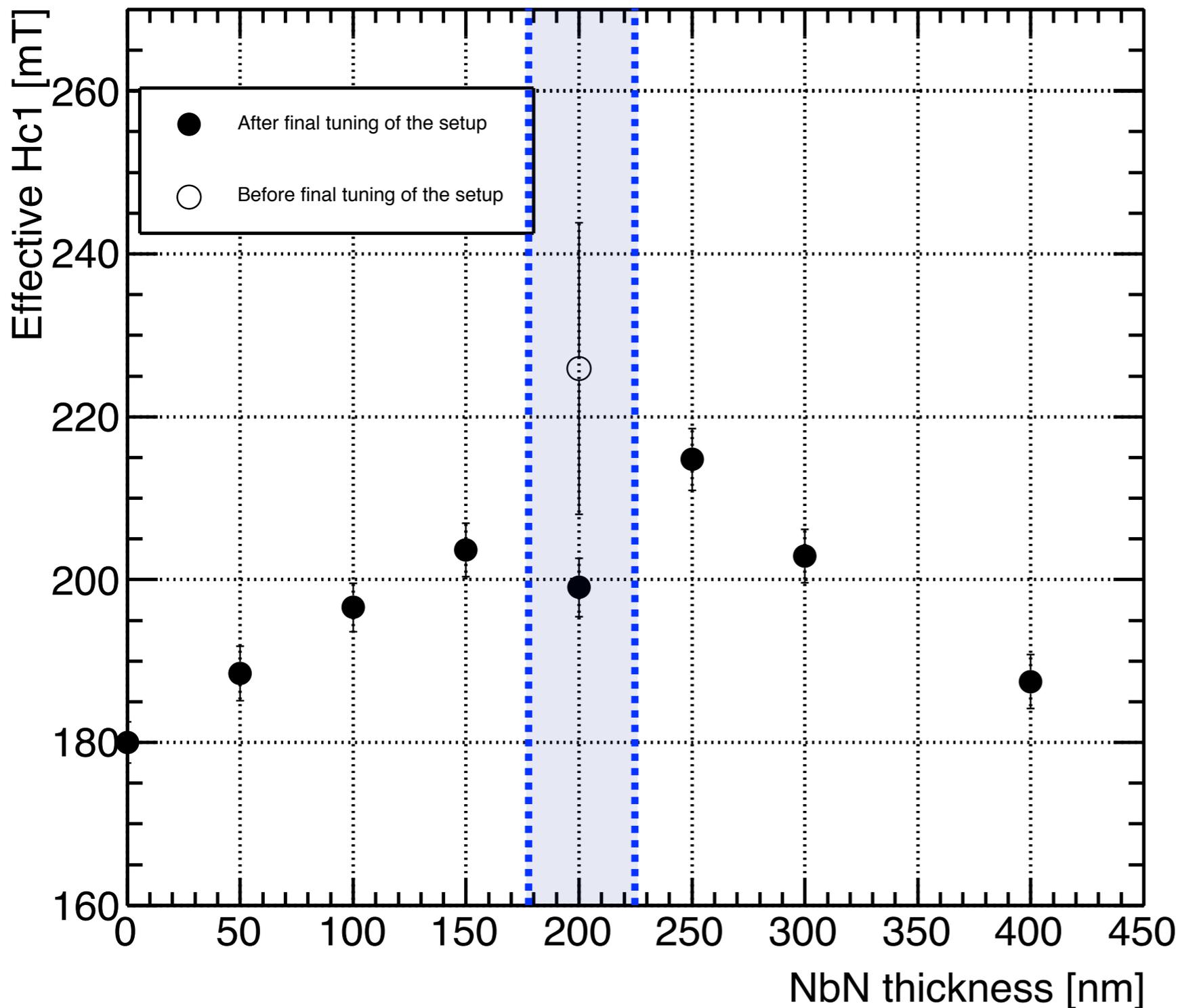
- 0 K での磁束侵入磁場の値と NbN 層厚みの関係をプロット。

# 測定結果(NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプル)



- 200 nm サンプルに関して性能劣化が起きた。  
← 測定装置の改良の際に繰り返し使用したためと考えられる。
- 検証のため、新しい 200 nm サンプルでの測定を予定している。

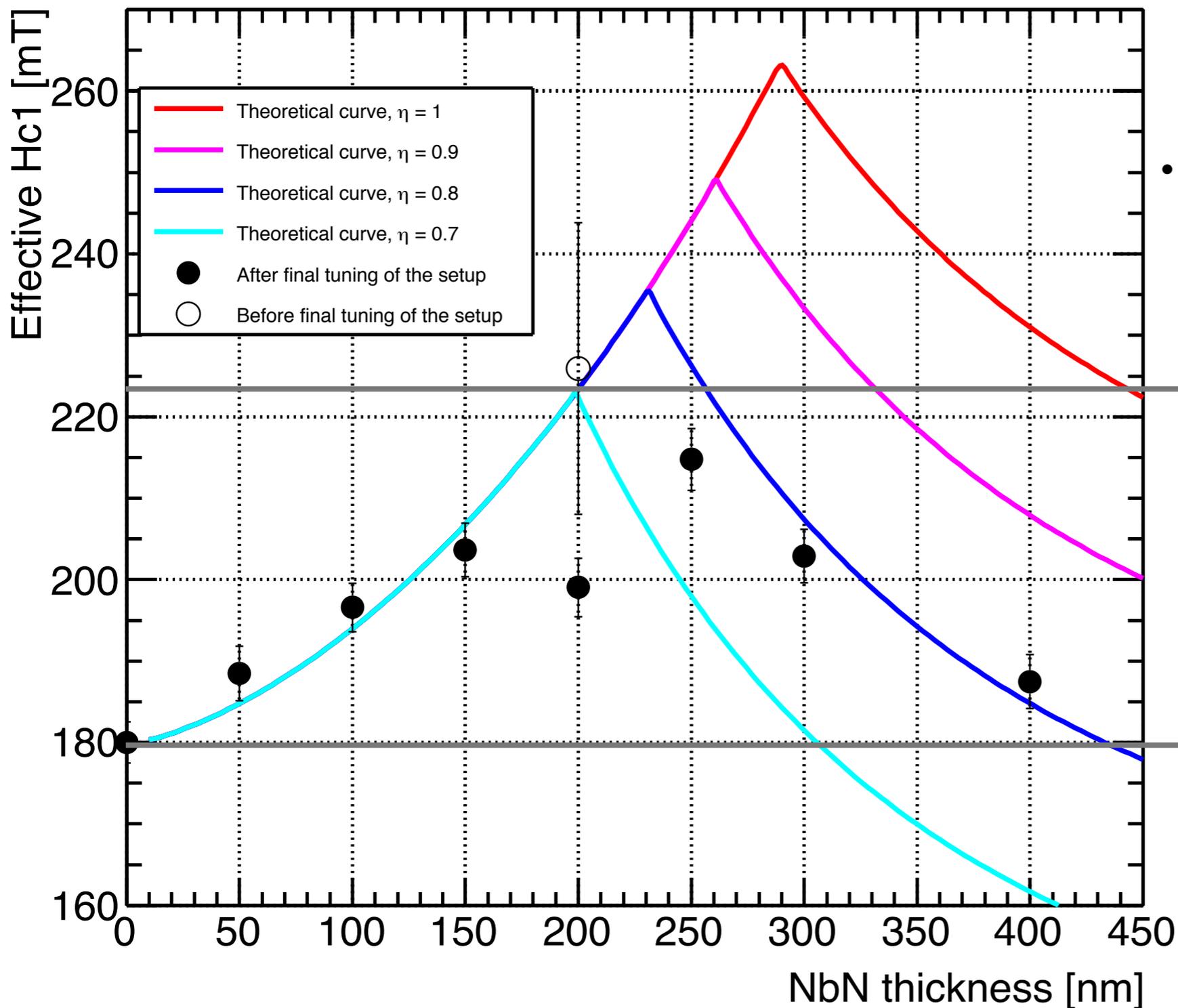
# 測定結果(NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプル)



- 200 nm サンプルに関して性能劣化が起きた。  
← 測定装置の改良の際に繰り返し使用したためと考えられる。
- 検証のため、新しい 200 nm サンプルでの測定を予定している。

**磁束侵入磁場を最大化するNbN薄膜の最適膜厚が 200 nm 付近に存在する。**

# 測定結果(NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプル)



$\eta$  は NbN 層の性能抑制係数

- $\eta = 0.7 \sim 0.8$  の理論曲線とよく一致している。

NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb  
 $\eta = 0.7$

24% up

Bulk Nb

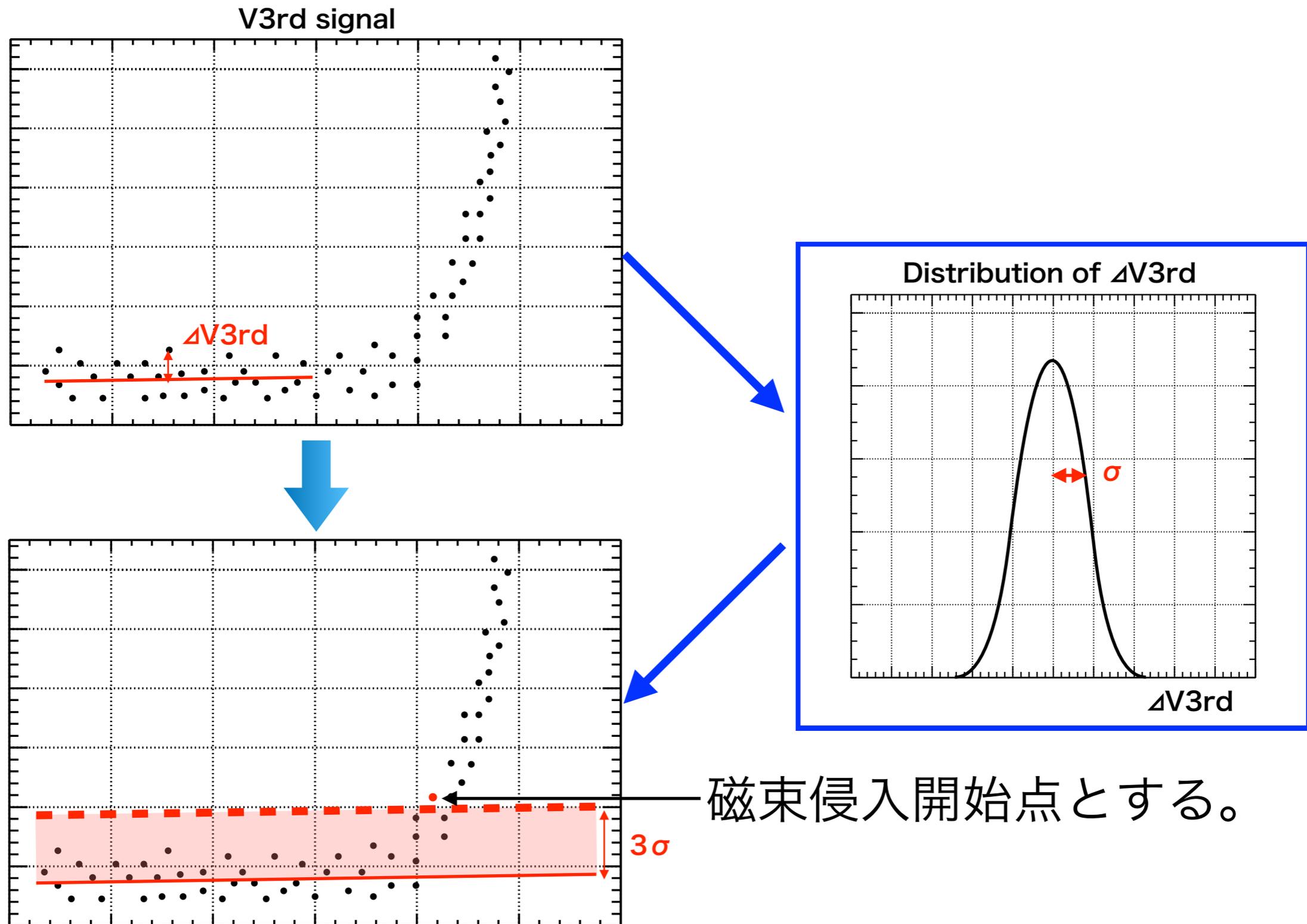
$\eta = 0.7$  の場合、磁束侵入磁場は最大で 24% 増加する。

# まとめ

- 多層薄膜構造を施すことで超伝導空洞の飛躍的性能向上が見込める。
- 多層薄膜構造による磁束侵入磁場向上の原理実証のため、京都大学とKEKにて3次高調波測定システムを構築した。  
-> 京都大学での結果はTHPI001を参照。
- NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb サンプルの測定結果として、磁束侵入磁場の向上と最適膜厚の存在を確認した。
- $\eta = 0.7$  の場合、最大 24% の磁束侵入磁場の向上が見込める。
- NbN-SiO<sub>2</sub>-Nb 超伝導空洞製造の際に目標となる膜厚パラメータが得られ、最大加速電場の向上を強く示唆している。

# Back up

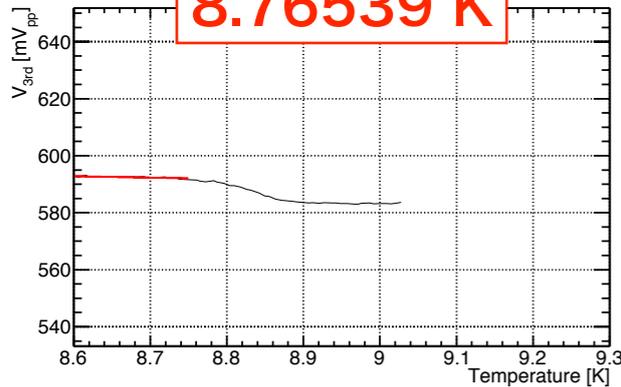
# 磁束侵入開始点の決定方法



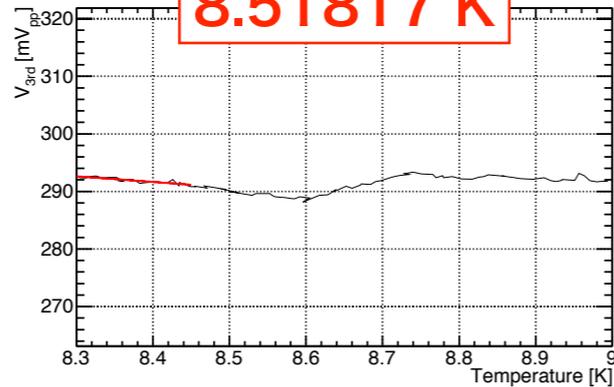
# V<sub>3rd</sub> signal of NbN\_300 nm

T<sub>c</sub>

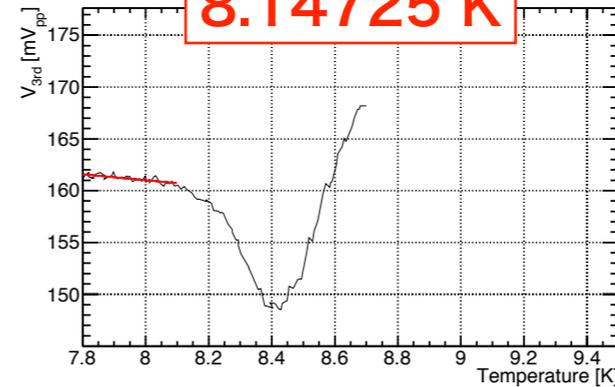
8.76539 K



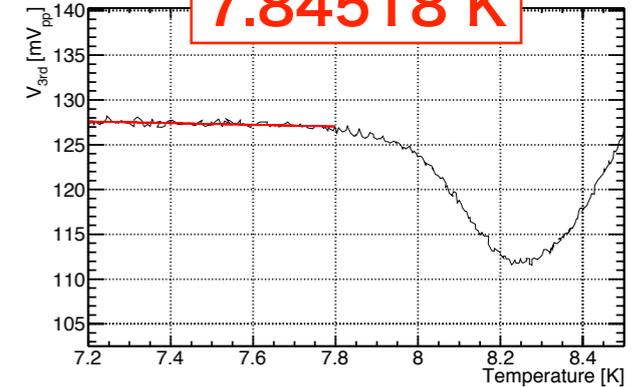
8.51817 K



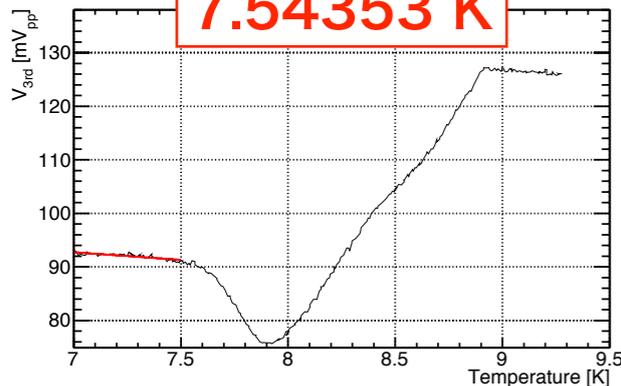
8.14725 K



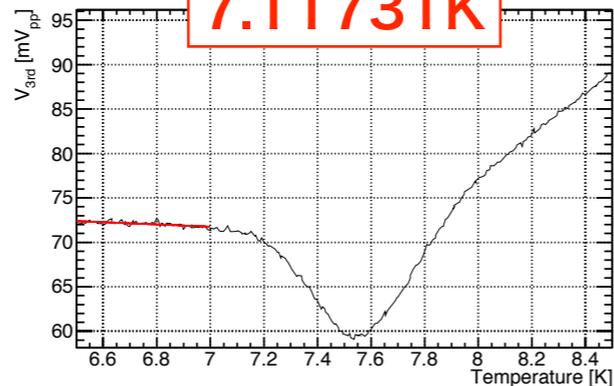
7.84518 K



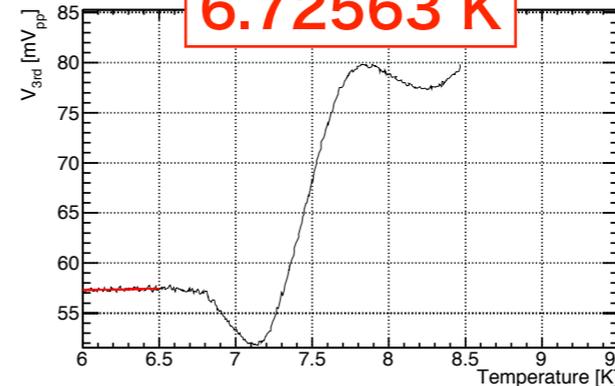
7.54353 K



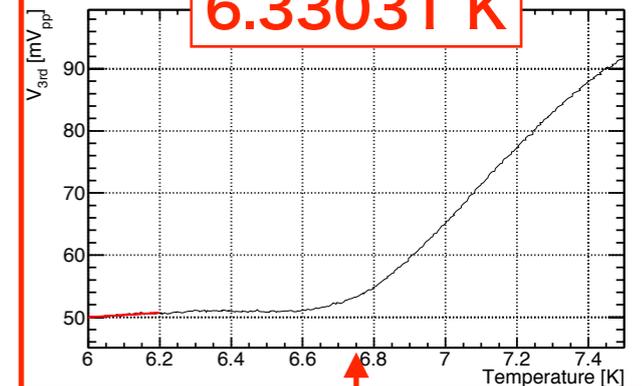
7.11731 K



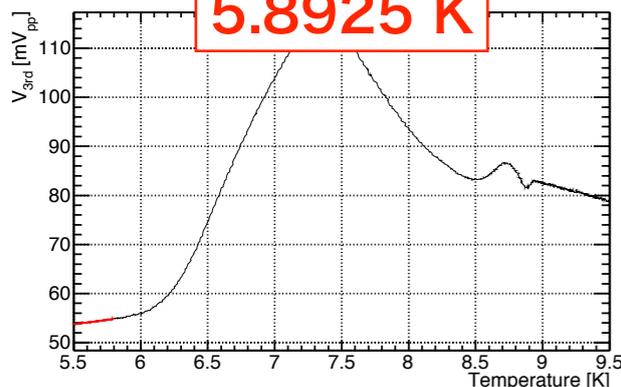
6.72563 K



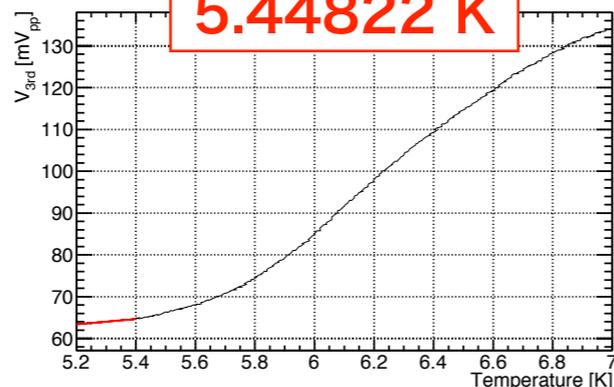
6.33031 K



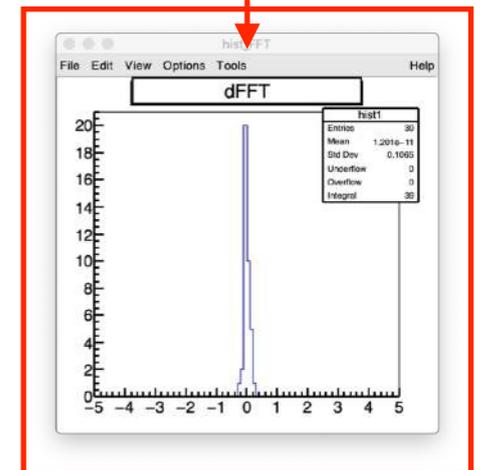
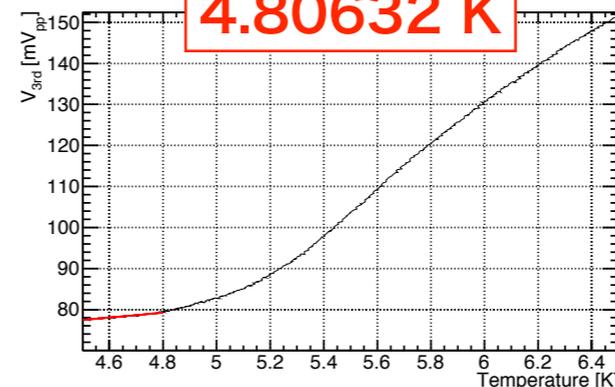
5.8925 K



5.44822 K

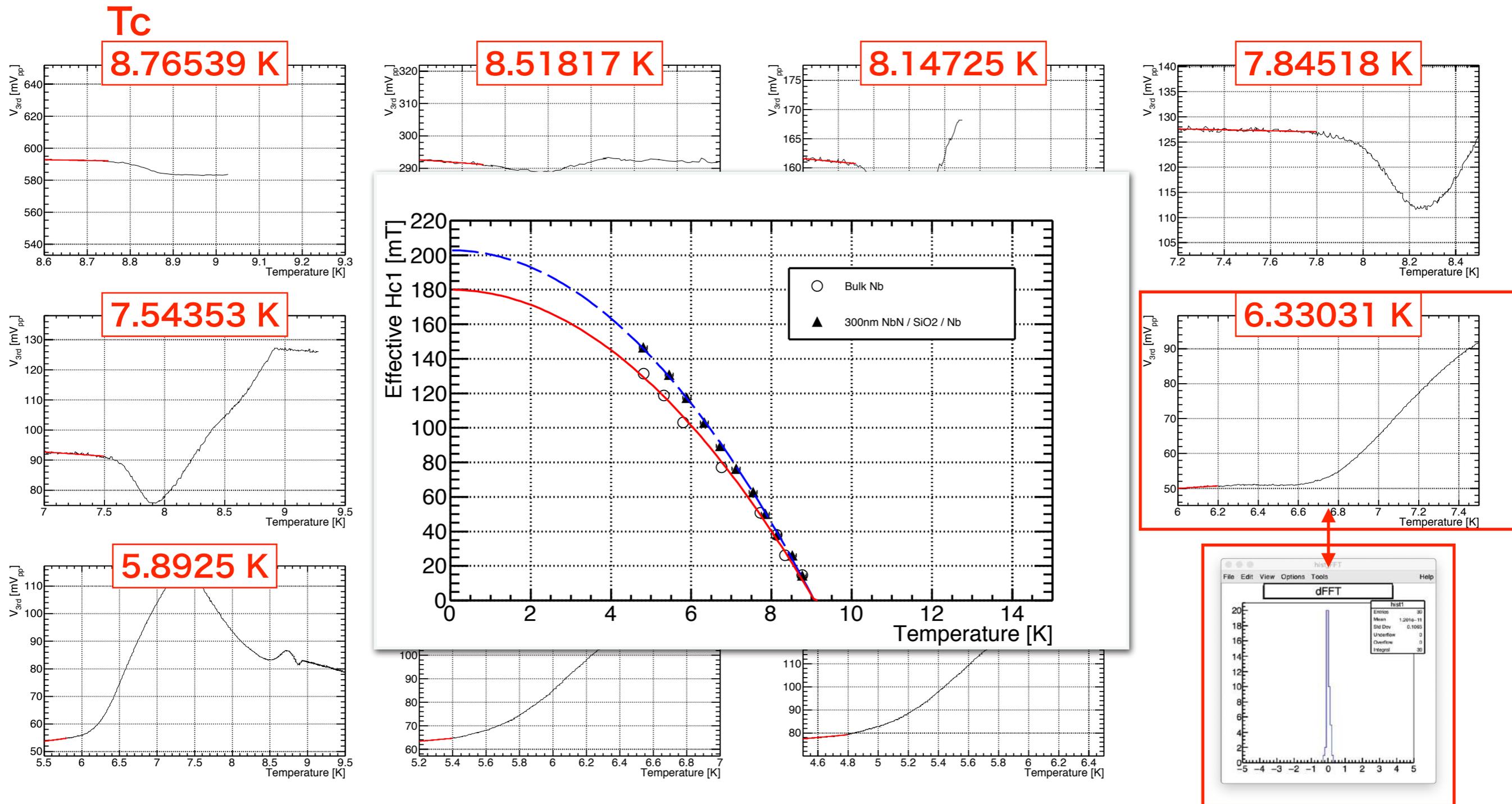


4.80632 K

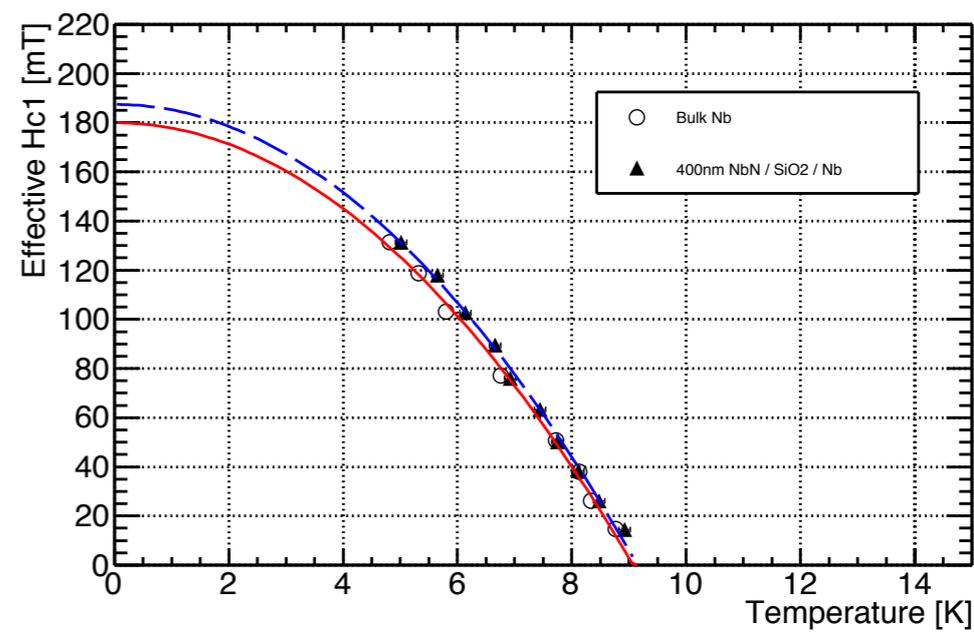
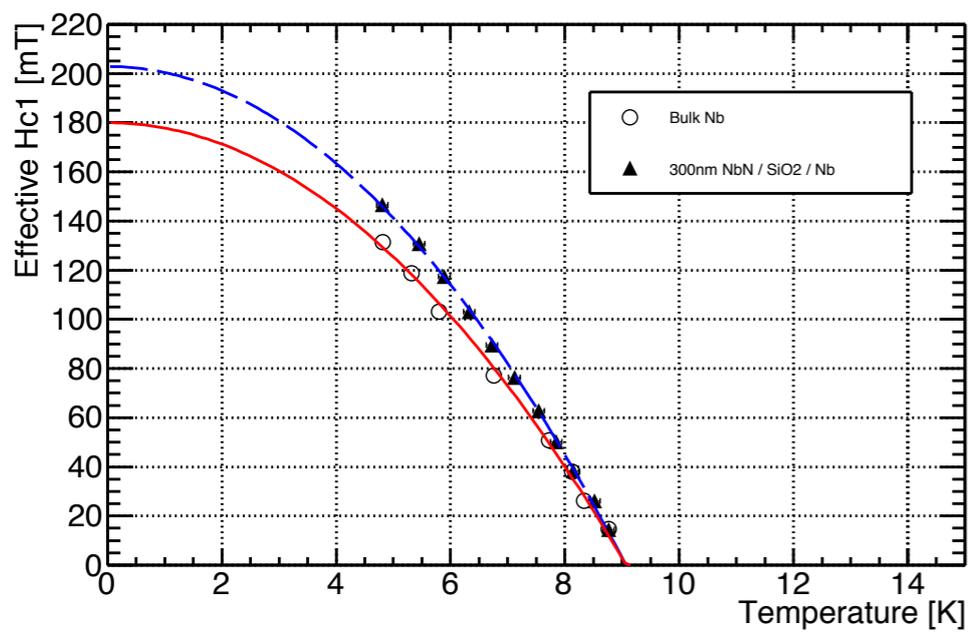
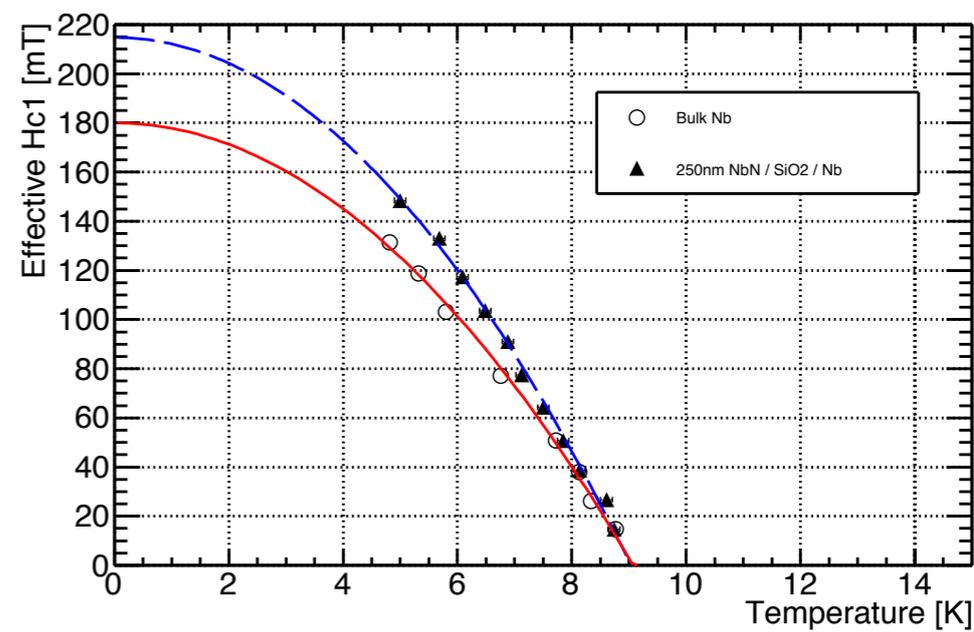
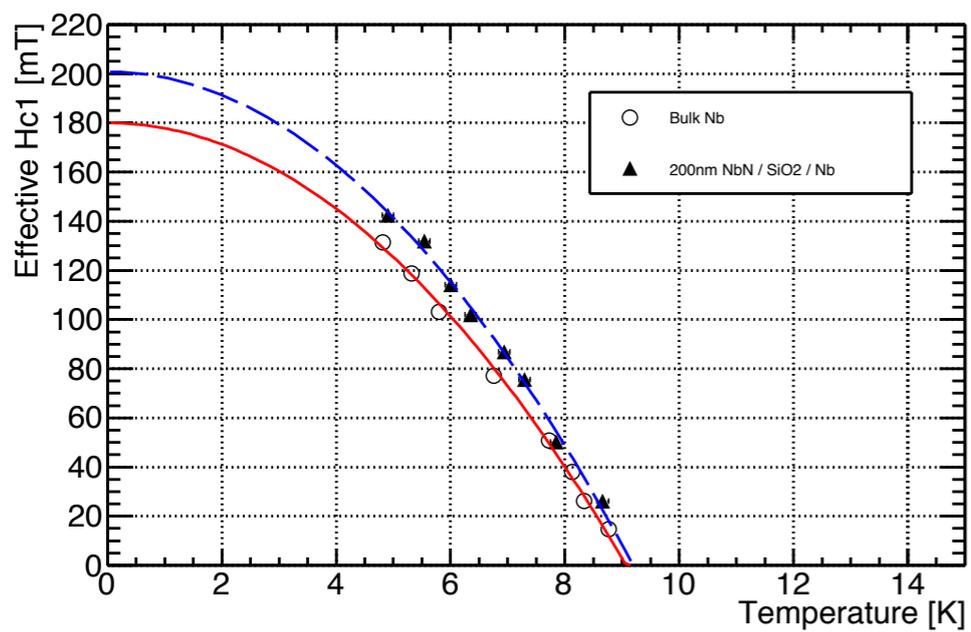
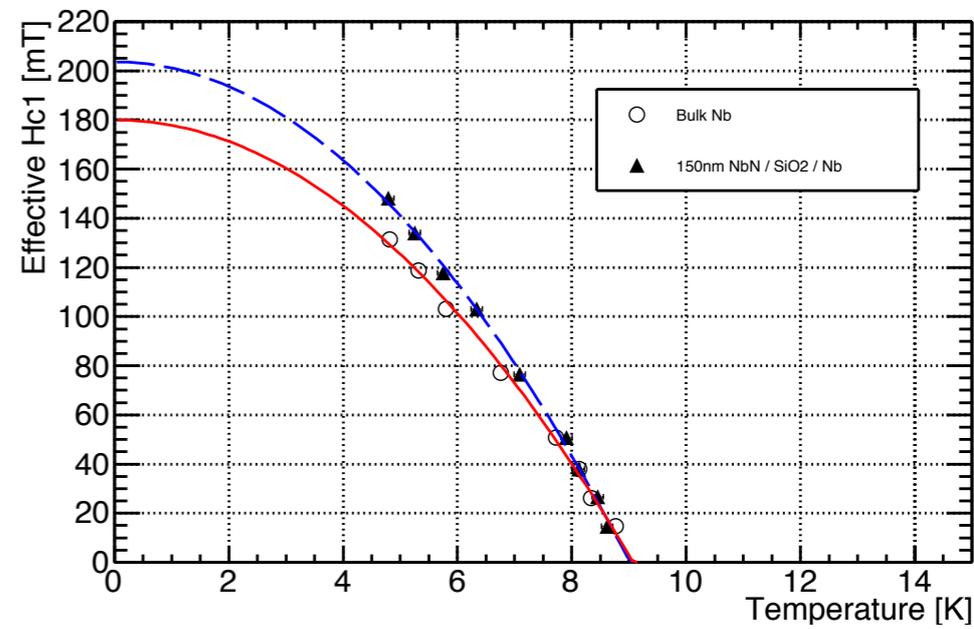
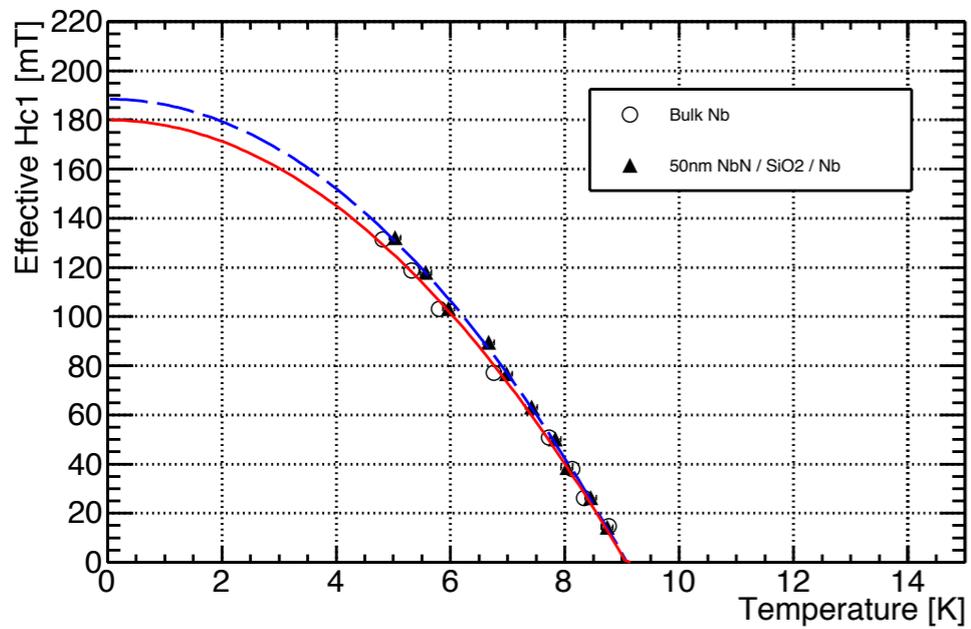


- V<sub>3rd</sub>の変化が起きる前のフラットな部分を線形フィッティング。フィッティング関数と各測定点の差の分散をとる。3σを超えた点を転移点とした。

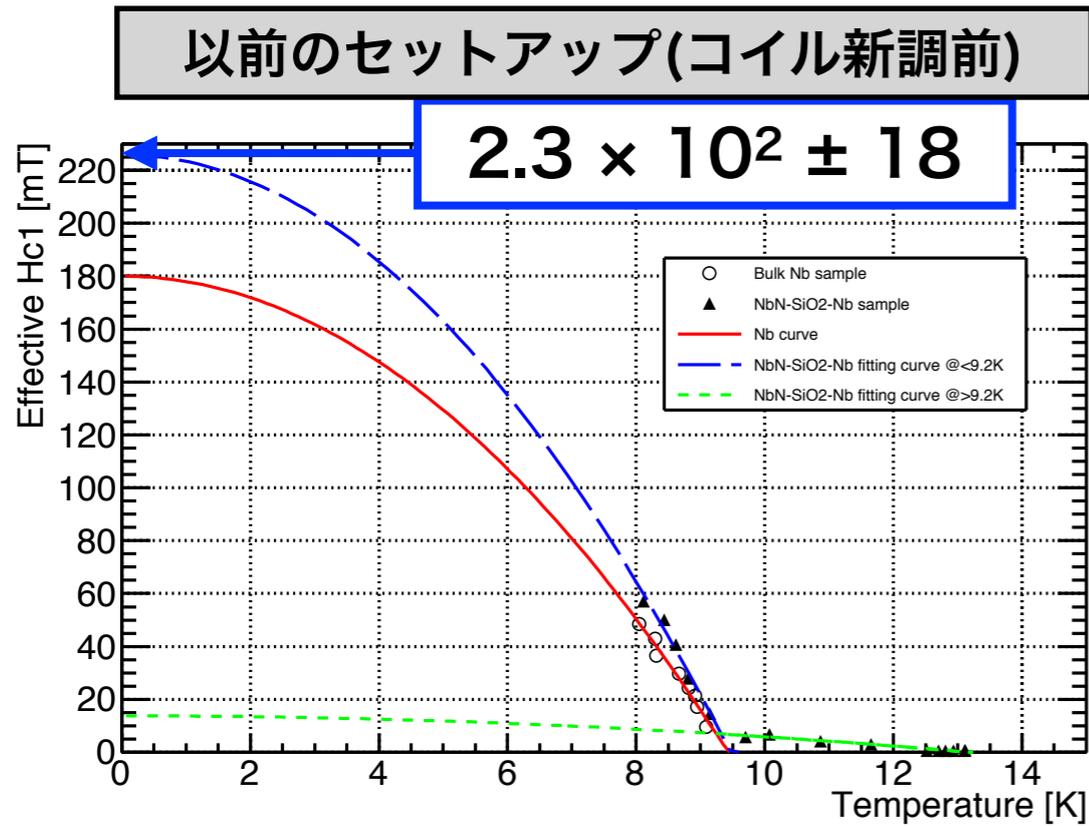
# V<sub>3rd</sub> signal of NbN\_300 nm



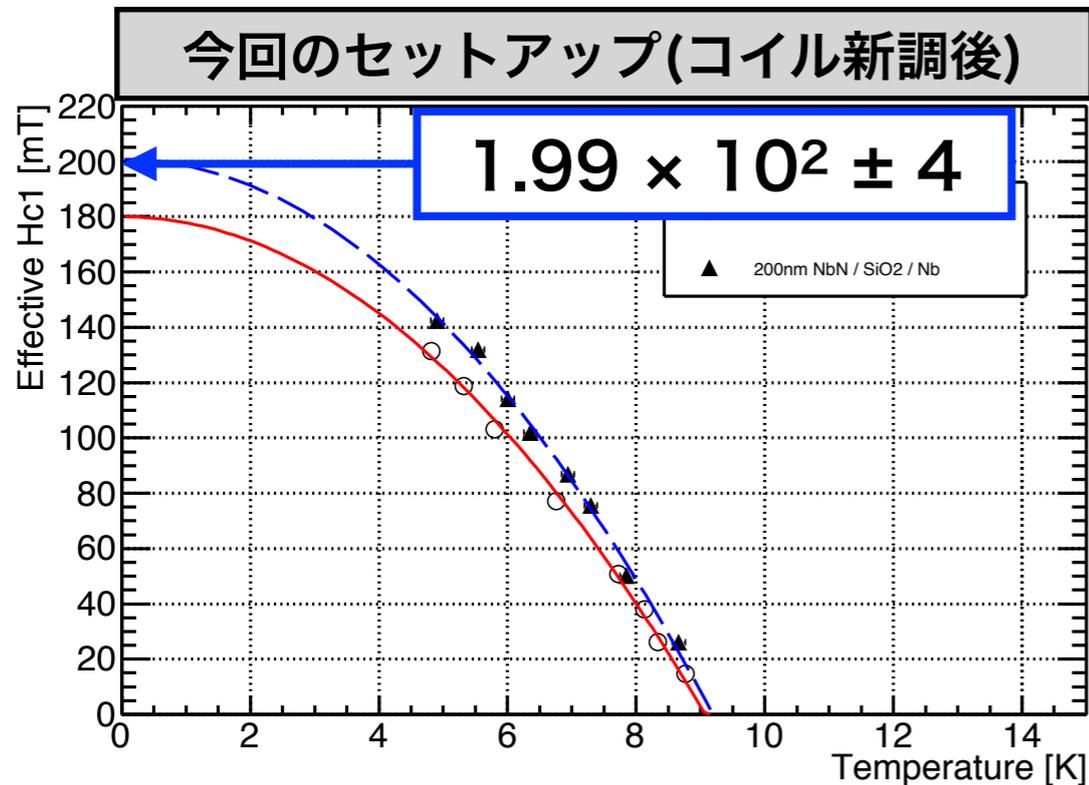
- V<sub>3rd</sub>の変化が起きる前のフラットな部分を線形フィッティング。フィッティング関数と各測定点の差の分散をとる。3σを超えた点を転移点とした。



# 厚み vs. 臨界磁場



- NbN200 nm サンプルは何度も測定しており、性能劣化が疑われる。



- その他のサンプルは初めて冷却試験したときの結果。