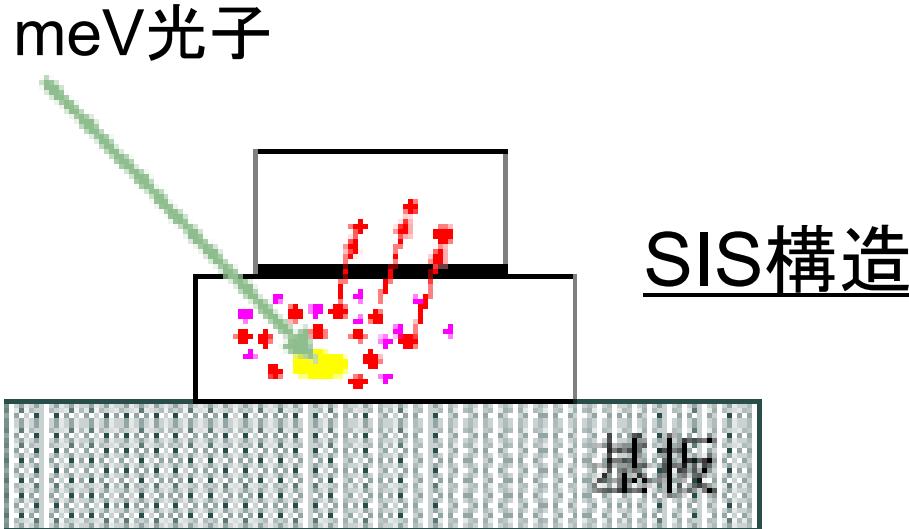


STJプロジェクト

羽澄昌史(KEK)

STJ Overview

- Superconducting Tunneling Junction Detector
(超伝導接合検出器)
- meVの光子に対するphotoconductor
- 他の超伝導検出器よりノイズが小さく、高速、ダイナミックレンジが大きい: **最高の次世代検出器**



クーパー対が壊れ、
電子に戻る。

量子物性理論的には
「準粒子が生まれる」

宇宙と素粒子の新しい研究を拓く

観測対象

マイクロ波背景放射(CMB)
とインフレーション宇宙

手段

meVレベルの光子の
超高感度測定が必要

ニュートリノ背景放射
とニュートリノ崩壊

Beyond Einstein



超伝導体の選別

応用1

宇宙マイクロ波背景放射
(30-300GHz)
AlとNbの厚みの比を変えて
帯域を
コントロール

超伝導体	臨界温度 (T_C) [K]	ギャップエネルギー (2Δ) [meV]	フォトン検出閾値 [GHz]	ビデオ検出帯域 [GHz]
Nb	9.23	3.1	750	375-750
Pb	7.193	2.4	580	290-580
Ta	4.39	1.4	340	170-340
In	3.4035	1.1	270	135-270
Al	1.196	0.34	80	40-80
Ga	1.091	0.31	75	37-75
Mo	0.92	0.26	60	30-60
Zn	0.852	0.22	50	25-50
Cd	0.56	0.15	36	18-36
Ti	0.39	0.10	24	12-24
Hf	0.165	0.04	10	5-10

応用2

宇宙ニュートリノ背景放射のニュートリノ崩壊
遠赤外線のエネルギー測定

STJグループの目標

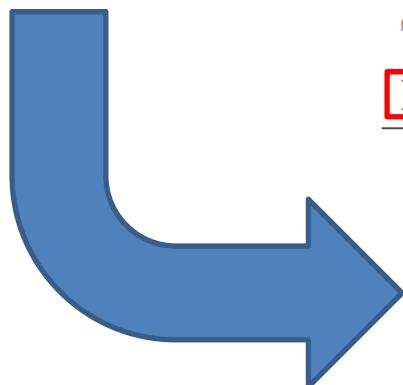
- Al STJアレイ(1000ch)の開発
- Hf STJの開発

成功すればどちらも世界初

- 宇宙観測への応用にとどまらず、幅広い応用を考えていく
(測定器開発室のraison d'être)
- 低温検出器設備(クリーンルーム等)を大学共同利用に供する

低温装置への要求

ノイズを十分
小さくするため
に、臨界温度
の1/10で
使用する



超伝導体	臨界温度 (T_C) [K]	ギャップエネルギー (2Δ) [meV]	フォトン検出閾値 [GHz]	ビデオ検出帯域 [GHz]
Nb	9.23	3.1	750	375-750
Pb	7.193	2.4	580	290-580
Ta	4.39	1.4	340	170-340
In	3.4035	1.1	270	135-270
Al	1.196	0.34	80	40-80
Ga	1.091	0.31	75	37-75
Mo	0.92	0.26	60	30-60
Zn	0.852	0.22	50	25-50
Cd	0.56	0.15	36	18-36
Ti	0.39	0.10	24	12-24
Hf	0.165	0.04	10	5-10

Al: 120mK
Hf: 16mK

ADRか希釈冷凍機

希釈冷凍機

STJグループメンバー

青:AI STJ (ミリ波カメラ)

赤:Hf STJ (赤外スペクトロスコピー)

黒:両方

* ミリ波カメラ代表

** 赤外スペクトロスコピー代表

岡山大学

近畿大学

KEK加速器研究施設

KEK素粒子原子核研究所

KEK超伝導低温工学センター

KEK物質構造科学研究所

JAXA宇宙科学研究本部

ソウル国立大学

筑波大学

東北大学

理化学研究所

: 石野宏和、樹林敦子、美馬覚

: 大田泉

: 吉田光宏

: 石本茂、後田裕、佐藤伸明、住澤一高、田島治、
羽澄昌史*、長谷川雅也、樋口岳雄、山内正則

: 鈴木敏一、都丸隆之

: 清水裕彦、森嶋隆裕

: 池田博一

: Soo-Bong Kim

: 金信弘**、武内勇司、武政健一

: 服部誠

: 有吉誠一郎、大谷知行、佐藤広海

CMBサイエンスプロジェクトとの関係

KEK CMB group
(QUIET+PolarBeR)

- Formed in Dec. 2007
- Members:
 - Masashi Hazumi
 - Masaya Hasegawa
 - Takeo Higuchi
 - Osamu Tajima
 - Takayuki Tomaru
 - Yuji Chinone (D1)

Future CMB satellite WG
(LiteBIRD)

Formed in Sep. 2008

JAXA, KEK, NAOJ,
Berkeley, Caltech, Tohoku,
Okayama, RIKEN, Kinki

測定器開発室STJグループ
KEK, RIKEN, Okayama, Tohoku

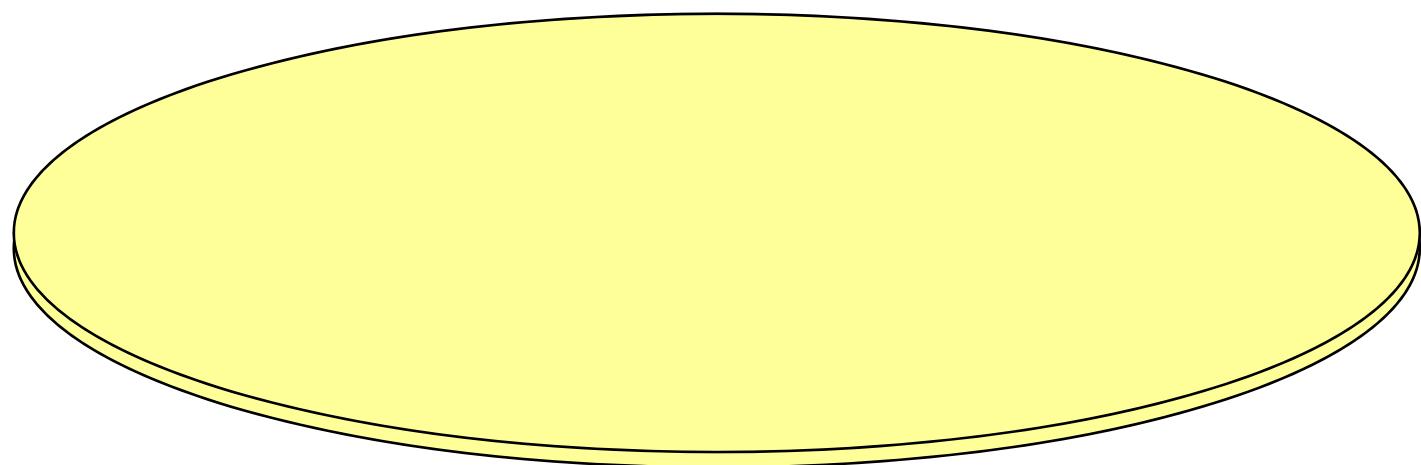
STJグループ活動概要

- Hf STJは2007年2月、AI STJは2007年5月に開始
- 測定器をゼロから手作り！
設計、STJ製作、アセンブリ、試験を全て自らの手で行う
 - 理研クリーンルームを用いて製作
 - 装置の一部を理研からKEKへ移設
→今年度の終わりにはKEKでも製作開始
- KEKでの性能試験システムの導入

典型的な製作工程 (X線用アルミSTJの例)

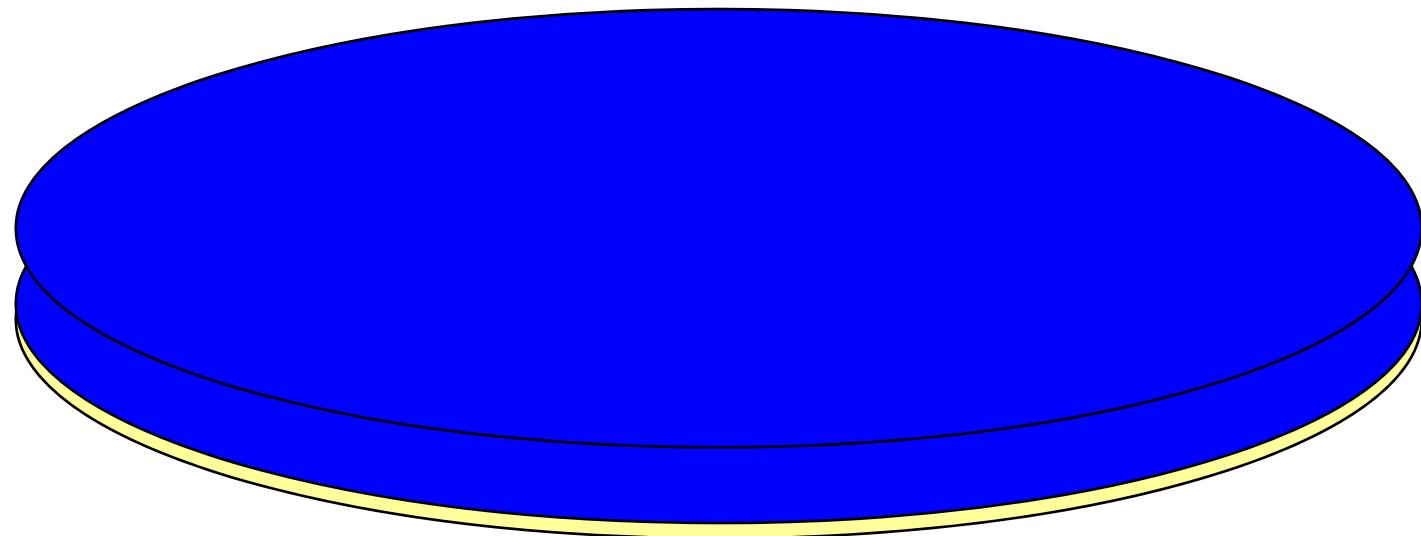


サファイア基盤



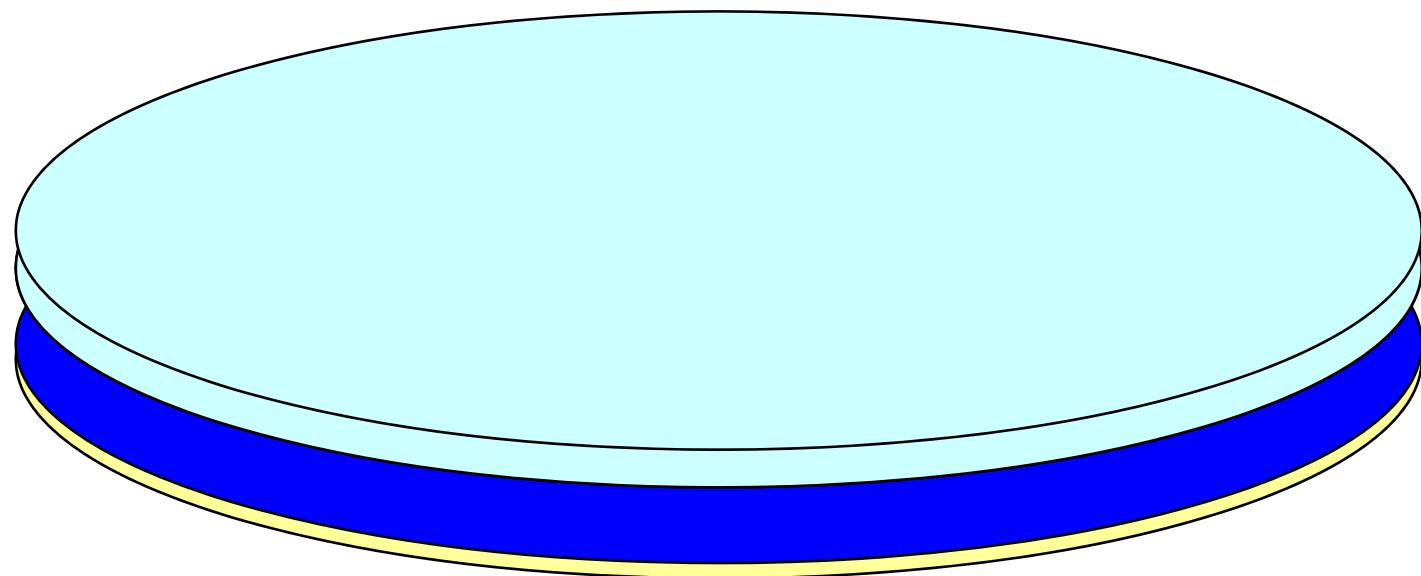
Buffer Layer(Al_2O_3) sputtering

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
1	Buffer	Sputter	Al2O3	Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W	215 A/min	1,000 Å	4'40"	



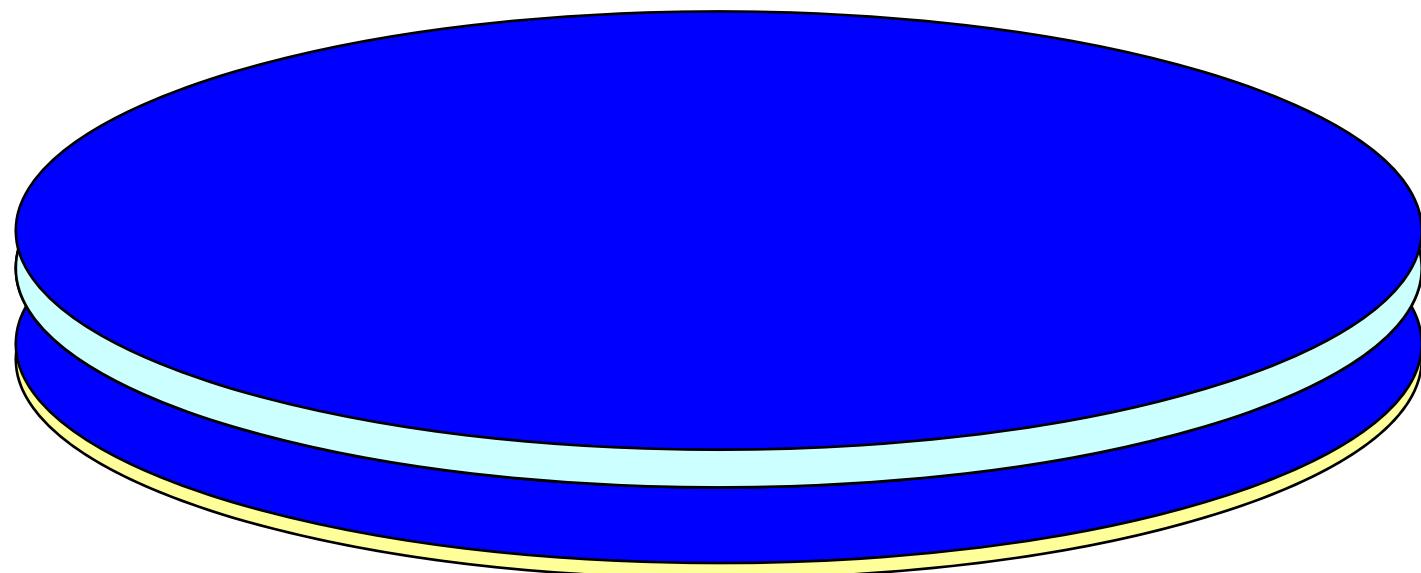
Tri-Base Al sputtering

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
2	Tri	Sputter	Al	Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W	922 A/min	500 A	33"	
		Oxidation	AlOx	O2 100 sccm: 30Torr	2~3nm/30TH	20~30 A	60' (30TH)	Torr x Hour
		Sputter	Al	Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W	922 A/min	500 A	33"	



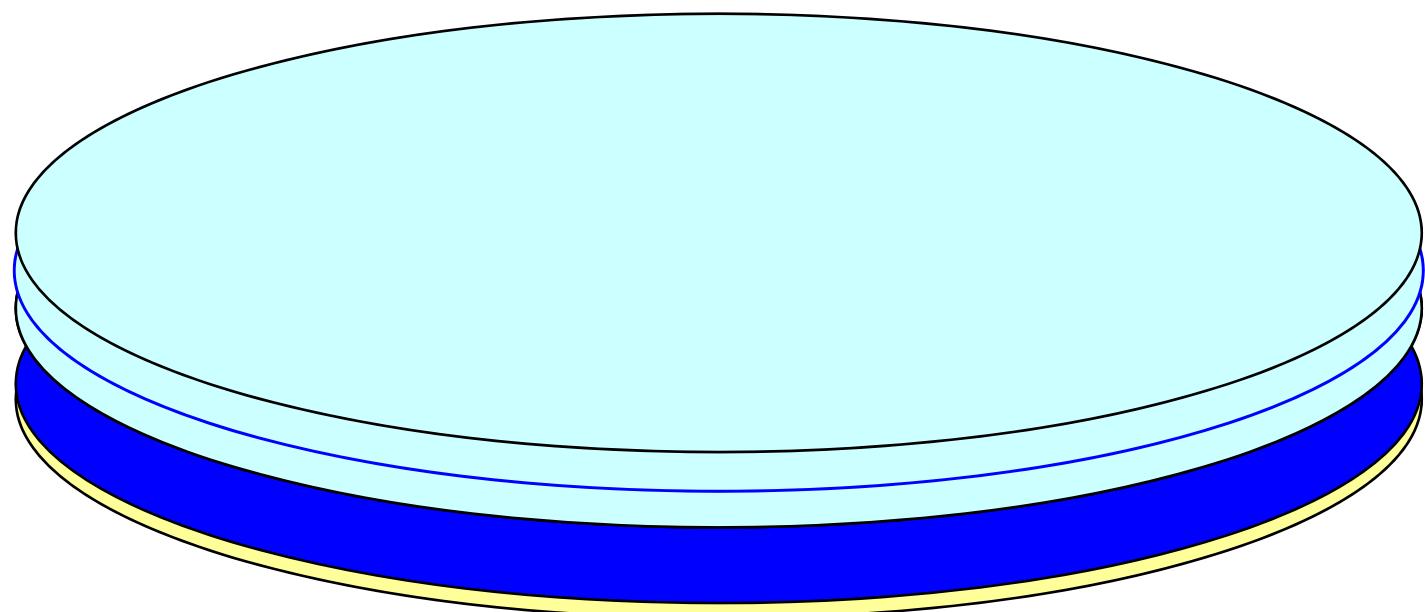
Tri-Middle AlOx

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
2	Tri	Sputter	Al	Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W	922 A/min	500 Å	33"	
		Oxidation	AlOx	O2 100 sccm: 30Torr	2~3nm/30TH	20~30 Å	60' (30TH)	Torr x Hour
		Sputter	Al	Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W	922 A/min	500 Å	33"	



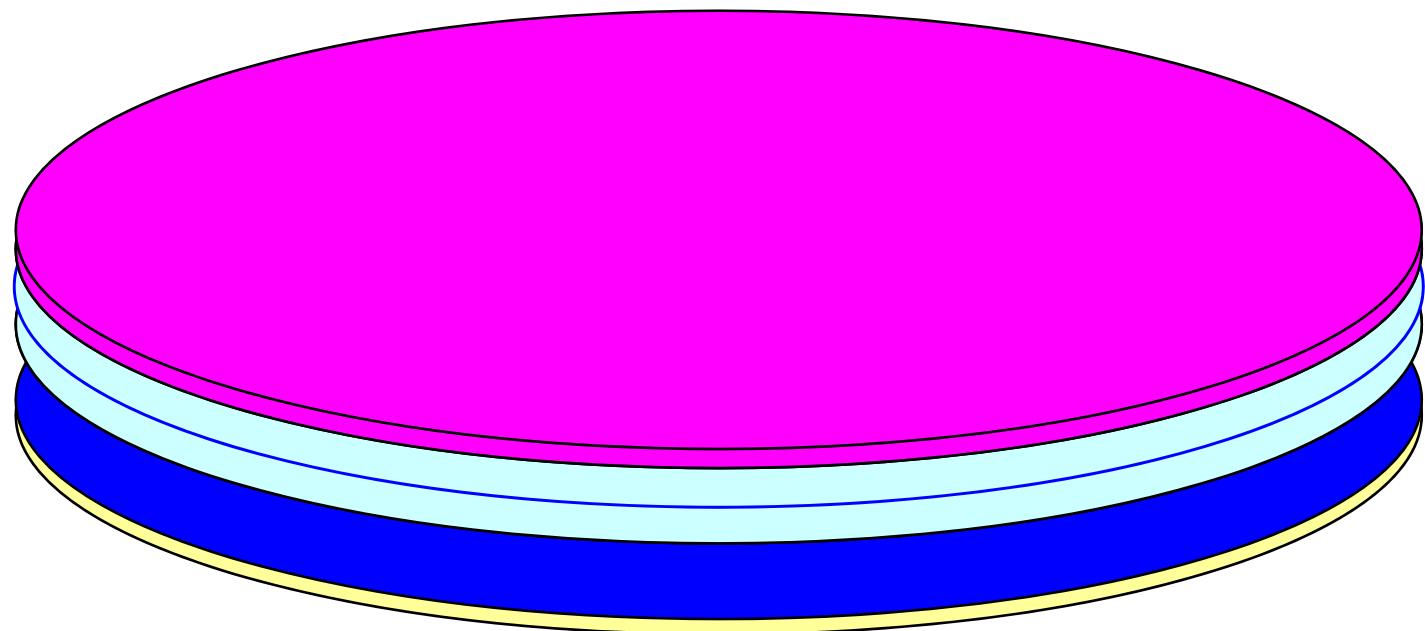
Tri-JD Al

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
2	Tri	Sputter	Al	Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W	922 A/min	500 A	33"	
		Oxidation	AlOx	O2 100 sccm: 30Torr	2~3nm/30TH	20~30 A	60' (30TH)	Torr x Hour
		Sputter	Al	Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W	922 A/min	500 A	33"	



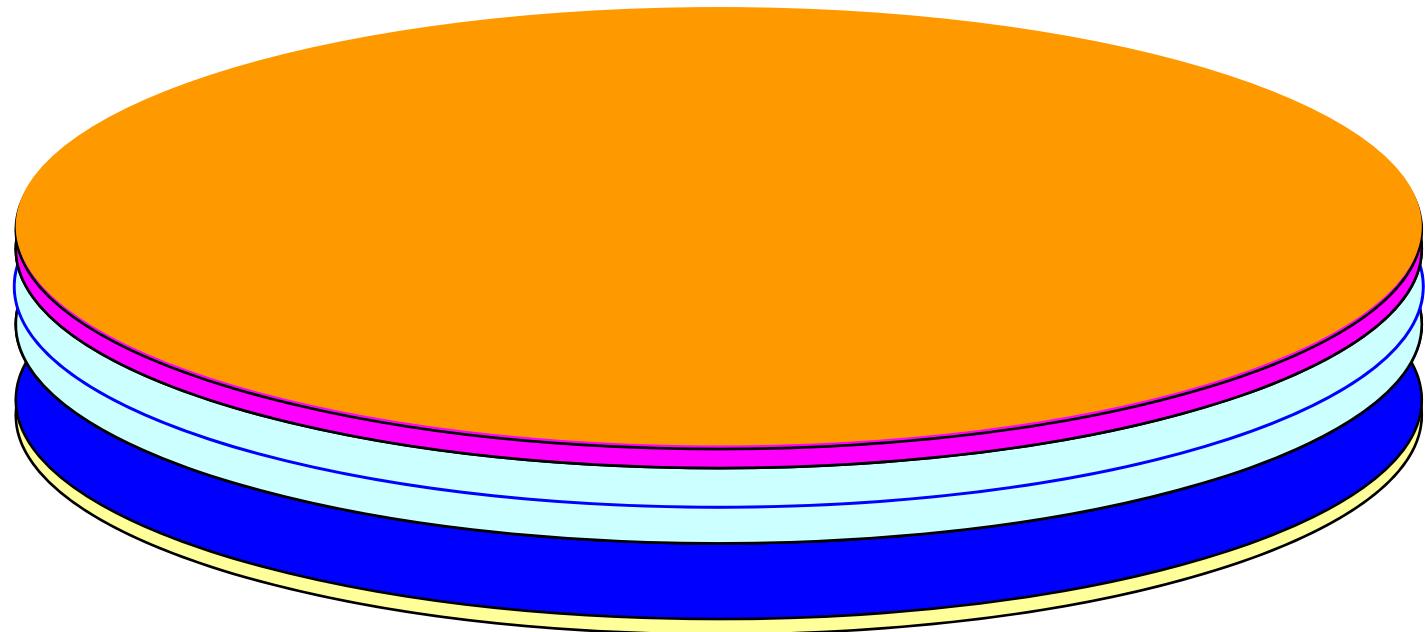
保護膜

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
3	Protection	Sputter	SiO2	Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W	554 A/min	240 A	26"	



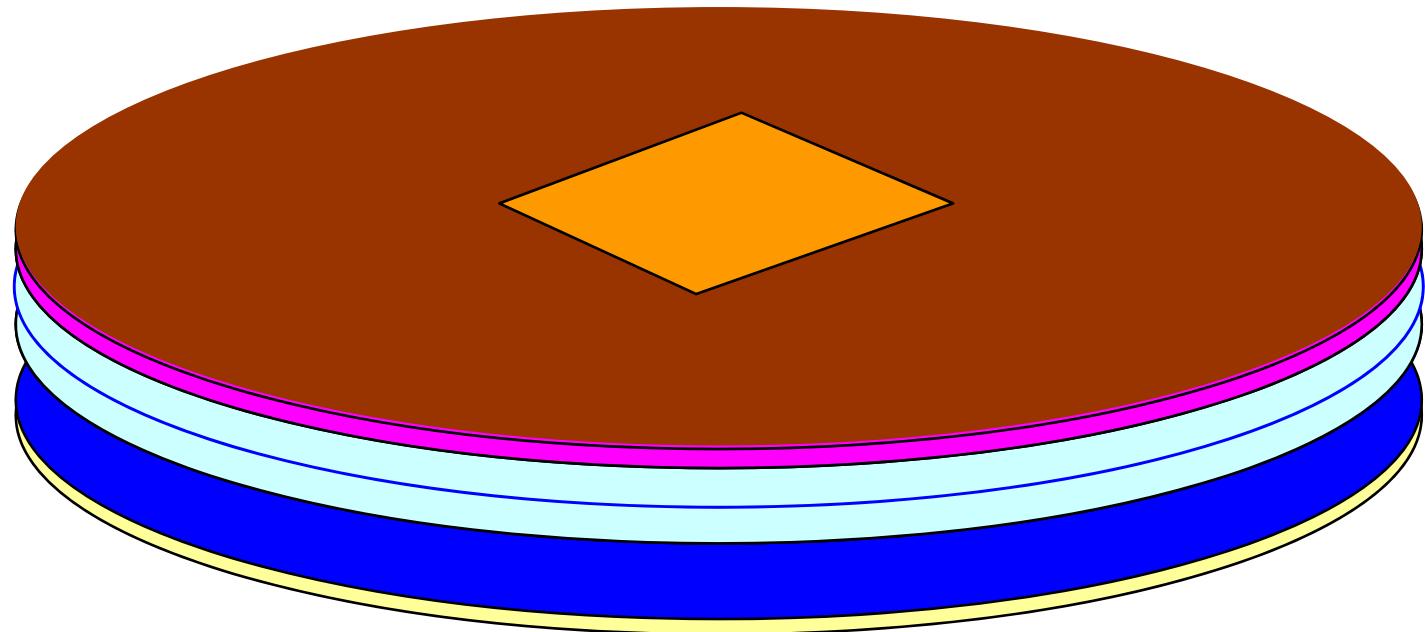
レジスト塗布

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
4	Resist	JD		RE11 MD5-JD				



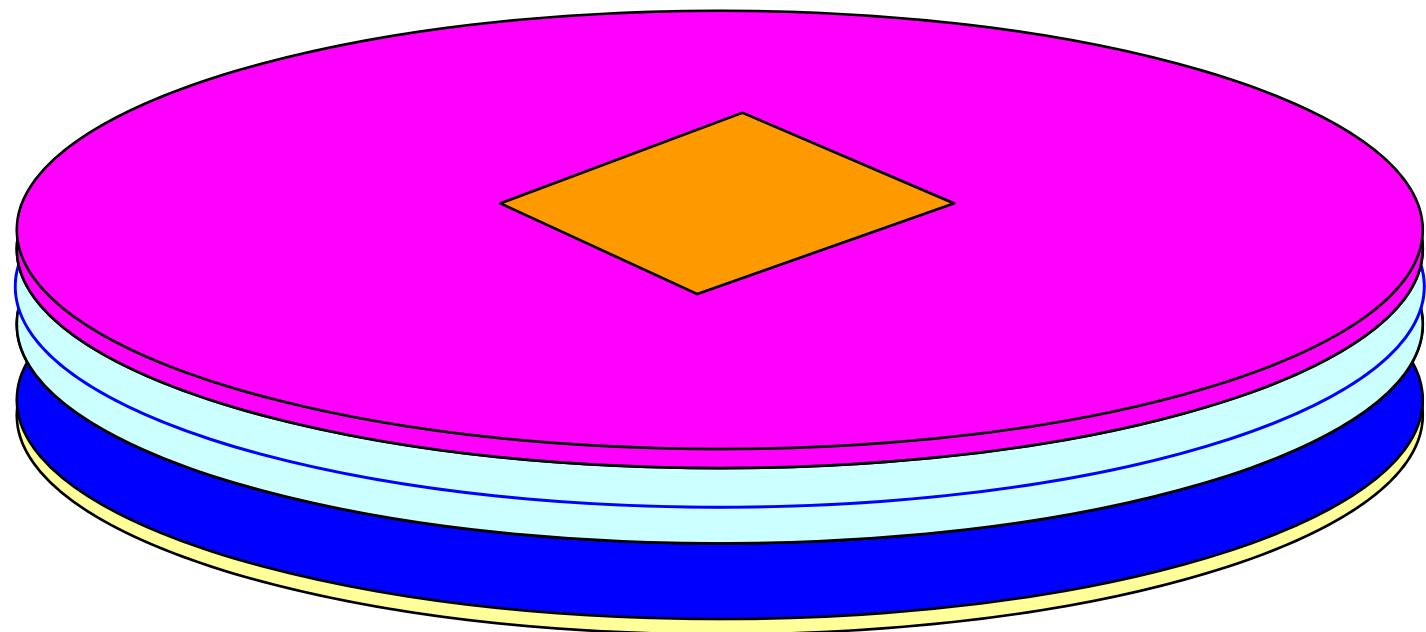
露光

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
4	Resist	JD		RE11 MD5-JD				



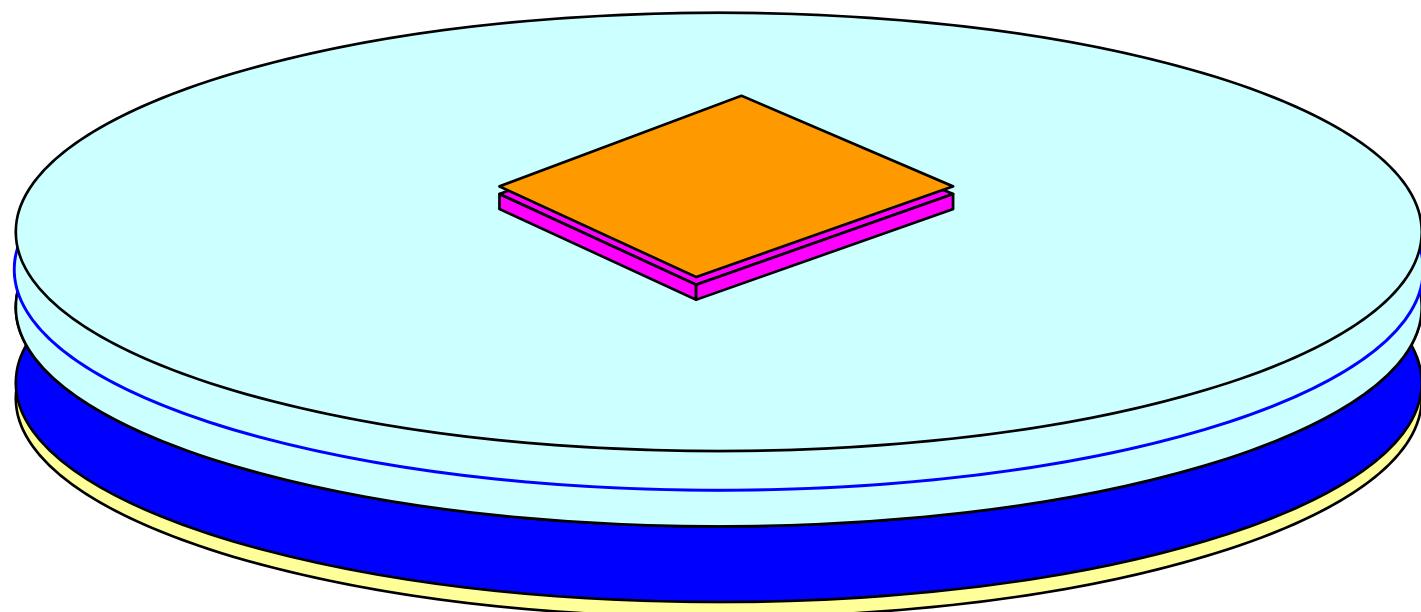
現像

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
4	Resist	JD		RE11 MD5-JD				



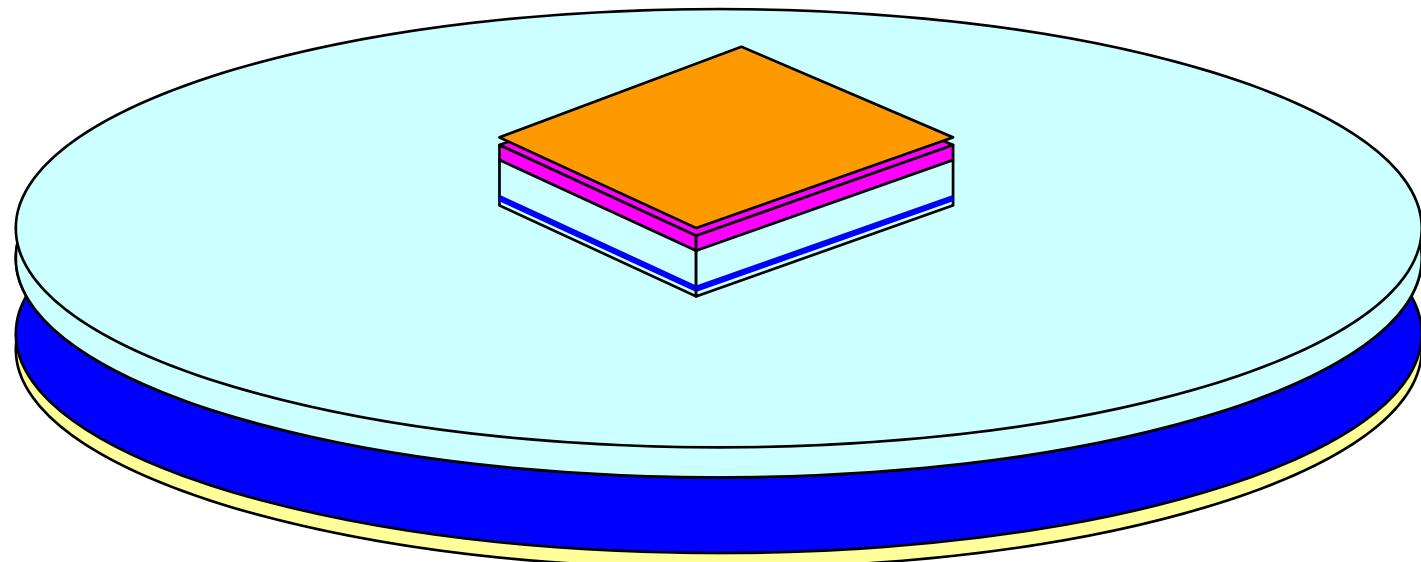
JDプリエッチング

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
5	Junction	Etching (RIE 1)	SiO ₂	CF4 50sccm: 20Pa, 30W	477 Å/min	250 Å	1'	
	Define (JD)		Al	CF4 50sccm: 4Pa, 30W	46 Å/min	550 Å	2'x6 (3)	次回 1'x12?



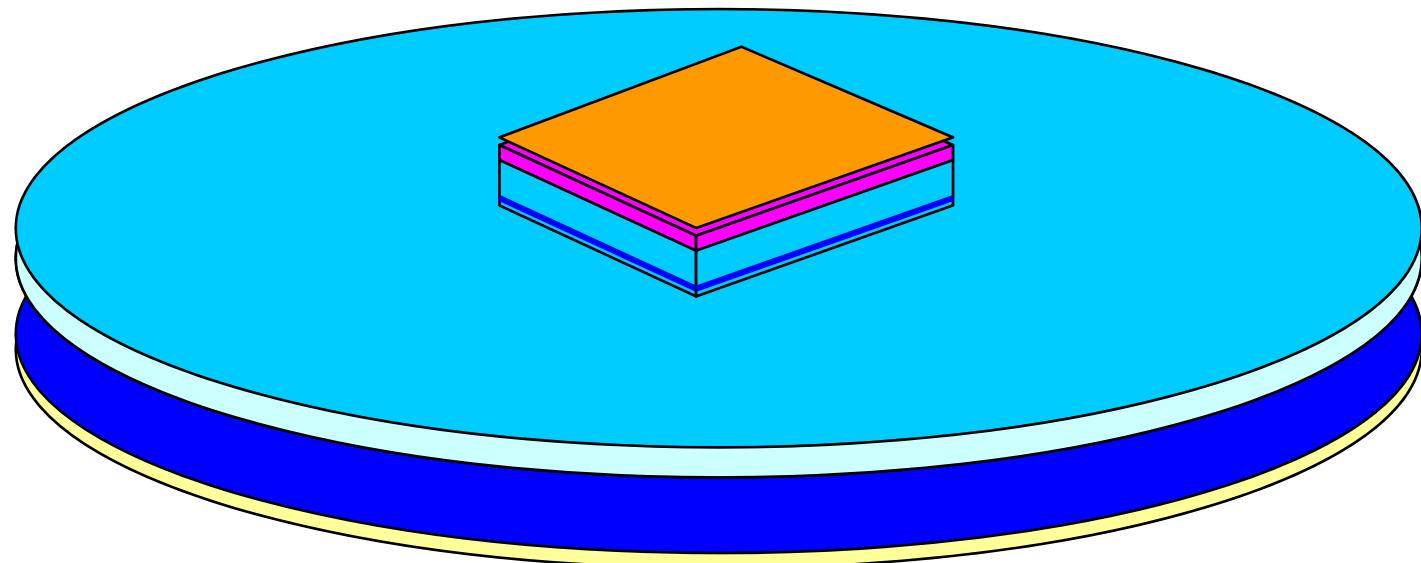
JD本番エッチング

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
5	Junction	Etching (RIE 1)	SiO ₂	CF4 50sccm: 20Pa, 30W	477 A/min	250 Å	1'	
	Define (JD)		Al	CF4 50sccm: 4Pa, 30W	46 A/min	550 Å	2'x6 (3')	次回 1'x12?



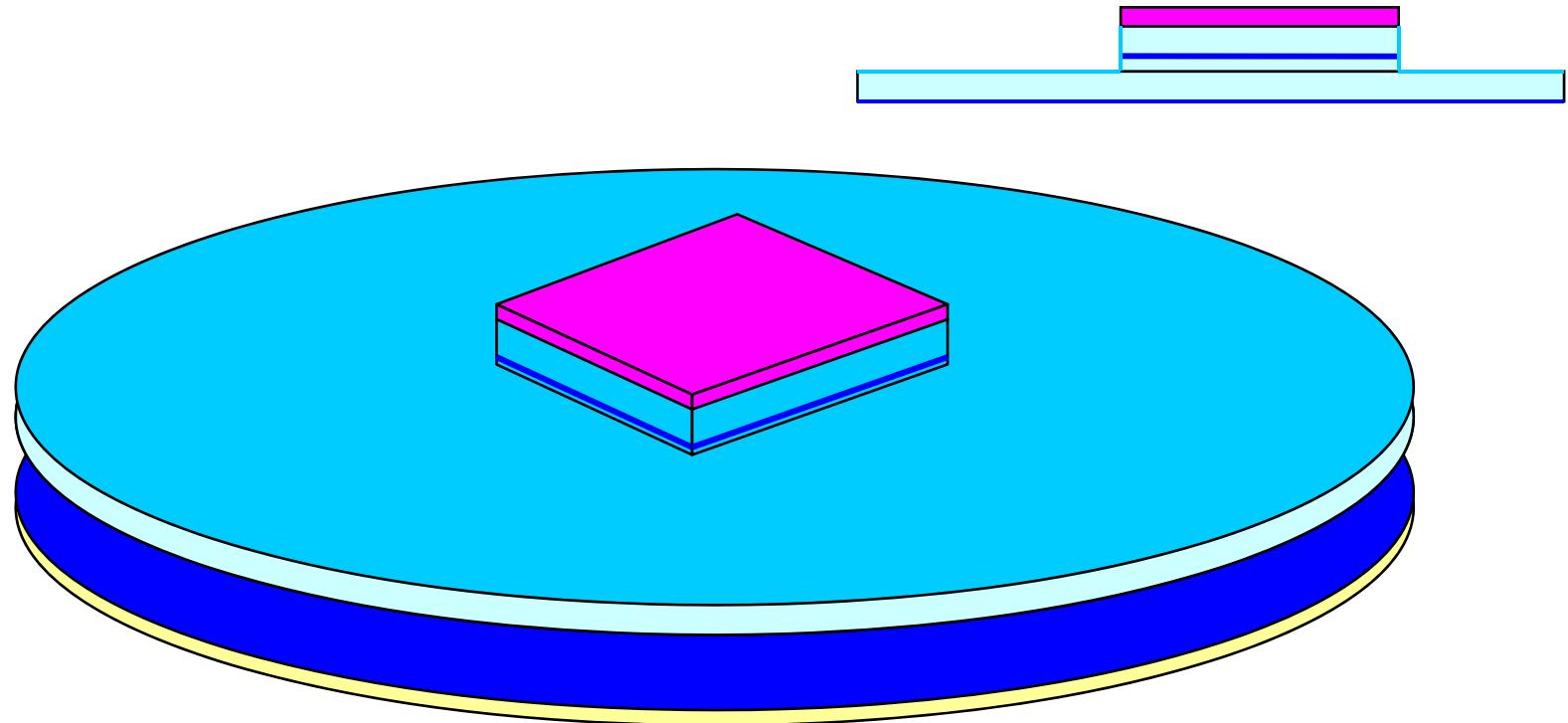
プラズマ酸化

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
6	Edge	プラズマ酸化	O2	O2 30 sccm: 13Pa, 30W	---	---	1'	



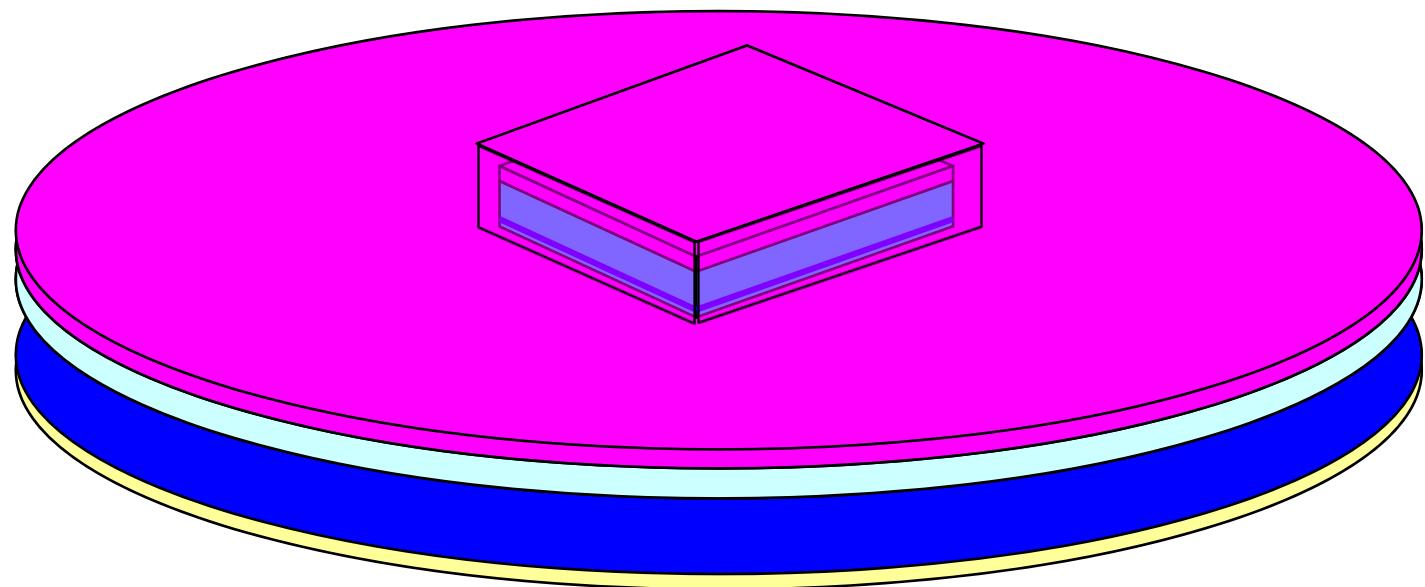
レジスト除去

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
7	Resist除去							↓5/14 19:00



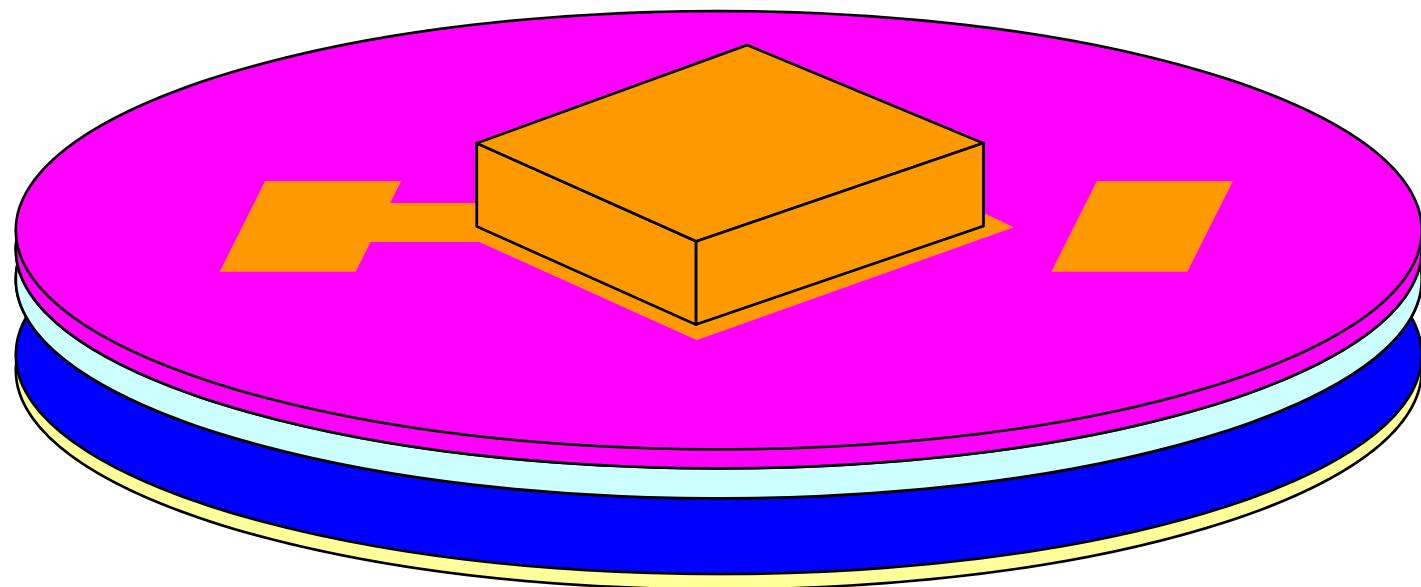
保護膜

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
8	Protection	Sputter	SiO2	Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W	554 A/min	240	26"	



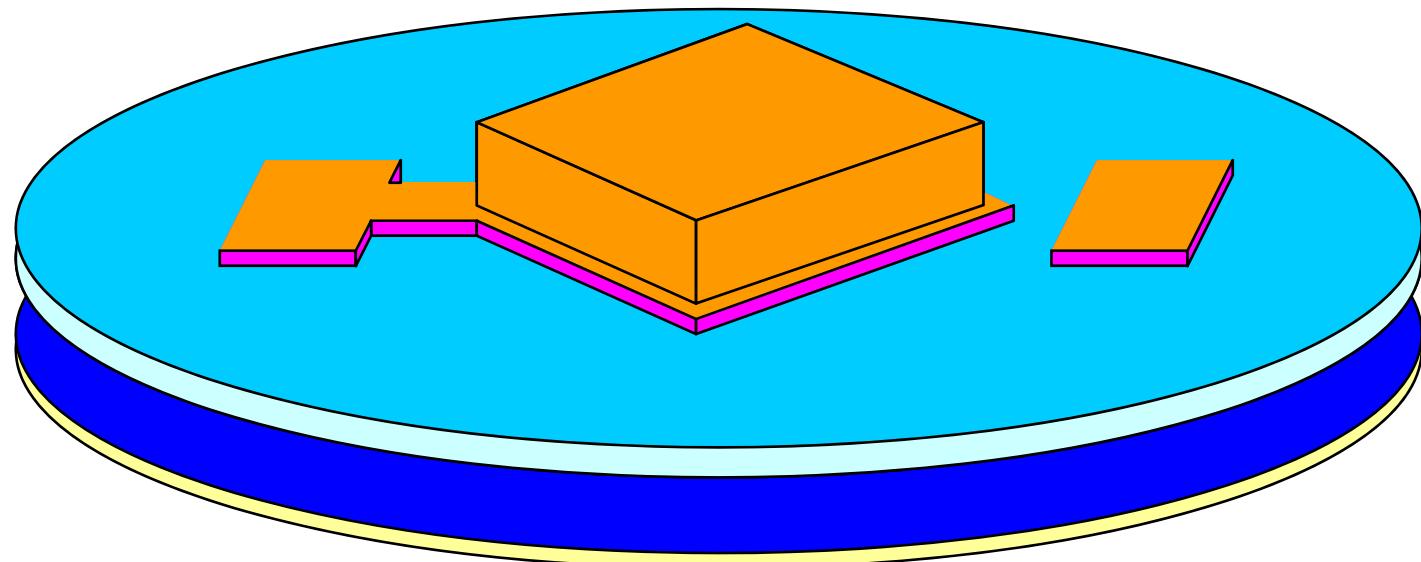
レジスト塗布、露光、現像

	Layer		materia l	Condition	Rate	Thicknes s	time	
9	Resist	BE		RE11(実際は13)MD5-BE				↓5/15 12:30



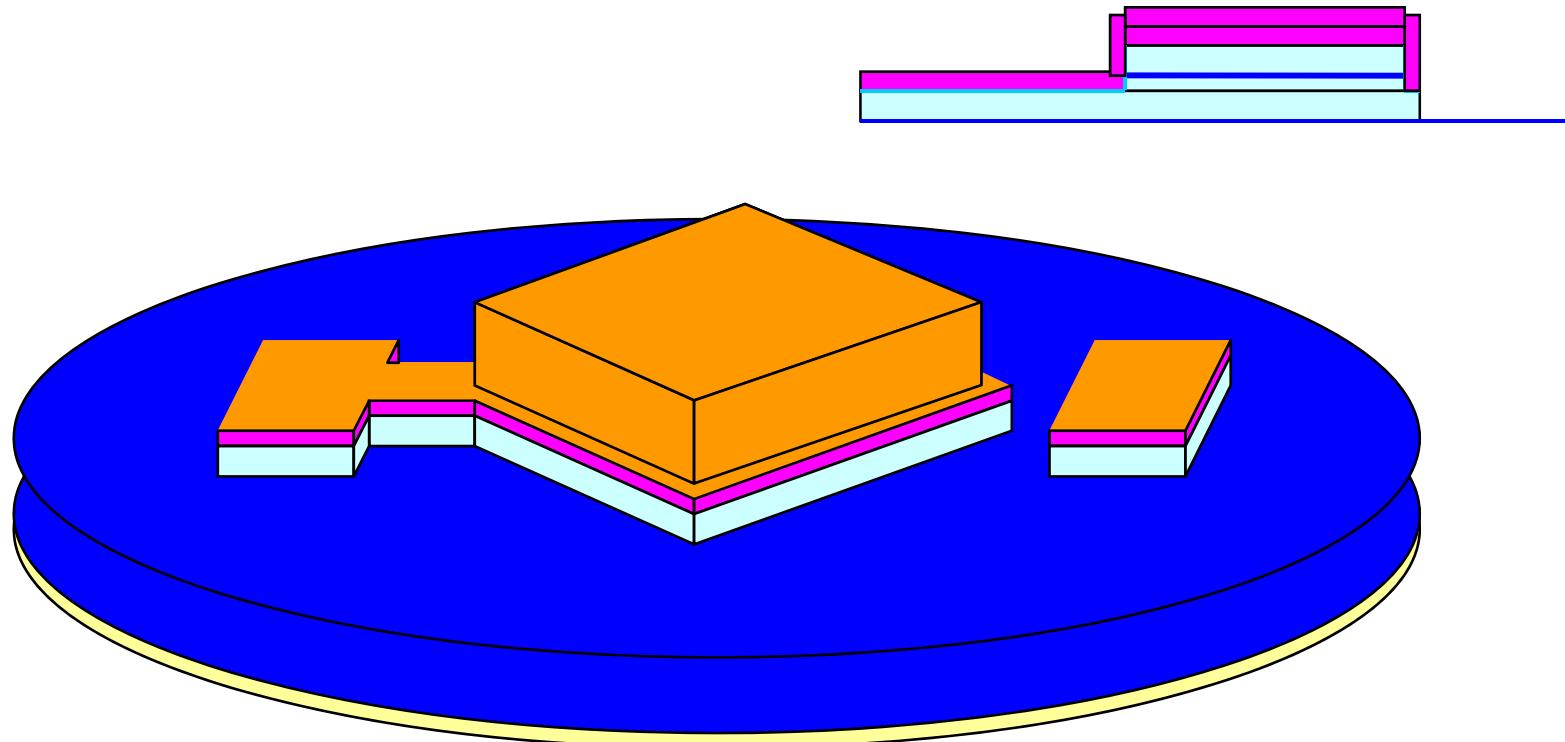
BE pre-etching

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
10	BE (Base Electrode)	Etching (RIE 1)	SiO ₂	CF4 50sccm: 20Pa, 30W	477 Å/min	250 Å	1'	
			Al	CF4 50sccm: 4Pa, 30W	46 Å/min	550 Å	2'x6 (3')	次回 1'x12?



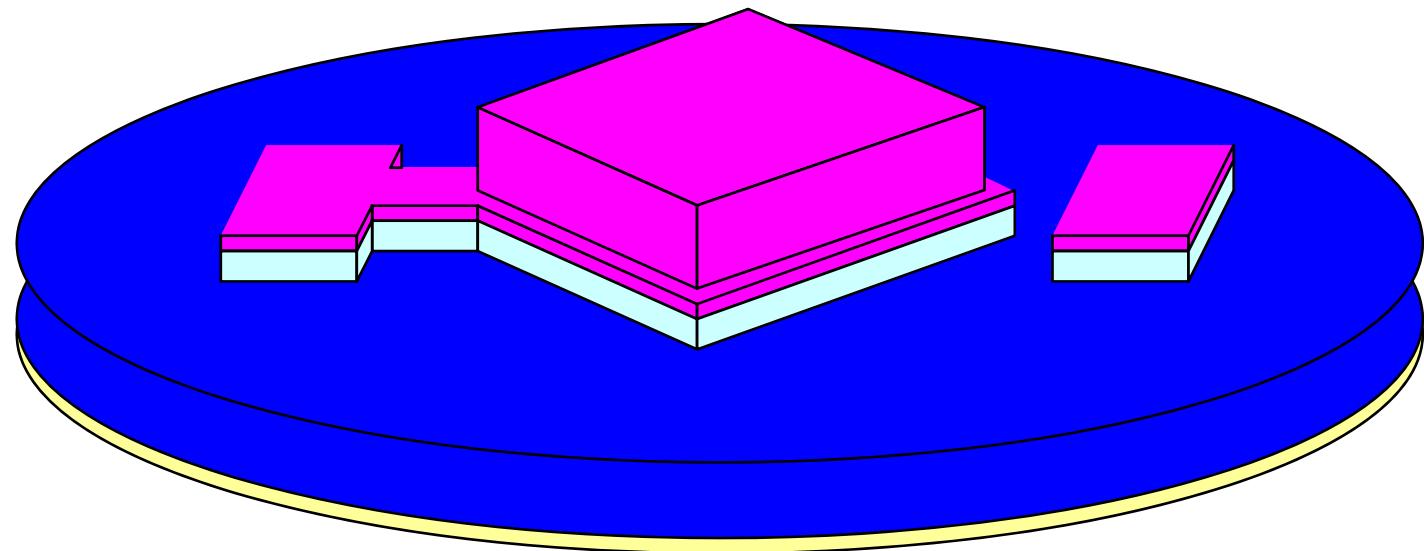
BE 本番etching

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
10	BE (Base Electrode)	Etching (RIE 1)	SiO ₂	CF4 50sccm: 20Pa, 30W	477 Å/min	250 Å	1'	
			Al	CF4 50sccm: 4Pa, 30W	46 Å/min	550 Å	2'x6 (3)	次回 1'x12?



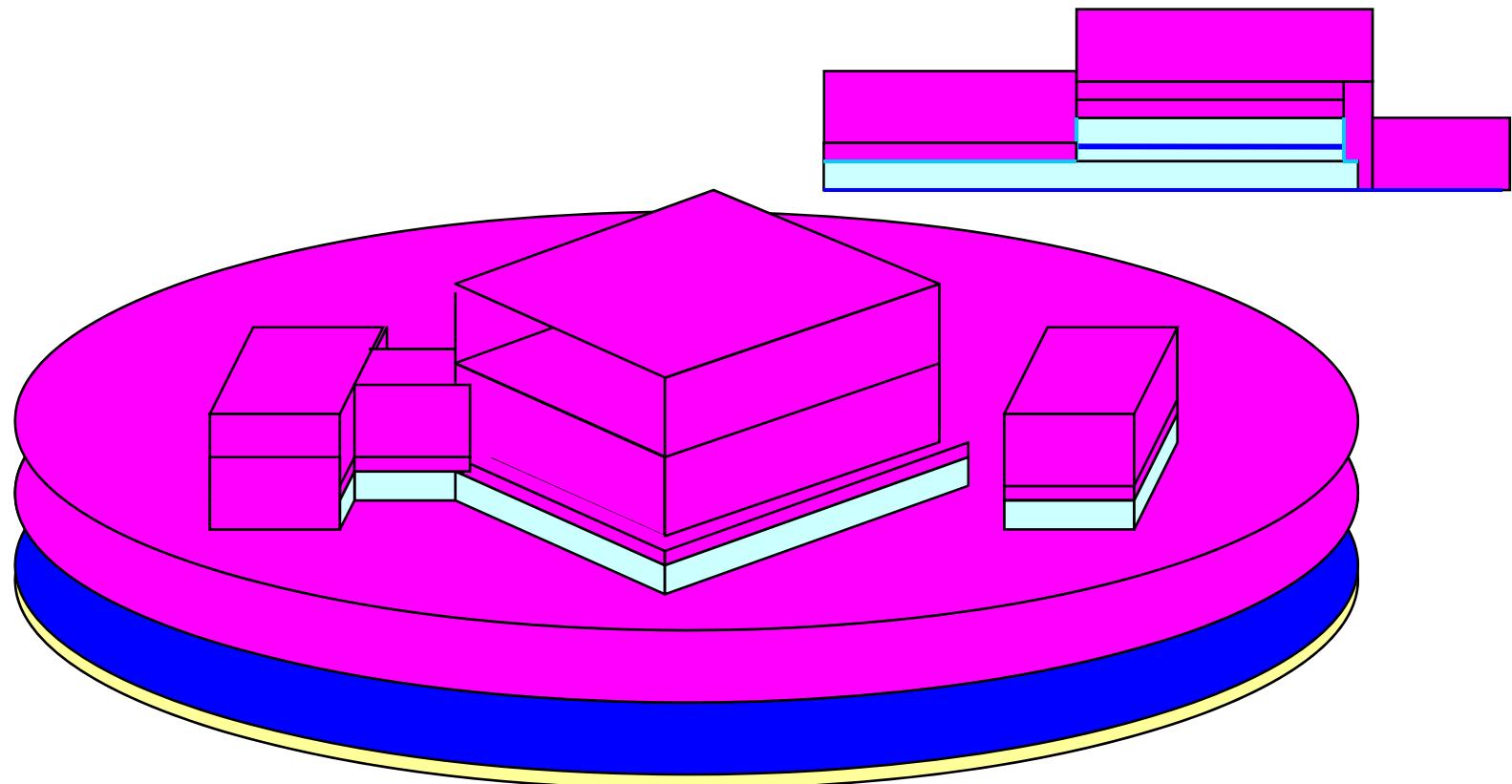
レジスト除去

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
11	Resist除去							



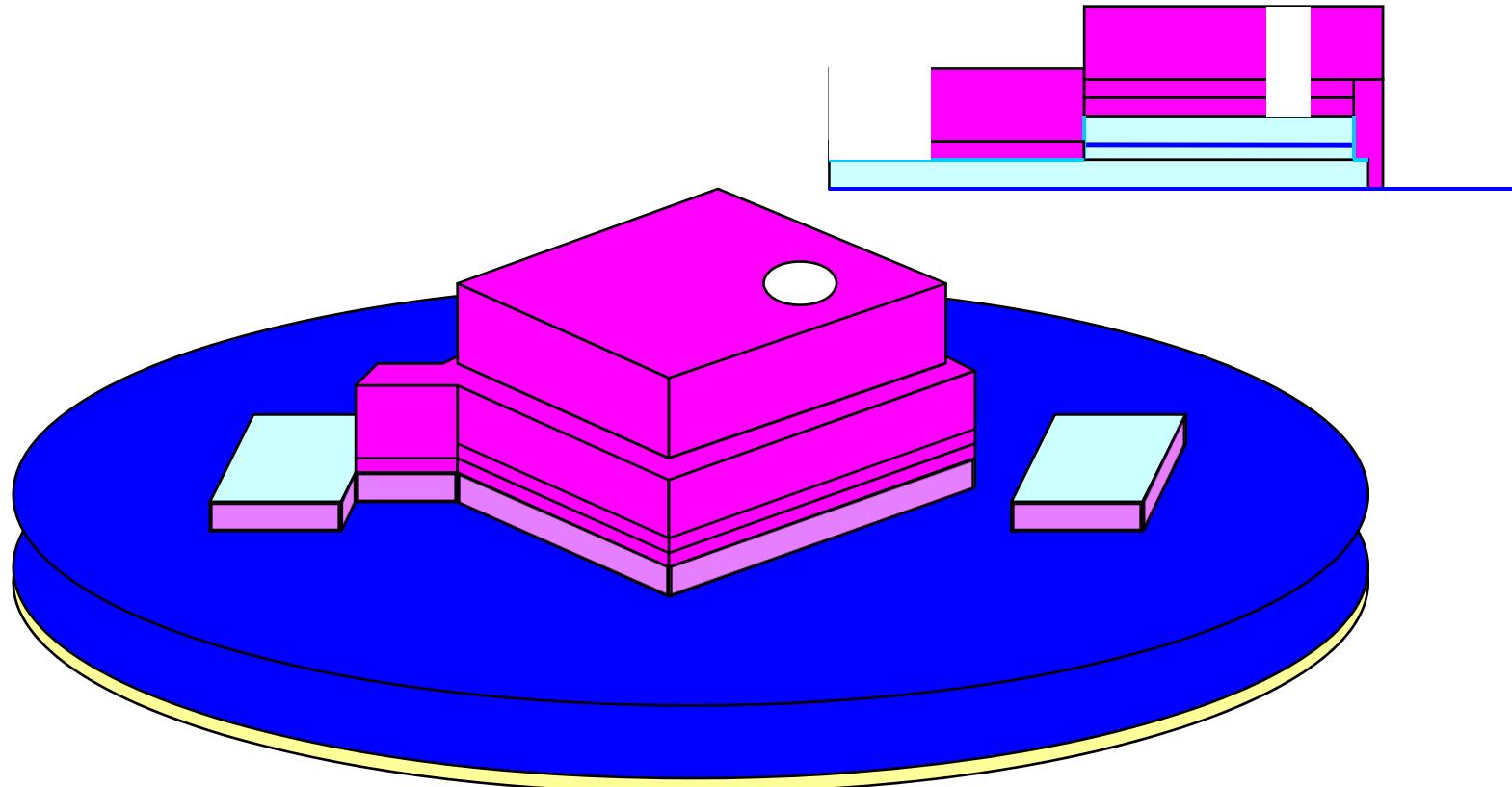
Insulation Layer

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
12	Insulation	Sputter	SiO2	Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W	554 A/min	1,000 Å	1'48"	

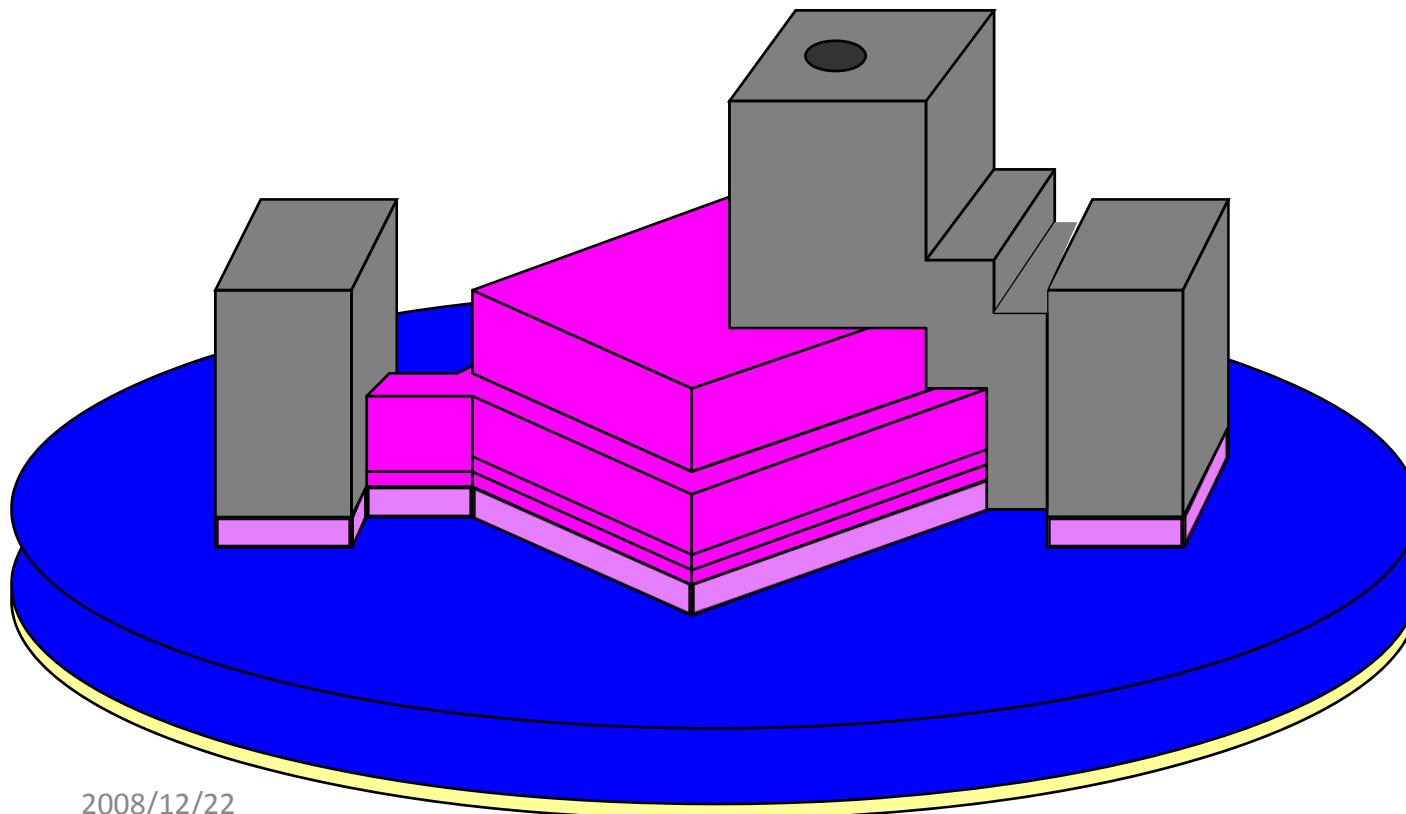
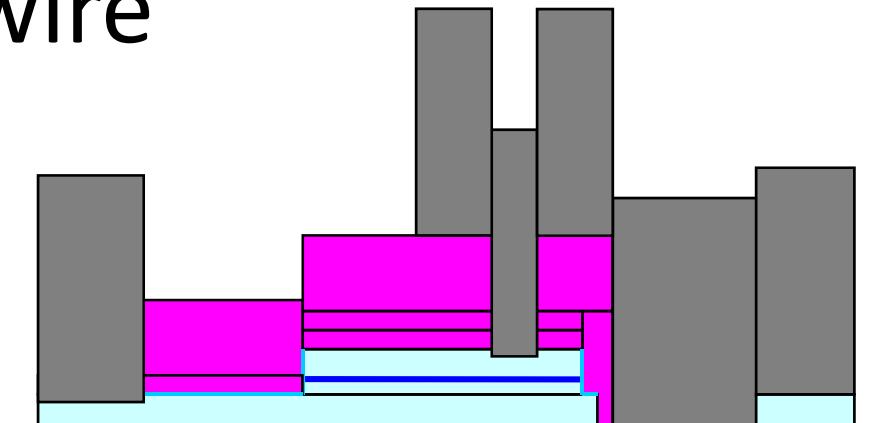


Contact Hall (padの酸化膜も削る)

	Layer		material	Condition	Rate	Thickness	time	
13	Resist	BE		RE11 MD5-CH				
14	CH	Etching	SiO ₂	CF4 50sccm: 20Pa, 30W	477 Å/min	1,500 Å	4'	↓ 5/15 17:50
15	Resist除去							↓ 5/15 18:30

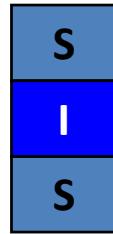
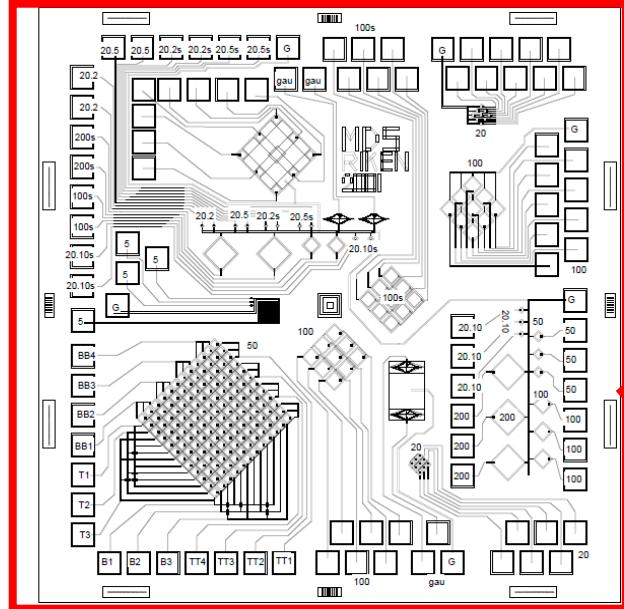


Nb wire

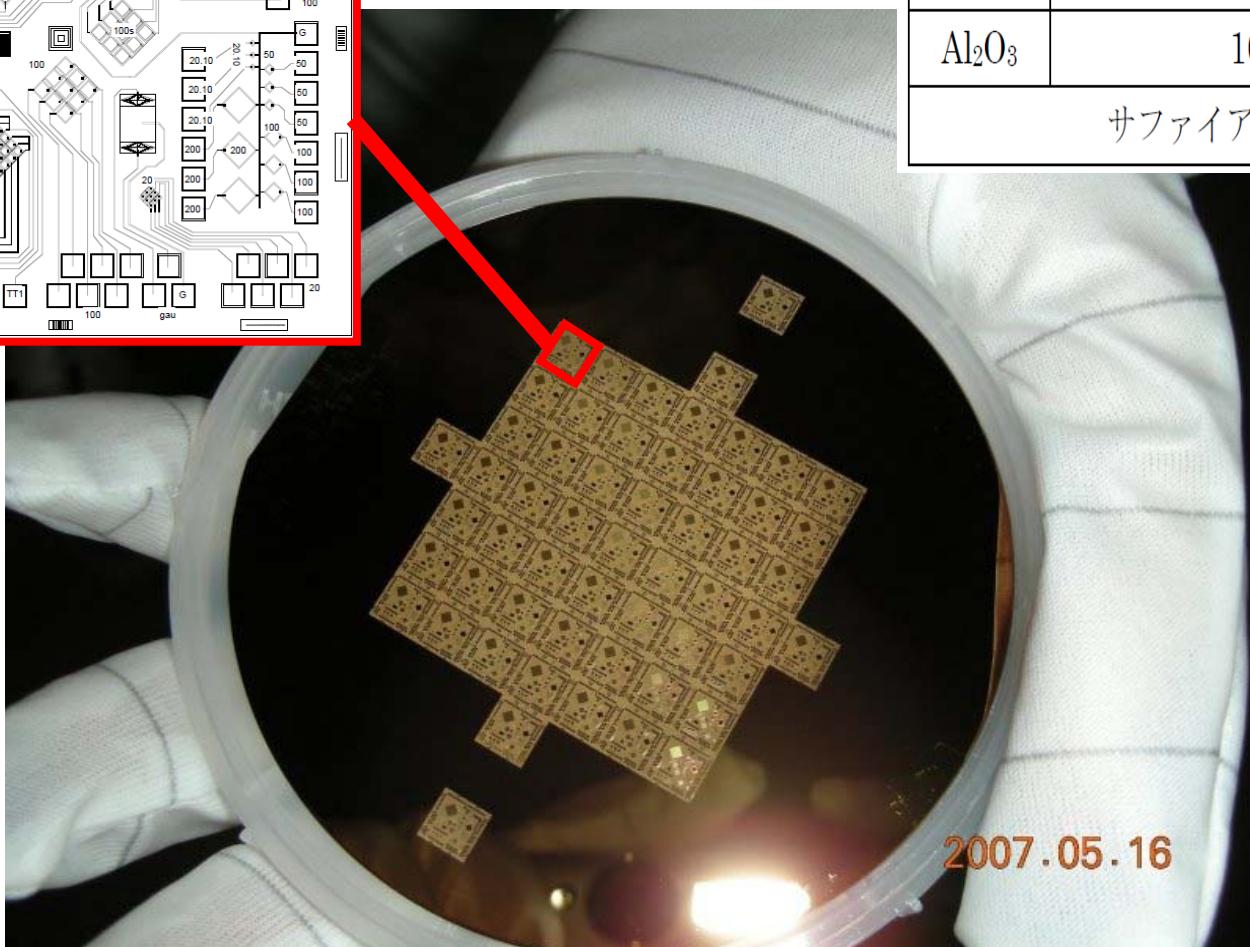


	Layer	
16	Wire	Sputter
17	Resist	W
18	Wire	Etching
19	Resist除去	
20	保護resist	ペーク 5'

X線用Al-STJ

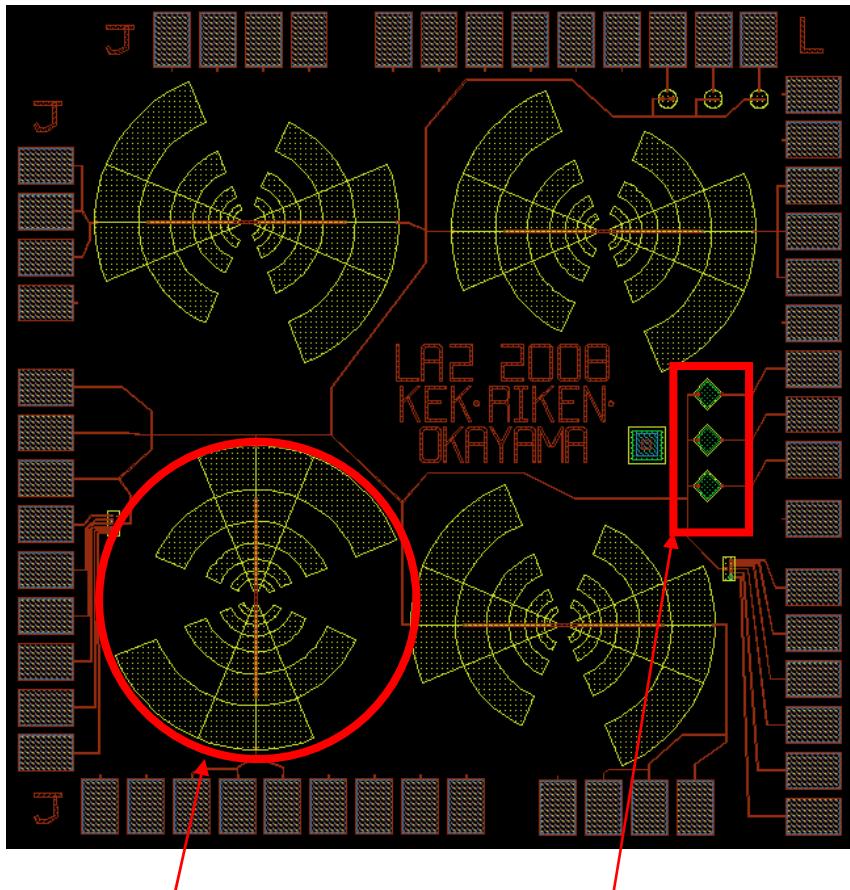


Al	50 nm
AlO _x	30Torr x 1hour (2~3nm)
Al	50 nm
Al ₂ O ₃	100 nm
サファイア基板	



アンテナ接続AI/Nb-STJ試作

作成条件が既知のNb/AI-STJで試作



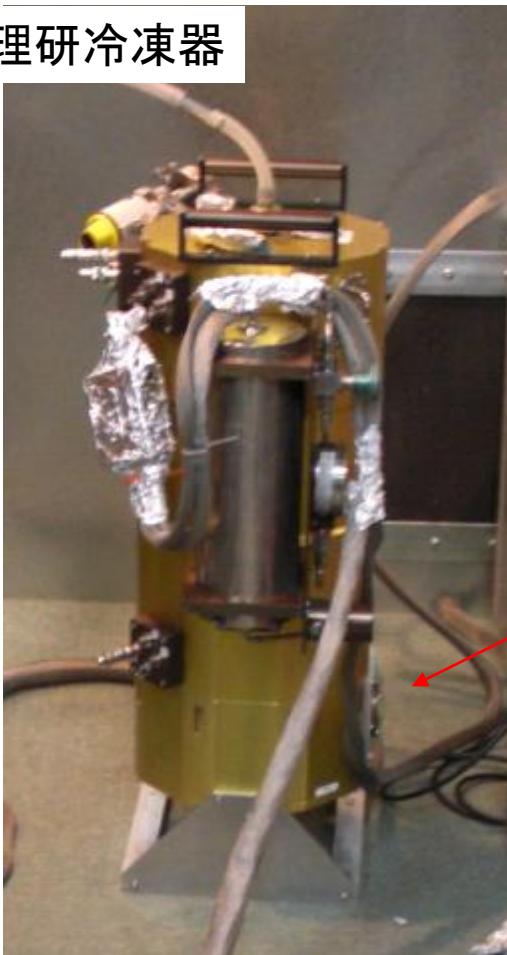
アンテナ結合STJ

X線用STJ

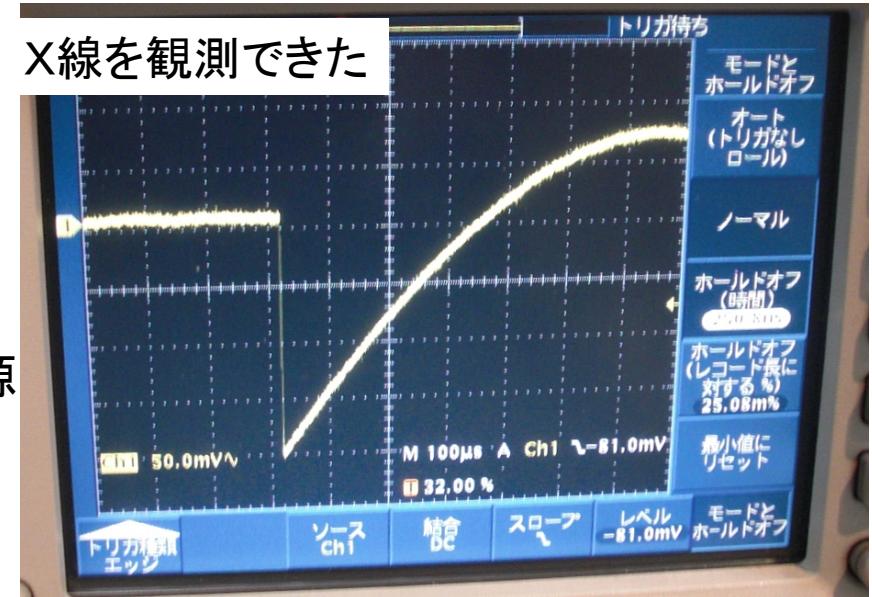
KEKLA2-03		
S	Nb	50 nm
I	Al	25 nm
I	AlO _x	6~9nm(20Torr X 0.5Hour)
S	Al	25 nm
アンテナ(Nb)		150 nm
Al ₂ O ₃		100 nm
シリコン基板		

Nb/Al-STJ試験 0.3K冷凍機を使ったX線測定

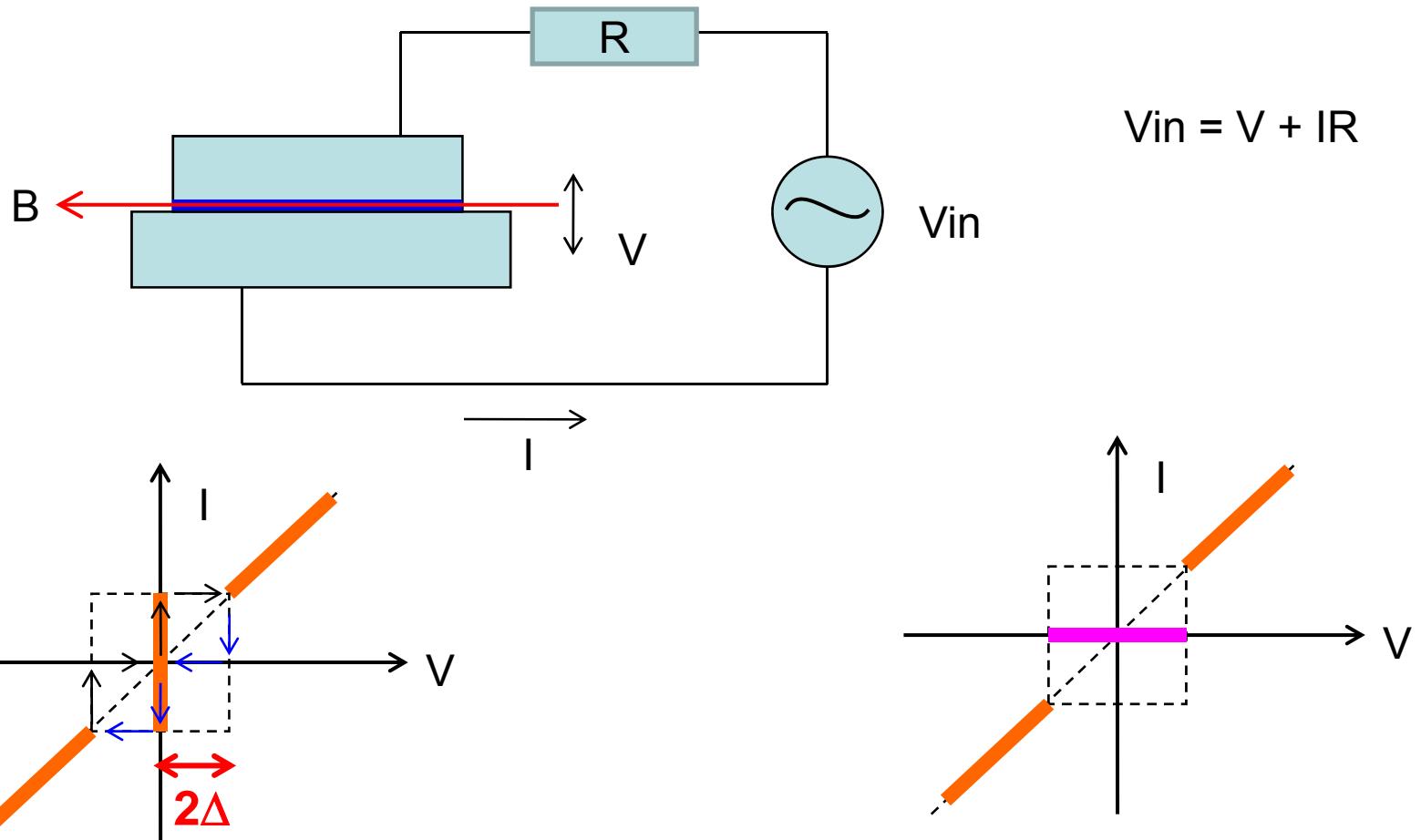
0.3K理研冷凍器



Fe55線源



I-V測定=SIS構造がうまく出来ていることのチェック

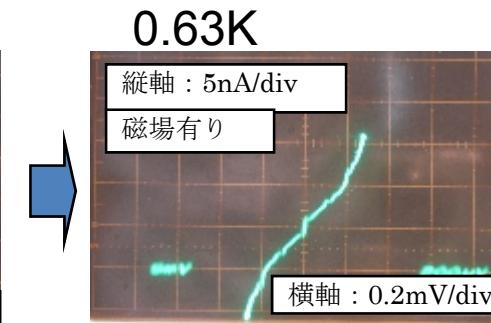
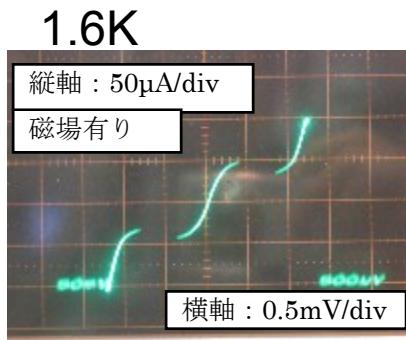
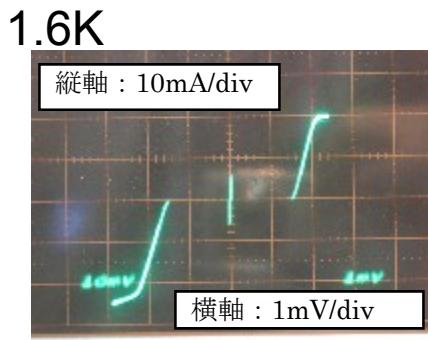


磁場無
トンネルバリアをクーパー対
が抜けられる(直流ジョセフソン効果)

磁場有
トンネルバリアに磁力線が
入り込むためクーパー対が
通れない

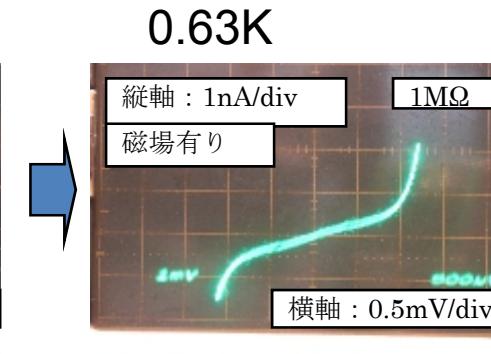
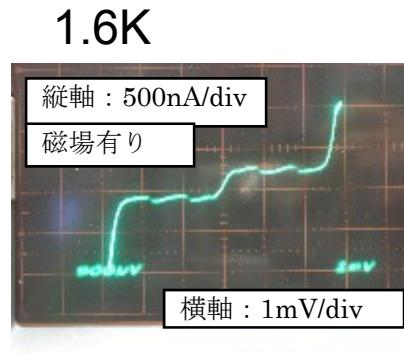
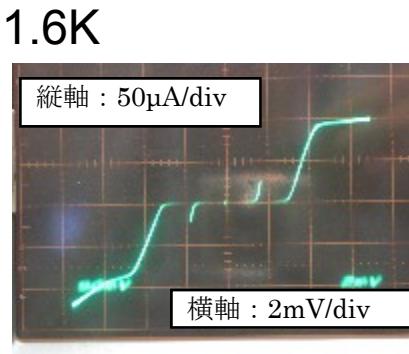
Nb/AI-STJの試験 He4デュアーを使ったI-V測定

- ダイヤ型STJ(100μm)



リークカレント
5nA@200μV
* 40μA (1.6K)

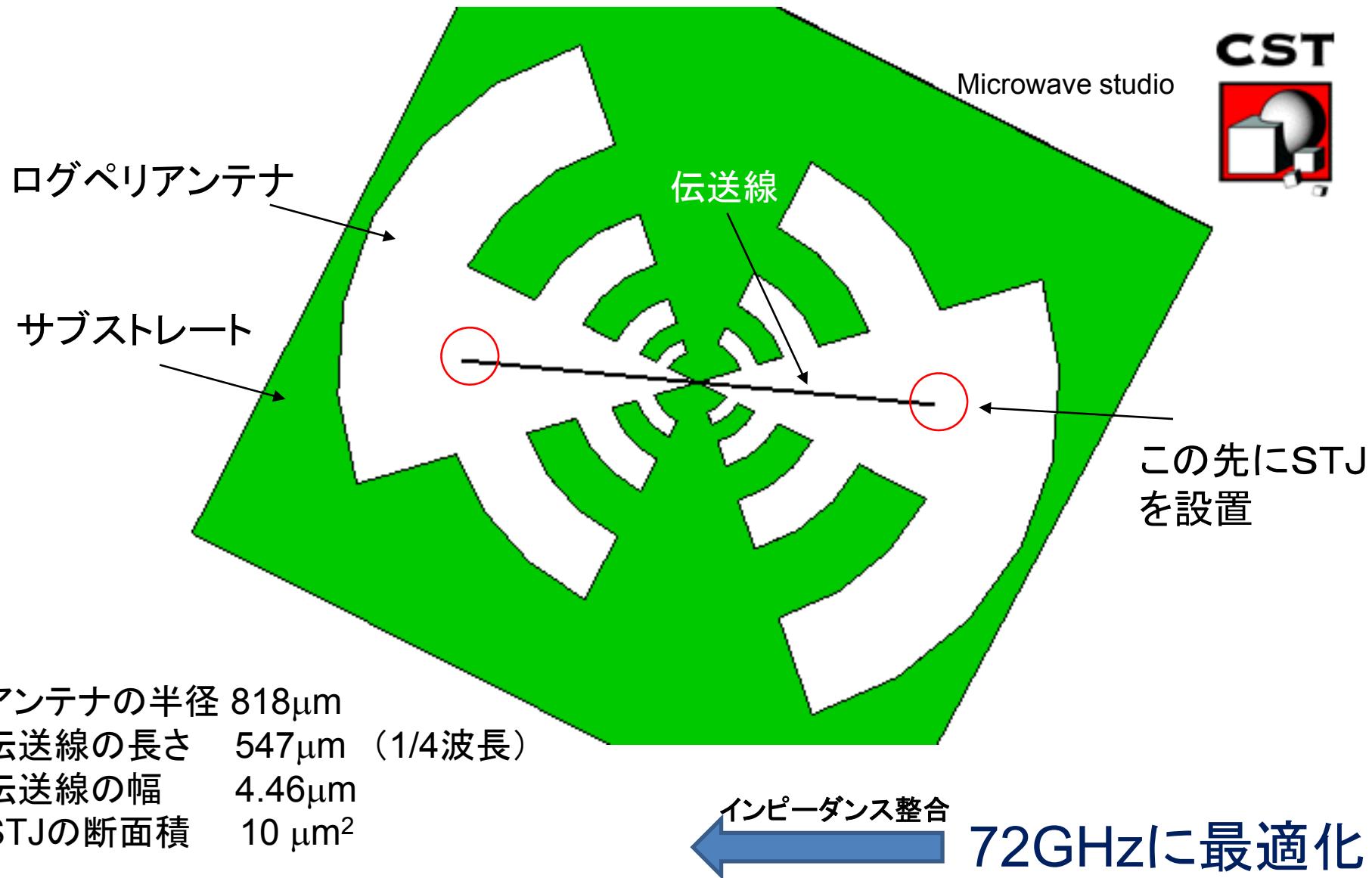
- アンテナ接続STJ($\varphi 7\mu\text{m} \times 2$)



リークカレント
0.3nA @ 400μV
* 180nA (1.6K)

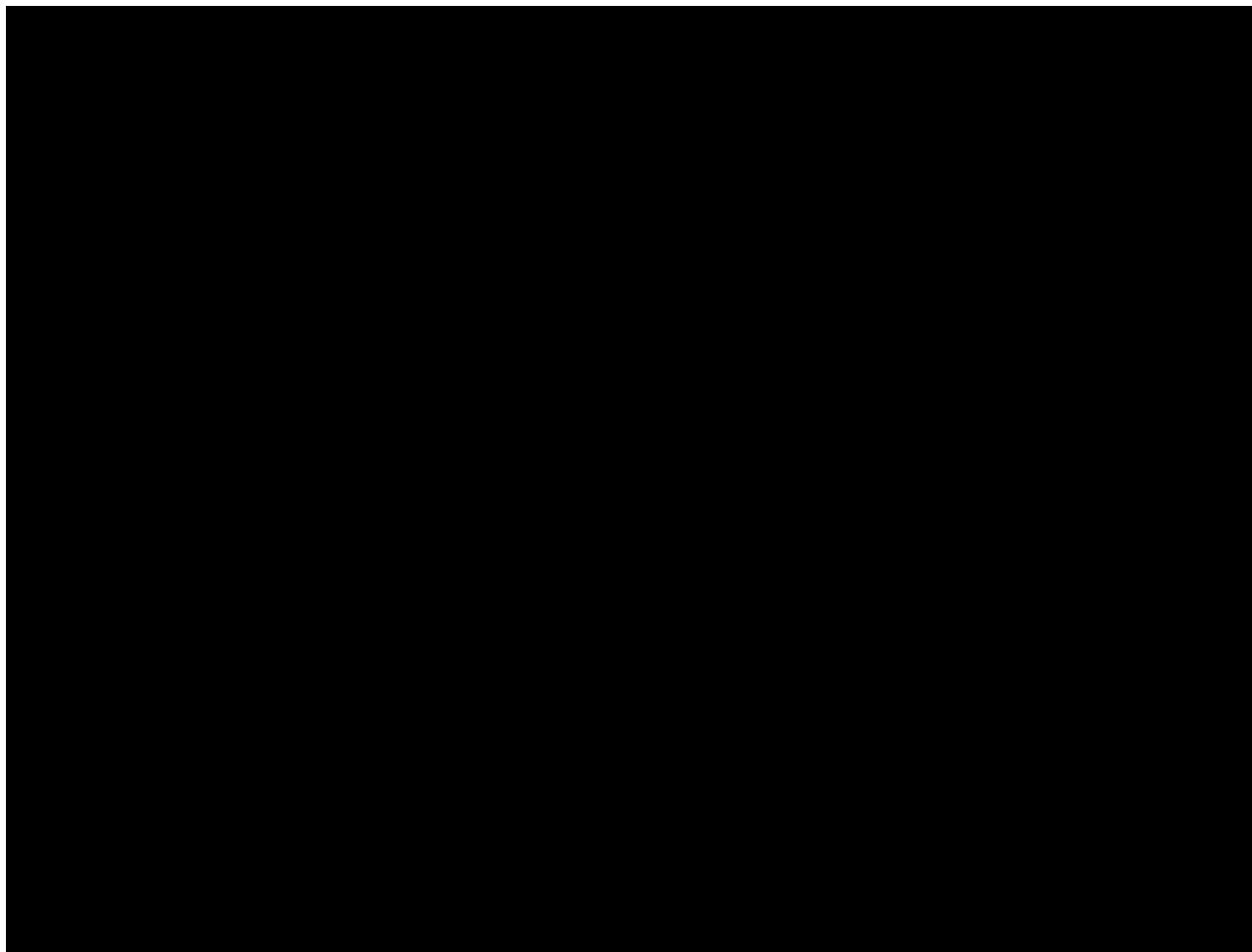
アンテナ結合のNb/AI-STJがうまく作成出来た。
今後: 東北理研でミリ波照射のテストを行う。

AI-STJ: アンテナと伝送線の設計



電界シミュレーション

吉田



色が(アンテナ面に垂直な)電界の強さをあらわす

2008/12/22

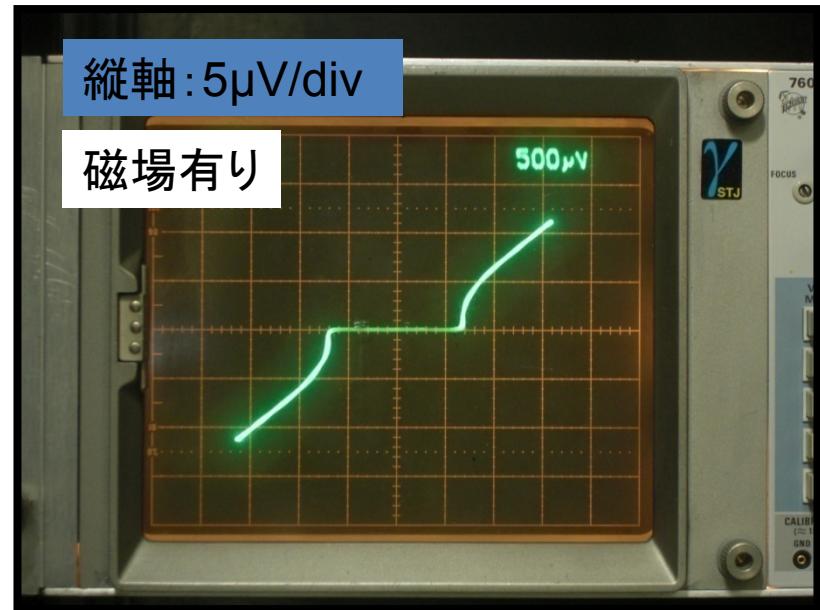
■ 上向きの電界
■ 下向きの電界

38

アンテナ接続AI-STJ試作

KEKLA2-アライナー

S	Al	25 nm
I	AlOx	6~9nm(20Torr X 0.5Hour)
S	Al	25 nm
	アンテナ(Al)	25 nm
	Al2O3	100 nm
	シリコン基板	



アンテナ結合STJ($\phi 7\mu\text{m} \times 2$)

- ギャップ: 650 μ V (Al x 2)
- 25nA@200 μ V
 - 温度を下げるさらに下がりそう
→ADRで100mKでのI-V測定を行う

Hf-STJs:Depo. condition

H.Sato

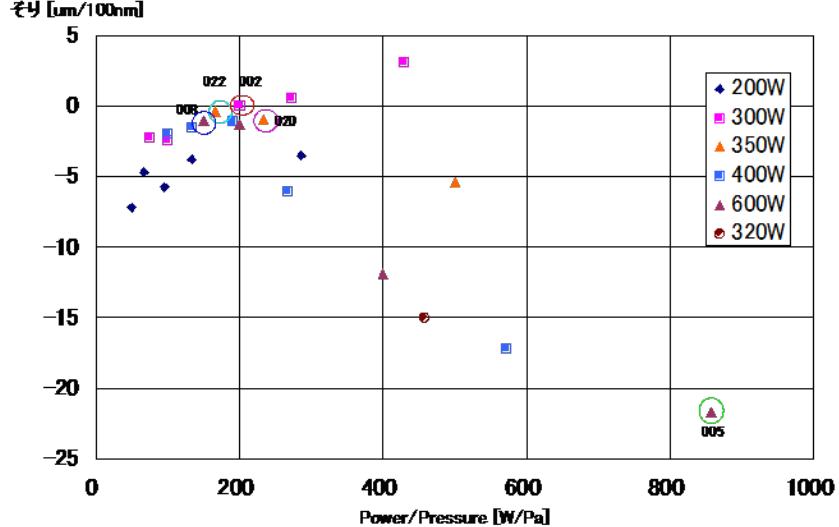
This was a first time for us to make Hf films. So, deposition condition should be fixed firstly.

(... And So far, nobody succeed in making Hf-STJs in the world.)

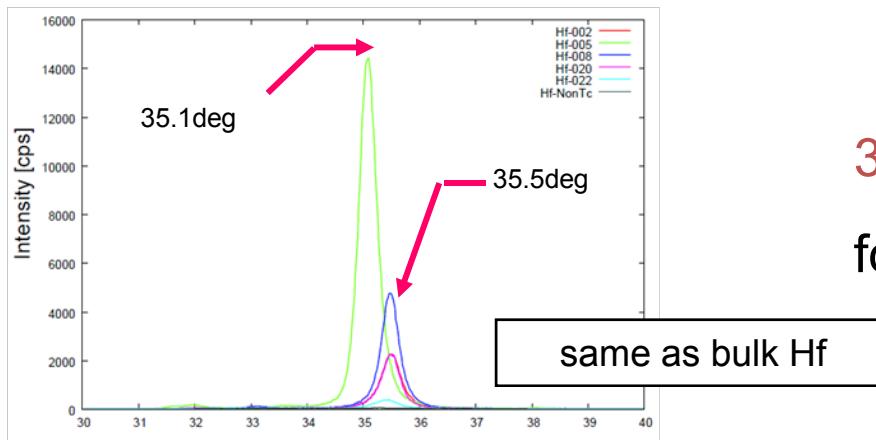
deposition conditions

	Power [W]	Ar Pressure [Pa]	Bend [μm/100nm]	Thickness [nm/5min]
Hf-002	300	1.5	0.034854	76.5
Hf-005	600	0.7	-21.689552	134
Hf-008	600	4.0	-1.0269692	117
Hf-020	350	1.5	-0.9649903	86.2
Hf-022	350	2.1	-0.3786127	86.5
Hf-000	300	1.0	-	83.5

search condition for stress-free layer



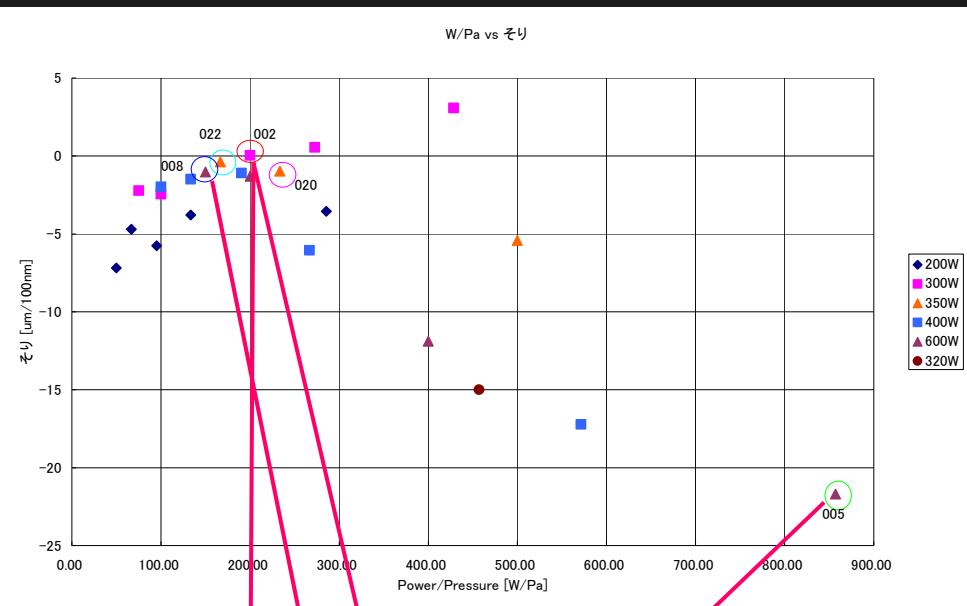
X-ray diffraction measurement



300W, 1.5Pa was good
for Hf deposition

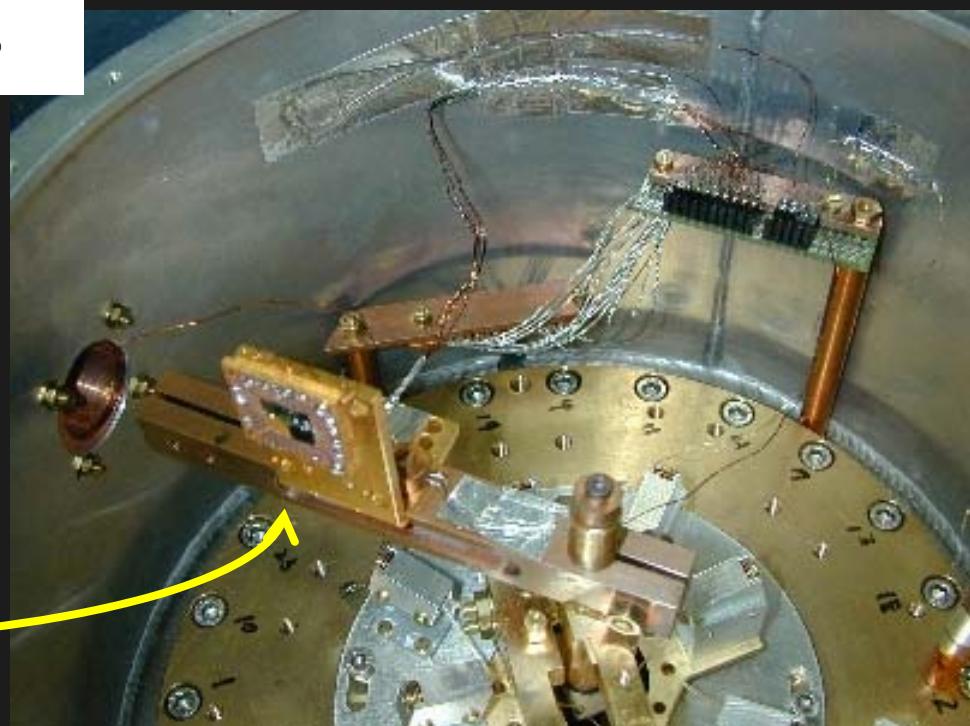
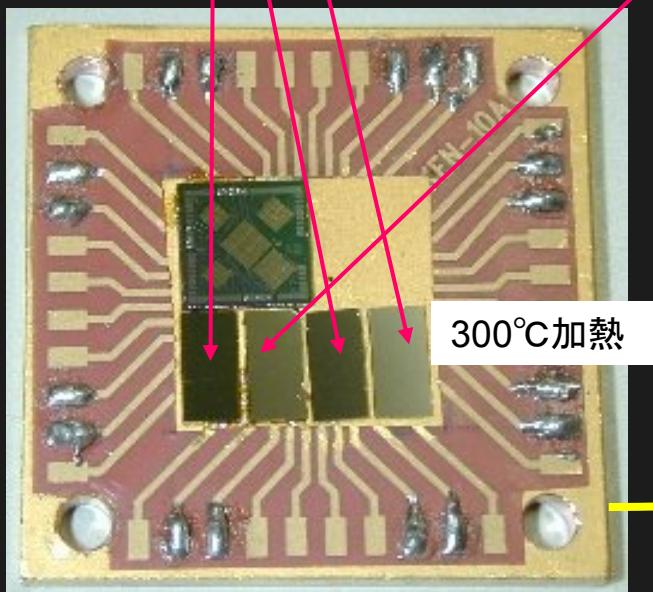
②超伝導転移測定

H.Sato



核断熱消磁冷凍機(ADR)でHf薄膜を冷却し、超伝導転移を観測する

バルクHfの $T_c=165\text{mK}$



Hf-STJs: T_c measurement

H. Sato

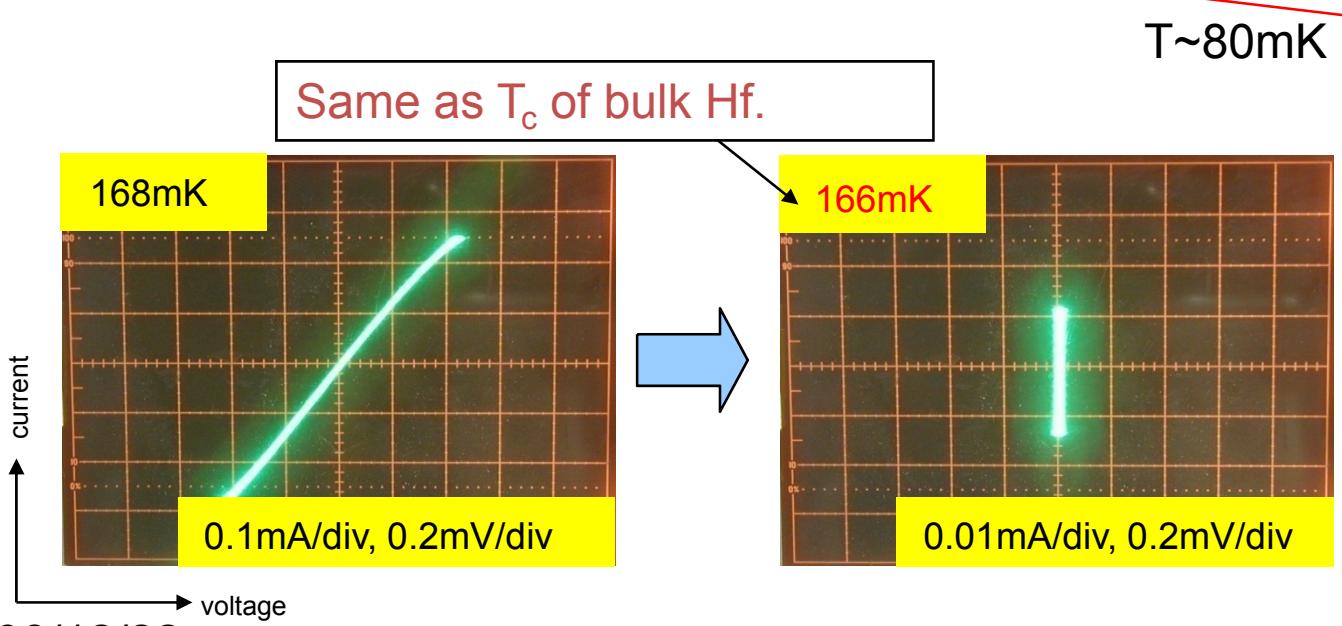
We tried to realize a same T_c as bulk Hf.



Finally, we found that deposition with substrate heating at 300 deg. was effective.

Power 300W, Ar 1.5Pa, 300 deg. heating

T_c was measured by using ADR.



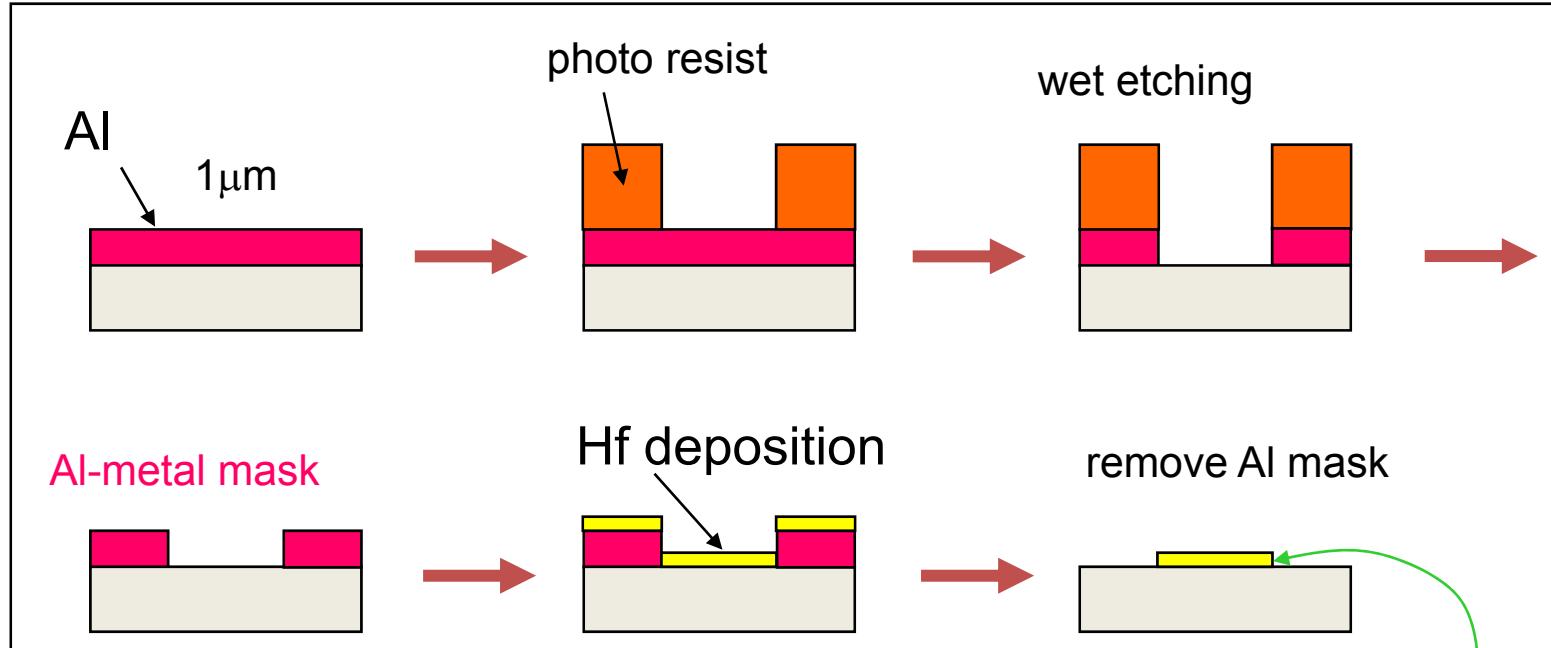
Hf-STJs: Fabrication

H.Sato

Hf was very “hard” to dry-etch with our RIE.



We introduced a lift-off method with Al-metal mask.



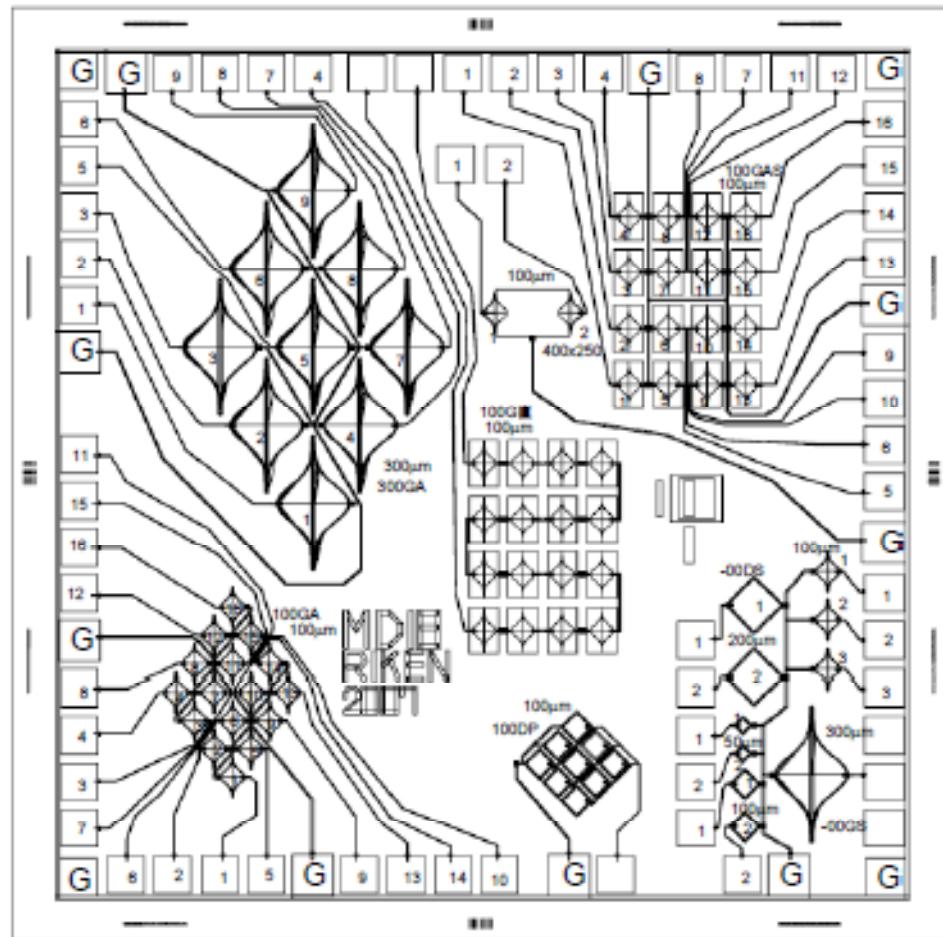
We obtained $T_c=166\text{mK}$ with this fabricated Hf.

Now we are ready to make Hf-STJs.

X線用Ta/Al-STJ試作

Ta: ADRを使わずにミリ波照射が可能な転移温度

製膜条件は既知



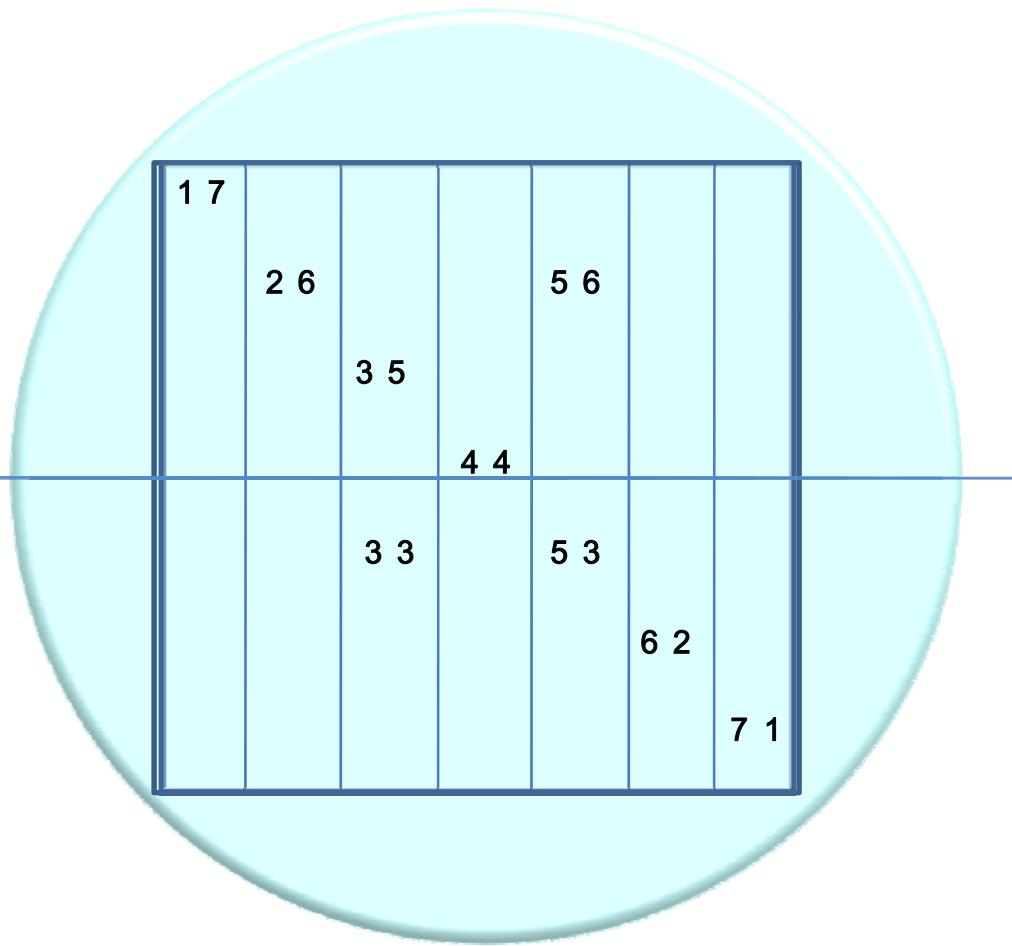
2008/12/22

S	Ta	200 nm
I	Nb	10 nm
S	Al	25 nm
	AlO _x	20 Torr, 38 分 → 13TorrH
S	Al	25nm
	Ta	200 nm
	Nb	10 nm
	Al ₂ O ₃	100 nm
		サファイア基板

Nbを敷かないとTaを
スパッターできない

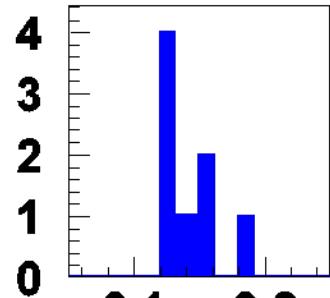
1. 7KでIVカーブ測定をしたチップ

9チップについて、各チップでSTJ15個のIVカーブを測定

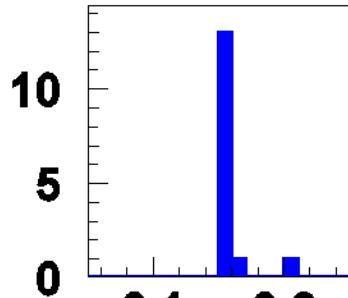


チップごとSTJの単位面積あたりの電流

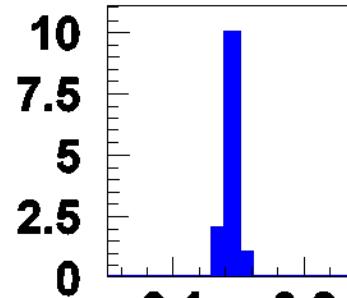
顕著な場所
依存性は見
られなかつた。



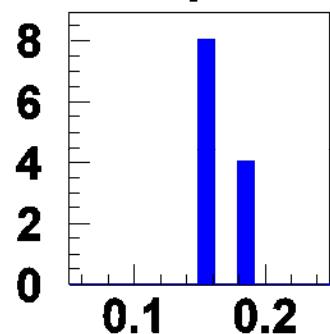
chip 33



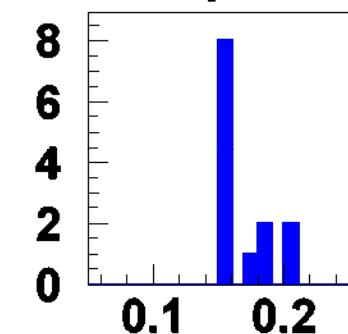
chip 44



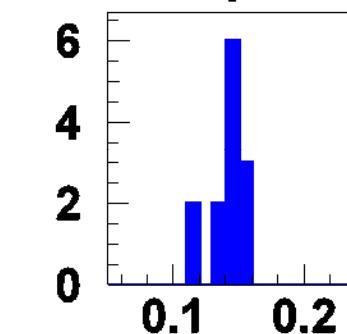
chip 56



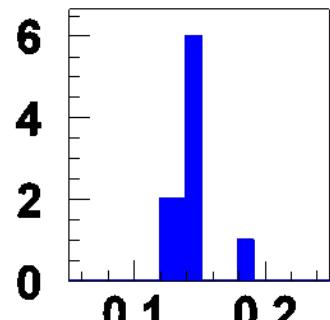
chip 62



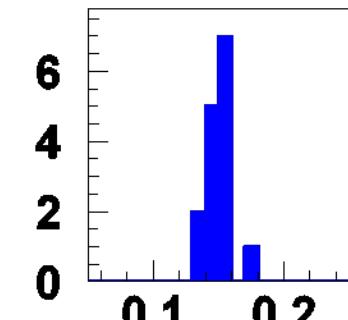
chip 71



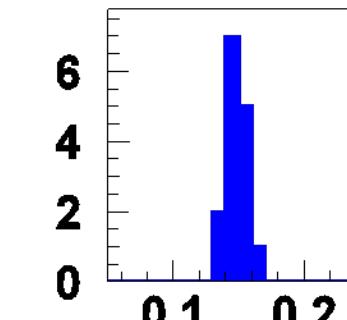
chip 35



chip 53



chip 17



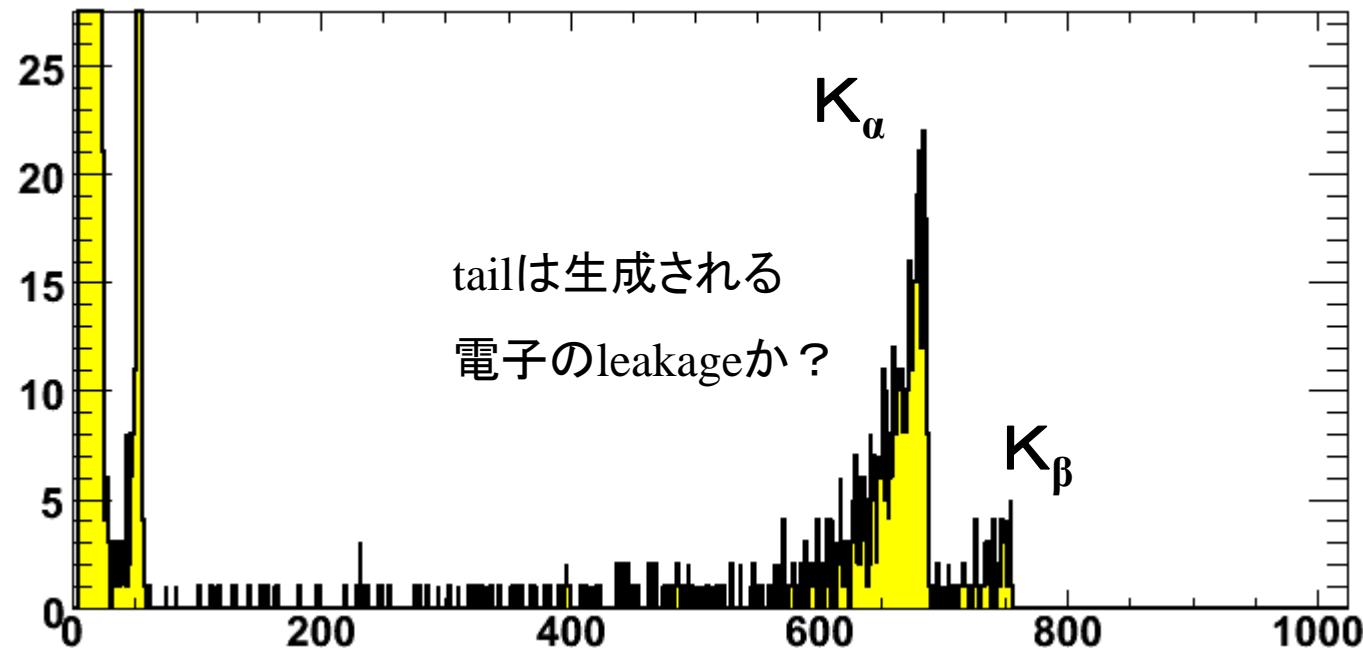
chip 26

100GS-3

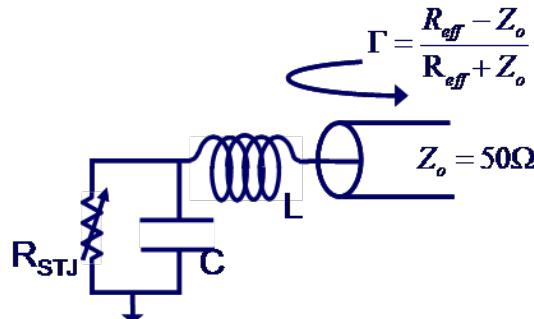
preamp out 1V

IB=0.166A

VB=-4.89V



• 多チャンネル化：周波数ドメイン読み出し

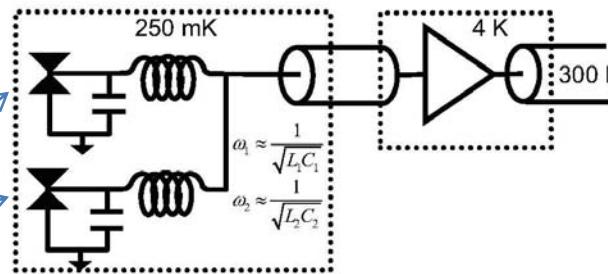


$$R_{\text{eff}} = \frac{L}{R_{\text{STJ}} C} \quad \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

ごく最近Yale大学がRF-STJによる周波数ドメイン読み出しを提唱

IEE Trans. Appl. Superconductivity Vo.17 p.241 (2007)
STJ多チャンネル化へのブレークスルーとなる可能性あり。

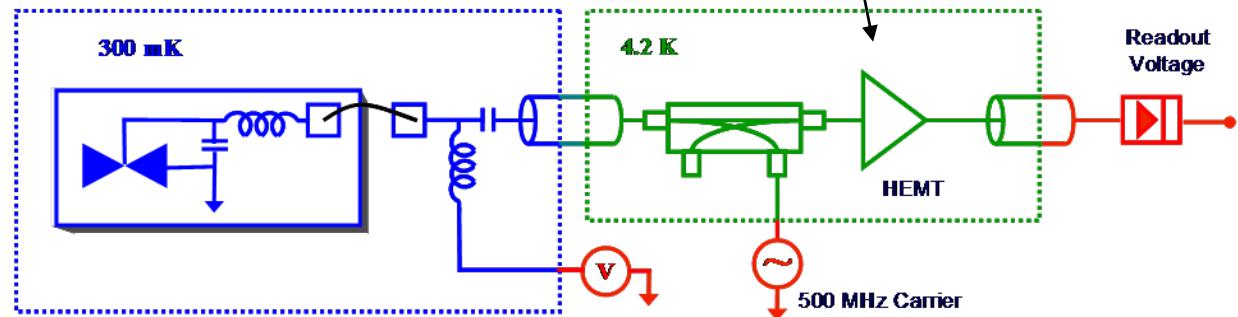
アンテナ結合
STJ



周波数ドメインの
多重化
(ラジオみたい)

この部分は市販品で出来るようになる！

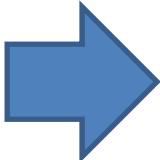
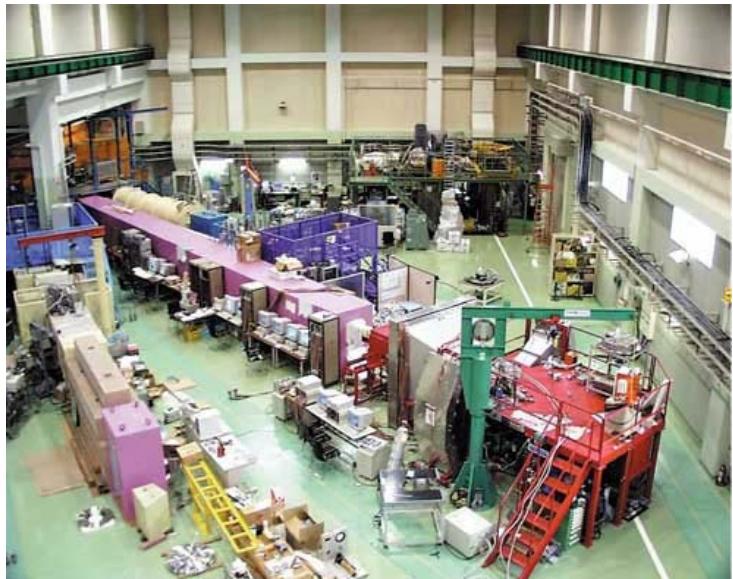
KEK大学支援事業
岡山大とKEKで
開発



KEKでの装置整備

大実験室クリーンルーム

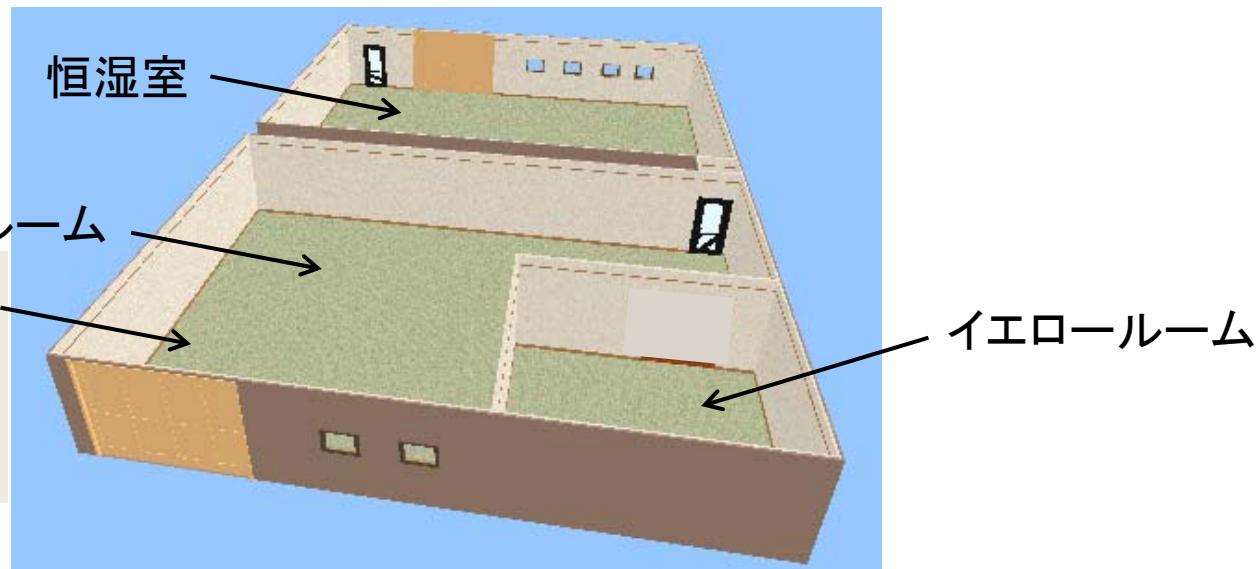
- 場所:先端計測実験棟大実験室
 - 昨年まで冷中性子実験棟と呼ばれた建物
- 特長:300m²の大型クリーンルーム
- 目的:精密機器、大型機器を設置、共用することにより、従来より高いレベルの測定器開発を効率よくおこなう。
 - スパッタ装置、エッチング装置、蒸着装置、アライナー、顕微鏡、プローバー、ワイヤーボンダーなど



クリーンルーム仕様

- JIS規格に準拠したクリーンルーム
- 落札業者:エクセルインターナショナル
- 3つの部屋
 - 10m × 15mの恒湿室(クラス10万)
 - 普段着でOK、ワイヤーボンダー、プローバーなどを装備し、多目的に使用
 - 10m × 15mのクリーンルーム(クラス10000と1000)
 - クラス1000の部分は現像用イエロールーム(6m × 4m)

10月に理研から
超伝導薄膜作製
装置群を移設



理研からの移設した装置の現状

佐藤(伸)



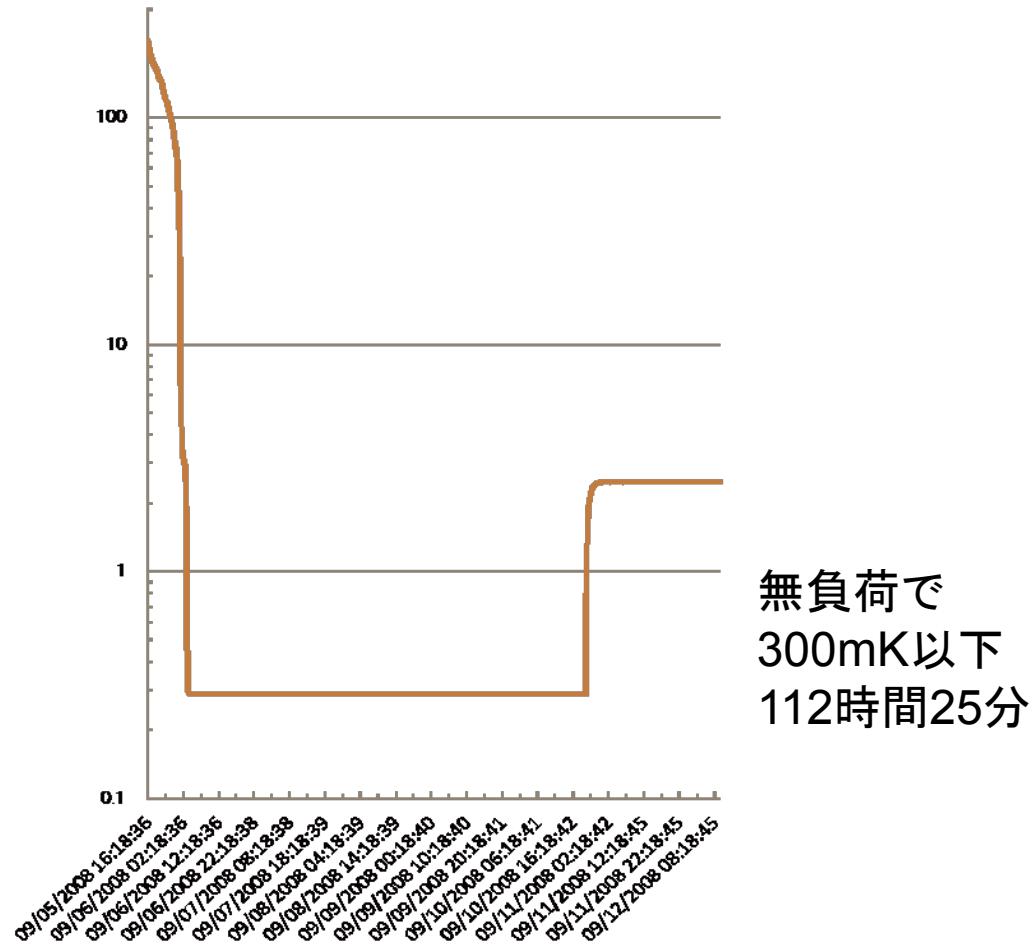
恒湿室

- ・窒素、圧縮空気の配管終了(クリーンルームとともに)
- ・ダイシングソー導入のための配管終了



0.3K全自动無冷媒冷凍機 @ KEK

- 昨年度末納入後、様々な不具合を克服して、仕様の性能を達成



0.3KでのI-Vテストは今年度中にKEKで出来るようになる予定

希釈冷凍機@超伝導低温工学センター

- 1990年頃購入されたOxfordの希釈冷凍機(実験終了後倉庫で眠っていた)を発掘
- 低温センターに極低温応用の装置を持つことは意義深い

Dilution Refrigeratorを復活

200 μ W at 100mK

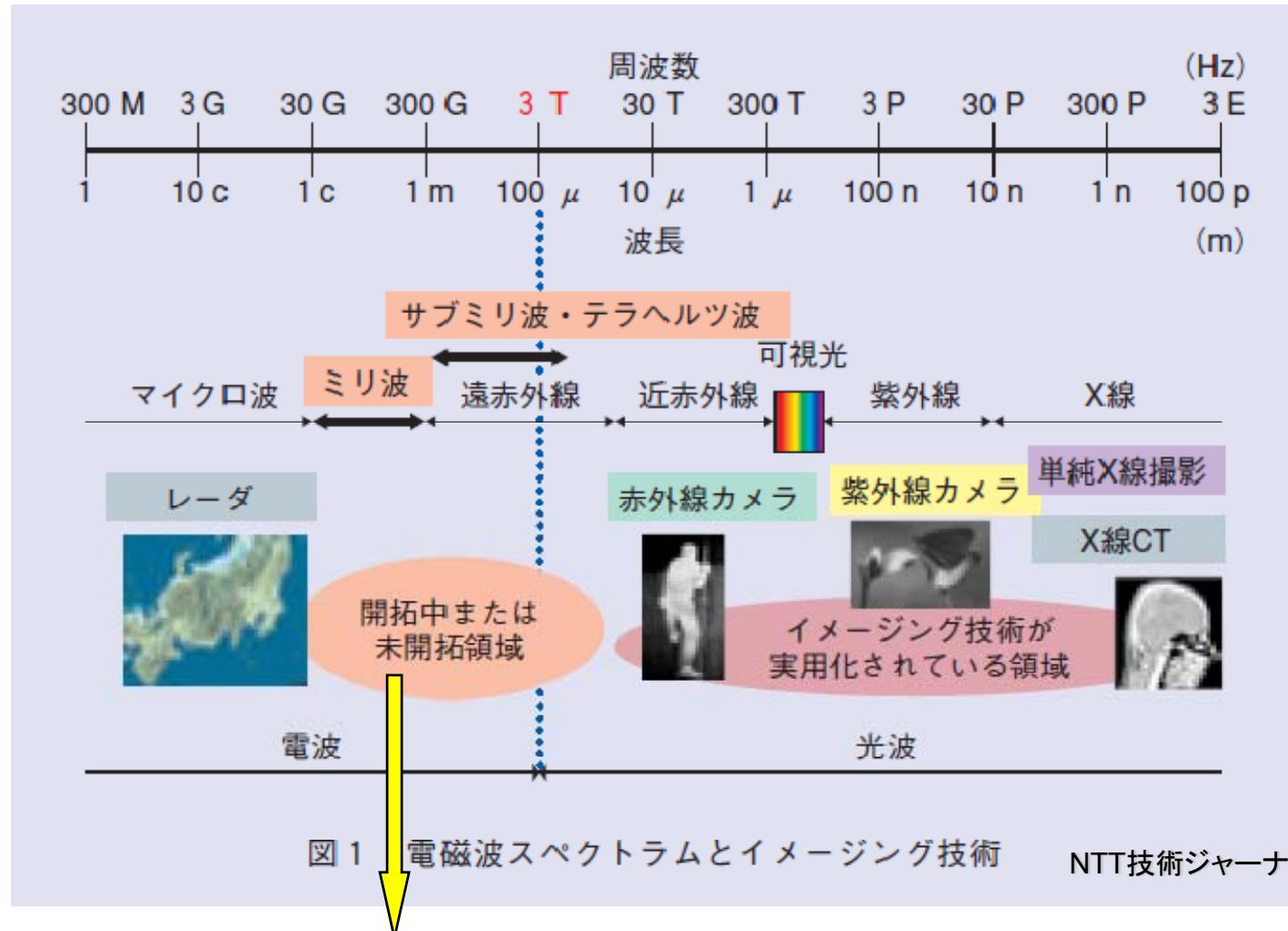
- Pump取付、配管復元続行中。TMP周囲はほぼ終わり。



今後

- 真空リークテスト
- インターロックのチェック
- TMP, RP到達度
- 冷却対象
 - 目的、要求温度、安定性
 - サイズ、信号入出力

STJの応用



高い透過力(プラスチック、壁、紙、衣服、煙、霧などを透過)と
マイクロ波より高い分解能 → 幅広い応用が可能、かつ未開拓！

研究会

- **日時**: 2009年2月20日、21日
- **場所**: KEK
- **テーマ**: 超伝導検出器と関連技術について
 - STJ、TES、その他のミリ波、テラヘルツ検出など
 - 現在のR&Dの進行状況、レクチャー、新しい応用について(アクション探索、質量分析etc.)
- **司会者**: 羽澄(KEK)、石野(岡山)、大島、関本(国立天文台)、松原(JAXA)