

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

07072015 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

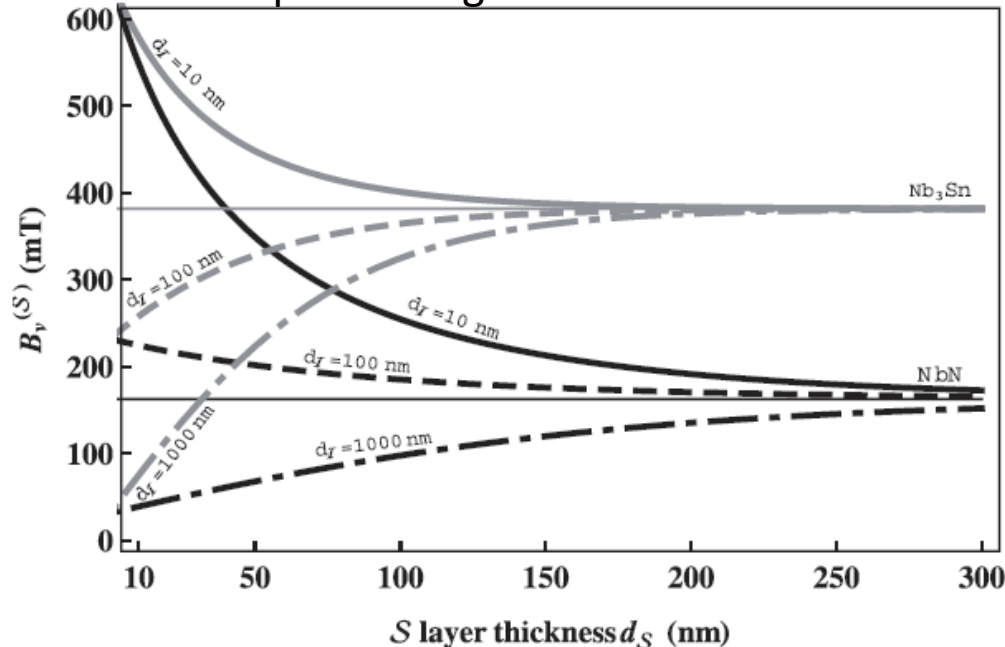
超伝導体多層薄膜を使えば、渦糸雪崩を防ぎ下部臨界磁場を越えてsuperheating fieldまでfieldを上げられると期待されている(2006, Gurevich)。更に、薄膜の厚み d_s が磁場侵入深さ λ 程度以下の時、Superheating fieldが増加することが理論的に示されている(2013, Kubo, Iwashita, Saeki)。



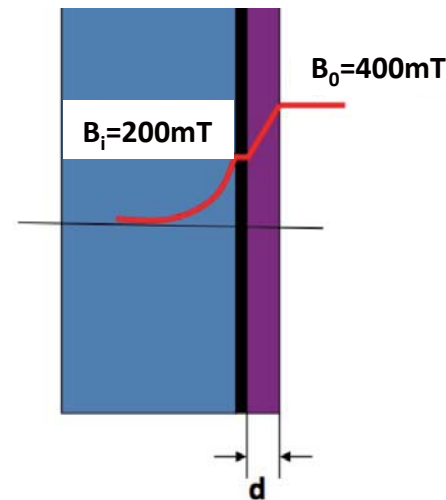
超伝導加速空洞に大きなパワーを入れる事ができる。すなわち、**高電界化が可能となる。**

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。

Superheating field enhancement



T.Kubo, Y.Iwashita, and T.Saeki,
Appl. Phys. Lett. 104, 032603 (2014)



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。

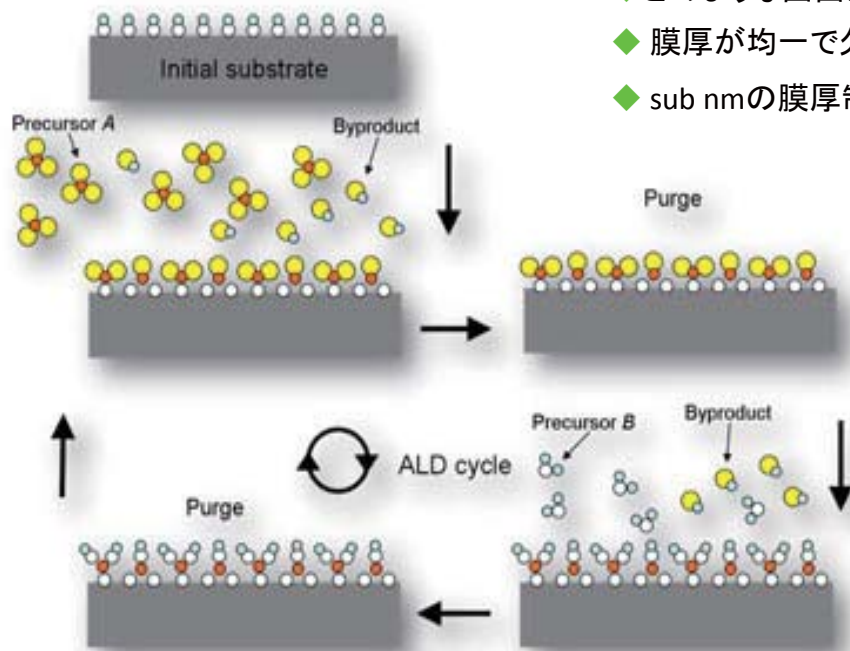
1層の Nb_3Sn 薄膜コーティングでもポルテックス侵入によるブレークダウン限界を2倍以上上げれる。すなわち、 100MV/m で加速器運転が可能

超伝導薄膜を高純度ニオブ単結晶サンプルに生成

Atomic layer deposition (ALD、原子層堆積法)を使用して、サンプル表面に薄膜を積層生成する。

なめらかな基板にALD法で成膜すると、現在薄膜生成時に問題となっている点を解決できる。

- ◆ どのような曲面にも成膜可能。
- ◆ 膜厚が均一で欠陥が生じにくい。
- ◆ sub nmの膜厚制御が可能。



◆ 工程

- ① 材料gas A (蒸気・気体の状態で、precursor: 前駆体)を投入
例 有機金属のTMA = $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$
- ② 窒素gasで、未反応気体と副生成気体をpurge
- ③ 材料gas Bを投入
例 H_2O
- ④ 窒素gasで、未反応気体と副生成気体をpurge

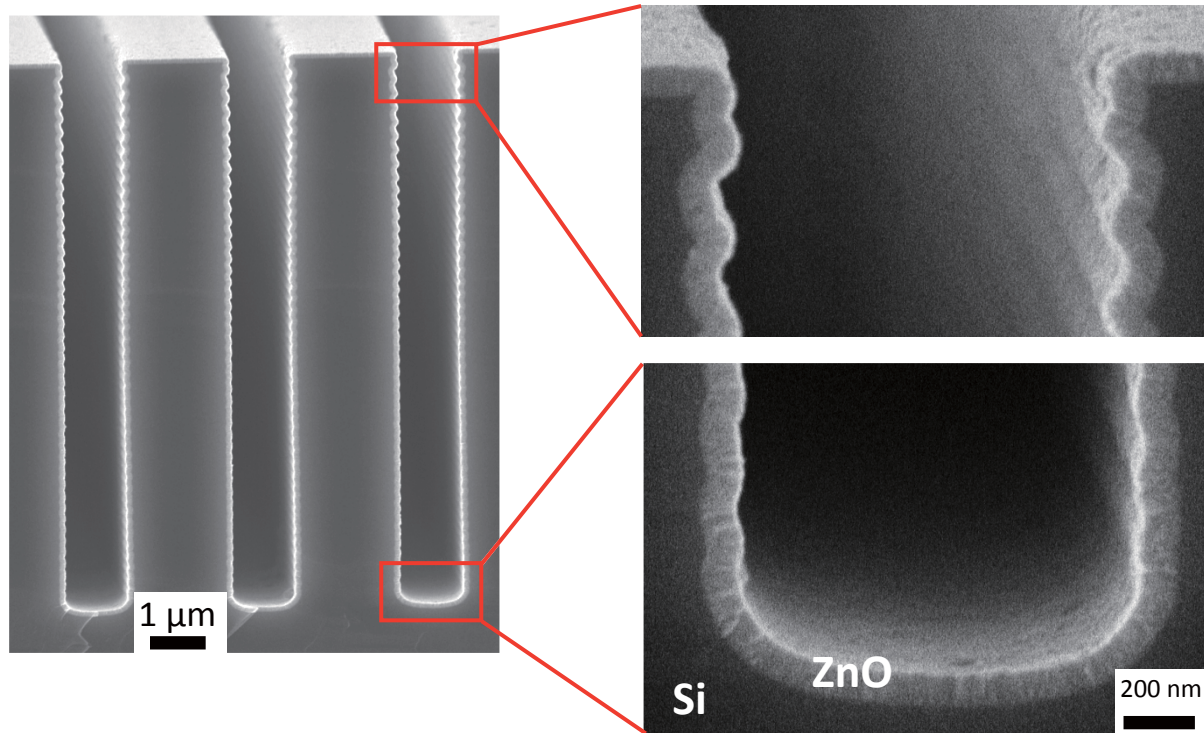
これを繰り返し、原子層を積層していく。

第1ステップとして、表面分析装置に装填可能な大きさのNbサンプル表面に薄膜を積層生成後、組成及び構造分析を行うとともに、低温時の超伝導特性を測定し、高性能な超伝導薄膜を得るための材料ガス選定、成膜条件サーチを行う。

ALDによる薄膜生成例

Atomic layer deposition (ALD、原子層堆積法)を使用した薄膜の例

*なお、この例は超伝導体薄膜ではない。



■ ALD is very good at coating non-planar surfaces

“Point Contact Tunneling as a Surface Superconductivity Probe of bulk Nb and $(\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{N}$ Thin Films”
@ 5th Thin Film workshop 2012(Jlab)

この例では、ALDは、複雑な構造体(Si)の表面に均一にZnO膜(~100nm)を生成できる。

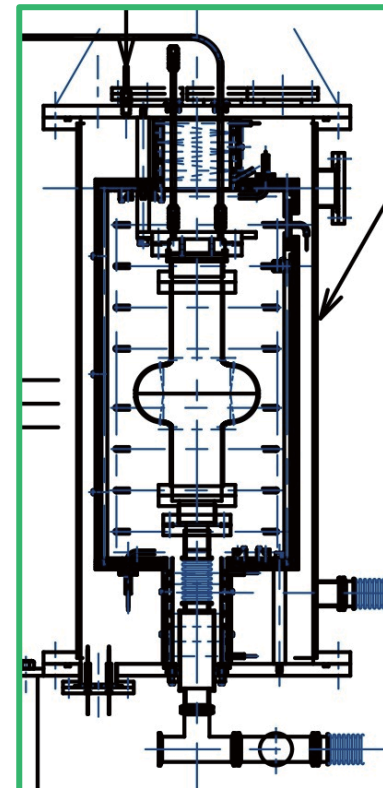
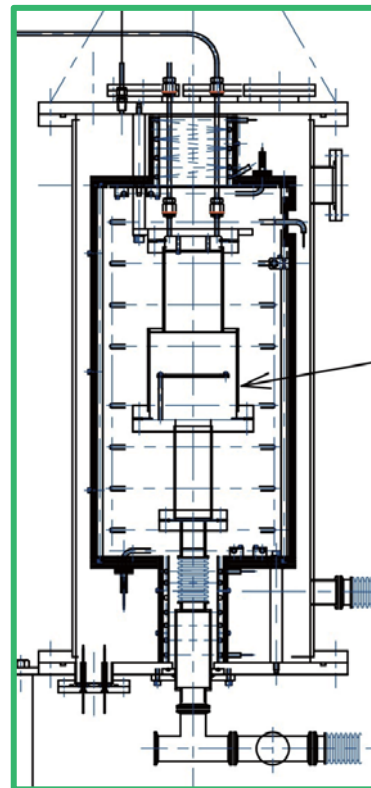
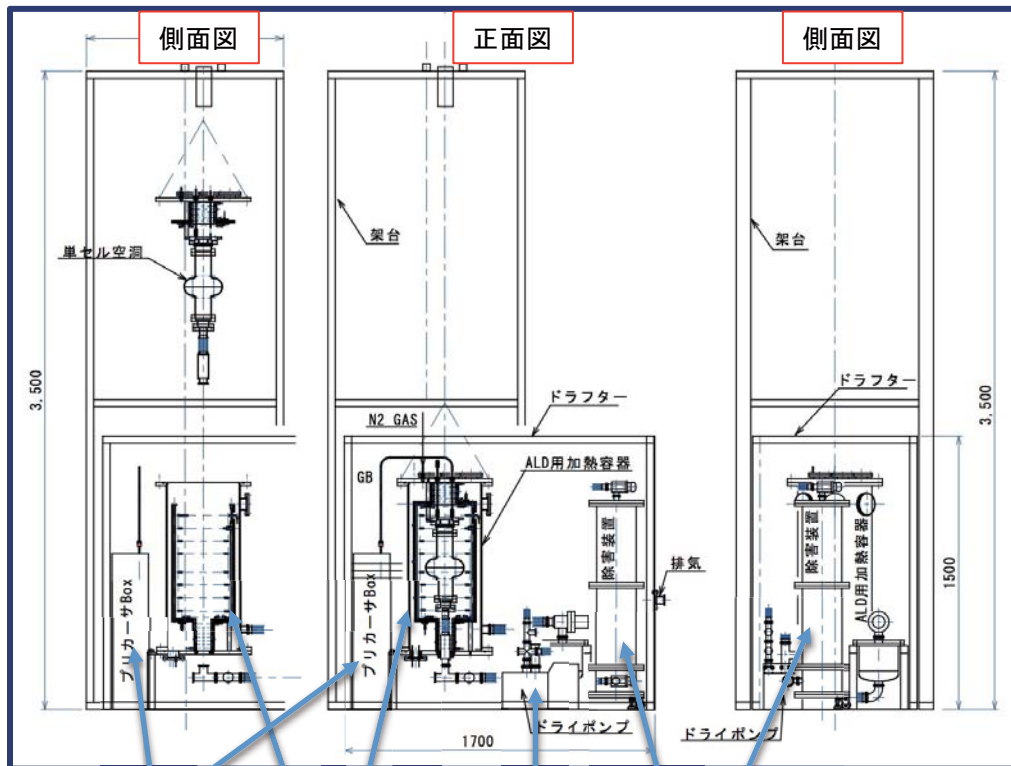
→ 複雑な形状の超伝導加速空洞にナノメートルの厚み制御可能な一様薄膜を生成できる。

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



成膜チャンバーの拡大図

プリカーサーBox

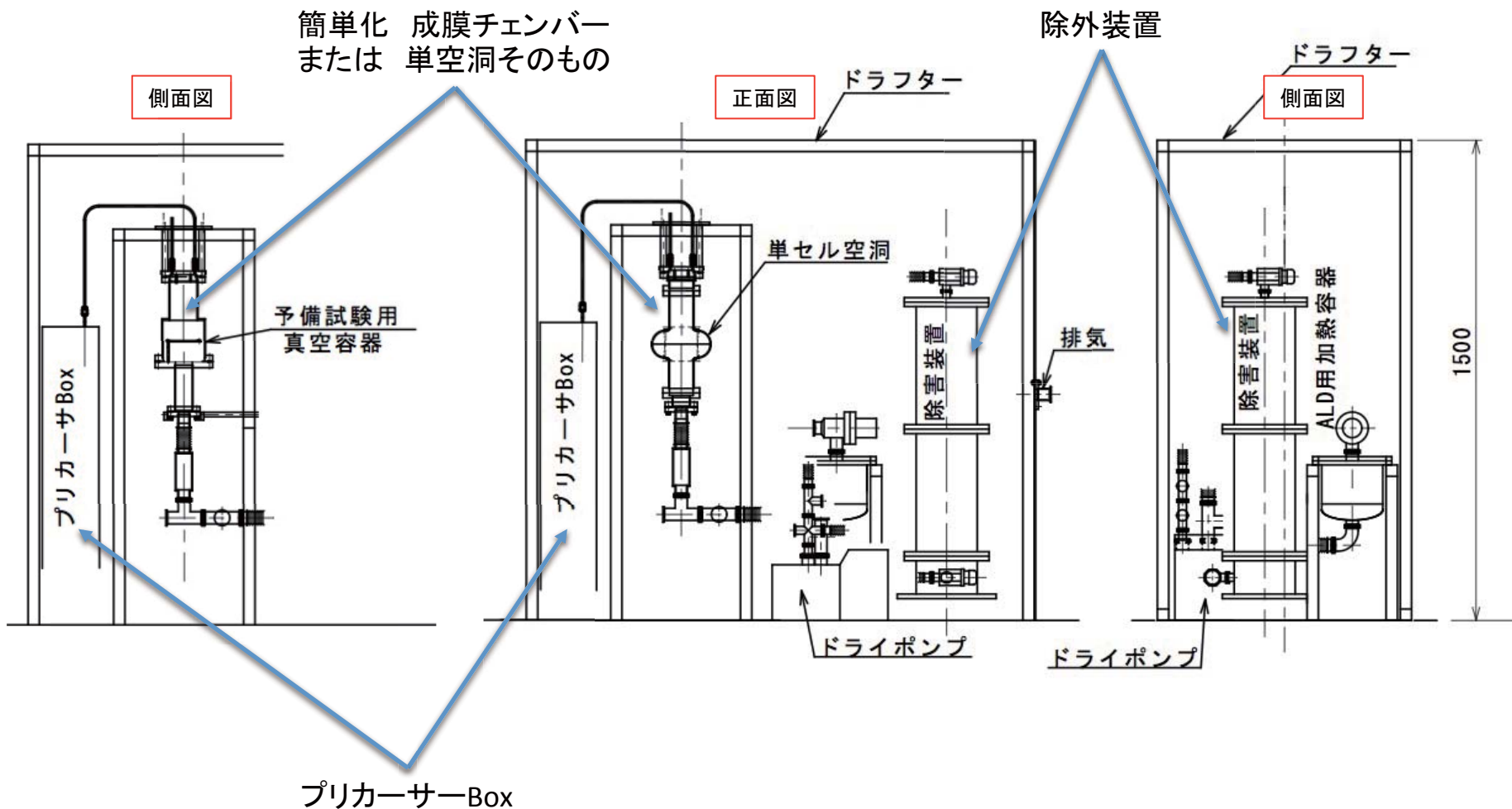
ドライポンプ

除外装置

成膜チャンバー
(真空、加熱容器)

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。)



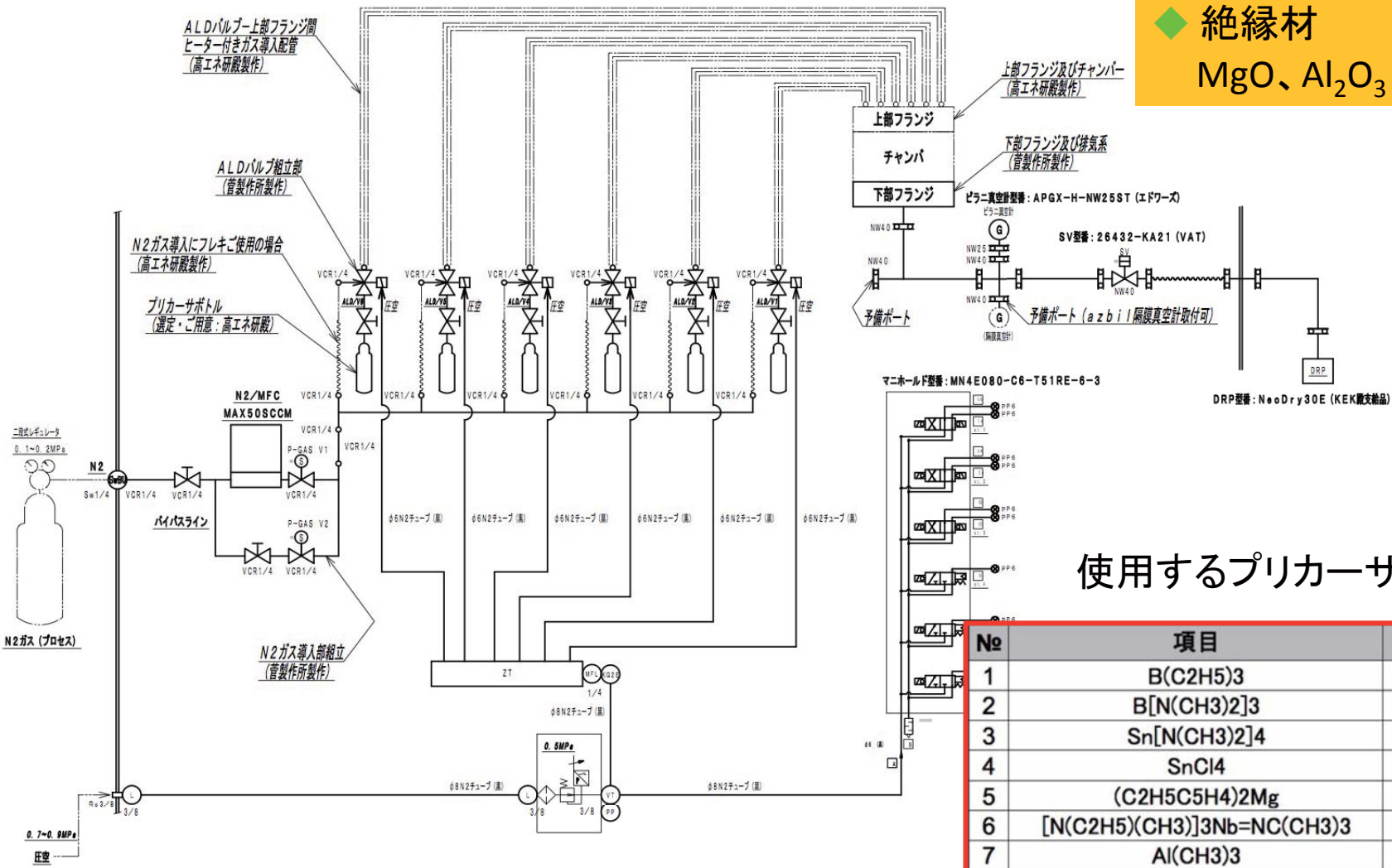
この簡易化成膜装置を、ばらばらで購入し自作で組み上げる。この時、できるだけ既存のものを流用

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



使用するプリカーサー(ガス)

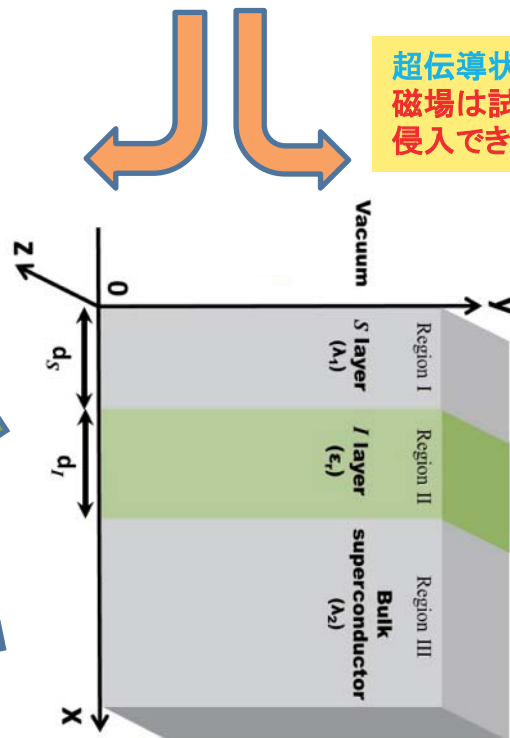
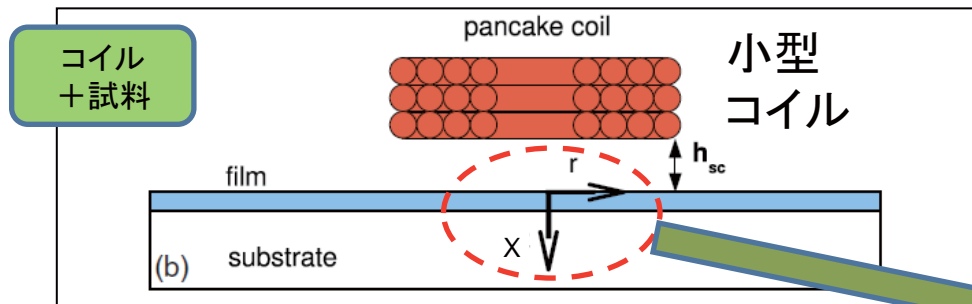
No	項目	数量	単位
1	B(C ₂ H ₅) ₃	25	g
2	B[N(CH ₃) ₂] ₃	25	g
3	Sn[N(CH ₃) ₂] ₄	25	g
4	SnCl ₄	25	g
5	(C ₂ H ₅ C ₅ H ₄) ₂ Mg	25	g
6	[N(C ₂ H ₅)(CH ₃)] ₃ Nb=NC(CH ₃) ₃	25	g
7	Al(CH ₃) ₃	25	g

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

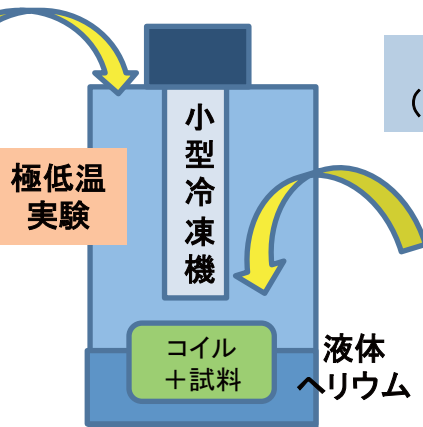
超伝導状態:
磁場は試料内に侵入できない。



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)

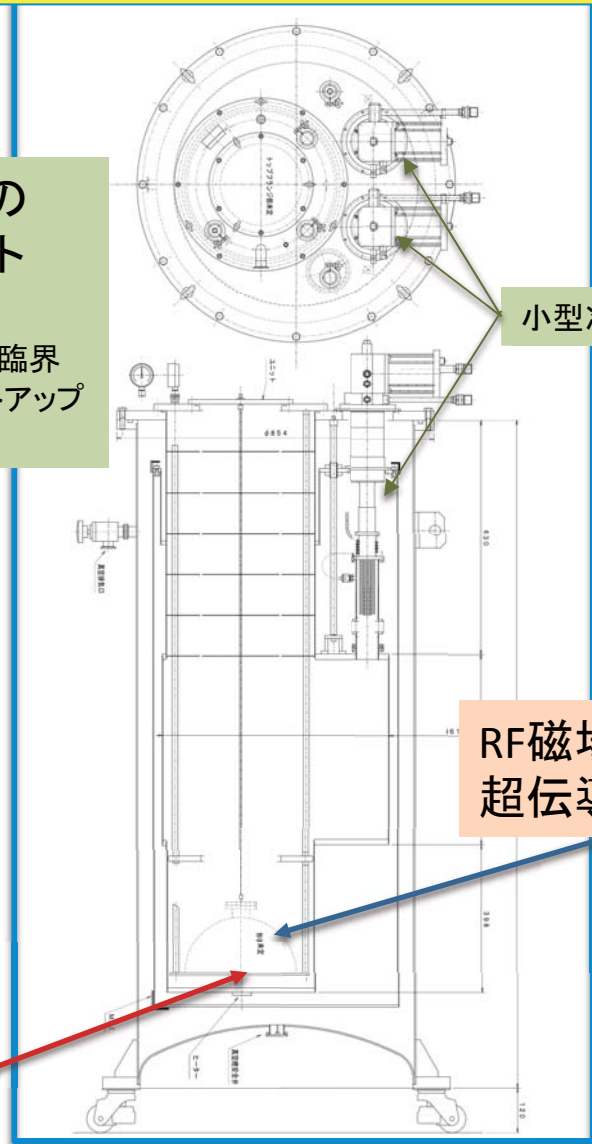
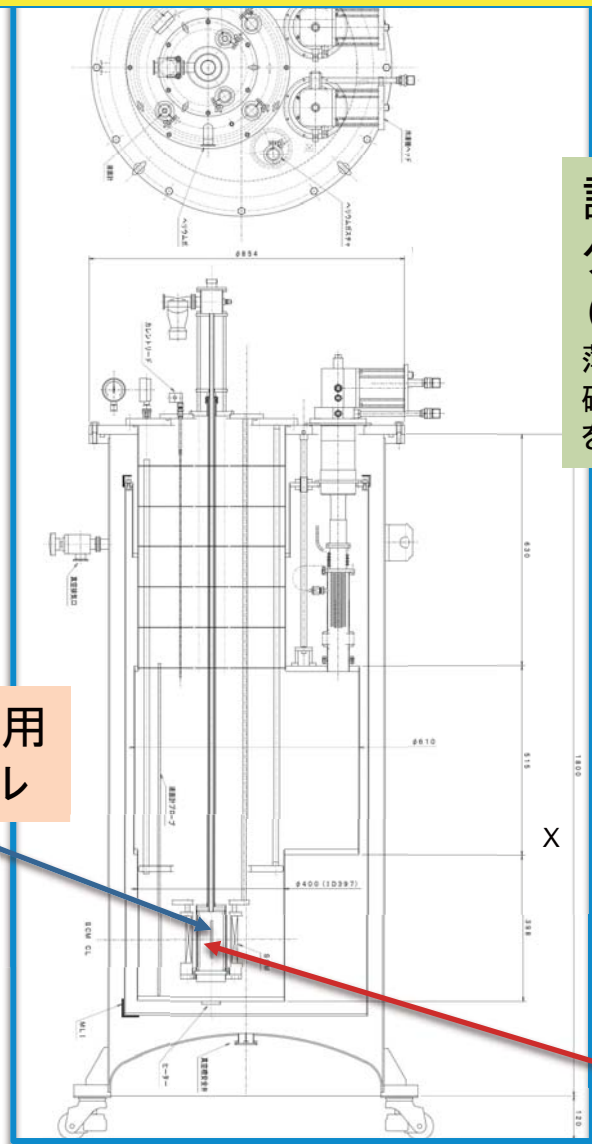
薄膜サンプルの下部臨界
磁場を計測するセットアップ
を準備中

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

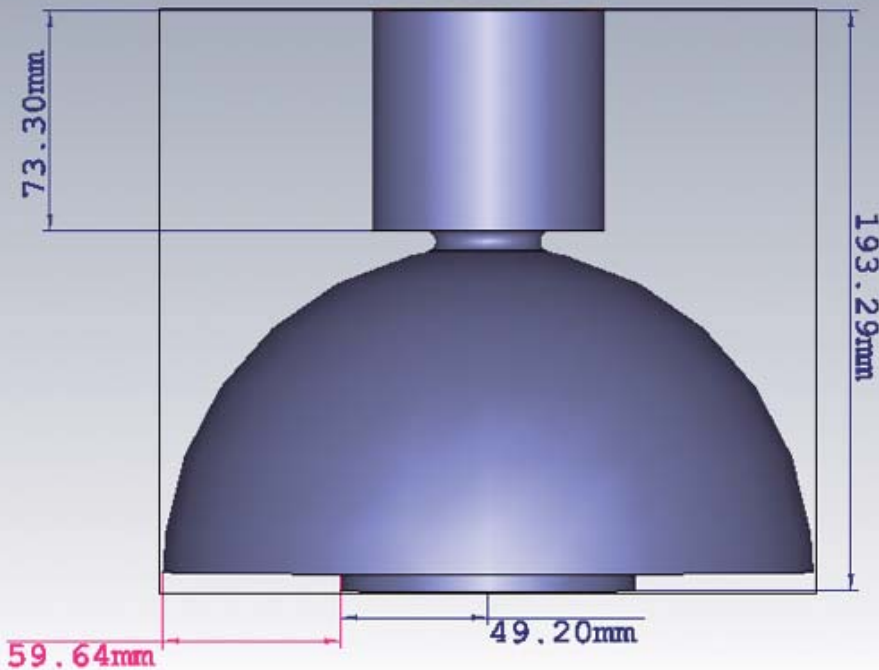


RF下部臨界磁場(B_{c1})計測用RF空洞の設計

3.9GHz マッシュルーム型RF空洞を使用予定

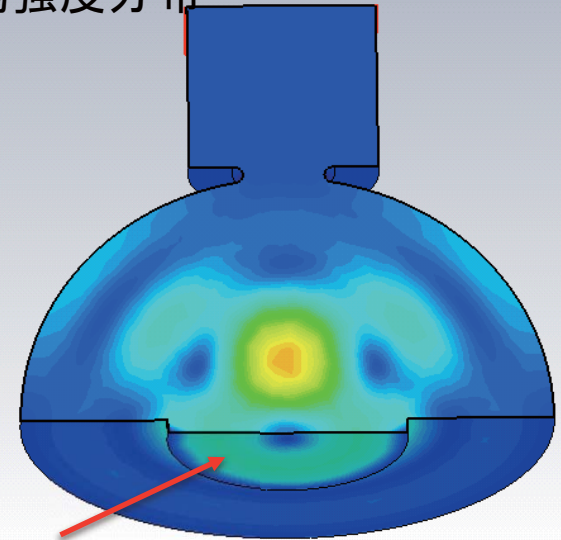
サンプル面に強い磁場、その他の面は弱い磁場
Nb製空洞(壁損失を減らす)

小型クライオスタットに入る大きさ→3.9GHzを選択



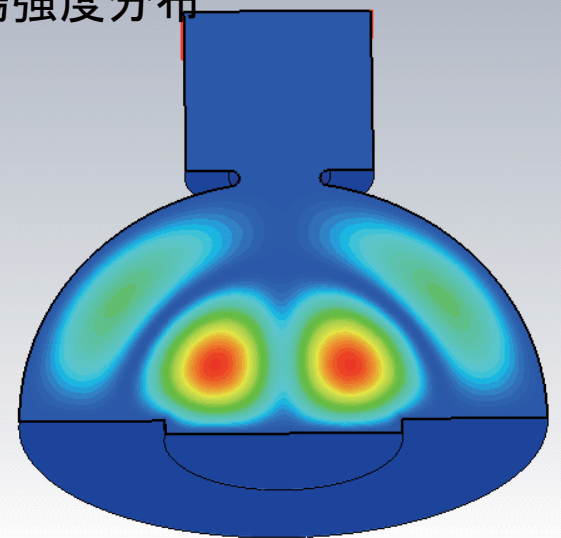
最適化設計中

磁場強度分布

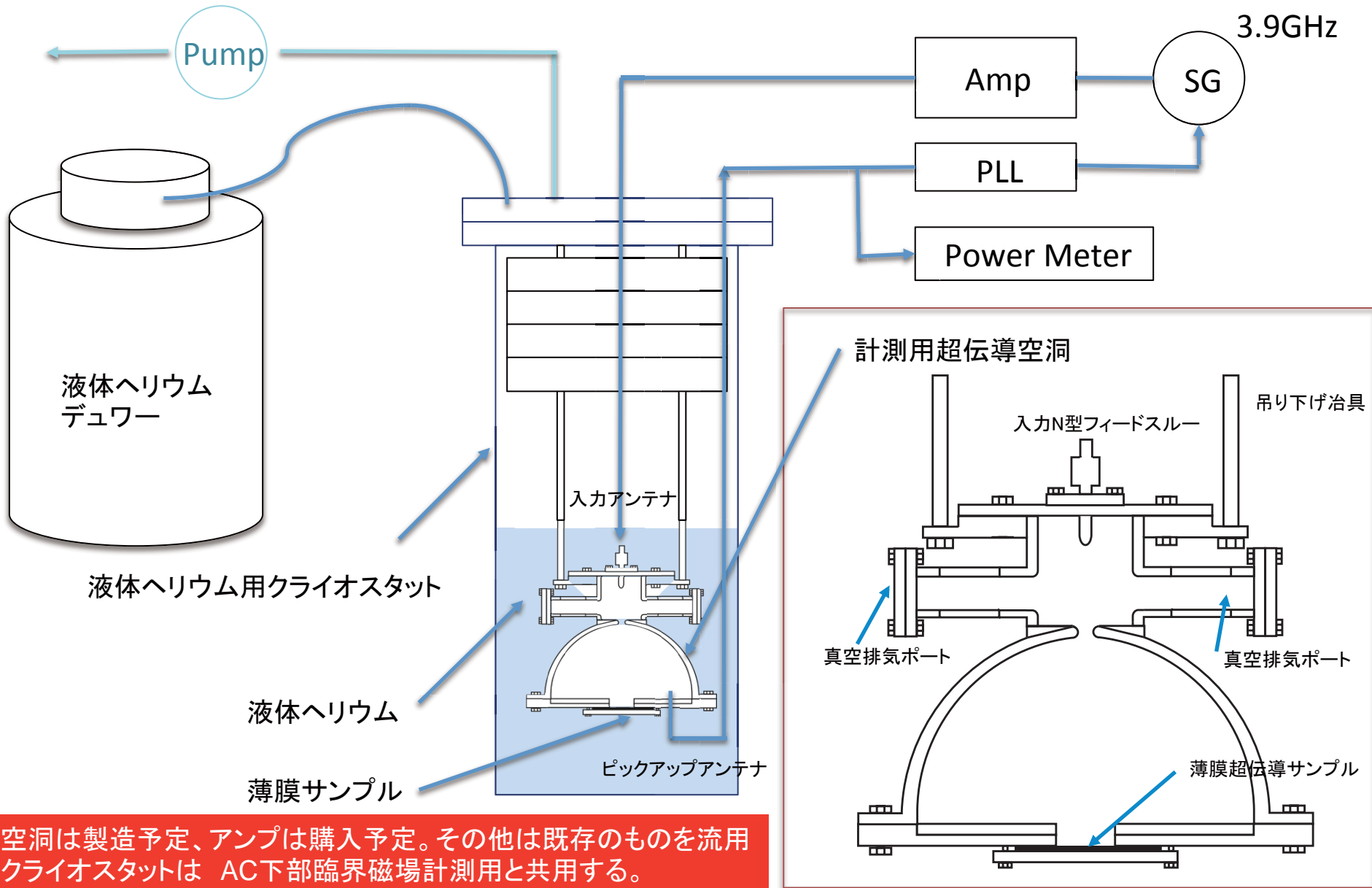


サンプル面に強い磁場

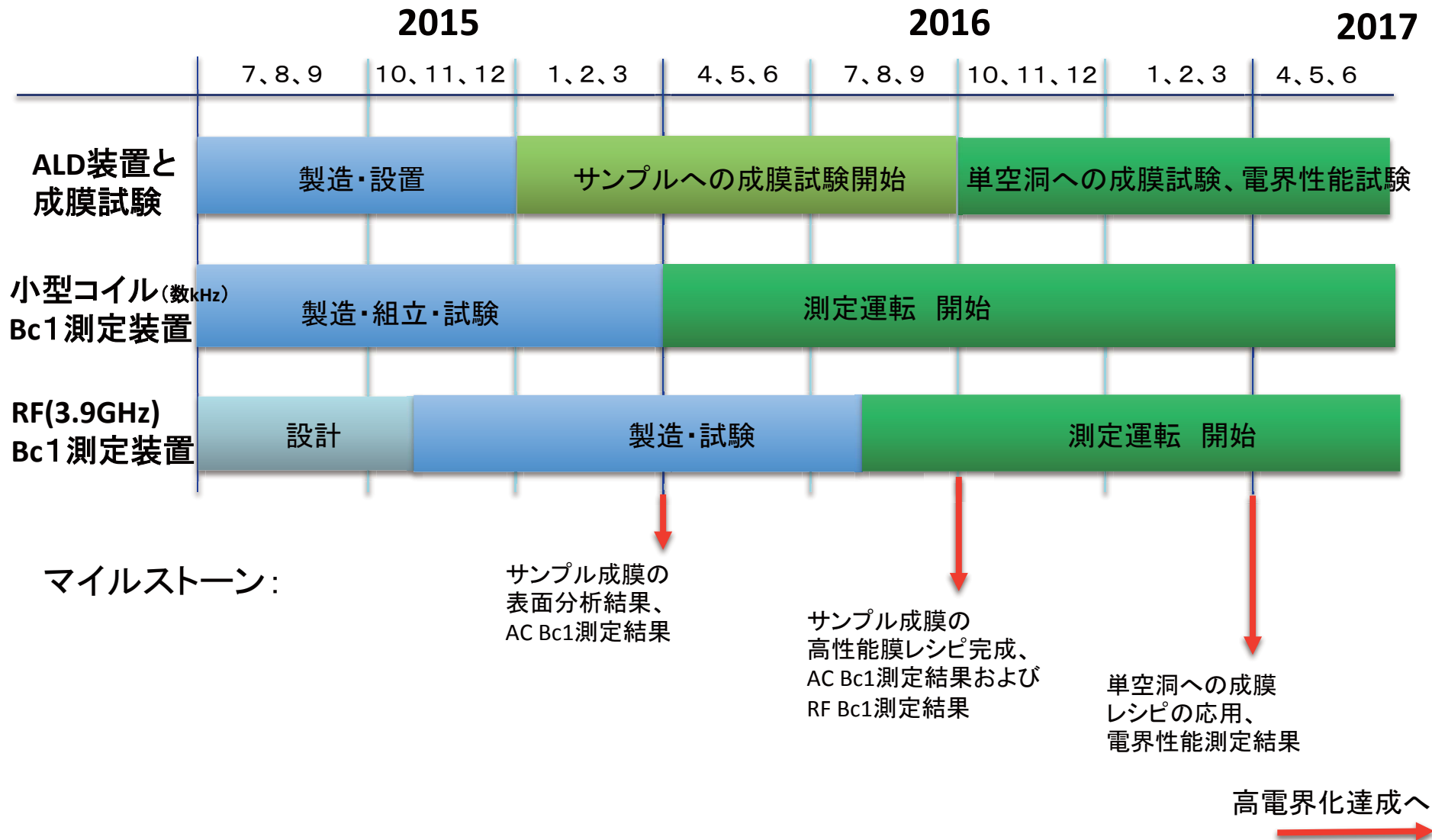
電場強度分布



RF下部臨界磁場(B_{c1})を測定するセットアップ(予定)



研究スケジュール



終わり

以降、参考資料

(参考資料)

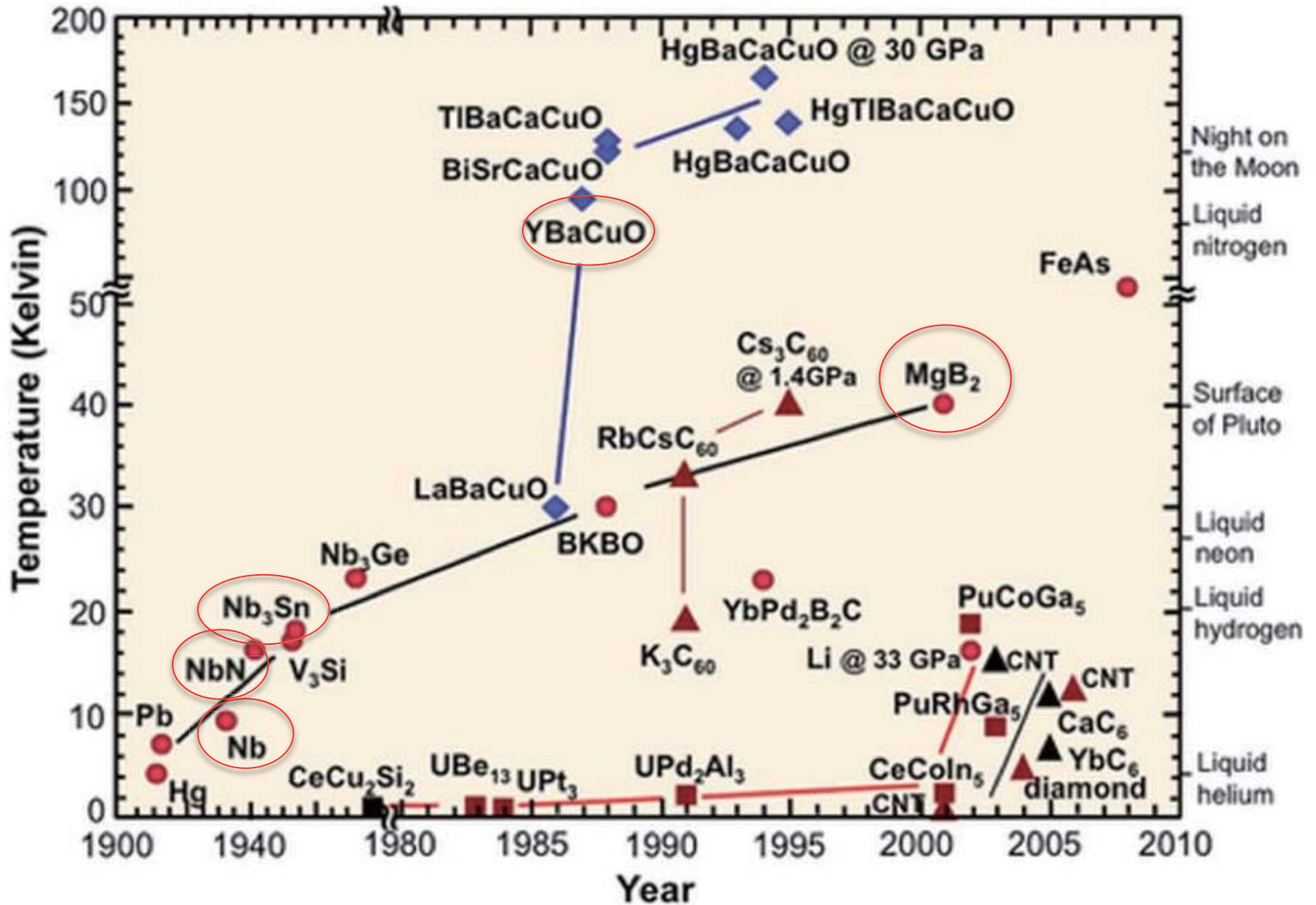
高温超伝導物質 (High-Tc materials)

SRF空洞に使われる超伝導物質に要求される重要項目

- (1) 液体ヘリウム消費を減らすために、表面RF抵抗が低い事
- (2) ボルテックスがRF損失を招くので、高電界のためには下部臨界磁場 H_{c1} とSuperheating臨界磁場 H_{sh} の両方が高い事
- (3) バルク物質の時には熱伝導がいい事
- (4) その他、
 - 長期間にわたり性能が落ちていかないこと
 - 超純水高圧洗浄で清浄度を確保できること
 - なめらかな曲面をもつことができること

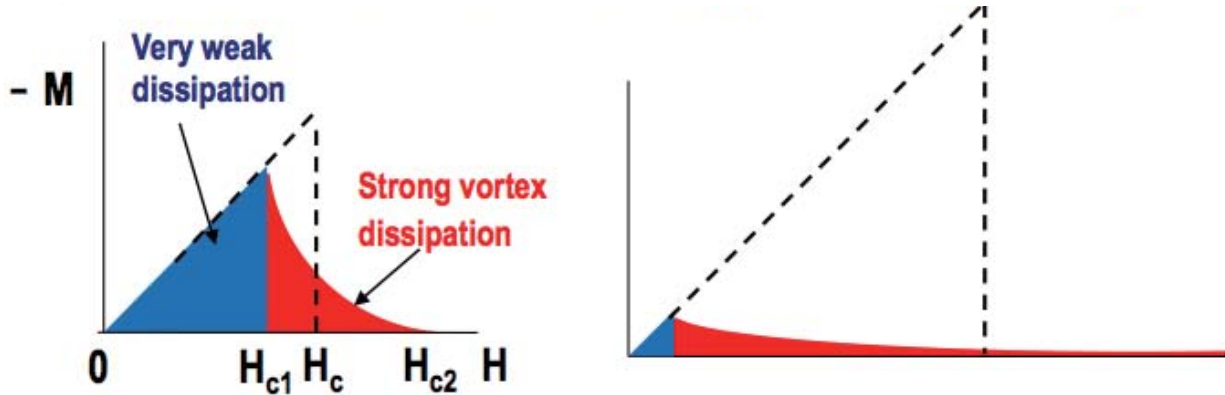
超伝導物質の発見

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sc_history.gif



加速器応用の候補となる超伝導物質

[A. Gurevich, SRFmaterial workshop, FNAL, May2007]



Very weak dissipation at $H < H_{c1}$ ($Q = 10^{10}-10^{11}$)
 Q drop due to vortex dissipation at $H > H_{c1}$

Nb has the highest lower critical field H_{c1}

Nb

Higher- H_c SC

転移温度 臨界磁場 下部臨界磁場 上部臨界磁場 磁場侵入長

Material	T_c (K)	$H_c(0)$ [T]	$H_{c1}(0)$ [T]	$H_{c2}(0)$ [T]	$\lambda(0)$ [nm]
Pb	7.2	0.08	na	na	48
Nb	9.2	0.2	0.17	0.4	40
Nb ₃ Sn	18	0.54	0.05	30	85
NbN	16.2	0.23	0.02	15	200
MgB ₂	40	0.43	0.03	3.5	140
YBCO	93	1.4	0.01	100	150

$$H_{c1} = \frac{\phi_0}{4\pi\lambda^2} \left(\ln \frac{\lambda}{\xi} + 0.5 \right)$$

Thermodynamic critical field H_c (surface barrier for vortices disappears)

$$H_c = \frac{\phi_0}{2\sqrt{2\pi}\lambda\xi}$$

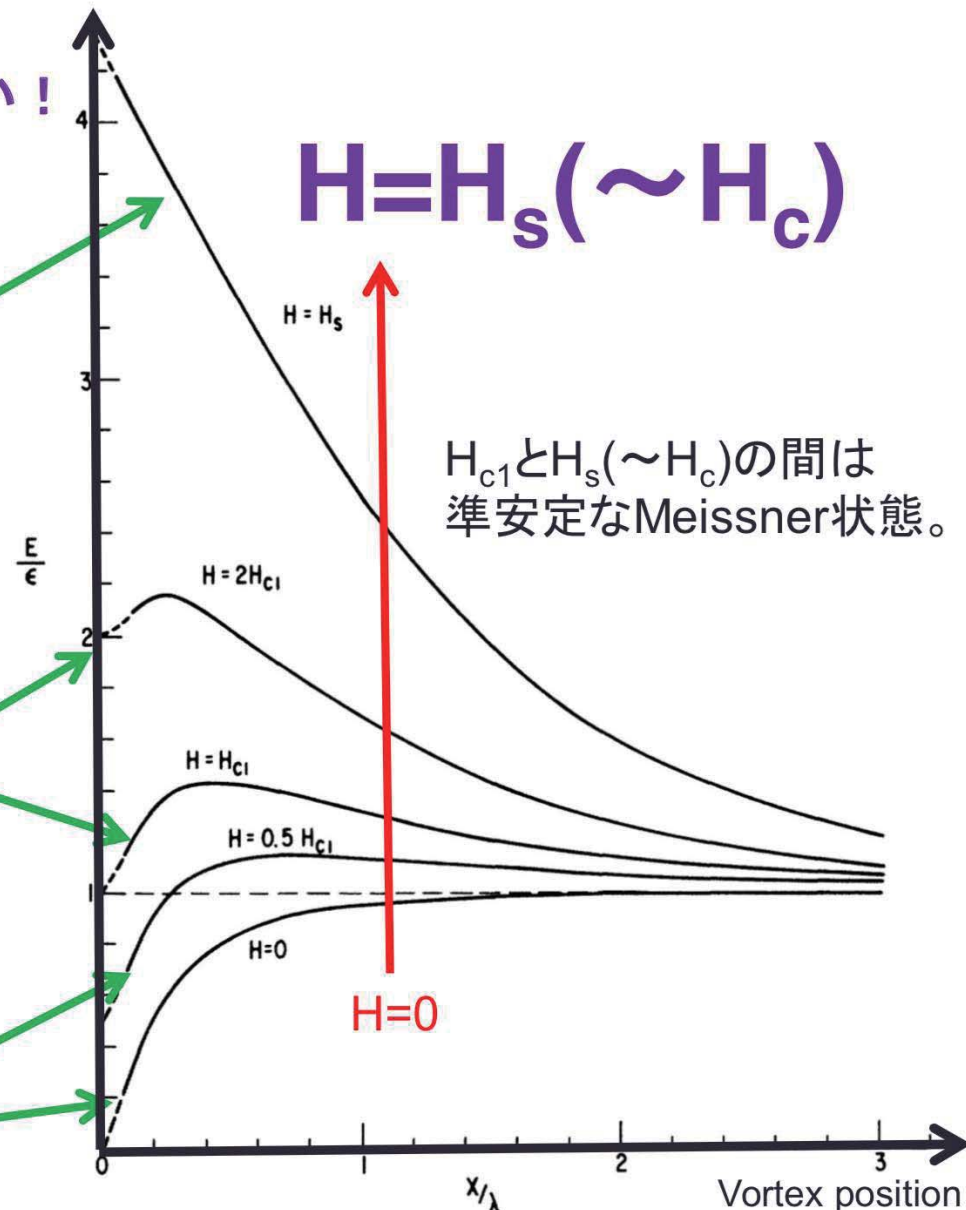
H_{c1} が 'field limit' を与えるわけではない!

印加磁場が H_s を超えると
Barrier は消失し、渦糸が自由
に流れ込むようになる。

Theoretical limit

印加磁場が H_{c1} を超えると
渦糸が内部にある方が安定。
ただし barrier を超えなければ
中に入れない。

印加磁場が弱いと
渦糸が外にある方が安定

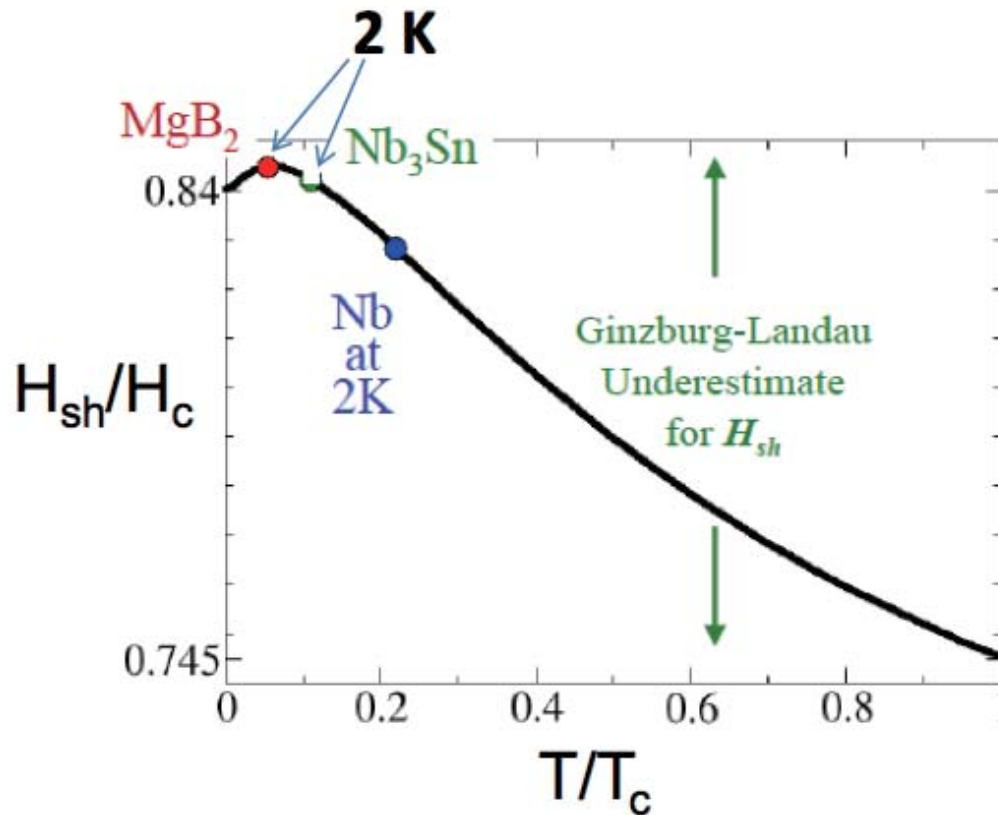


G-L theory is only valid in the vicinity of T_c .

At $T \ll T_c$, $H_{sh} \neq 0.75 H_c$ (this was obtained from G-L equations)

Solving Eilenberger's equation which is applicable to any T gives

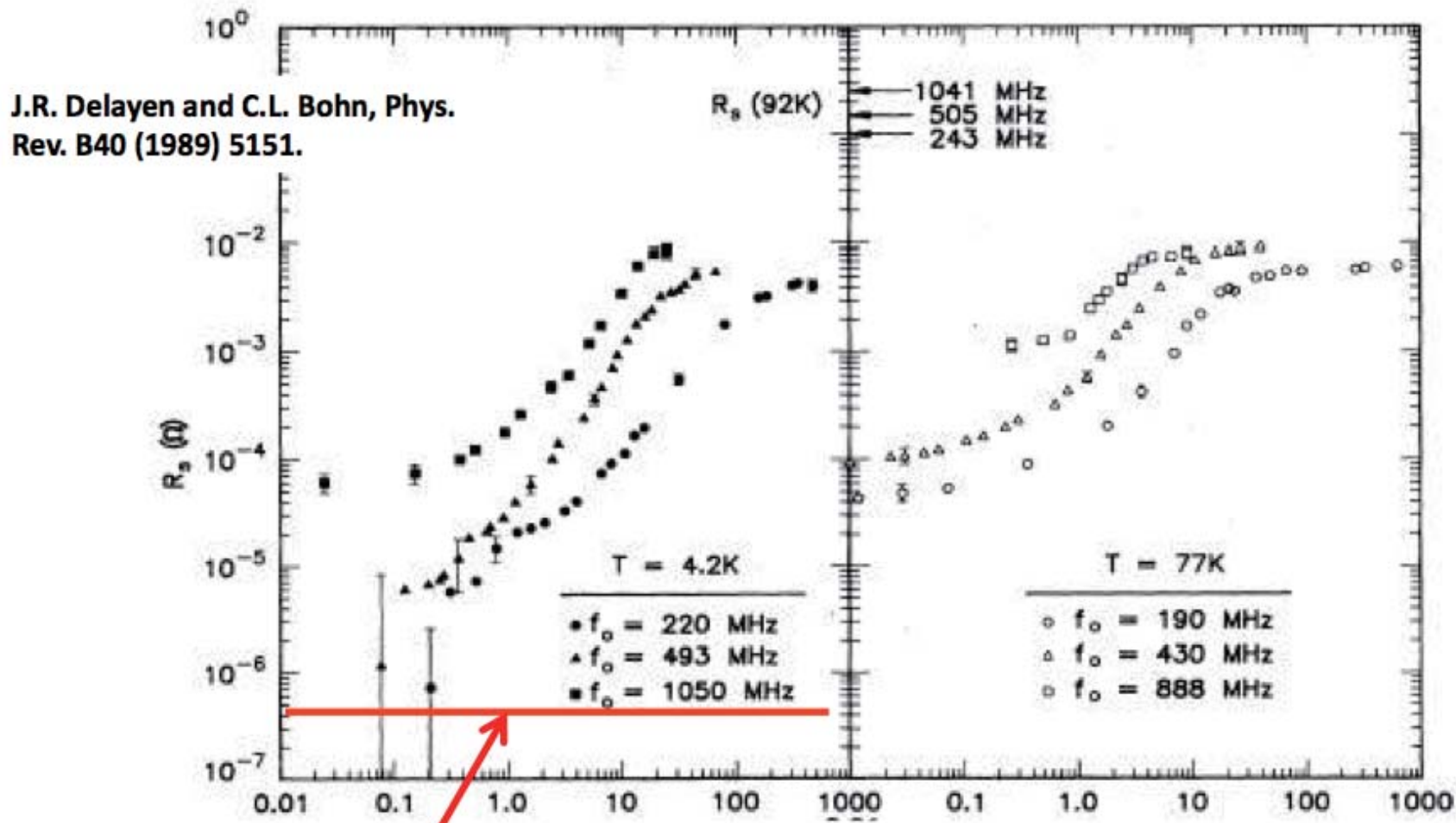
Max. $H_{sh} = 0.845 H_c$ @ $T/T_c = 0.06$ [1]



絶対温度2Kにおいて、
過熱状態臨界磁場 H_{sh}
と臨界磁場の比が
ニオブより高いのが
 Nb_3Sn と MgB_2

[1] G. Catelani, J. Sethna, PRB **78** (2008) 224509.

YBCOは磁場による表面抵抗値 R_s の増加が激しく、加速器向きではない。(1989当時のデータ)



BCS R_s of Nb @ 1 GHz $4.4 \times 10^{-7} \Omega$ RF Magnetic field (Oe)

(参考資料)

Multi-layer thin film concept

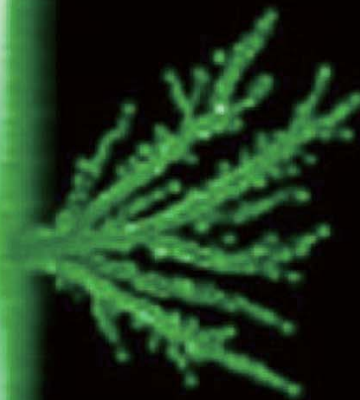
多層薄膜コーティング

B_{c1} より上では、超伝導体内部が渦糸の安定点。表面バリアに弾かれて中に入れられないだけ。

表面欠陥等、バリアが大幅に抑圧されている箇所があれば、そこから渦糸が侵入する。

渦糸の運動で熱が発生すると、温度上昇により臨界磁場が減少。更に渦糸が侵入しやすくなる。これが **vortex avalanche**(渦糸雪崩)を引き起こす。

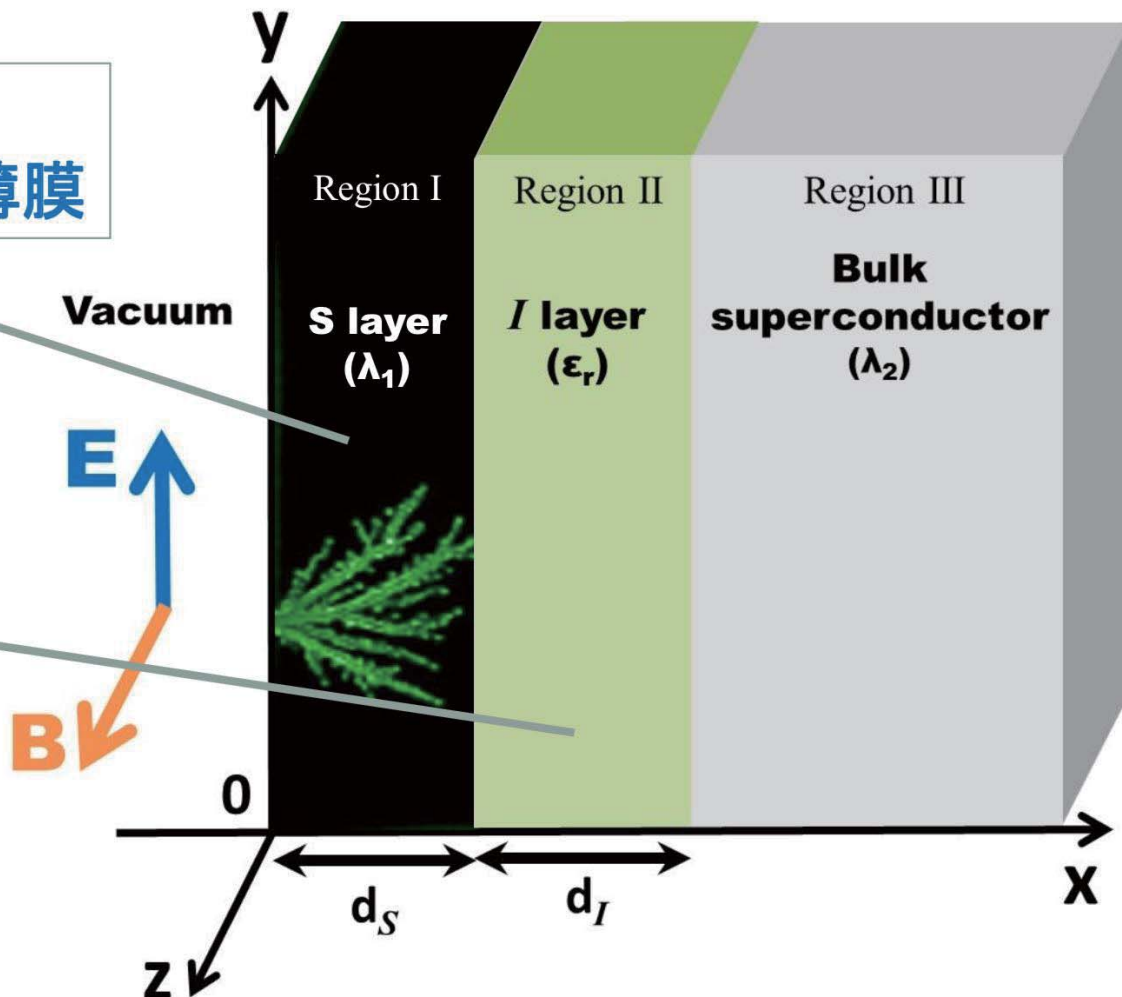
Vortex avalanche



A. Gurevich, Appl. Phys. Lett. **88**, 012511 (2006)

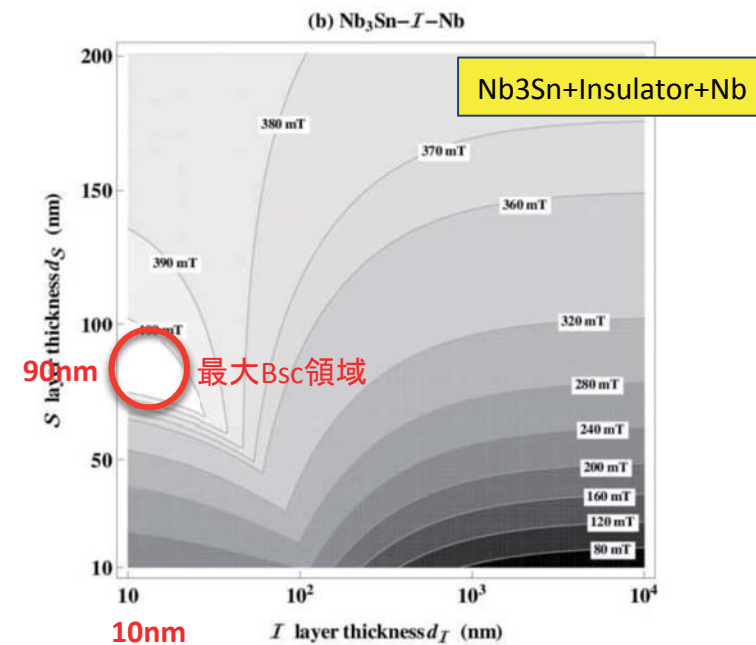
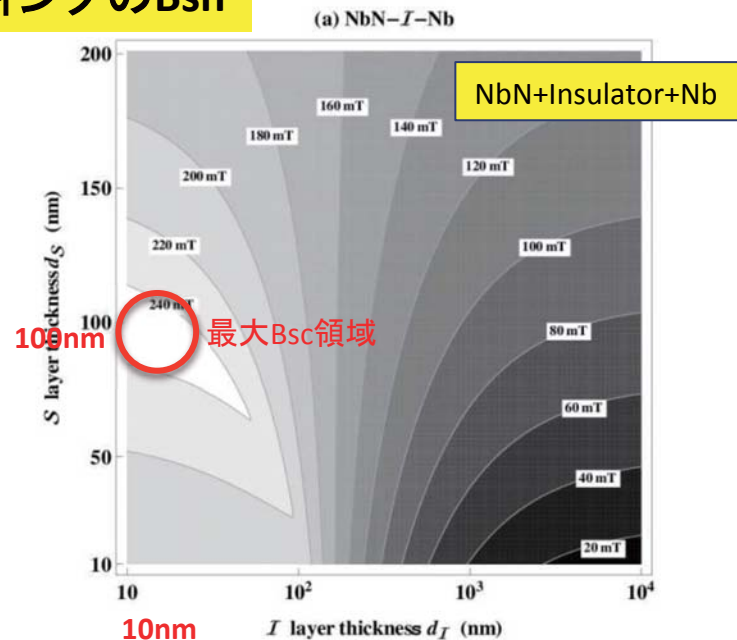
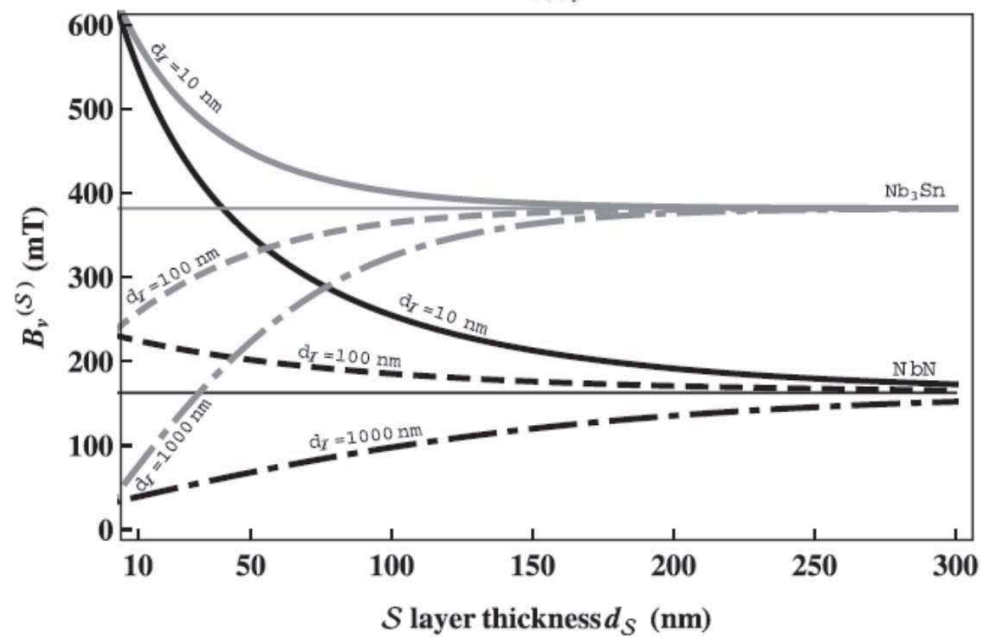
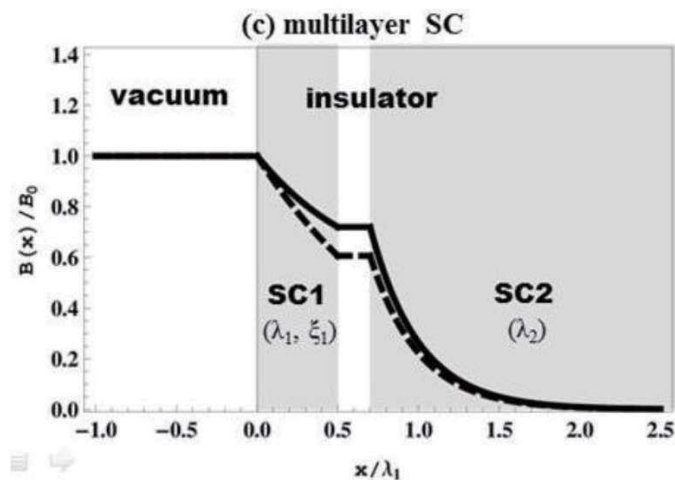
NbN, Nb₃Sn, MgB₂等
H_c, T_cの大きな超伝導薄膜

絶縁層
雪崩を食い止める

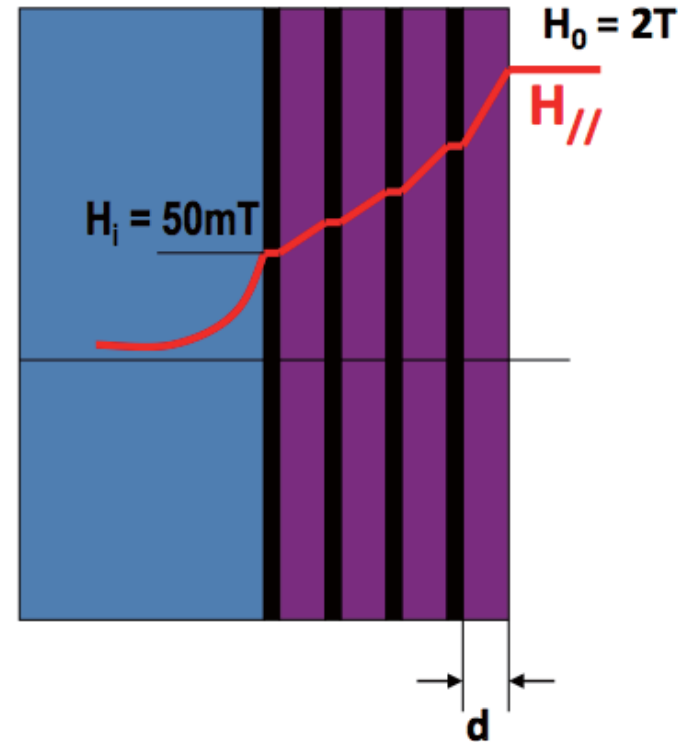
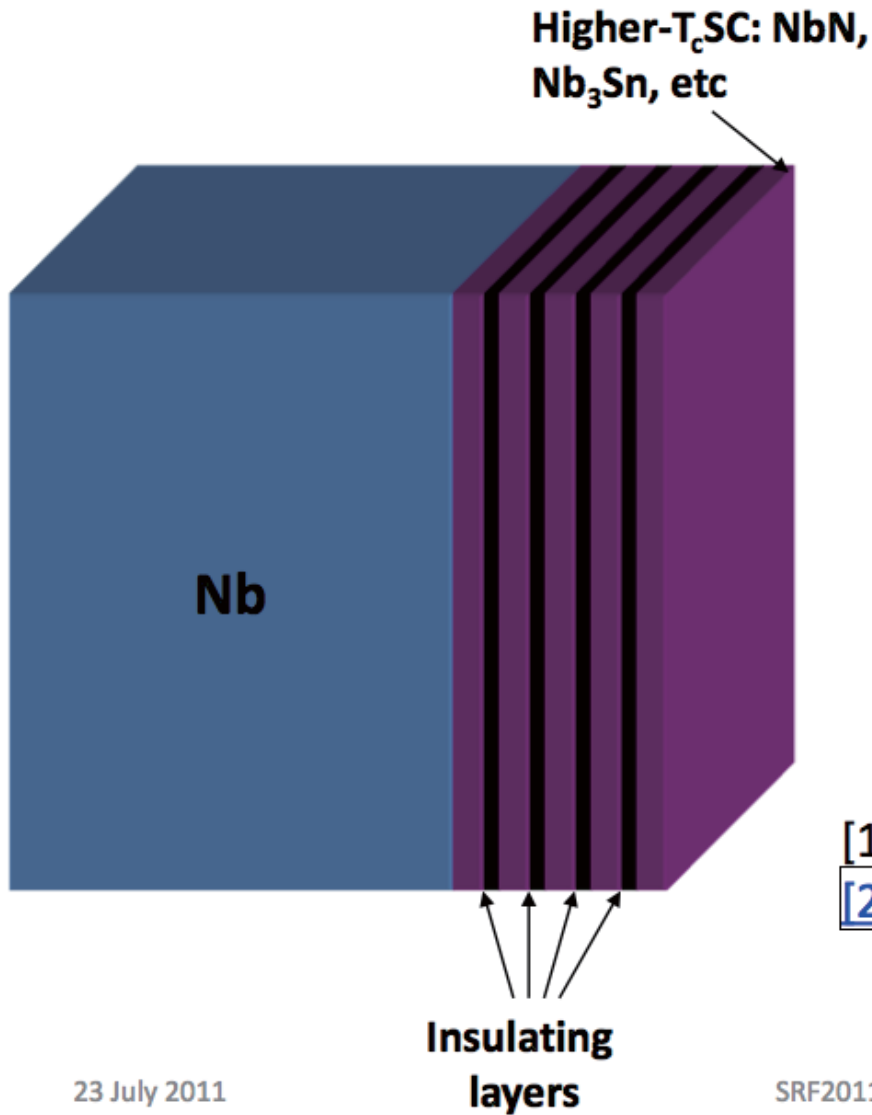


多層膜にすることで渦糸雪崩を防ぐことができ、
これによりH_{c1}を超える磁場まで耐えられる。耐えられる最大磁場はsuperheating field H_s

T. Kuboらによって計算された超伝導体多層薄膜コーティングのBsh



A. Gruvichi [1,2]によって提案された超伝導体多層薄膜コーティングの概念

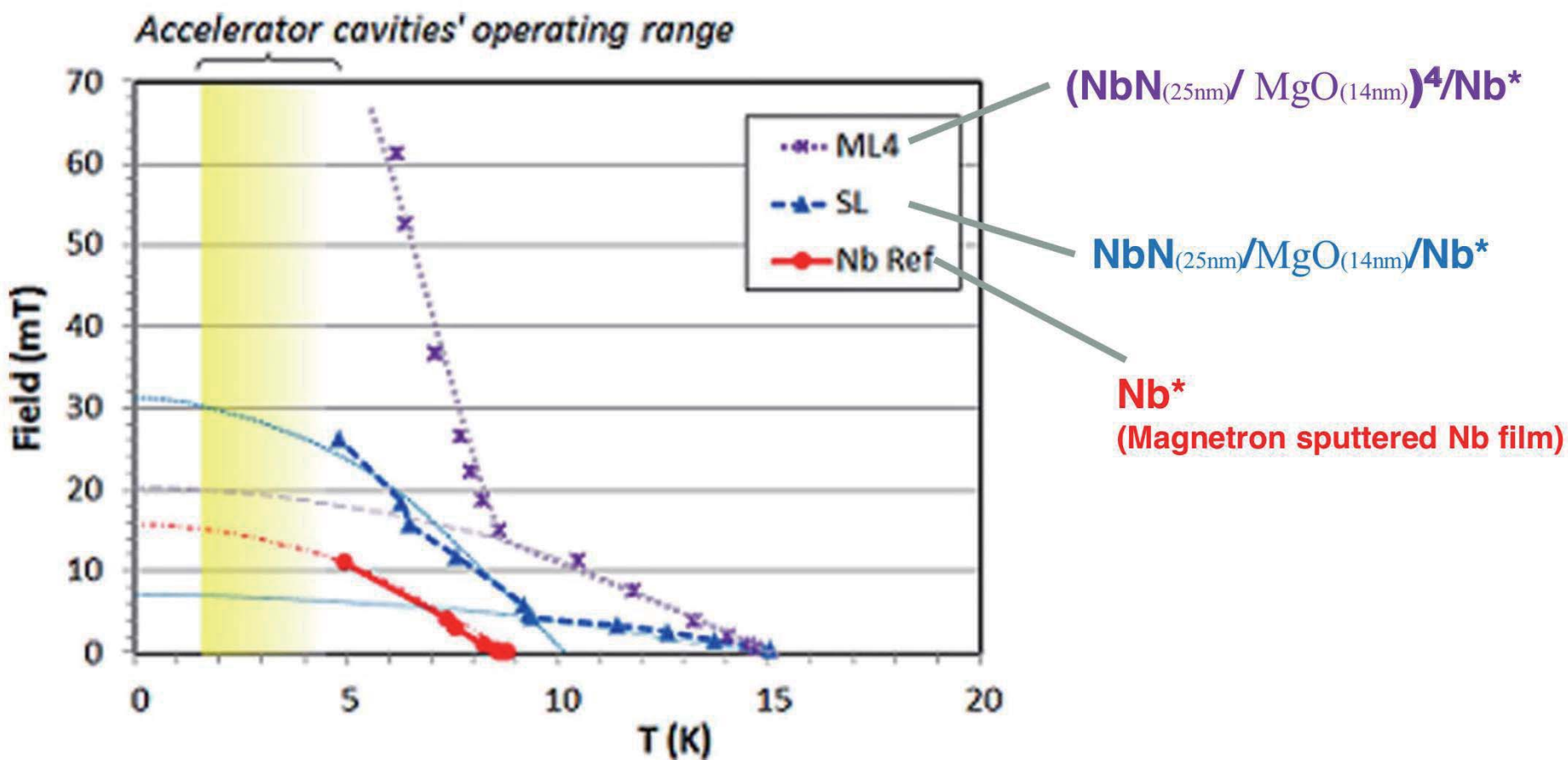


[1] A. Gurevich, APL **88** (2006) 012511

[2] A. Gurevich, [SRF Materials Workshop, FNAL, 23-24 May 2007](#)

C. Z. Antoine et al., Appl. Phys. Lett. 102, 102603 (2013)

まだ原理実証の段階。
高いfieldは未だ得られていない



(参考資料)

Nb₃Snの研究例

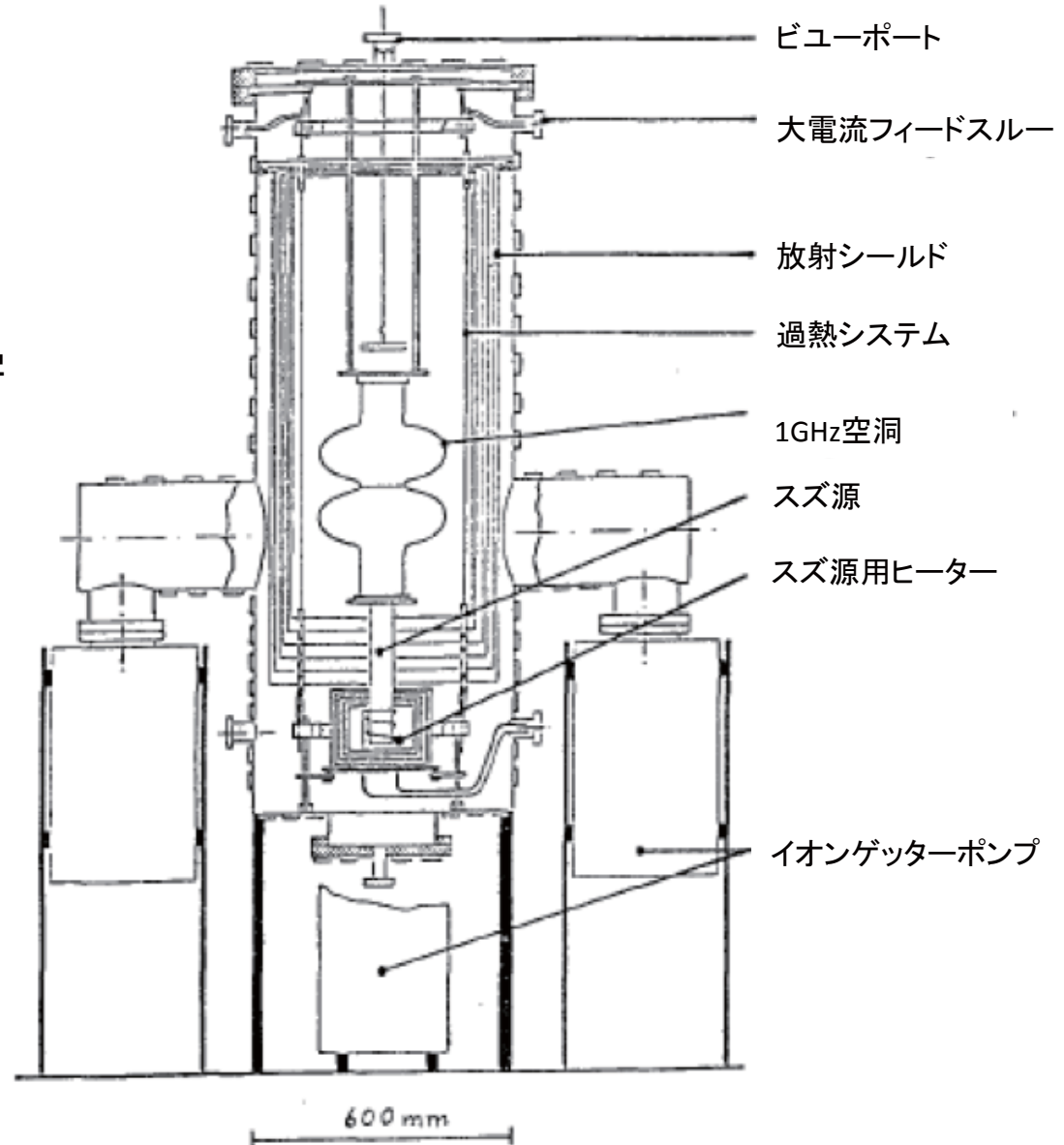
Nb₃Sn

- 1.5GHzの空洞にコーティングするのに成功している唯一の超伝導体[1]
- スズ蒸発拡散法はWuppertal大学において80年代から90年代に開発された。[2]

[1] [G. Mueller et al.](#)
[EPAC1996.](#)

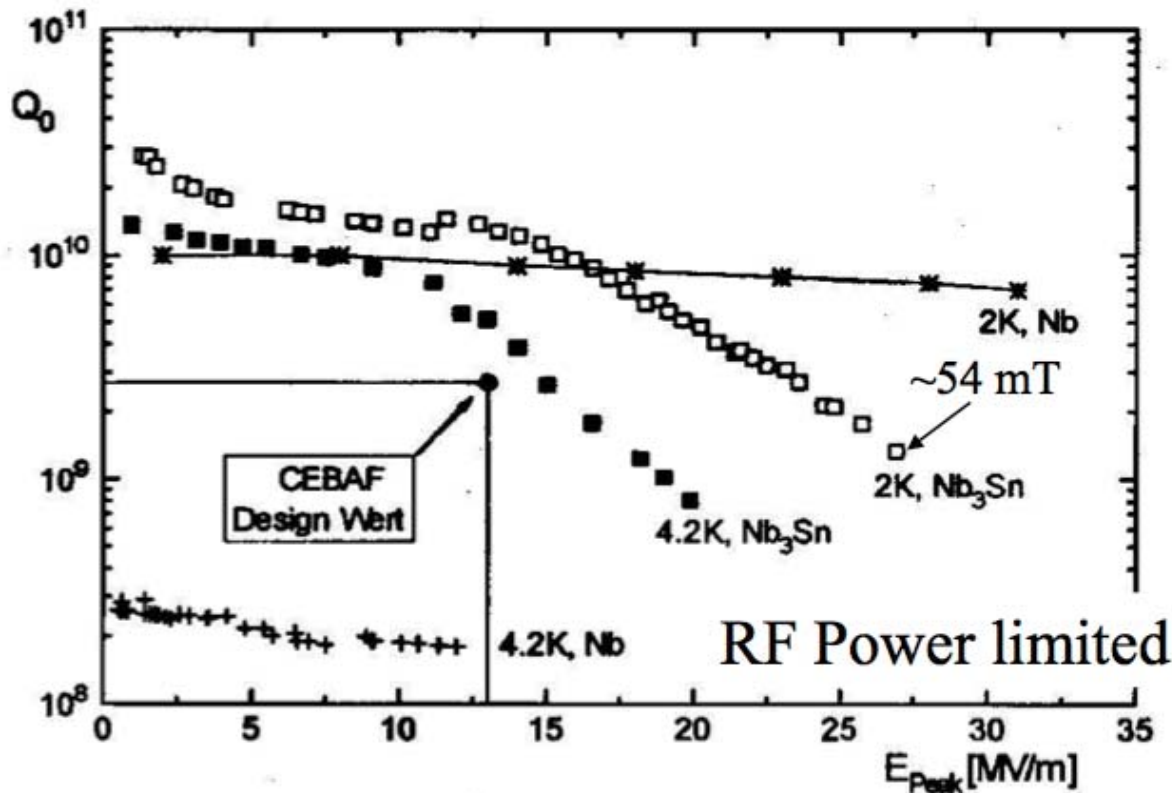
[2] [M. Peiniger et al.](#)
[SRF1987.](#)

1GHzの空洞にコーティングするシステム図[2]



Nb₃Sn

1.5GHz単セル空洞におけるNb₃Snコーティングの空洞加速勾配の性能は、4.2Kの温度でも2K温度でのニオブ空洞よりもCEBAF加速器の目標性能を上回っている。



Nb₃Sn空洞Q値は、4.2K温度においてニオブ空洞Q値の50倍!!

Best $R_{\text{res}} = 2.2 \text{ n}\Omega$!

Nb₃Sn coating at Wuppertal and measurement at JLAB

G. Mueller et al. EPAC1996



Increase in Q₀
via N-doping

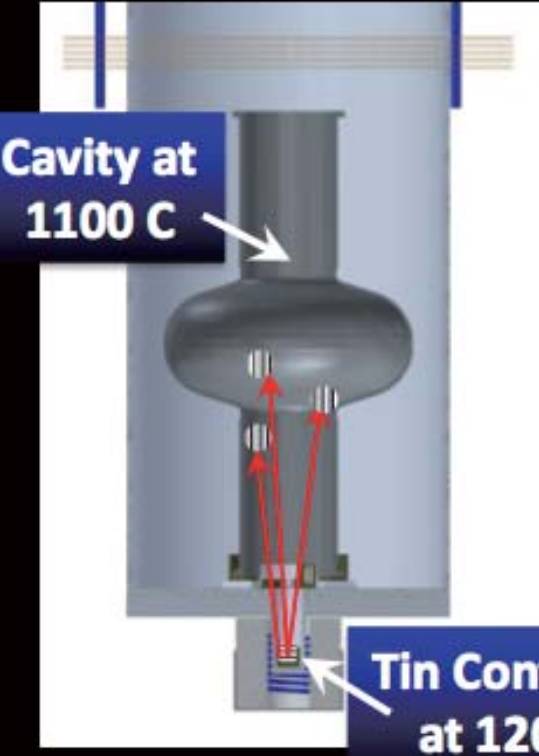
$\eta_{4.2K} / \eta_{2.0K} \approx 3.6,$
simpler cryoplant

	Niobium	Nb ₃ Sn
Critical Temperature T _c	9 K	18 K
Q ₀ at 4.2 K	6 x 10 ⁸	6 x 10¹⁰
Q ₀ at 2.0 K	3 x 10¹⁰ 4-8 x 10¹⁰	>10 ¹¹
Max. gradient E _{acc} (theory)	50 MV/m	100 MV/m

Approximate E_{acc} and Q₀ given for 1.3 GHz TeSLA or 1.5 GHz CEBAF cavities with R_{res} ↑ full

Nb₃Snのポテンシャルは、
4.2Kで加速器運転が可能、
100MV/mで加速器運転が可能

Halve # of
cavities to
reach energy?



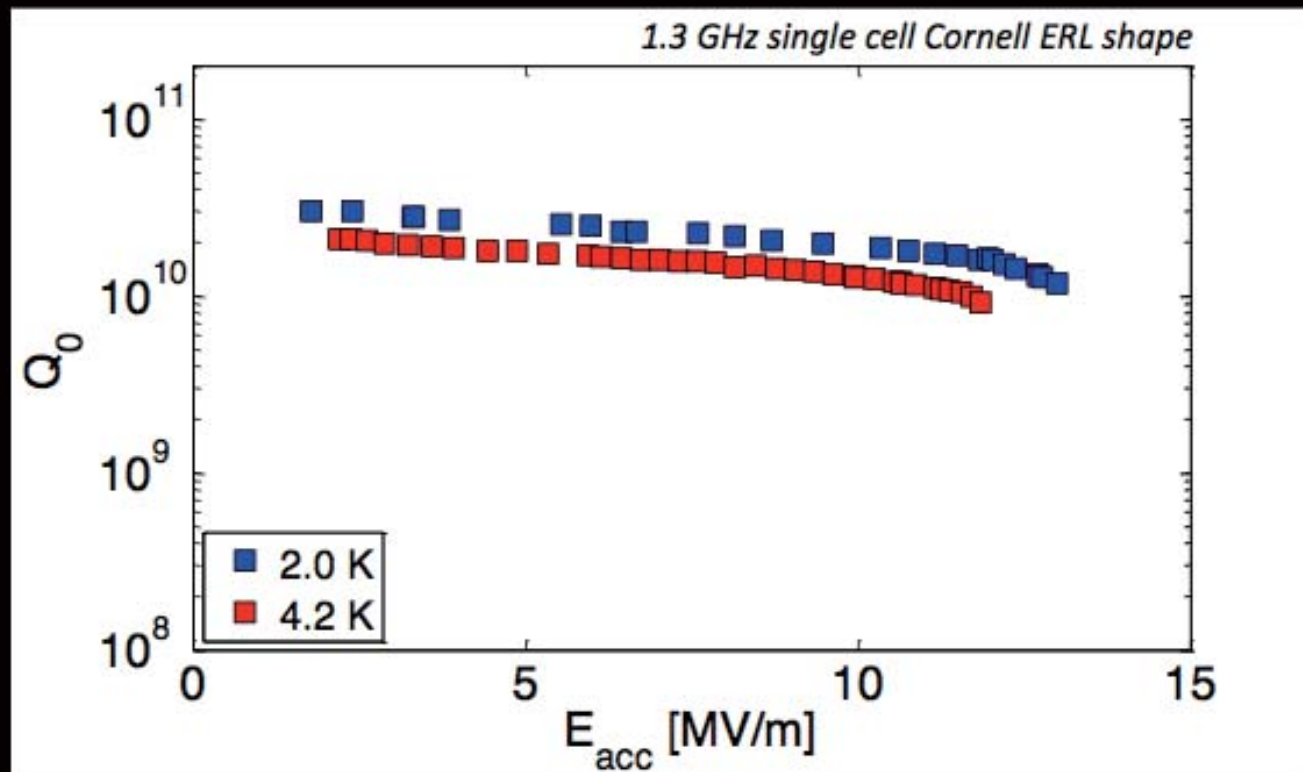
Sn, High Purity



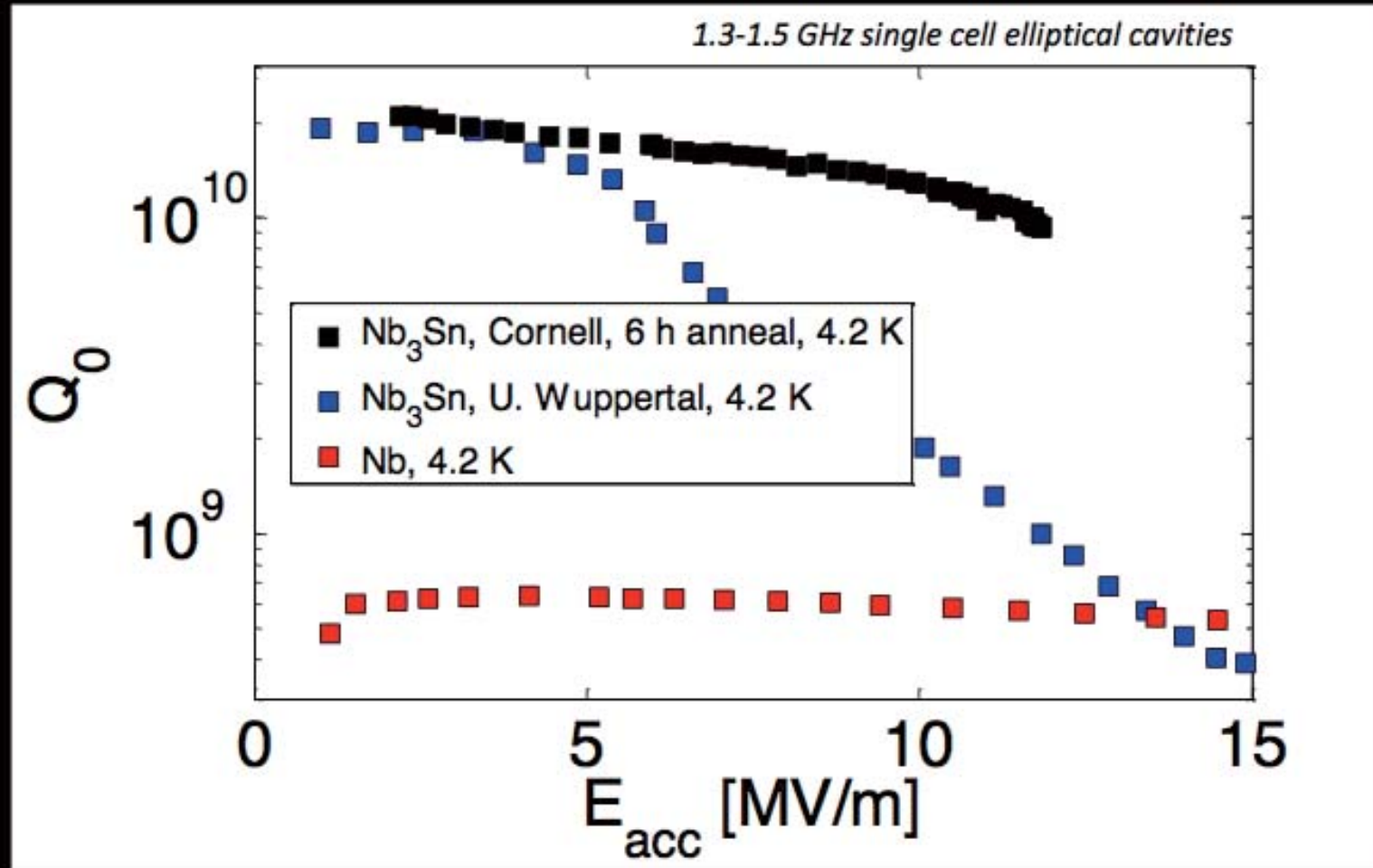
Wuppertalと異なって、コーティングの最中に1100°Cアニールを6時間かける。

縦測定の結果には以前にあった強いQ-slopeがなくなった。

(13MV/mでとどまっている理由は T-mapによるとセル内の局所クエンチ)



4.2Kの加速勾配データを比較してみる。



Wuppertalデータよりあきらかに進歩: 4.2Kで加速器に応用可能性 大!!