

超伝導高周波加速空洞高電界化の新技術 の開発



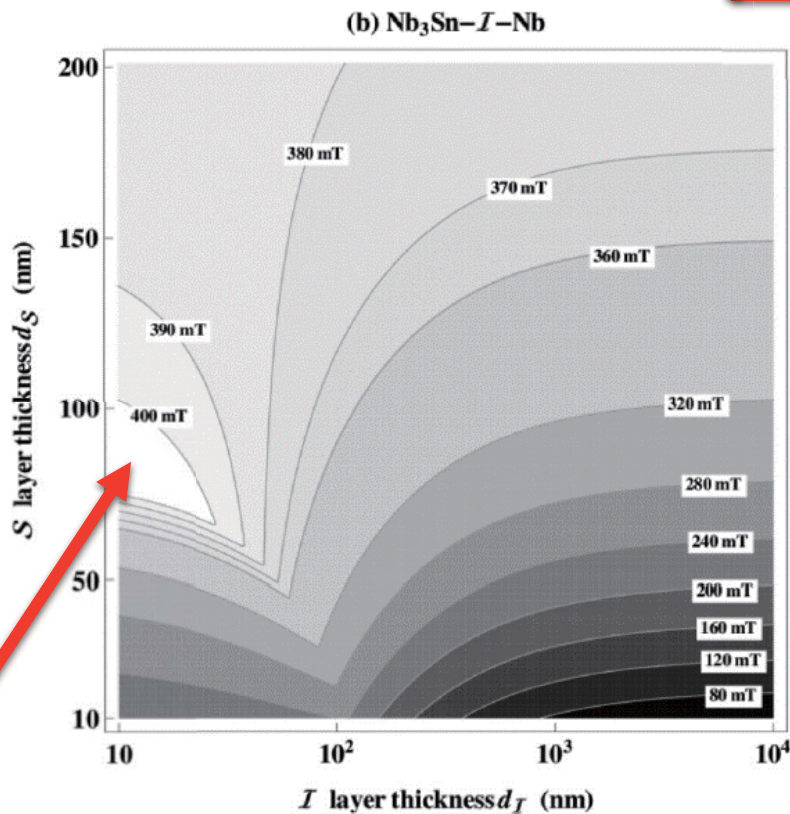
従来の加速空洞では加速勾配 $40\sim 50$ MV/mが限界

12152015 H. Hayano, KEK

分担研究者; 早野、佐伯、加藤、久保、及川(M2):KEK
岩下:京大、他

多層薄膜による超伝導空洞の高電界化(イントロ)

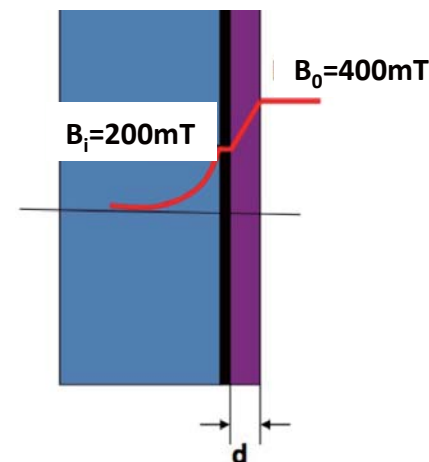
超伝導体多層薄膜を使えば、渦糸雪崩を防ぎ下部臨界磁場を越えてsuperheating fieldまでfieldを上げられると期待されて、更に薄膜の厚み d_s が磁場侵入深さ λ 程度以下の時、Superheating fieldが増加することが理論的に示されている(2013, Kubo, Iwashita, Saeki)。



もしニオブ空洞が内部臨界磁場 $B_i=200\text{mT}$ まで耐えられるなら、外部磁場は 400mT の強さまで耐えられる。

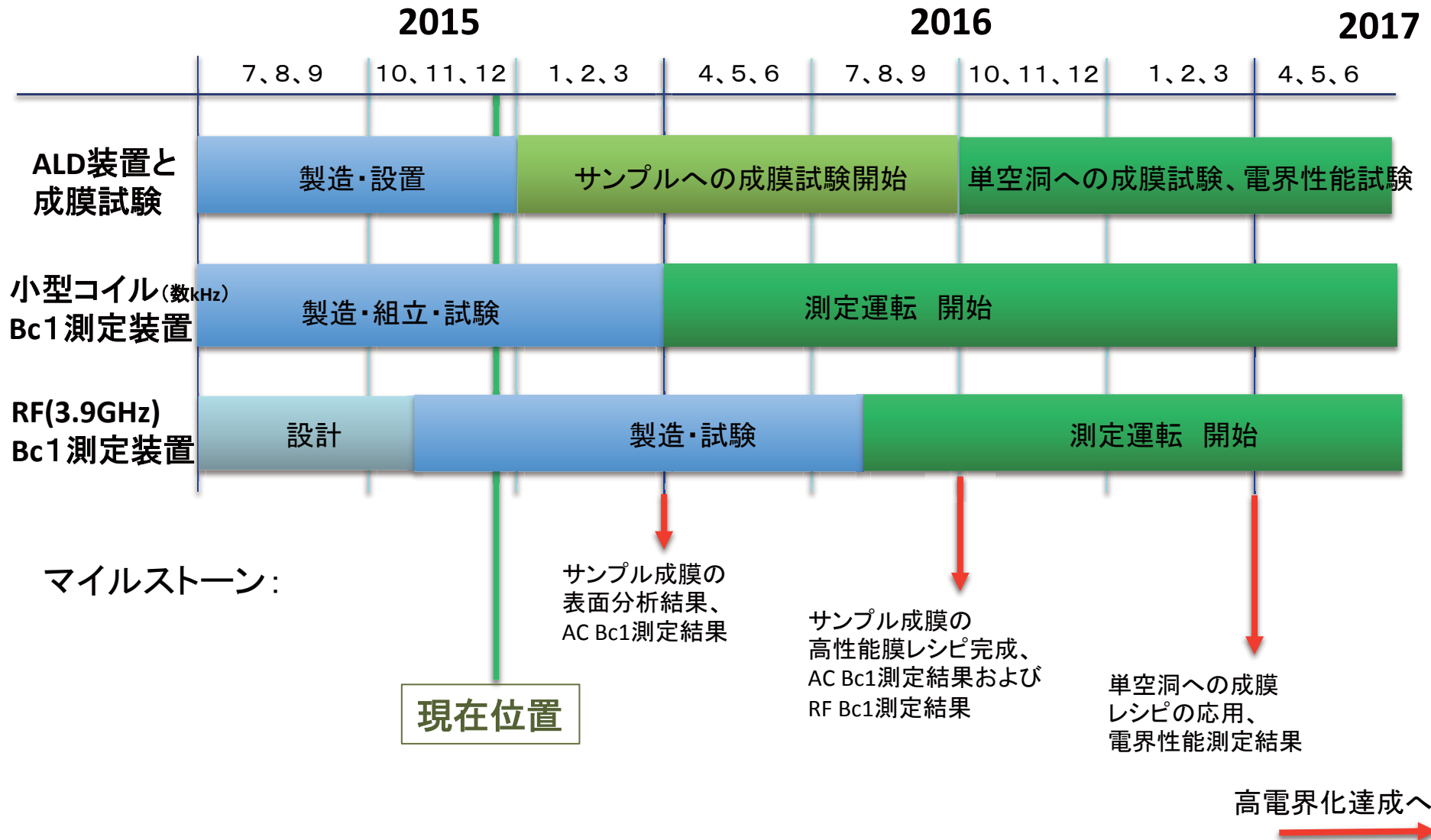
超伝導加速空洞に大きなパワーを入れる事ができる。すなわち、**高電界化**が可能となる。

例えば、 $d=100\text{nm}$ の Nb_3Sn 薄膜と薄い誘電体薄膜をコーティングされたニオブ空洞を考える。



1層の Nb_3Sn 薄膜コーティングでもポルテックス侵入によるブレークダウン限界を2倍以上、上げられる。すなわち、 100MV/m で加速器運転が可能

超伝導薄膜研究スケジュール



開発研究の状況

(1) 多層薄膜の理論的研究

Magnetic Flux のトラップについて研究を進めている。多層薄膜はその高い転移温度により2K程度の低温度まで冷却するとBCS抵抗が小さくなり、高いQ値が期待できる。しかし、残留磁場があるとそのトラップによりQ値も下がり H_{sh} よりも低い表面磁場で熱的超伝導破壊が引き起こされ高電界性能が損なわれる事が懸念される。近年注目されている温度差を大きくした冷却がそのトラップを少なくできそうだ。そのMagnetic Fluxトラップのモデルを提唱、現実のデータを説明できている。

(2) ALD成膜装置の開発

各パーツは届いていて、現在組み上げ中。ガスフロー制御のソフトウェアも構築中。

(3) 薄膜評価装置の開発

(a) AC臨界磁場計測装置

クライオスタットを手配中(未納)。3月末までに組み上げる予定。

(b) RF臨界磁場計測装置

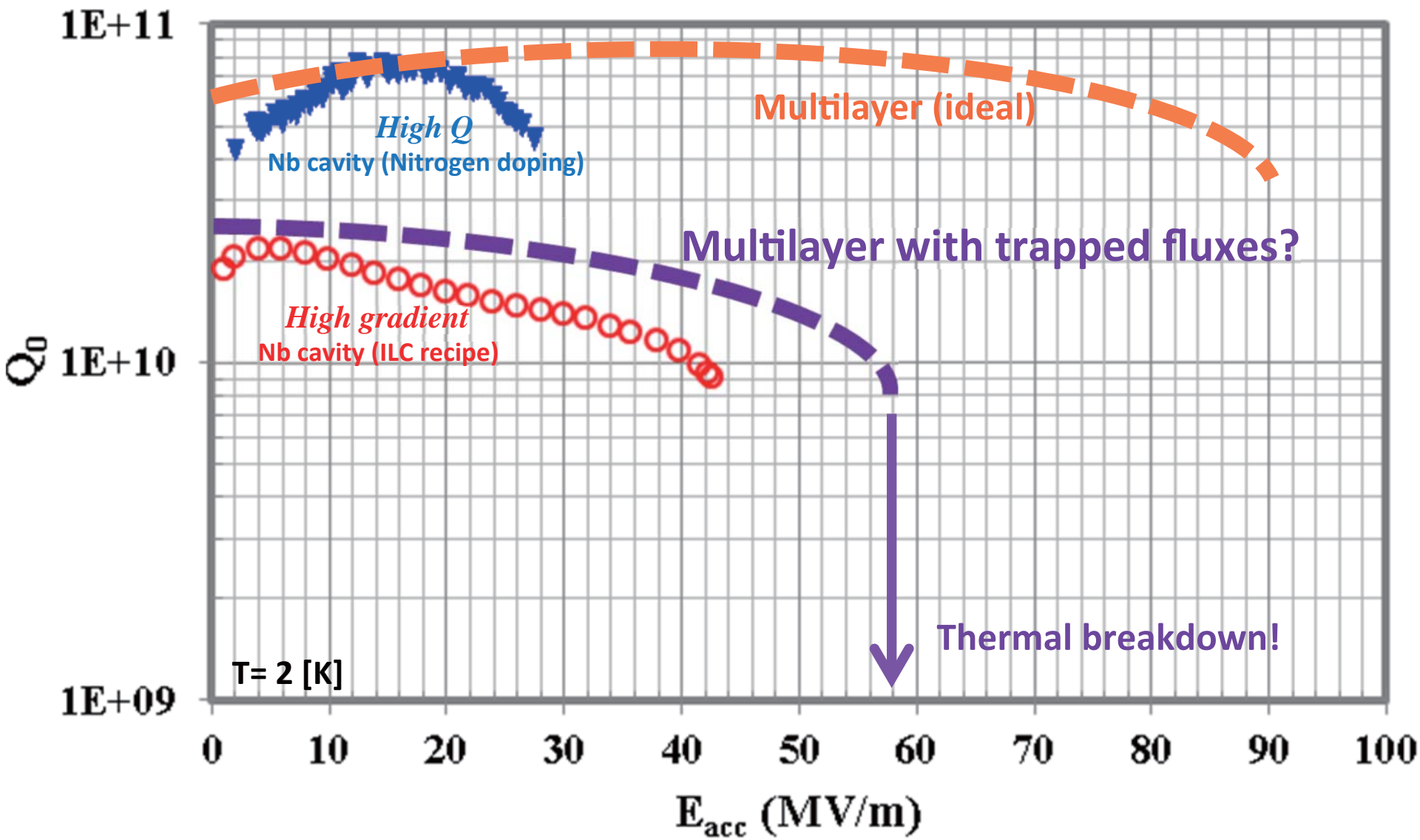
測定空洞アルミモデルの詳細設計を終え現在製作中。性能を確かめてからプレス工法でニオブモデルを製作する予定。

(c) 超伝導転移計測装置 (RRR計測)

計測装置を組み上げており、銅ベースプレートは3Kまで到達できている。ニオブでの試験は終了。現在Siウェハー上のNbN薄膜サンプルを計測中。

(1) 多層薄膜空洞はNb空洞よりもBCS抵抗が小さく、高いQが期待できる(オレンジの線)

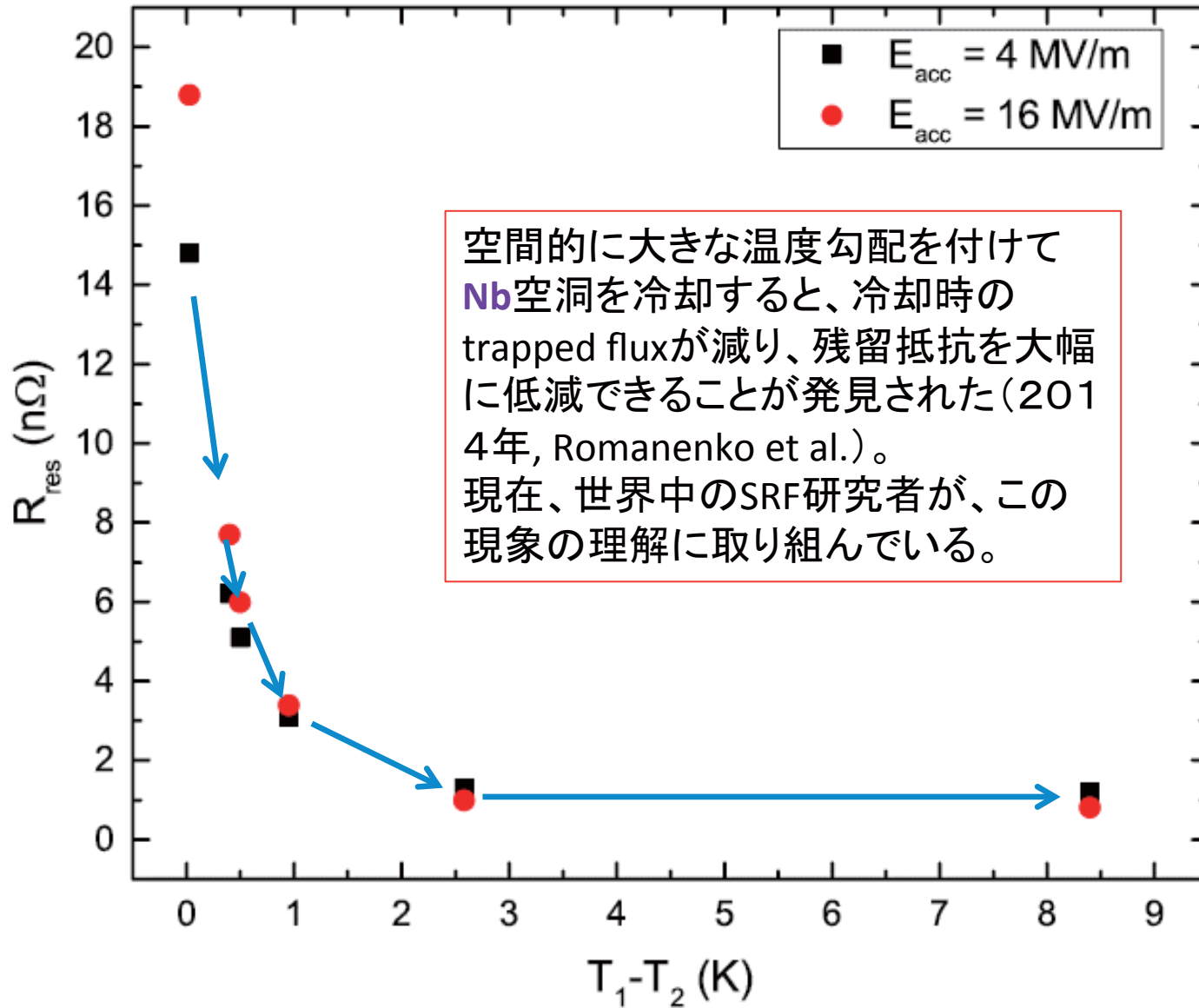
しかし、空洞冷却時にFluxが沢山trapされた場合には、trapped flux起源の残留抵抗が支配的になり、高いQ値が得られない。その場合には、superheating fieldより随分低いfieldでthermal breakdownを起こしてしまう(紫の線)。空洞冷却時のFlux trappingの理解と残留抵抗の低減がhigh field実現に不可欠。



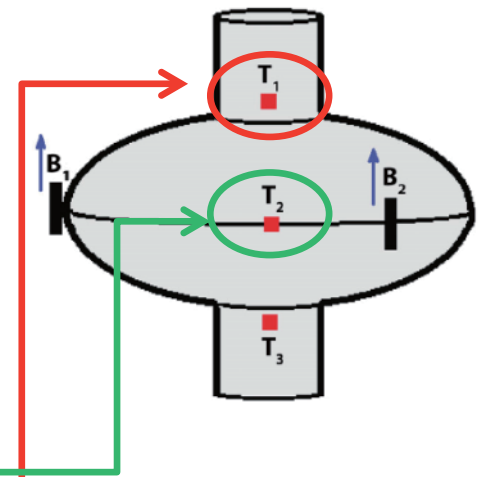
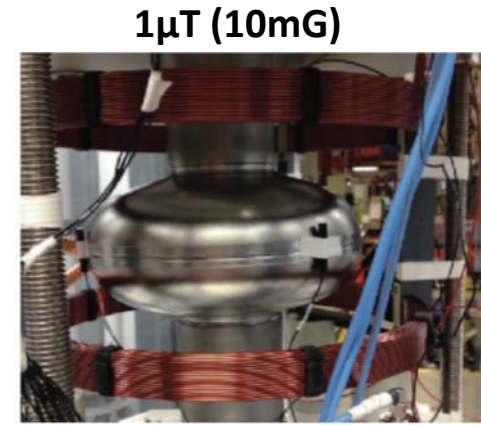
(1)

Cooling down with a large temperature gradient

Figures from A. Romanenko, et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 234103 (2014)

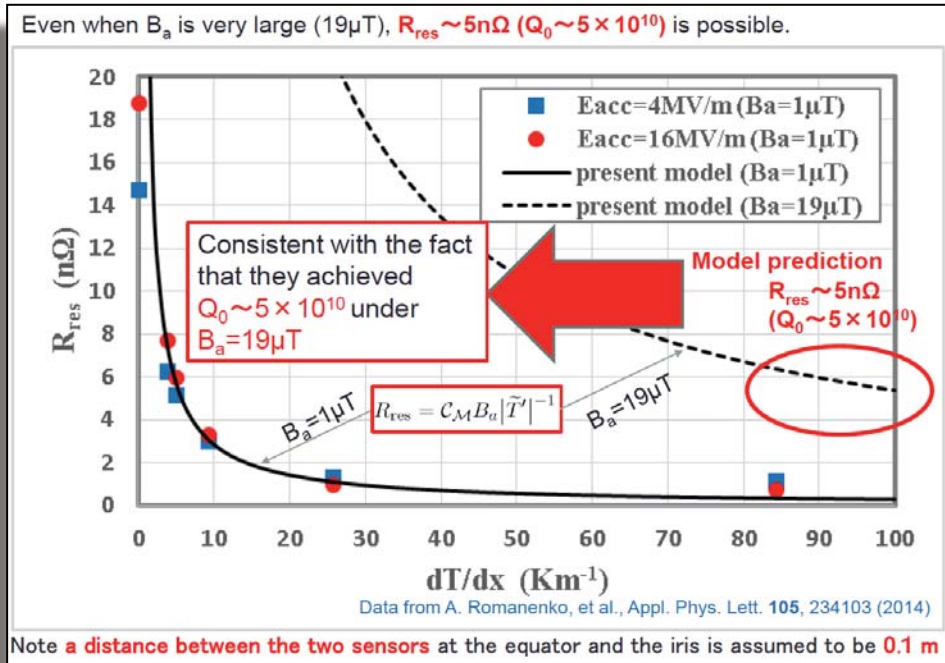
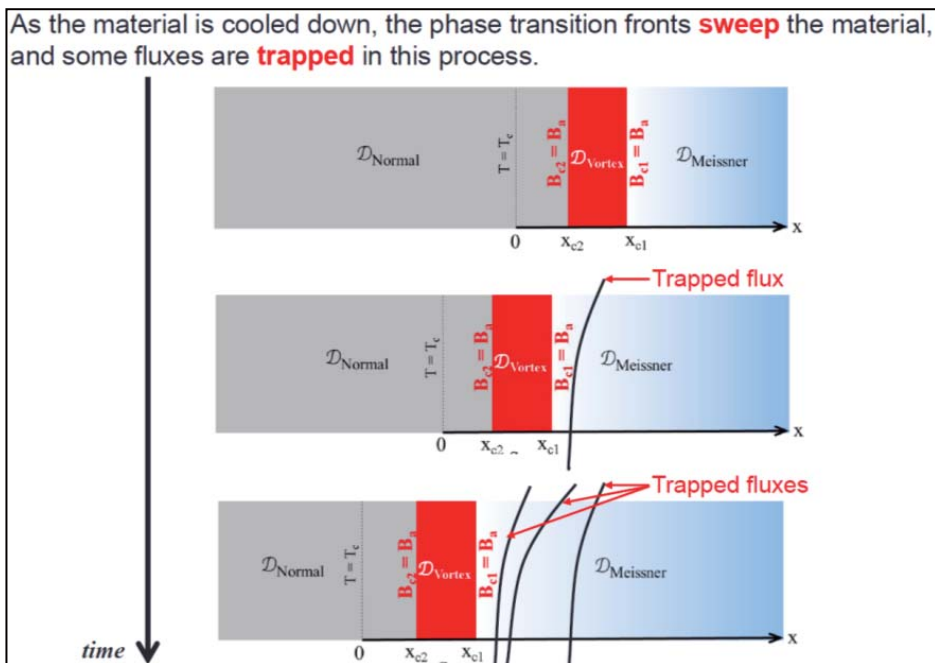


空間的に大きな温度勾配を付けて Nb 空洞を冷却すると、冷却時の trapped flux が減り、残留抵抗を大幅に低減できることが発見された(2014年, Romanenko et al.)。現在、世界中のSRF研究者が、この現象の理解に取り組んでいる。



(1) 温度勾配とtrapped fluxの関係に関するモデルを提案(久保)

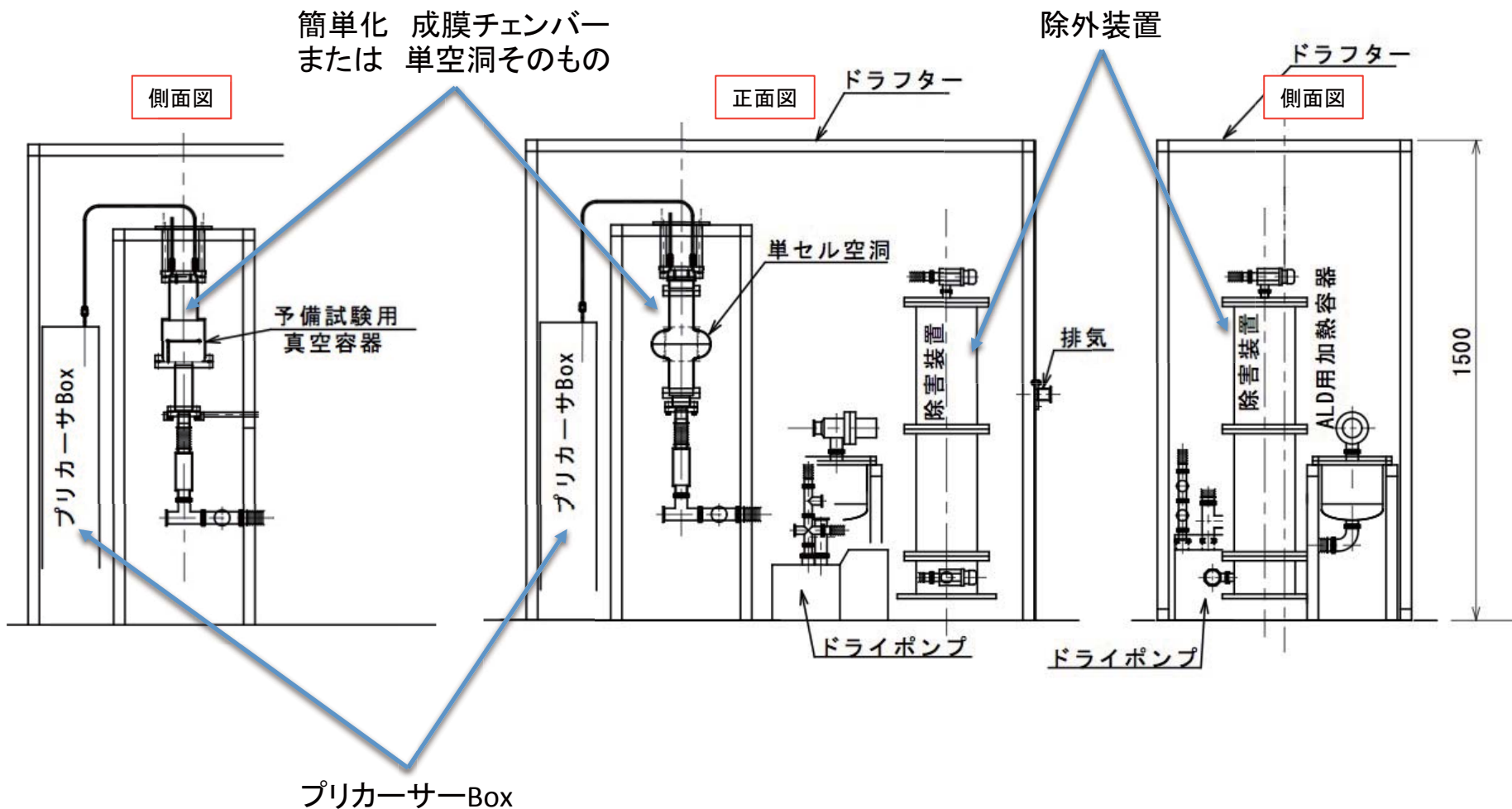
- 超伝導転移が起こる $T=T_c$ 付近には有限の厚みの渦糸状態領域が存在する。
- 冷却とともに、渦糸状態領域が空洞全体をsweepし、この過程で渦糸はtrapされる。
- 渦糸状態領域の厚みは温度勾配の逆数に比例するため、温度勾配を大きくするとtrapped fluxの候補となる渦糸の数が減少 \Rightarrow trap確率減少 \Rightarrow trapped fluxの総数が減少する
- 上記モデルを基に見積もった残留抵抗はRomanenkoらの実験結果とconsistent
- SLACで行われたTTC meetingに招待され、発表を行った。



(2)

簡易ALD装置の計画

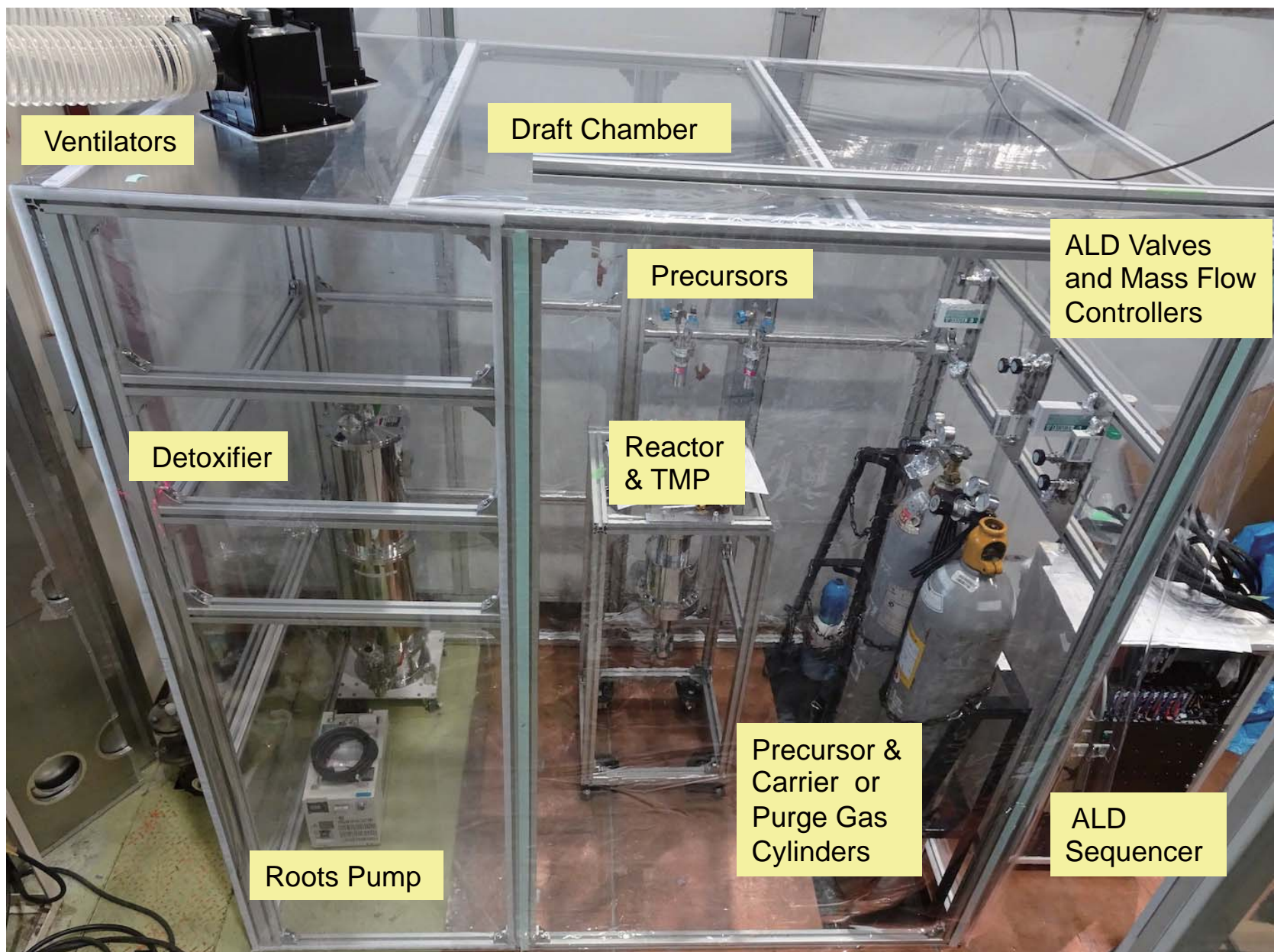
当初は、簡易化成膜チェンバーにより、薄膜を生成するシステムの完成を目指す。(加熱機能は後から。架台もシンプルに。)



この簡易化成膜装置を、ばらばらで購入し自作で組み上げる。この時、できるだけ既存のものを流用

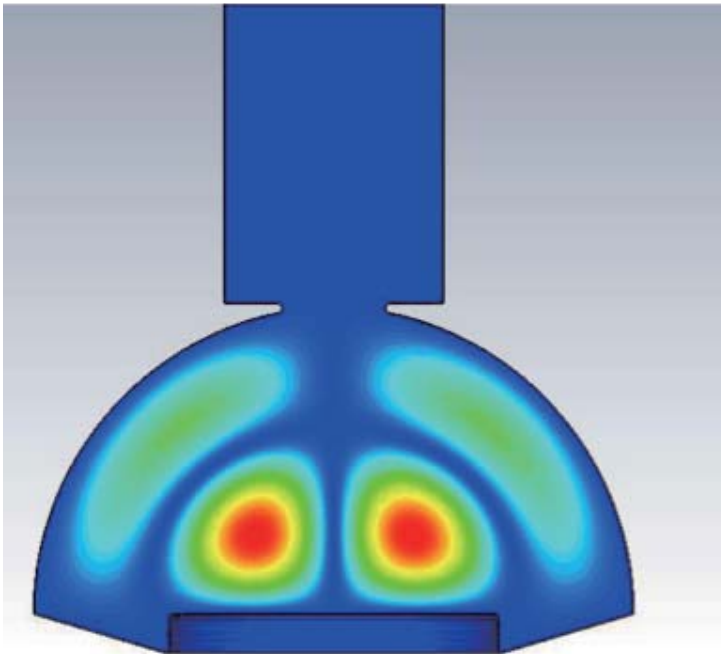
(2)

簡易ALD装置の現在状況(2015年12月)

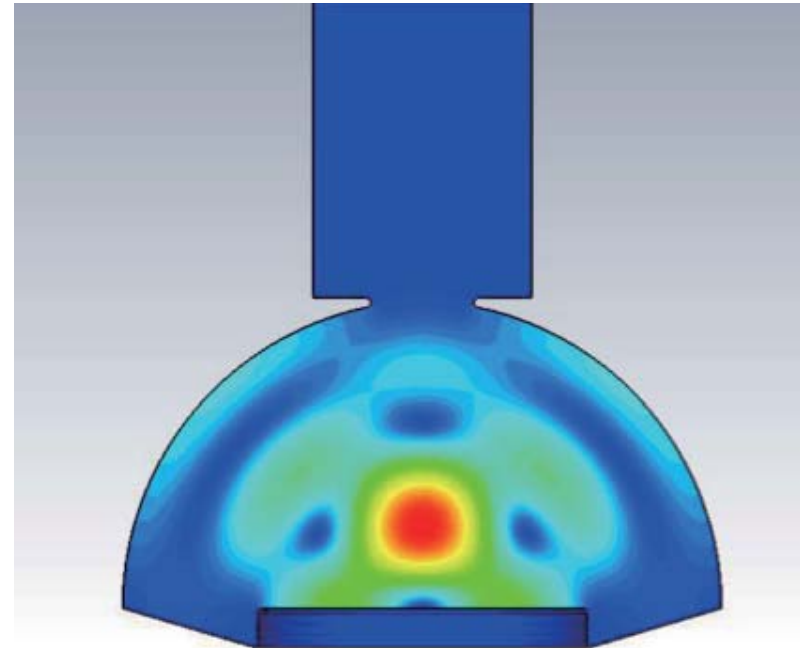


Design of Al Test-cavity

Electric Field



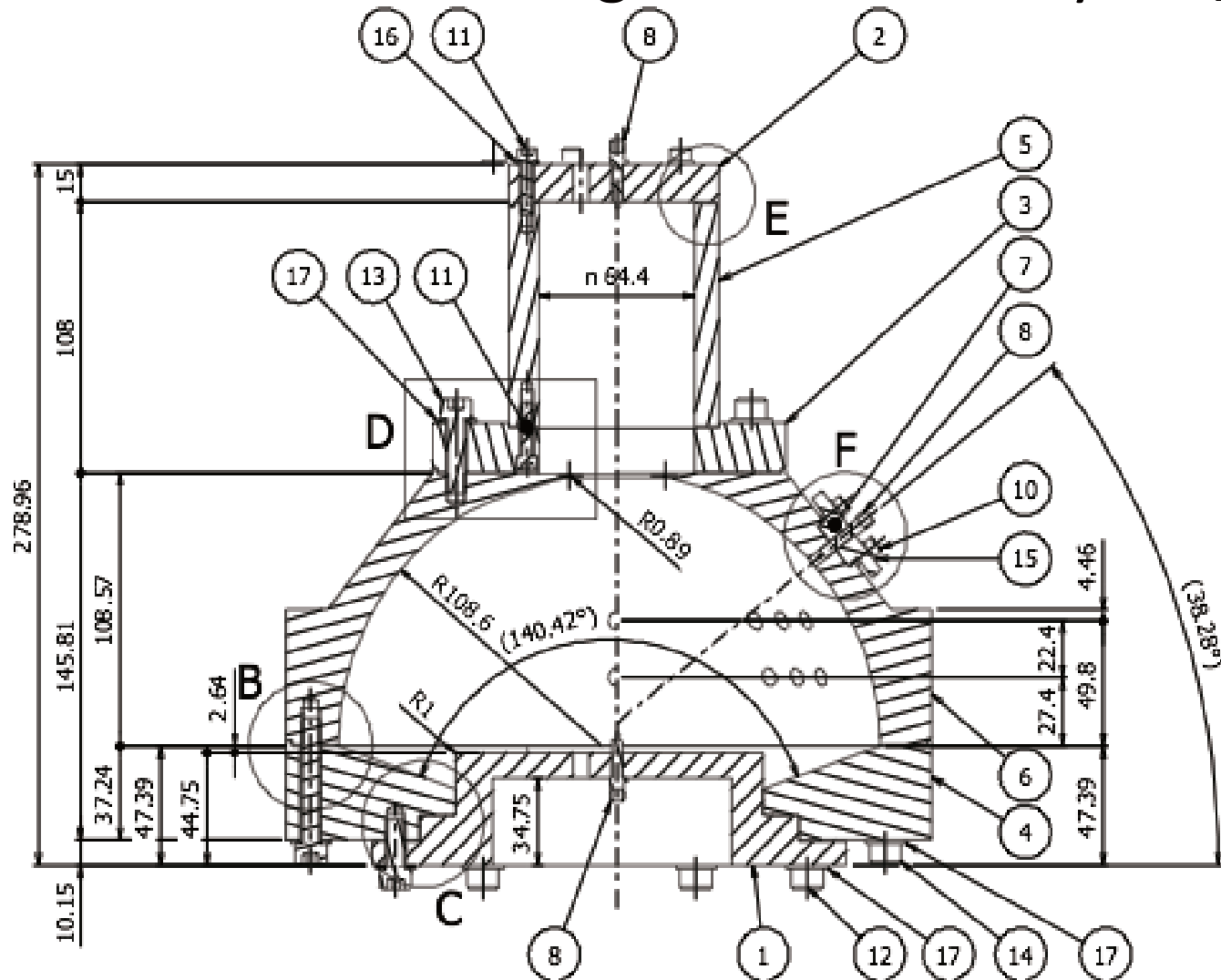
Magnetic Field



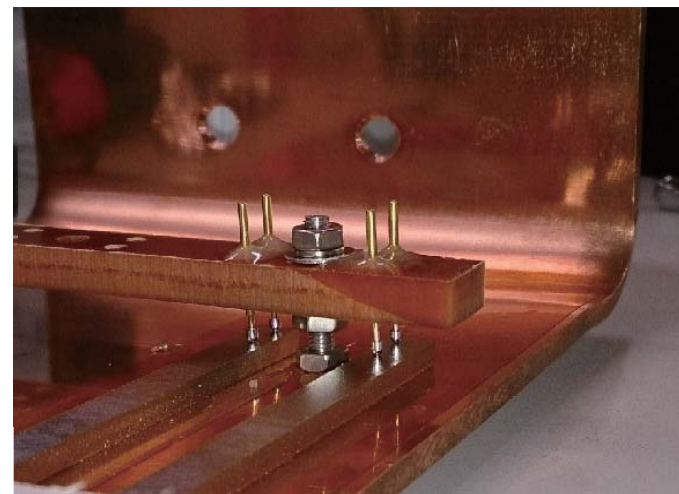
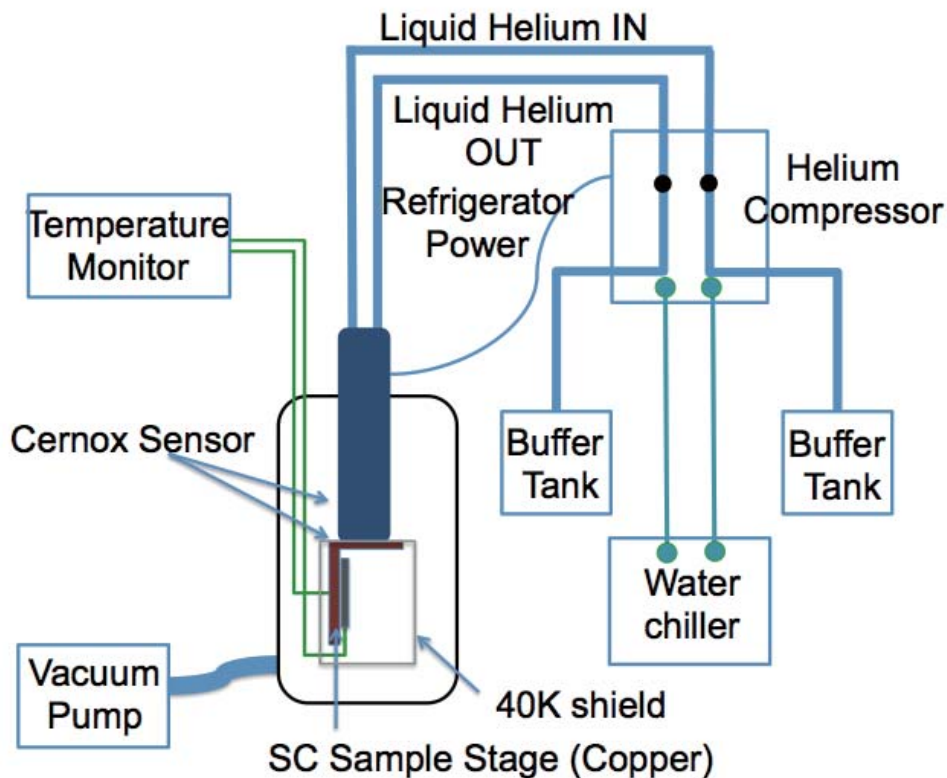
$$\frac{\text{sample surface magnetic field}}{\text{Nb surface magnetic field}} = 1.97$$

Fabrication Drawing of Al test-cavity

12月25日納期



小型冷凍機を使った計測装置



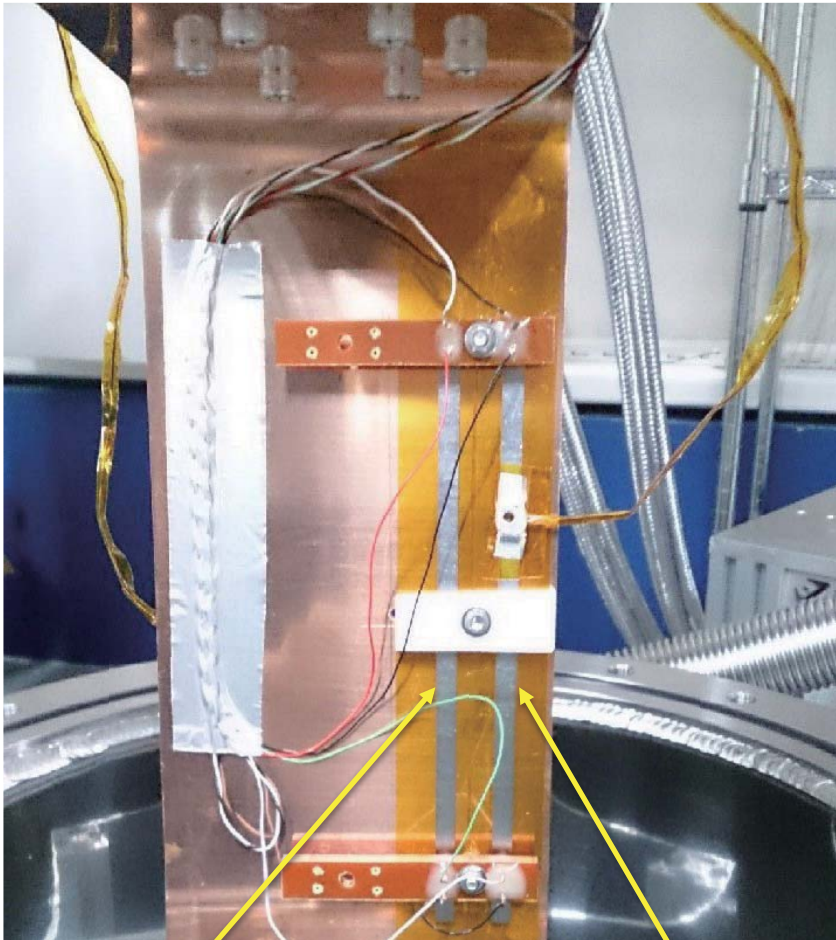
Cuベースプレートの3K、Nb試料の7K到達には
3時間30分程度かかる。
(その後室温に戻すには、ヒーターなしで2日かかる)

Nb試料表面に押し当てる
スプリングコンタクト電極

(3-c)

超伝導転移計測装置 (RRR計測)

Nb試料の取り付けと40Kシールドによる囲み、抵抗値計測は4端子法



温度計付きのNb試料 (5mm x 2.8mm x 150mm)



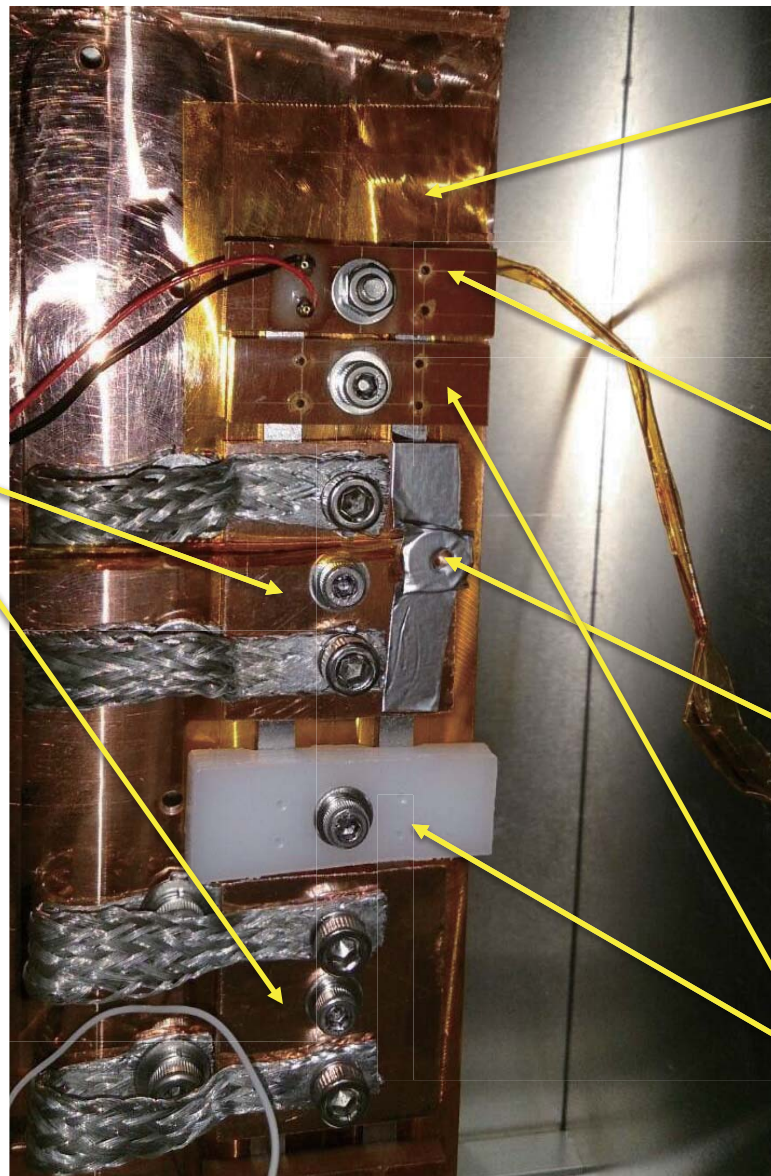
40Kシールドボックス

温度計なしのNb試料 (5mm x 2.8mm x 150mm)

(3-c)

Nb試料と銅板その熱的接触を強化したセットアップ

カプトンで絶縁し、銅板でNbの上から押さえつけて接触を強化



カプトンで絶縁した上にNbの試料を取り付け

Nbの試料の上にセルノックス温度計（片方のNb試料のみ）

Nbの試料の上の銅板上のセルノックス温度計

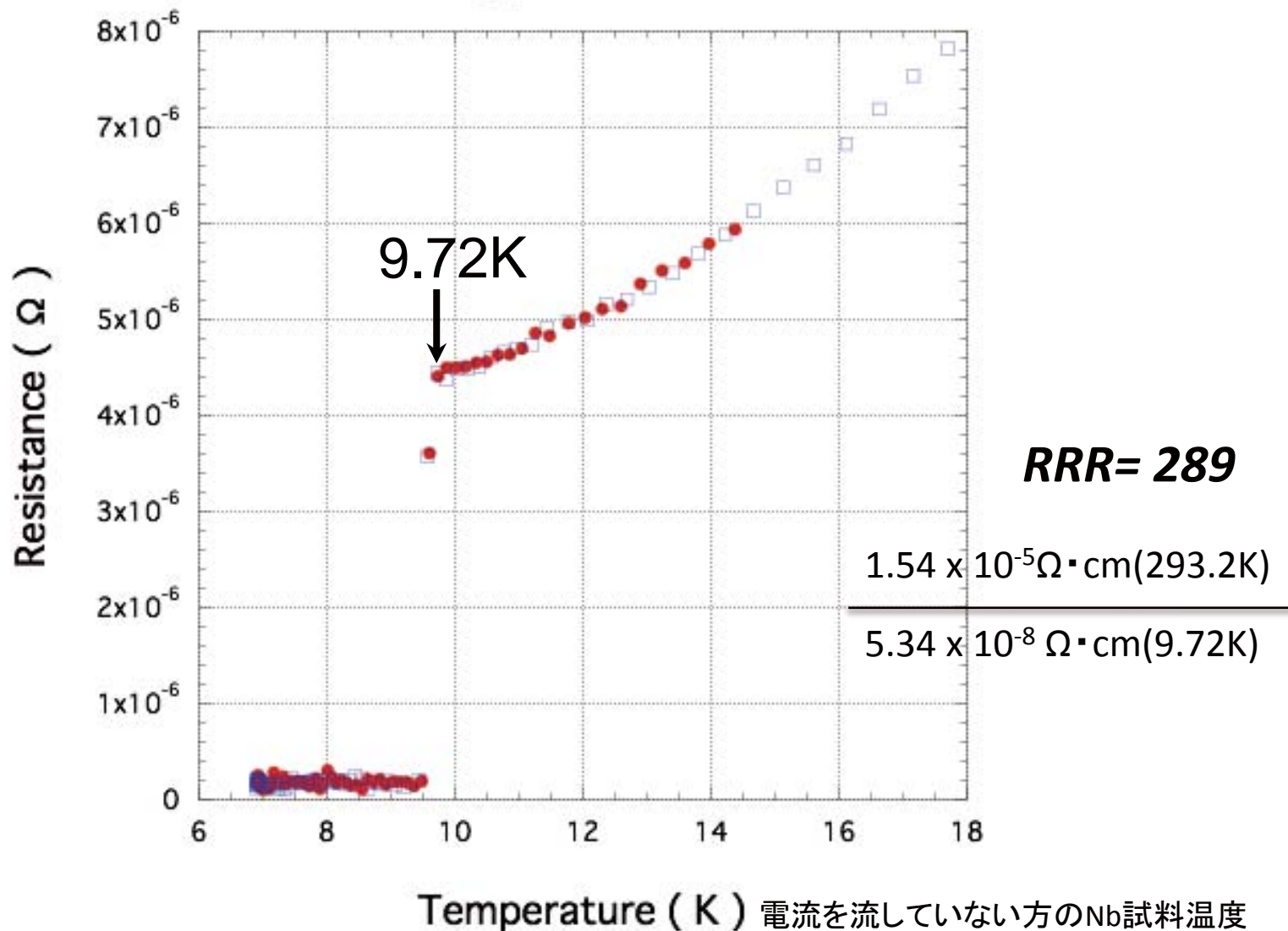
テフロンやG-10のNb試料押さえ

(3-c)

Nb試料の転移温度付近の抵抗値の変化

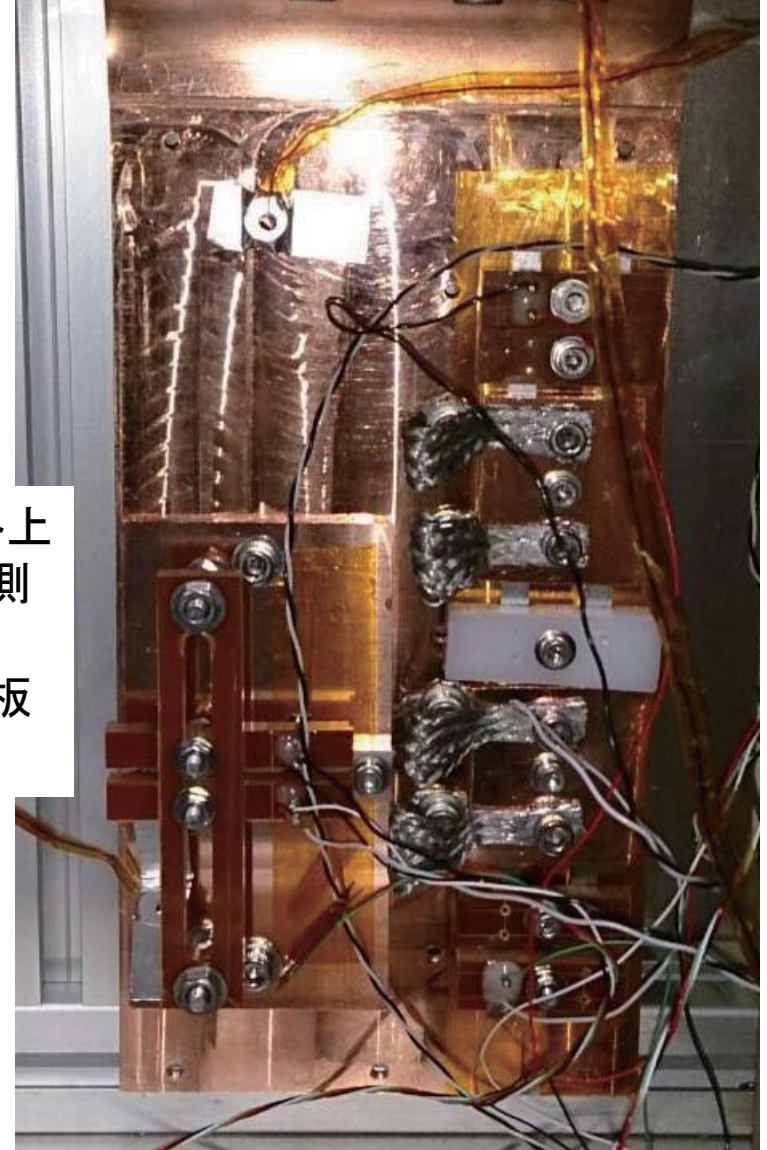
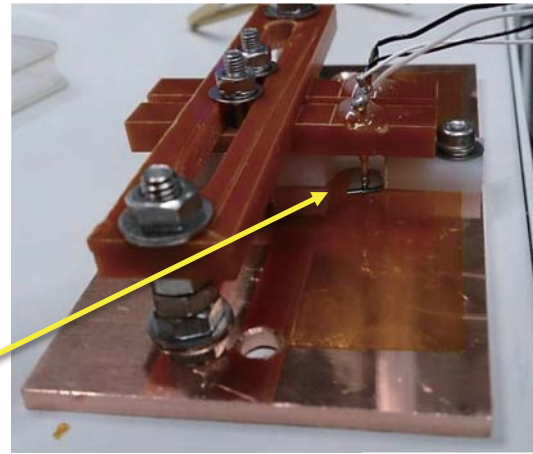
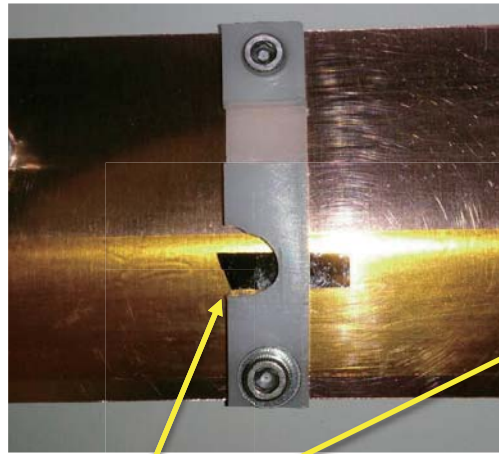
抵抗値測定結果

30mA RRR

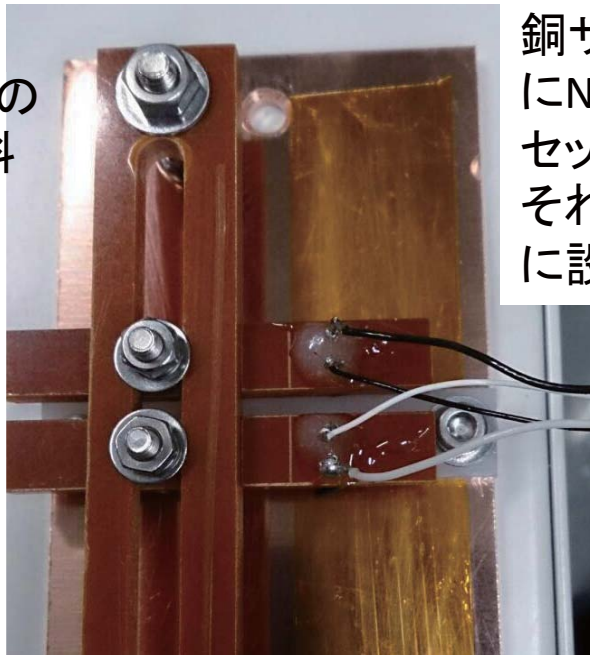


(3-c)

NbN Thin-film 試料の超伝導転移計測



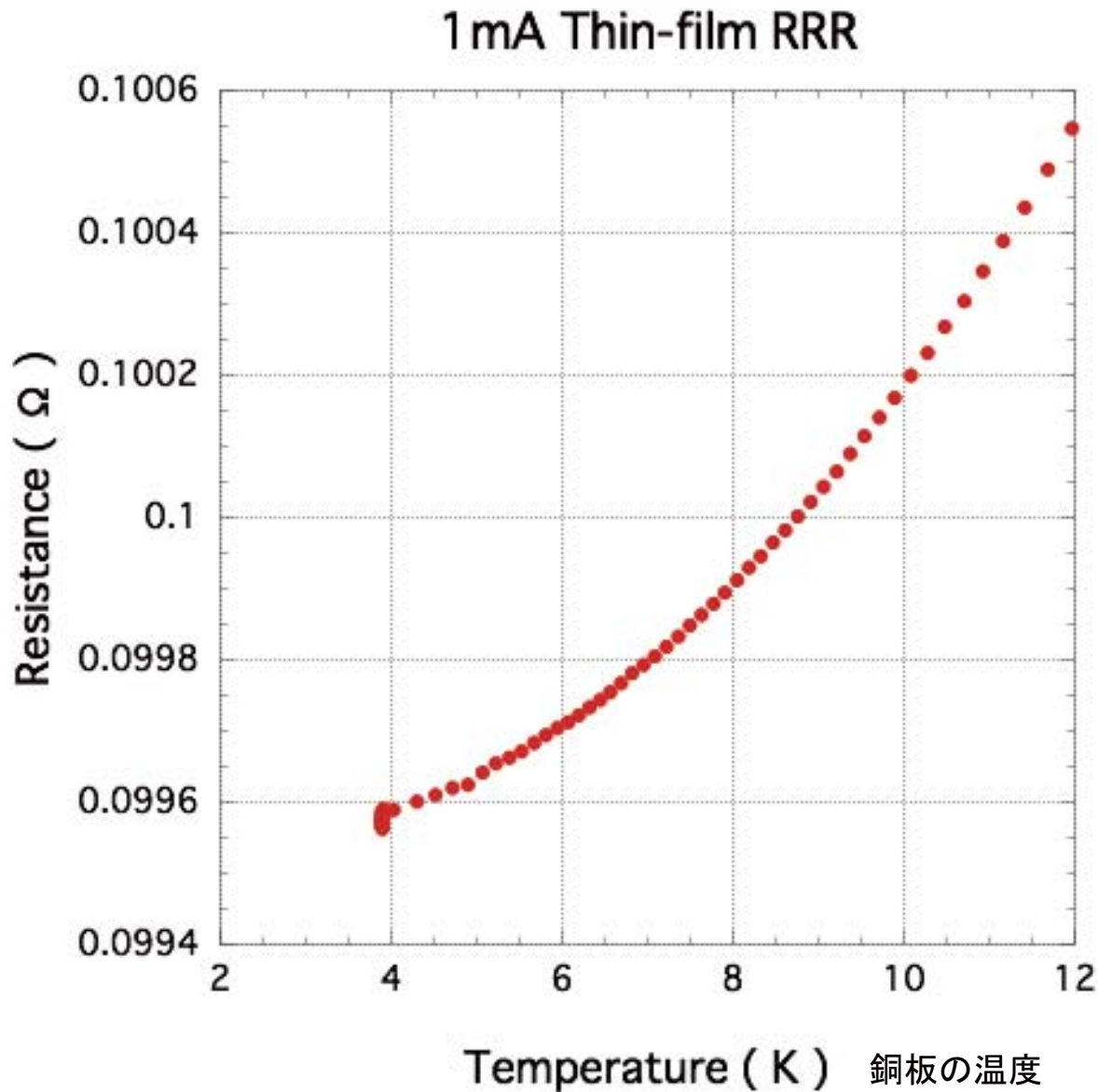
Siウェハー上の
NbN薄膜試料
(200nm)



銅サブプレート上
にNbN試料計測
セットを組み、
それを冷却銅板
に設置

(3-c)

NbN試料の冷却温度に対する抵抗値の変化



$T_c(\text{NbN}) = 16.2\text{K}$

超伝導転移が
見られなかった！

NbNが冷えていない
可能性あり

終わり

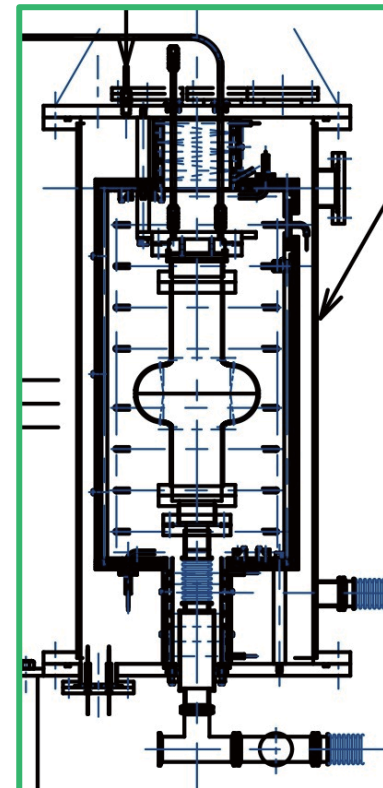
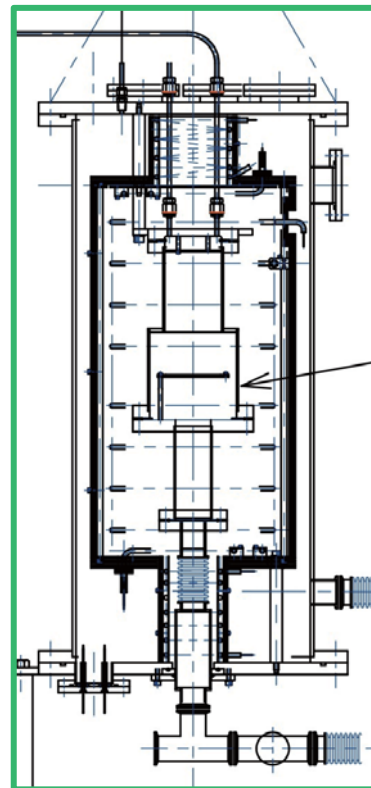
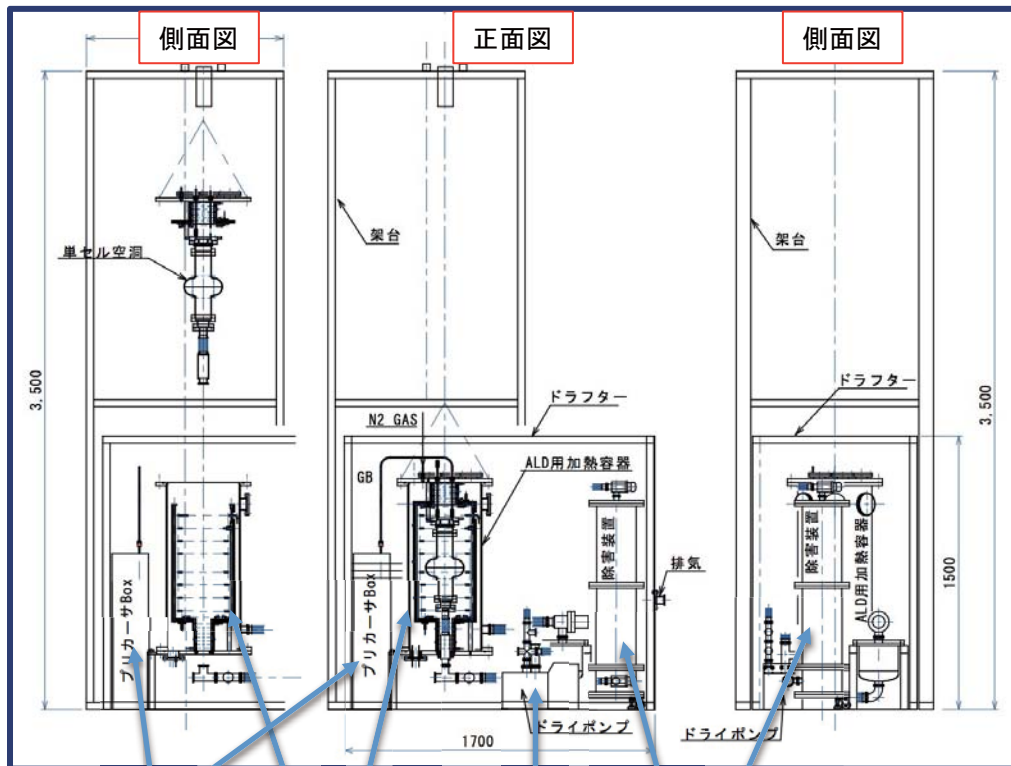
以降、参考資料(前回以前の装置説明資料)

ALD装置の計画 1

本研究計画で最終型とする薄膜生成システム
(既製品は高額なので、手作りで組み立てる)

サンプルへの
成膜の場合

単空洞への
成膜の場合



プリカーサーBox

ドライポンプ

除外装置

成膜チェンバー
(真空、加熱容器)

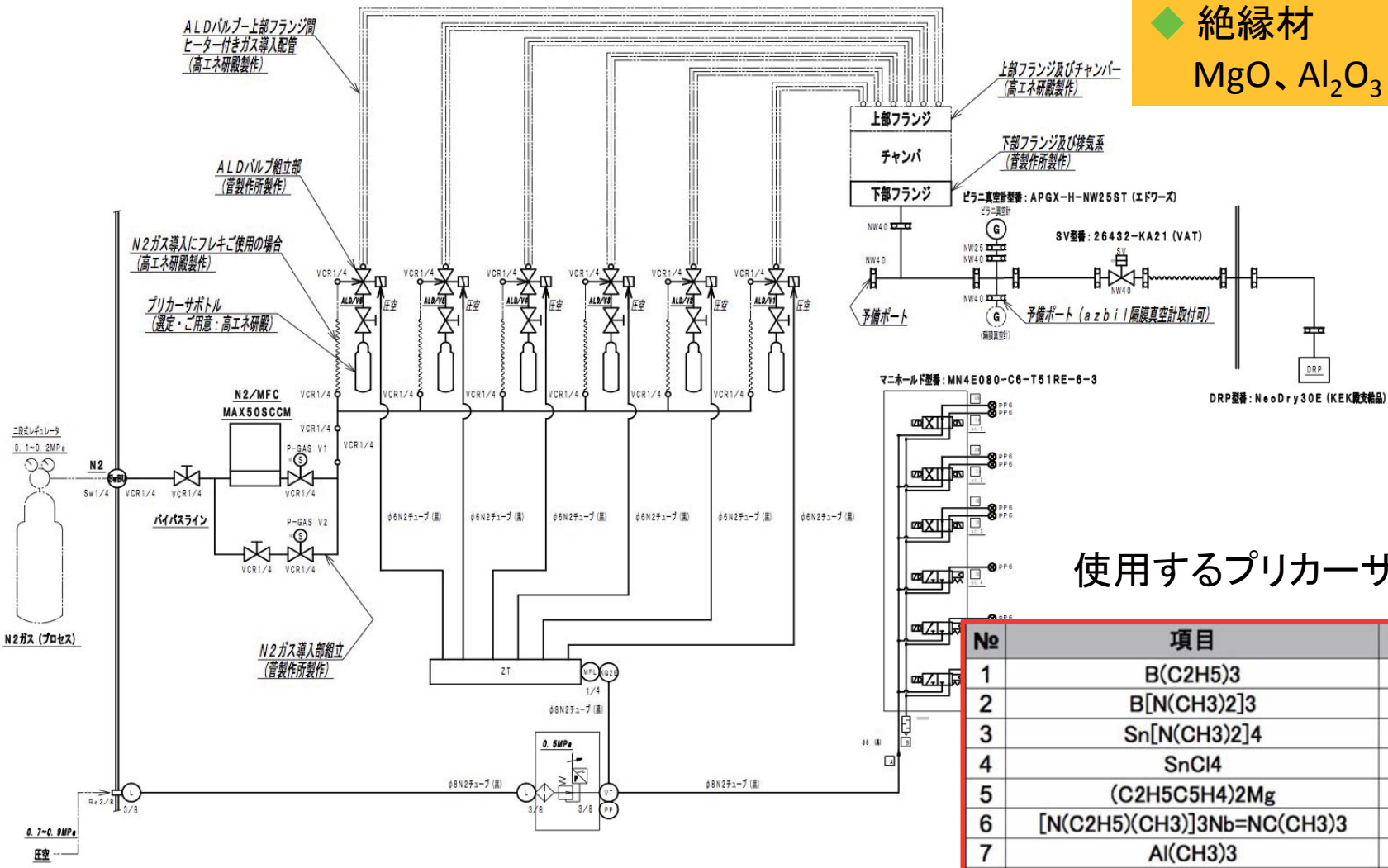
成膜チェンバーの拡大図

ALD装置の計画 3

多数のガスのフロー制御の概念構成図

目的の成膜構造

- ◆ high T_c材
MgB₂、Nb₃Sn、(NbN)
- ◆ 絶縁材
MgO、Al₂O₃



使用するプリカーサー(ガス)

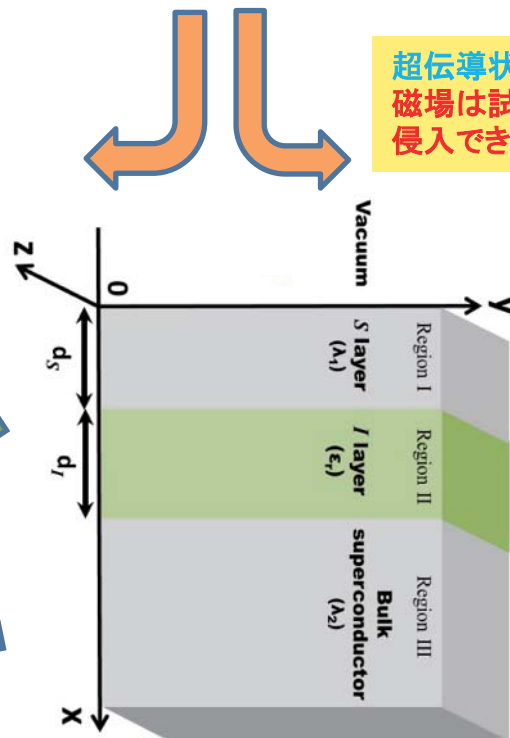
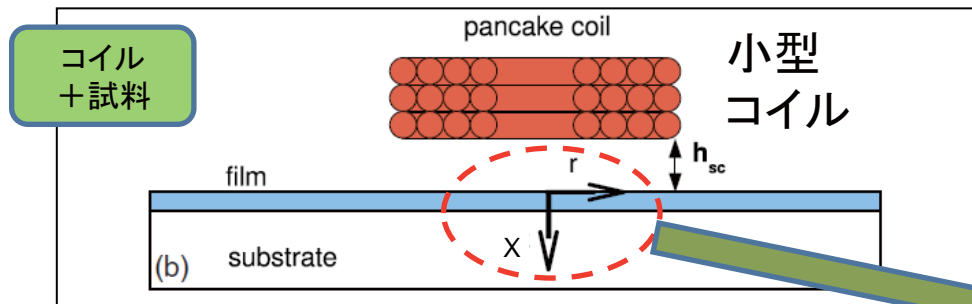
No	項目	数量	単位
1	B(C ₂ H ₅) ₃	25	g
2	B[N(CH ₃) ₂] ₃	25	g
3	Sn[N(CH ₃) ₂] ₄	25	g
4	SnCl ₄	25	g
5	(C ₂ H ₅ C ₅ H ₄) ₂ Mg	25	g
6	[N(C ₂ H ₅)(CH ₃) ₃] ₃ Nb=NC(CH ₃) ₃	25	g
7	Al(CH ₃) ₃	25	g

薄膜構造による高い下部臨界磁場 (B_{c1}) の測定装置

小型コイルに数kHzの交流電流を流して磁場 B を発生・変化させる。同時に試料からの誘導磁場によるコイル電圧 V (3次高調波)を測定する。温度 T を極低温で変化させて、この測定を繰り返す。

小型コイルによる磁場 B

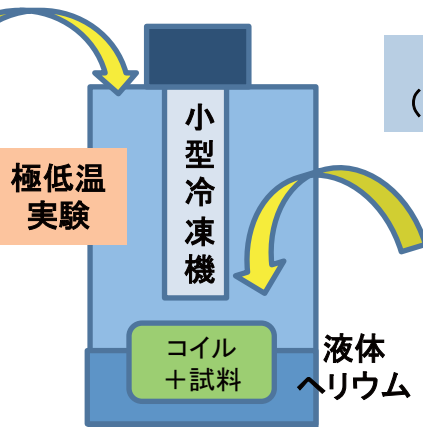
超伝導状態:
磁場は試料内に侵入できない。



試料表面に多層膜構造



小型冷凍機
(既存)



小型クライオスタット
(必要)

多層膜試料
(ALD法で製作)



各温度 T で、コイル磁場が下部臨界磁場 B_{c1} に達すると、試料の超伝導が破れ、コイル磁場が試料に侵入する。この時、コイル電圧の変化(ΔV)が観測される。 B_{c1} (T)の測定!

実験セットアップ全体を収める小型クライオスタットの設計・製造を予定

下部臨界磁場 (B_{c1}) を測定するクライオスタット (予定)

磁場印可用小型コイルによる
下部臨界磁場測定セットアップ

マッシュルーム型RF空洞による
下部臨界磁場測定セットアップ

設計・製作中の
クライオスタット
(1台)

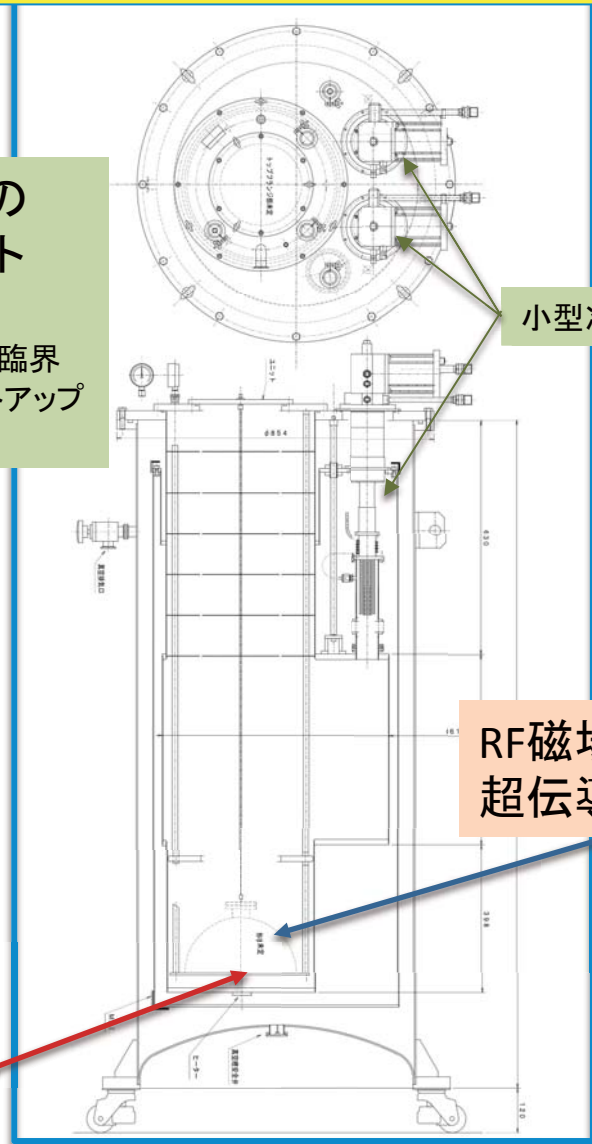
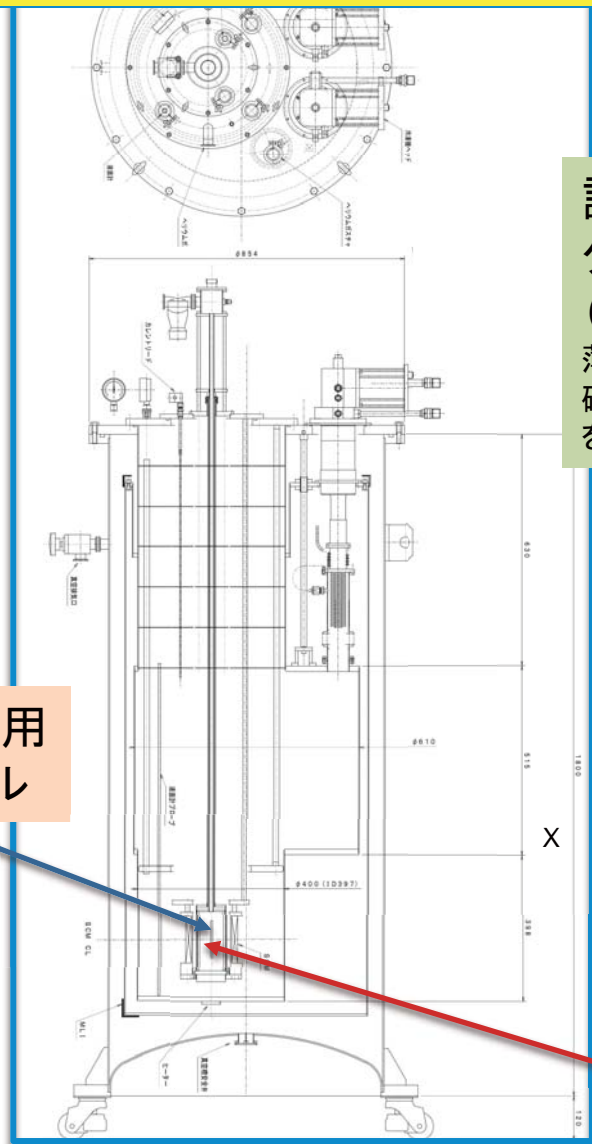
薄膜サンプルの下部臨界
磁場を計測するセットアップ
を準備中

小型冷凍機(2台)

磁場印加用
小型コイル

RF磁場印加用
超伝導空洞

サンプル

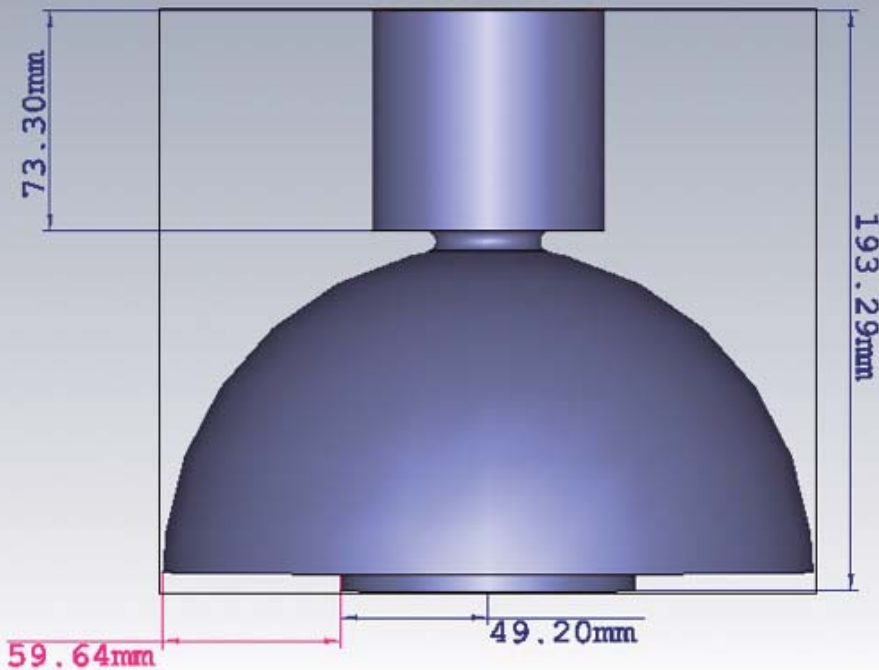


RF下部臨界磁場(B_{c1})計測用RF空洞の設計

3.9GHz マッシュルーム型RF空洞を使用予定

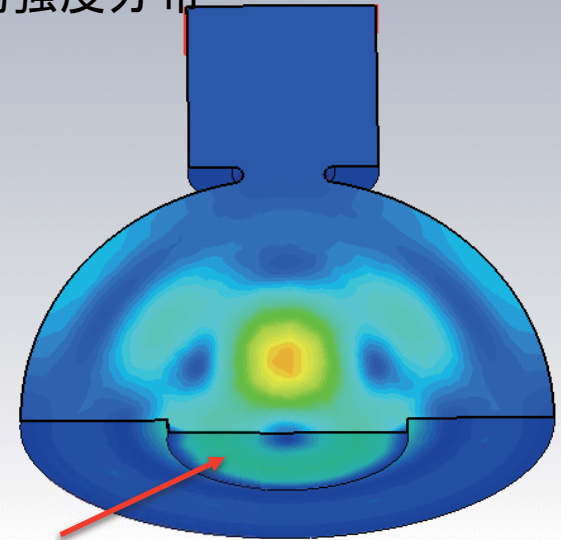
サンプル面に強い磁場、その他の面は弱い磁場
Nb製空洞(壁損失を減らす)

小型クライオスタットに入る大きさ→3.9GHzを選択



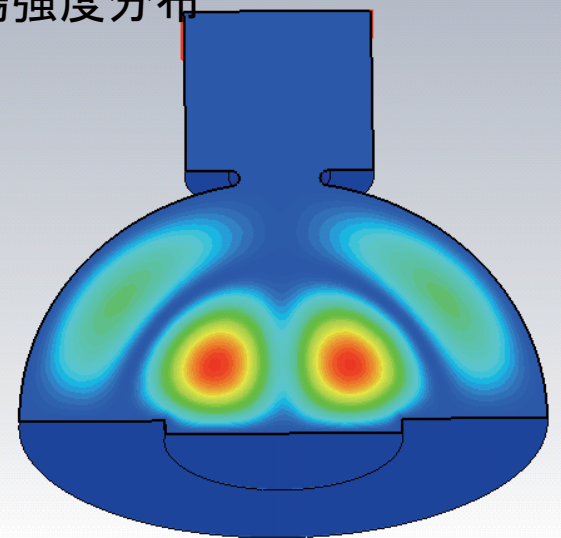
最適化設計中

磁場強度分布

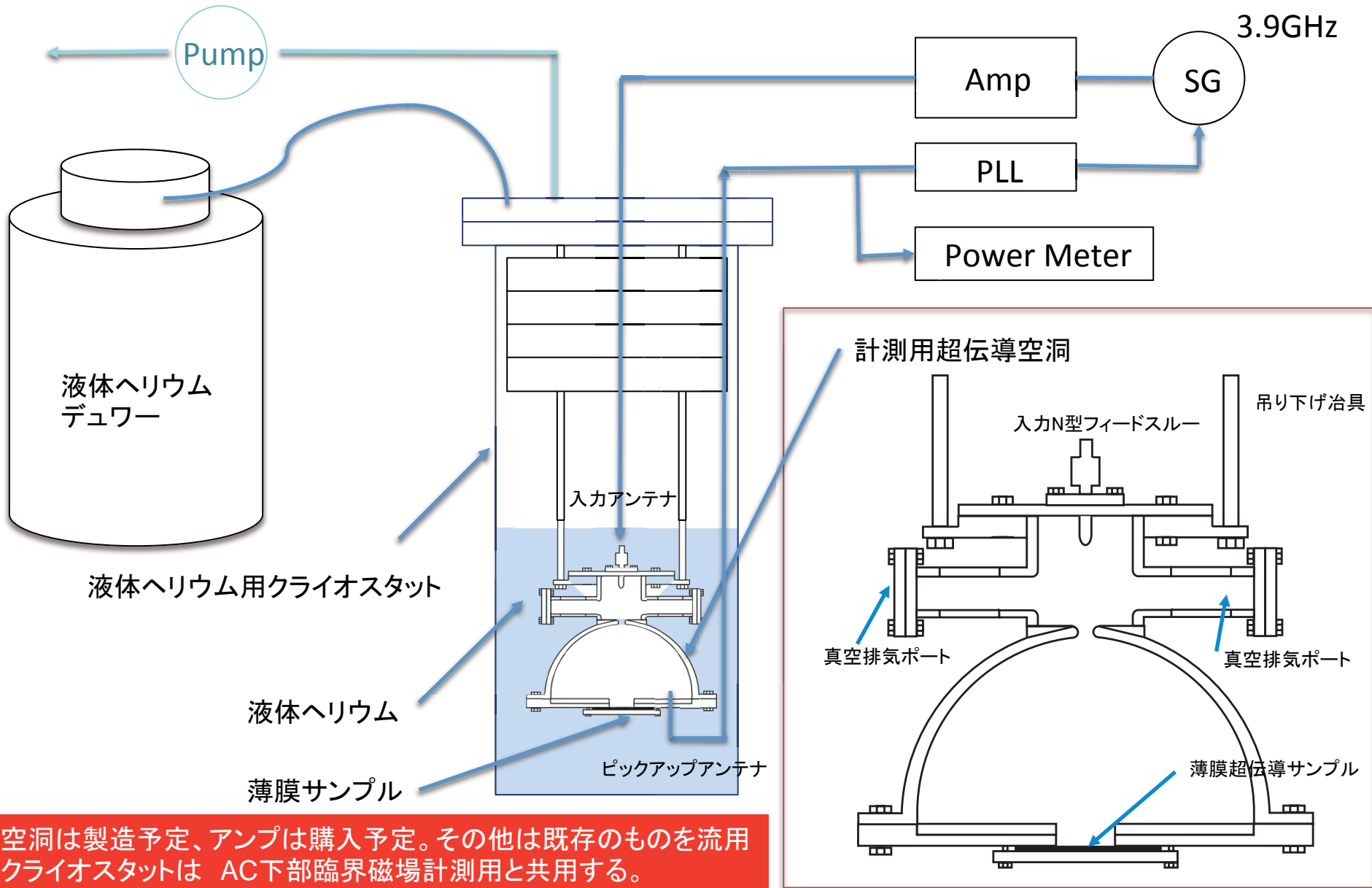


サンプル面に強い磁場

電場強度分布

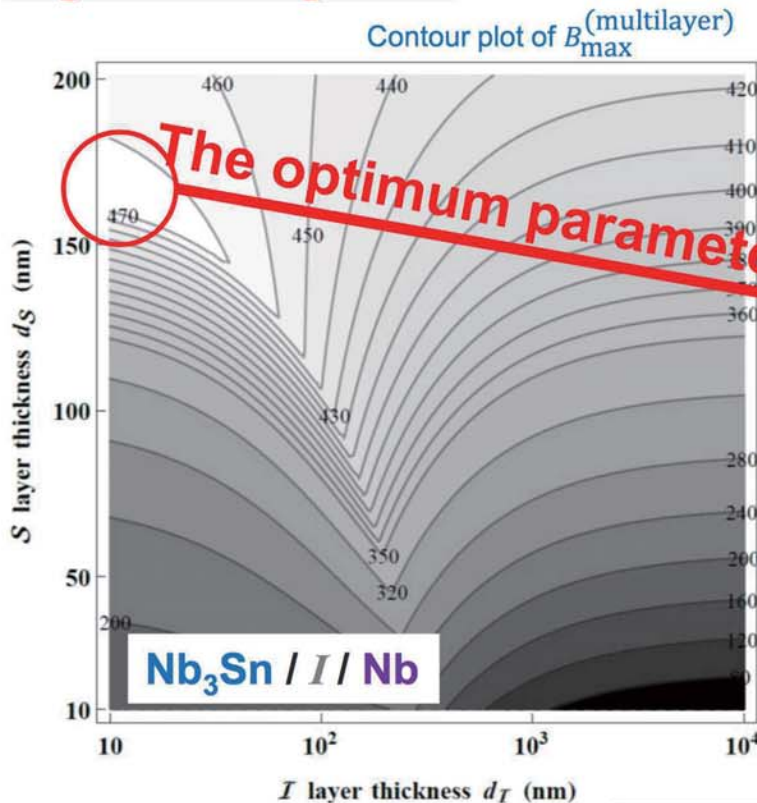


RF下部臨界磁場 (B_{c1}) を測定するセットアップ (予定)

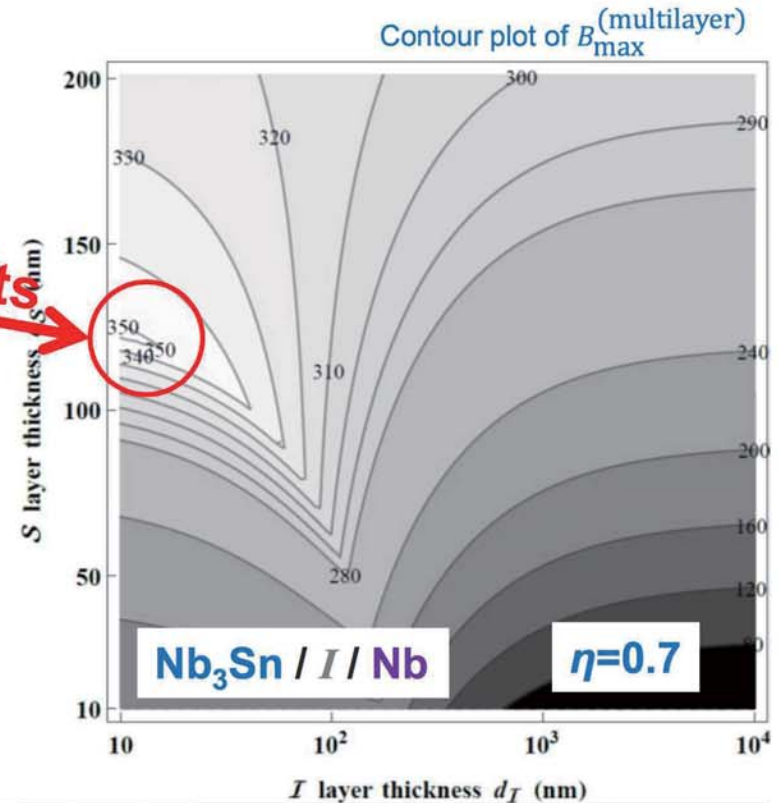


多層薄膜の理論的研究

The optimum thickness becomes thin in order to compensate **the suppressed superheating field.**



Optimum $d_s \sim 170\text{nm}$
Maximum field $\sim 470\text{mT}$



Optimum $d_s \sim 130\text{nm}$
Maximum field $\sim 350\text{mT}$

assumption
 S layer: Nb_3Sn (moderately dirty)
 $B_c^{(\text{Nb}_3\text{Sn})} = 540\text{mT}$
 $\lambda_1 = \lambda^{(\text{Nb}_3\text{Sn})} = 120\text{nm}$
 SC substrate: clean Nb
 $B_{\max}^{(\text{Nb})} = B_{c1}^{(\text{Nb})} = 170\text{mT}$
 $\lambda_2 = \lambda^{(\text{Nb})} = 40\text{nm}$

マイクロな表面凹凸を組み入れ
 現実の到達臨界磁場を計算