

# 超伝導高周波加速空洞高電界化の新技術 の開発



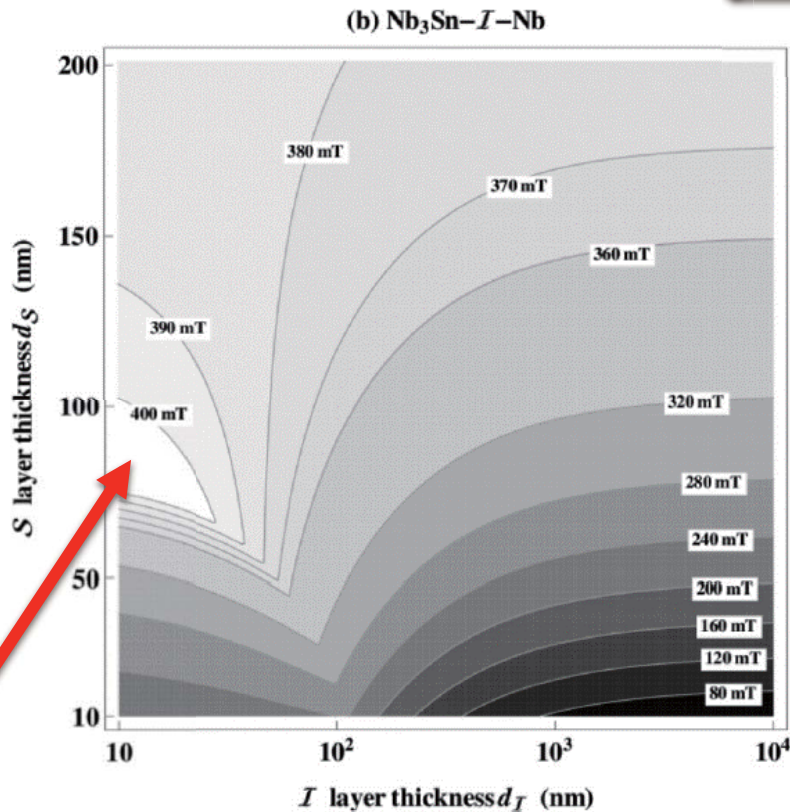
従来の加速空洞では加速勾配  $40\sim 50$  MV/mが限界

10062015 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

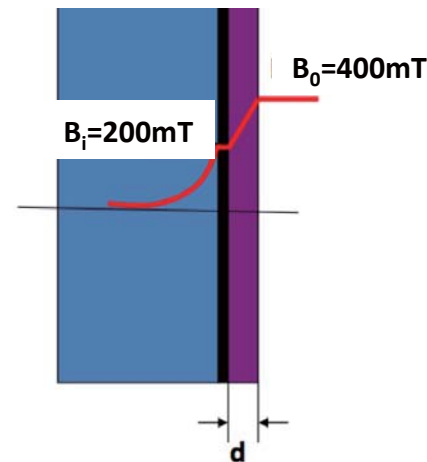
超伝導体多層薄膜を使えば、渦糸雪崩を防ぎ下部臨界磁場を越えてsuperheating fieldまでfieldを上げられると期待されて、更に薄膜の厚み $d_s$ が磁場侵入深さ $\lambda$ 程度以下の時、Superheating fieldが増加することが理論的に示されている(2013, Kubo, Iwashita, Saeki)。



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 $400\text{mT}$ の強さまで耐えられる。

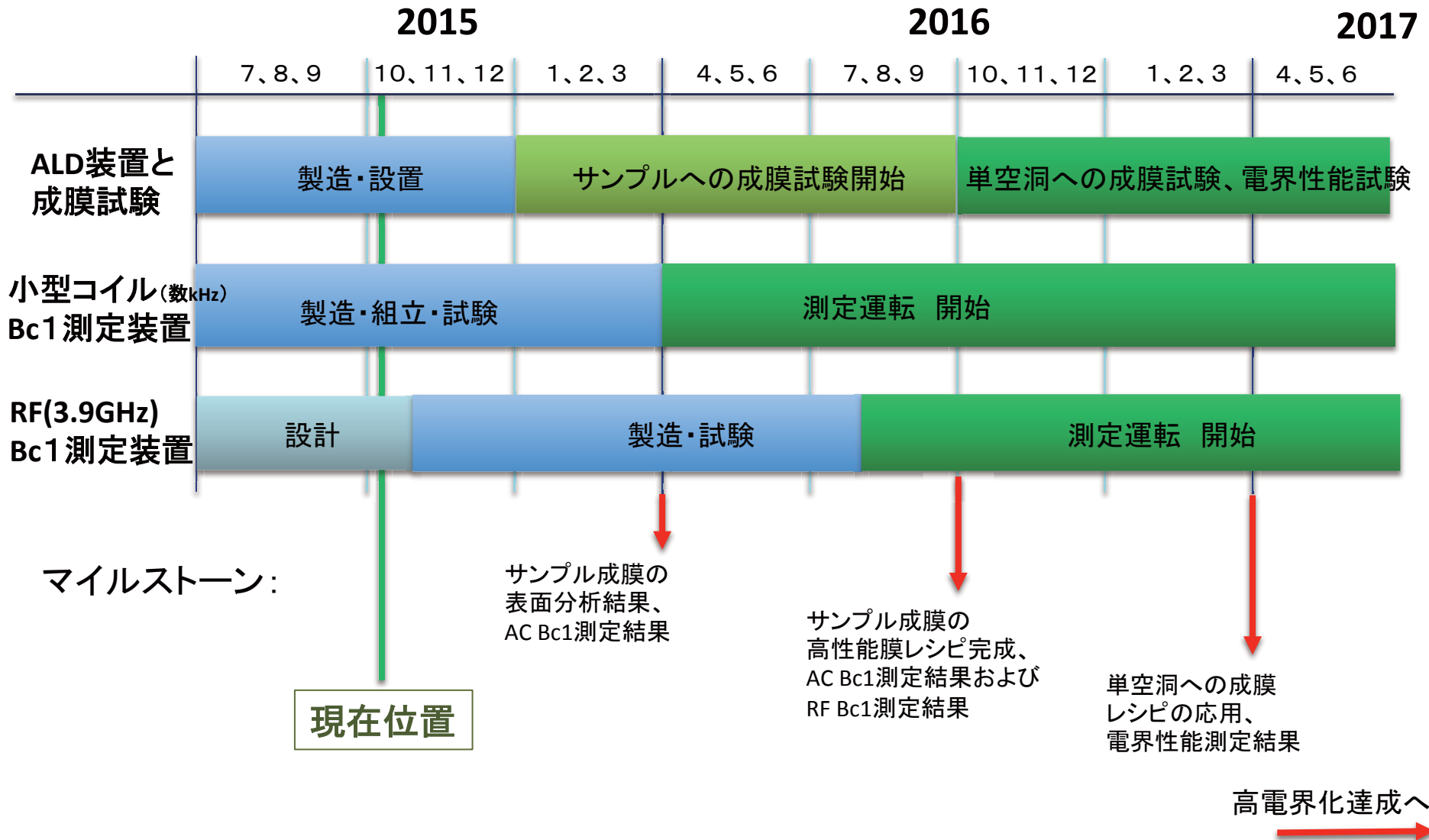
超伝導加速空洞に大きなパワーを入れる事ができる。すなわち、**高電界化**が可能となる。

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、 $100\text{MV/m}$ 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

London理論を使って多層膜の最大到達fieldや最適パラメータを見積もっていたが、 $T \ll T_c$ においては定量的に信頼できるものではなく、これに準古典理論による計算結果を組み合わせることで $T \ll T_c$ でも信頼できる定量的な理論へと発展させた。その上で表面の数十nmの凹凸による補正も加え、現在最も進んだ多層膜超伝導体の理論を得ている。

## (2) ALD成膜装置の開発

各パーツの手配中(未納)。12月末までに組み上げる予定。

## (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

測定空洞の詳細設計中。アルミモデルで評価の後、プレス工法でニオブモデルを製作予定。

### (c) 超伝導転移計測装置 (RRR計測)

計測装置を組み上げ中であり、7Kまでの低温運転試験を行ったところ。4Kまで到達できるように熱シールドを追加開発中。

# 超伝導転移計測装置 (RRR計測)

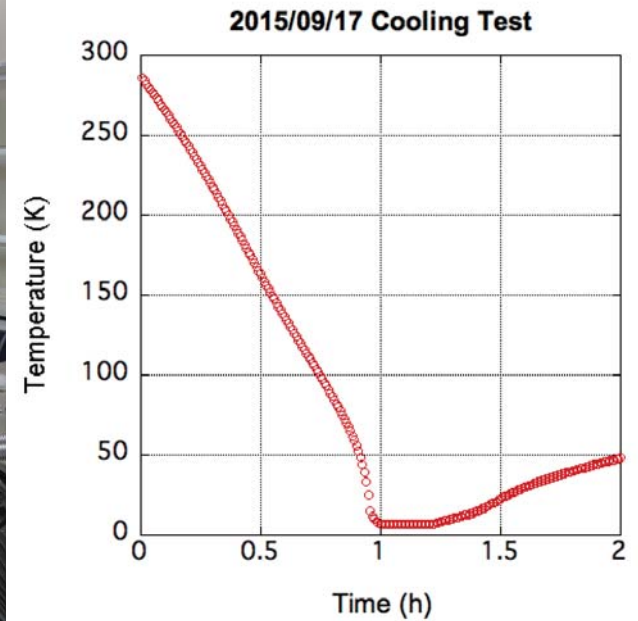
小型冷凍機ヘッドにサンプルを取り付け、RRRを計測する装置



装置の全体写真



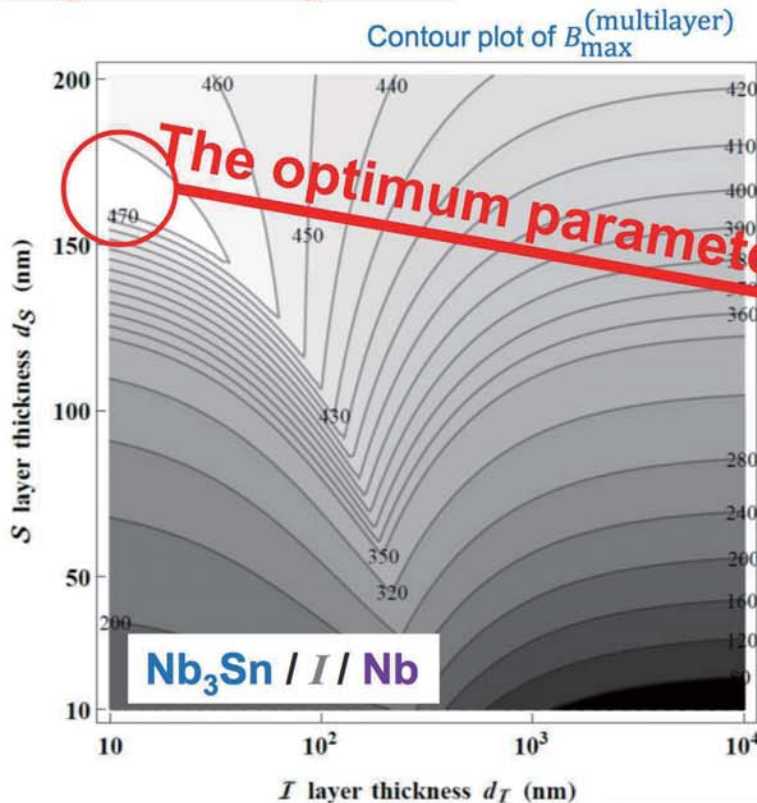
冷凍機ヘッドを引き上げた時の写真



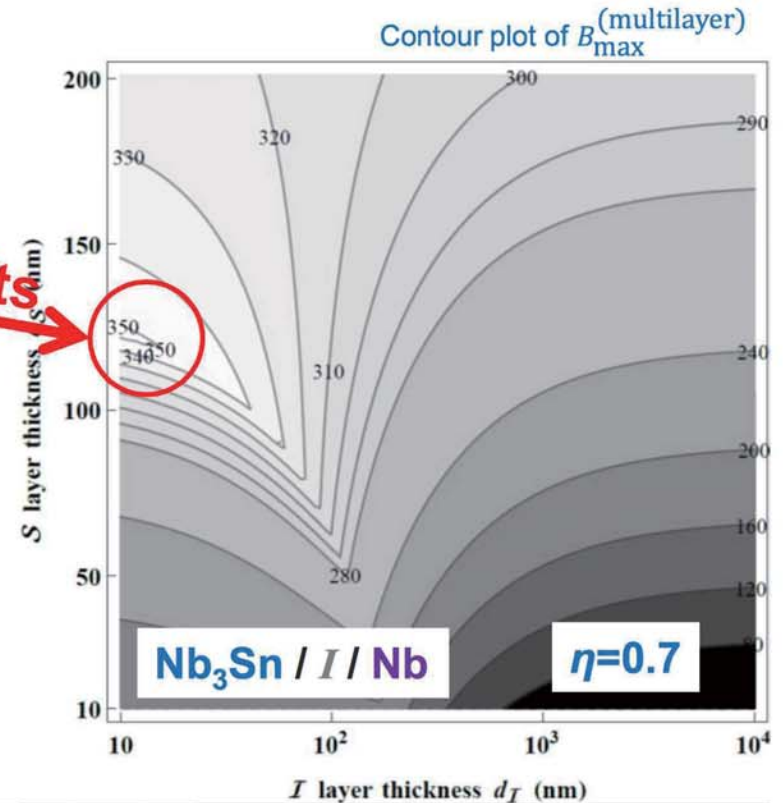
7Kまで1時間で冷却

# 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:  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  (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  $\text{Nb}$   
 $B_{\max}^{(\text{Nb})} = B_{c1}^{(\text{Nb})} = 170\text{mT}$   
 $\lambda_2 = \lambda^{(\text{Nb})} = 40\text{nm}$

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

終わり

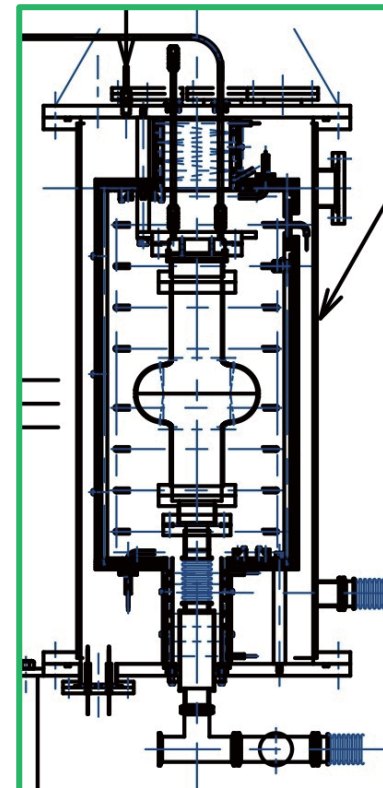
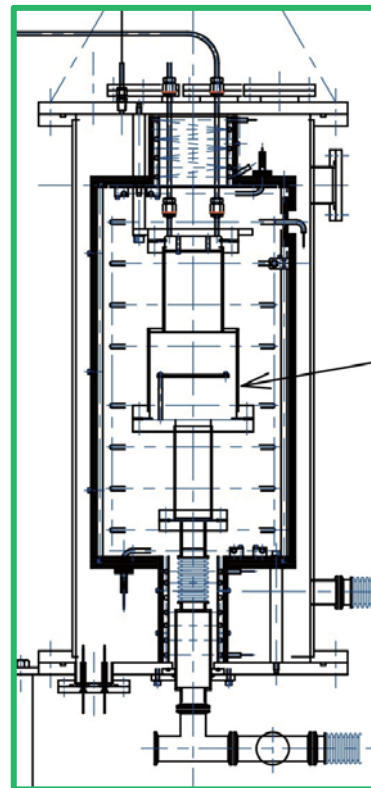
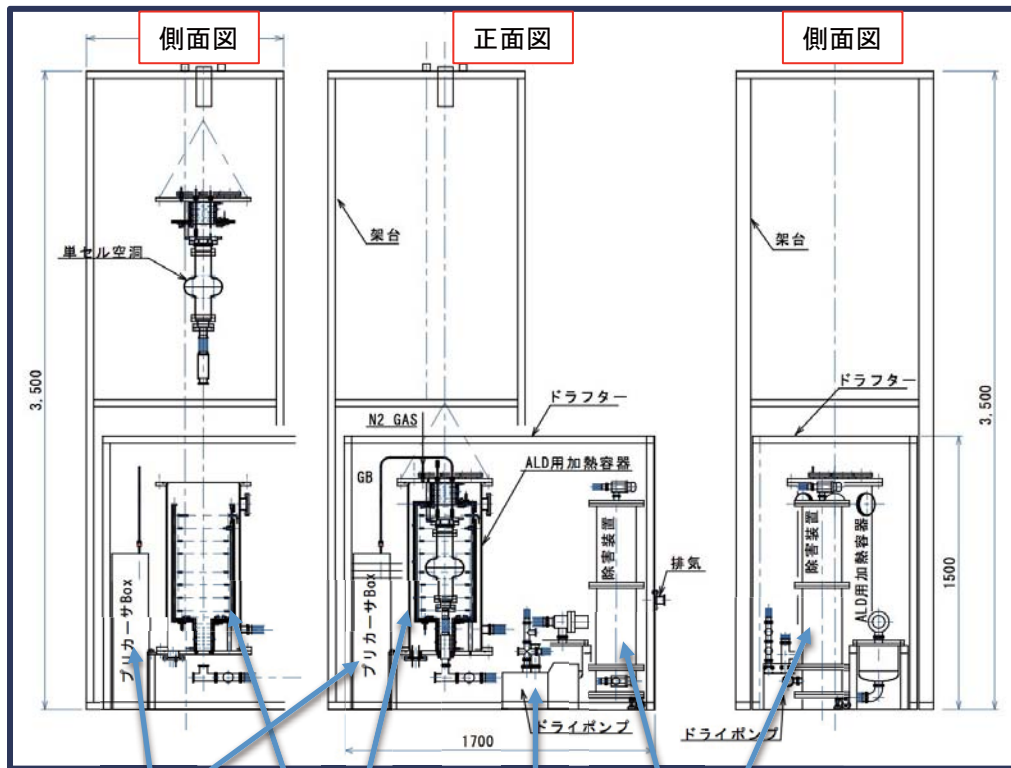
以降、参考資料(前回の装置説明資料)

# 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

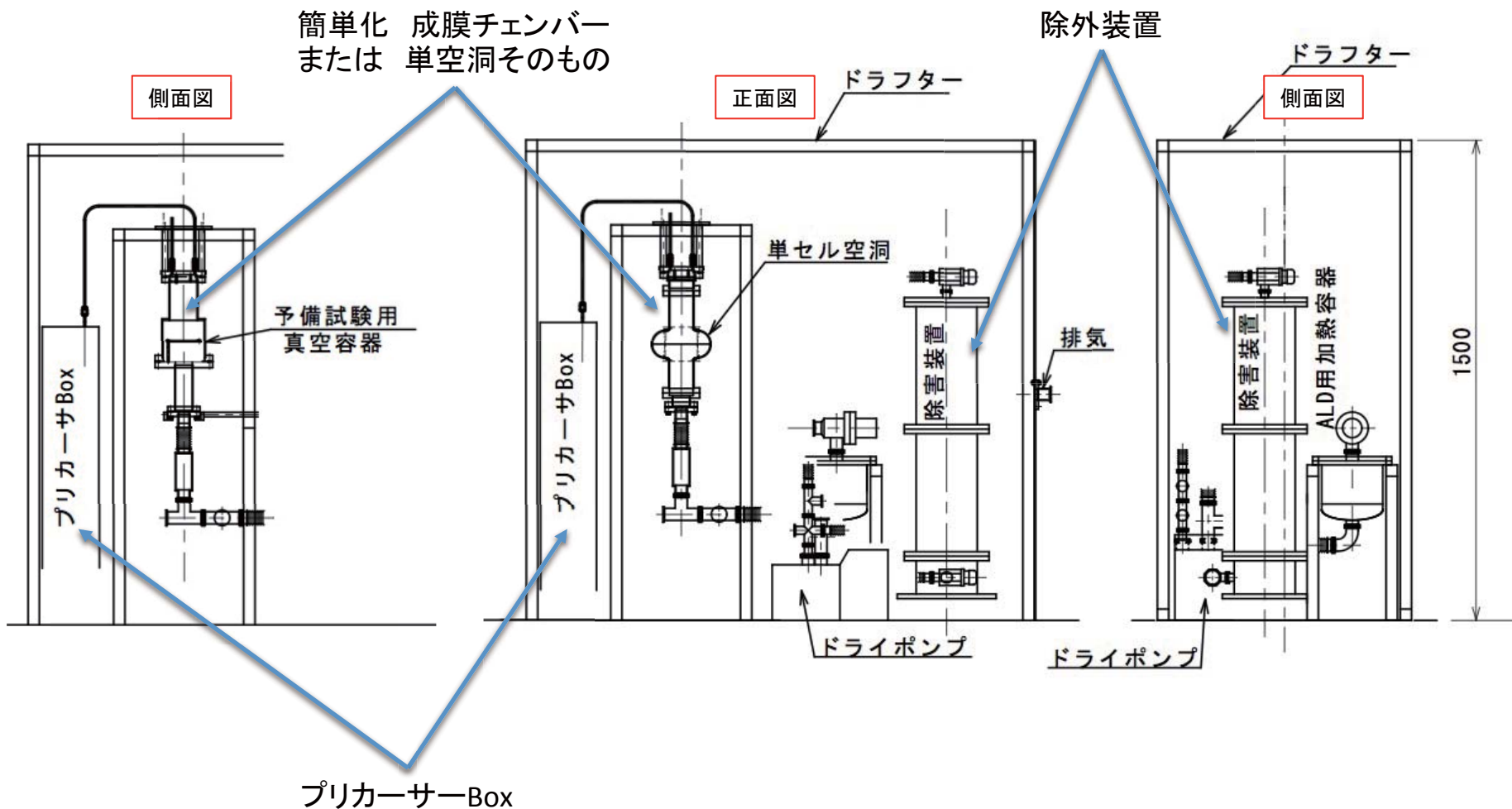
成膜チェンバー  
(真空、加熱容器)

成膜チェンバーの拡大図



## ALD装置の計画 2

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。)



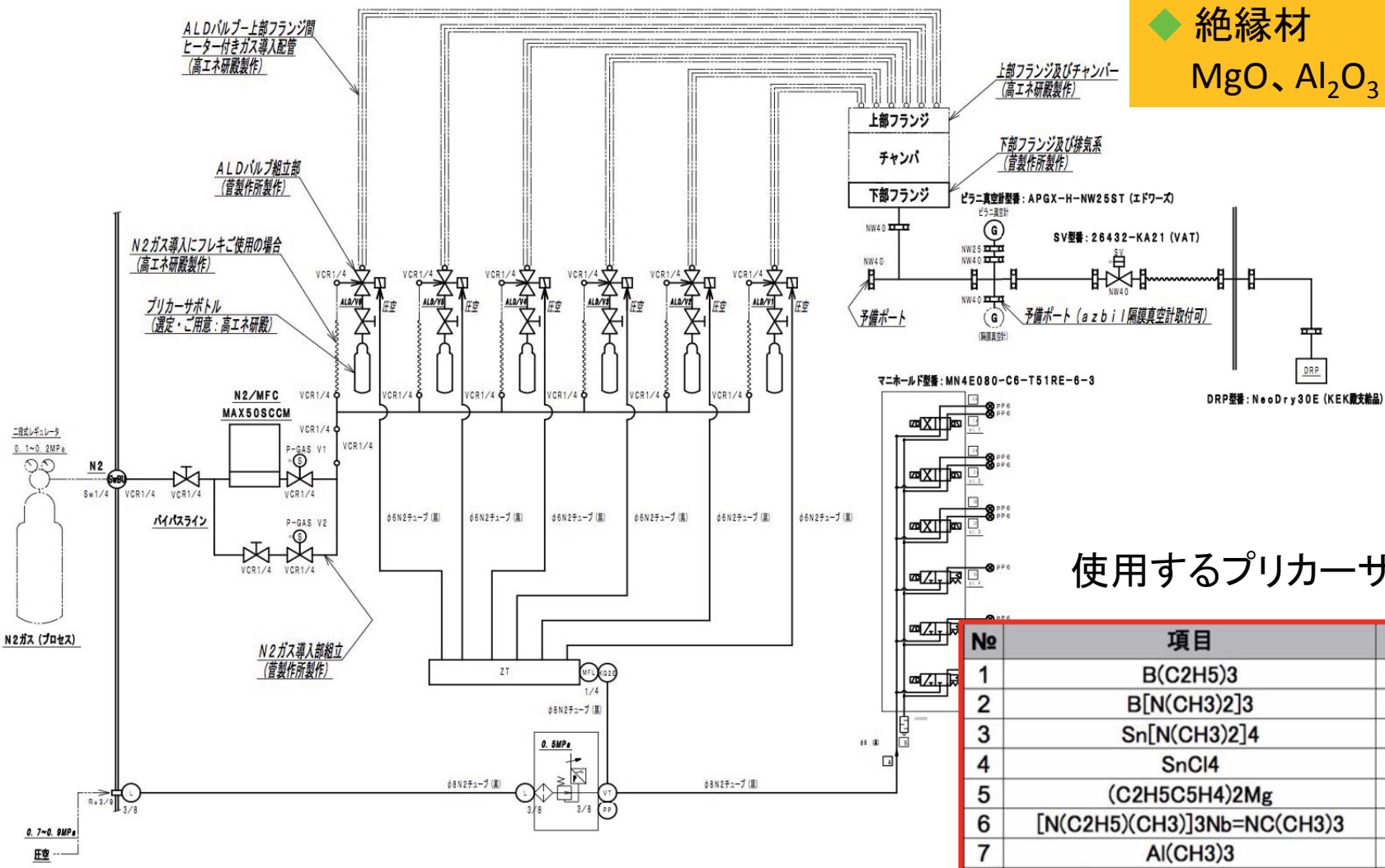
この簡易化成膜装置を、ばらばらで購入し自作で組み上げる。この時、できるだけ既存のものを流用

# 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<sub>c</sub>材  
MgB<sub>2</sub>、Nb<sub>3</sub>Sn、(NbN)
- ◆ 絶縁材  
MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



## 使用するプリカーサー(ガス)

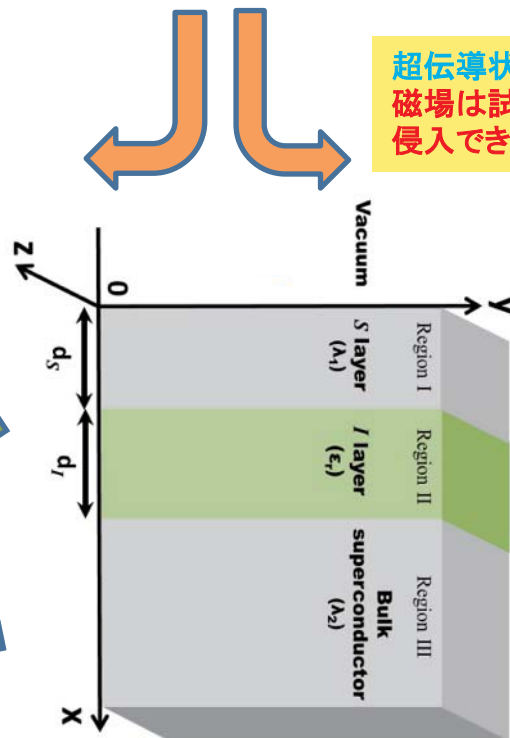
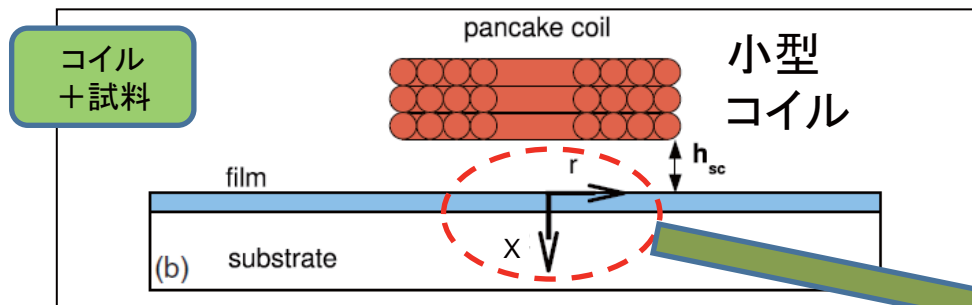
No	項目	数量	単位
1	B(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub>	25	g
2	B[N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ] <sub>3</sub>	25	g
3	Sn[N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ] <sub>4</sub>	25	g
4	SnCl <sub>4</sub>	25	g
5	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Mg	25	g
6	[N(C <sub>2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

# 薄膜構造による高い下部臨界磁場 ( $B_{c1}$ ) の測定装置

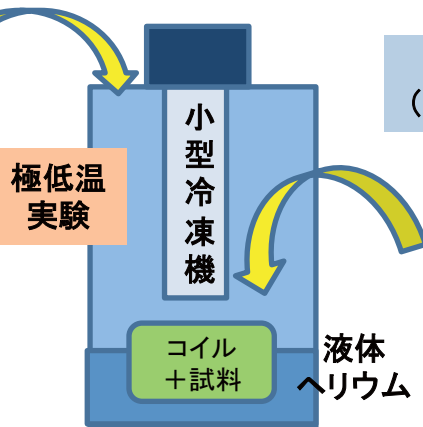
小型コイルに数kHzの交流電流を流して磁場 $B$ を発生・変化させる。同時に試料からの誘導磁場によるコイル電圧 $V$ (3次高調波)を測定する。温度 $T$ を極低温で変化させて、この測定を繰り返す。

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。



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)



試料表面に多層膜構造

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( $\Delta V$ )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)

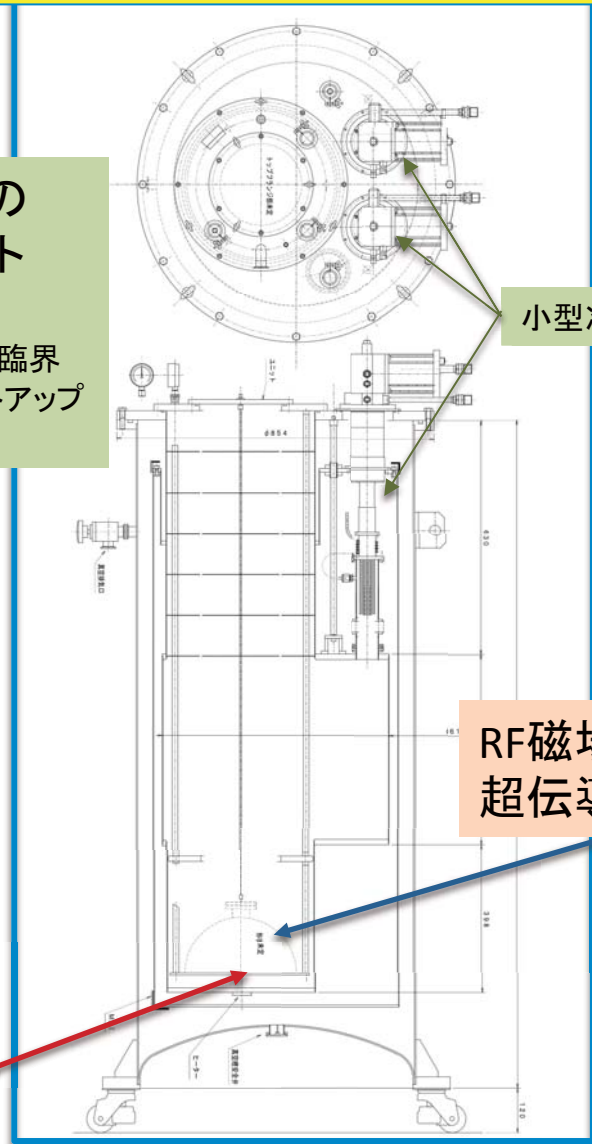
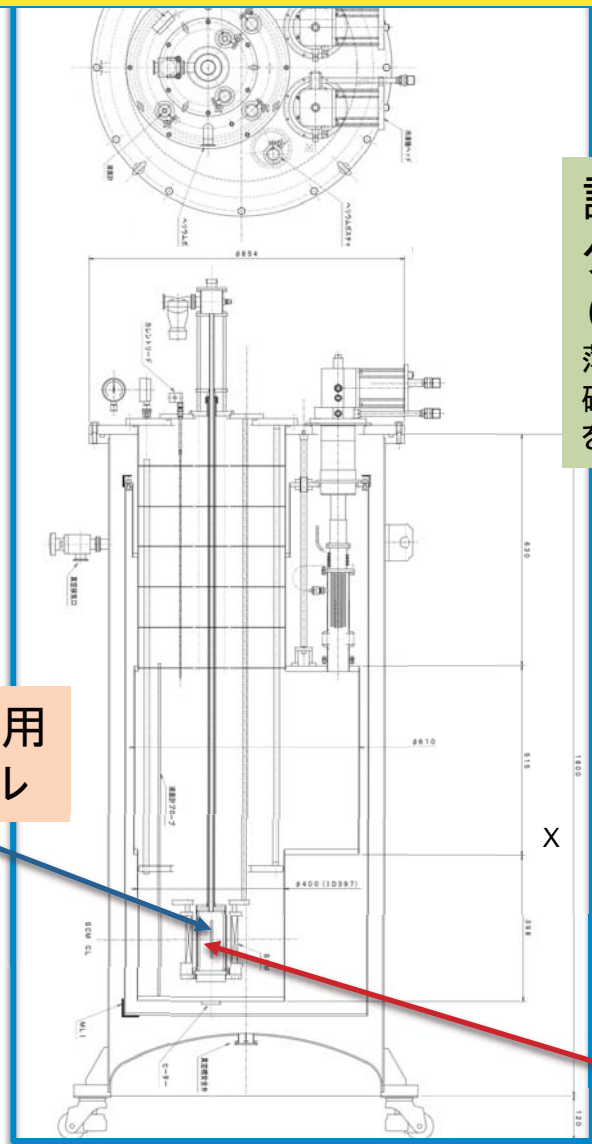
薄膜サンプルの下部臨界  
磁場を計測するセットアップ  
を準備中

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

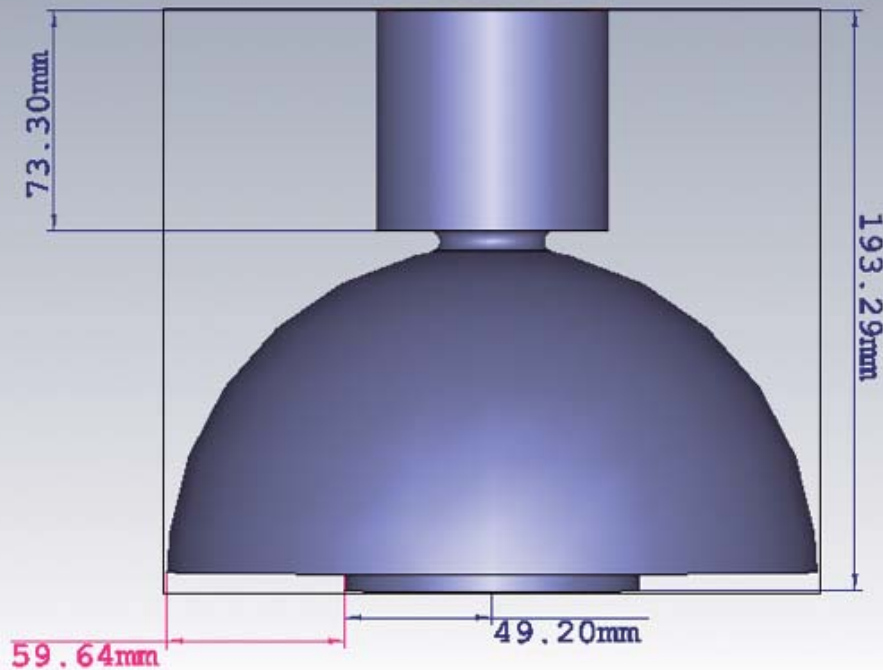


# RF下部臨界磁場( $B_{c1}$ )計測用RF空洞の設計

## 3.9GHz マッシュルーム型RF空洞を使用予定

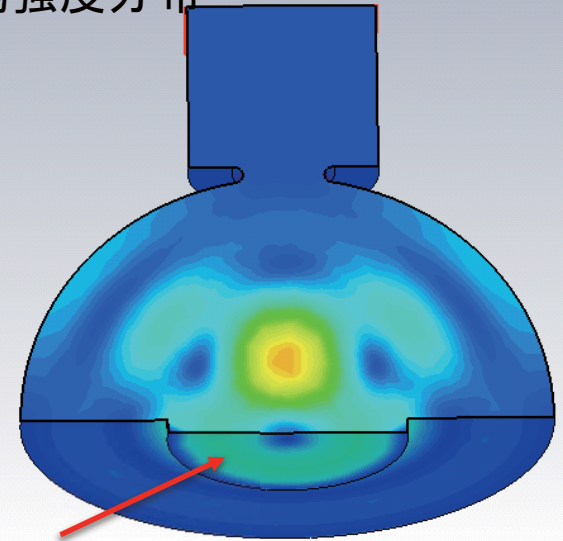
サンプル面に強い磁場、その他の面は弱い磁場  
Nb製空洞(壁損失を減らす)

小型クライオスタットに入る大きさ→3.9GHzを選択



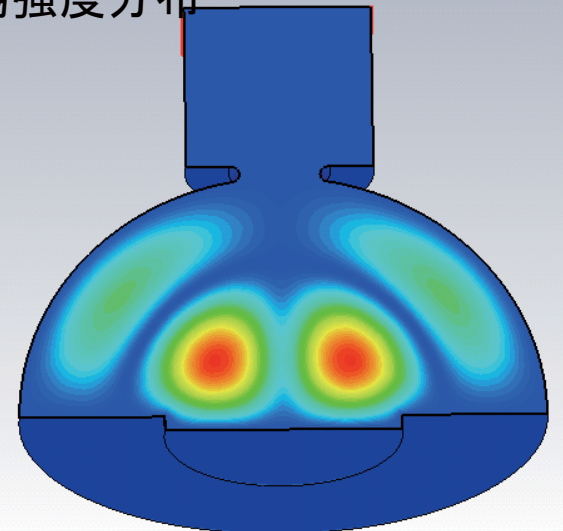
最適化設計中

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)

