

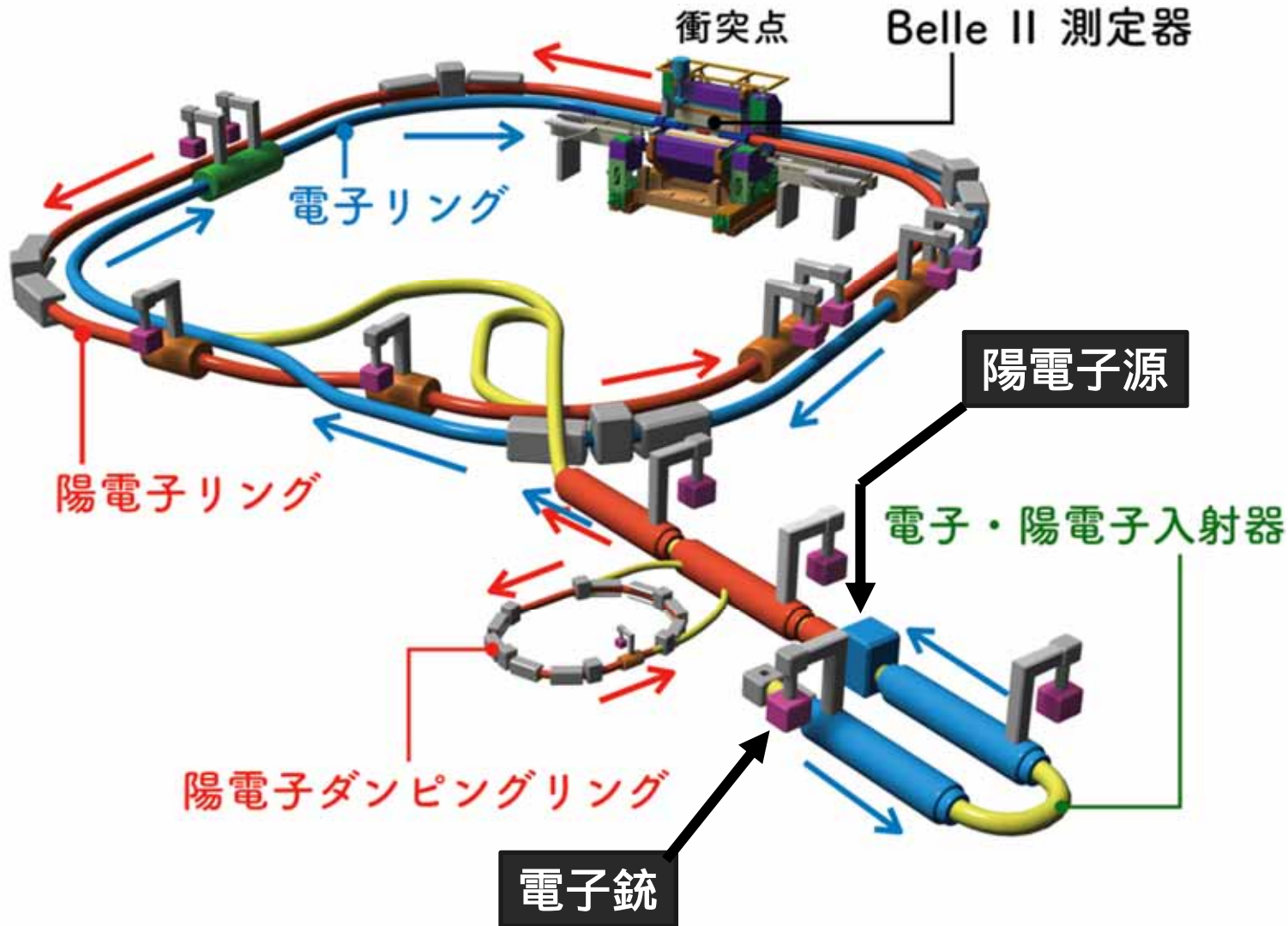
# 銅合金を用いたSuperKEKB陽電子源 用フラックスコンセントレータ

榎本 嘉範, 阿部 慶子, 岡田 尚起,  
高富 俊和(KEK)

# 目次

- SuperKEKBの陽電子源
- 材料評価
- 製作方法
- 発熱評価
- 設置、結果
- まとめ

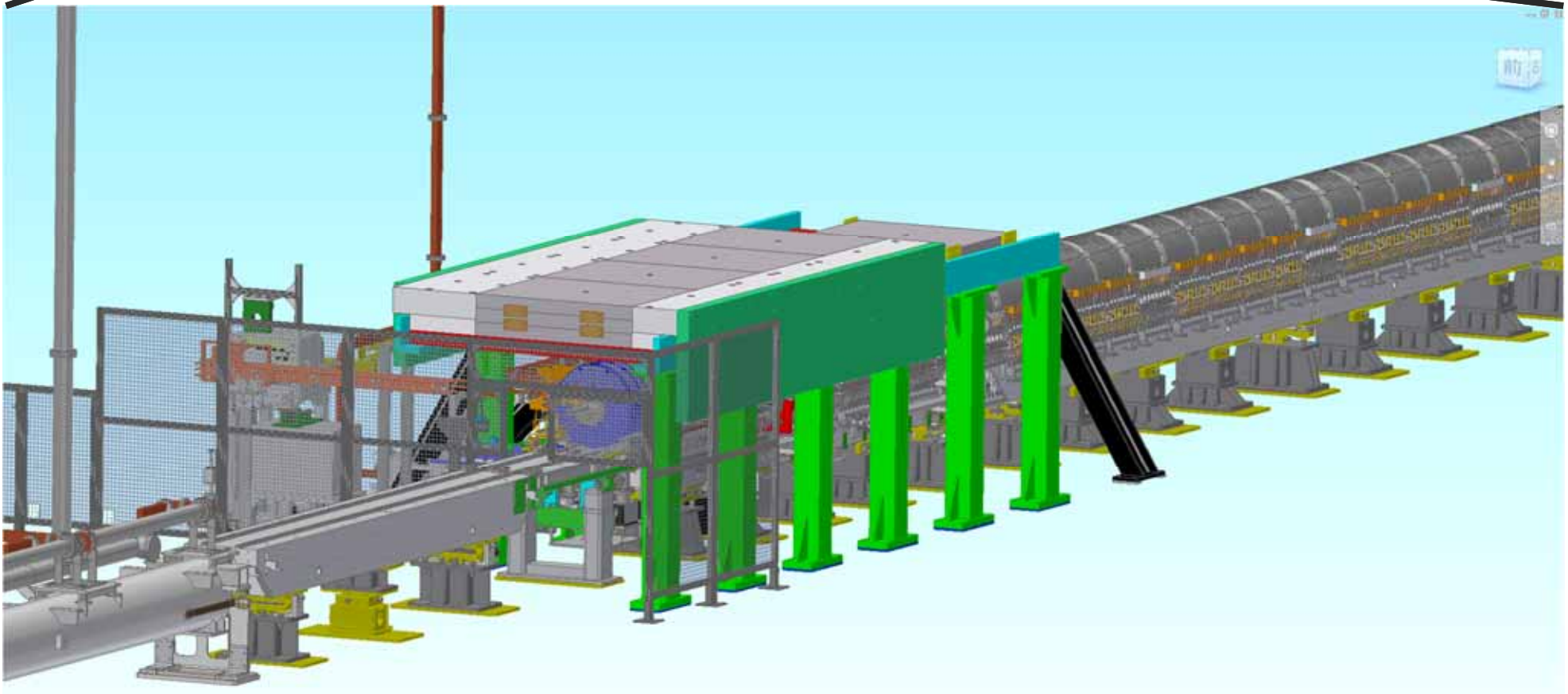
# SuperKEKBの陽電子源 1



	KEKB	SuperKEKB
Ring		
E	3.5 GeV	4.0 GeV
I	1.6 A	3.6 A
Life time	150 min	6 min
Loss rate	0.18 mA/s	10 mA/s
Linac		
Bunch charge	1 nC	4 nC
Repetition	25 Hz	25 Hz
No. of bunch	2 bunch	2 bunch
Inj. Current	50 nA	200 nA
Linac to Ring		
Inj. Efficiency	0.5	0.5
Rep. rate	$10^5$	$10^5$
Max. increase current rate	2.5 mA/s	10 mA/s
duty	0.07	1

# SuperKEKBの陽電子源 2

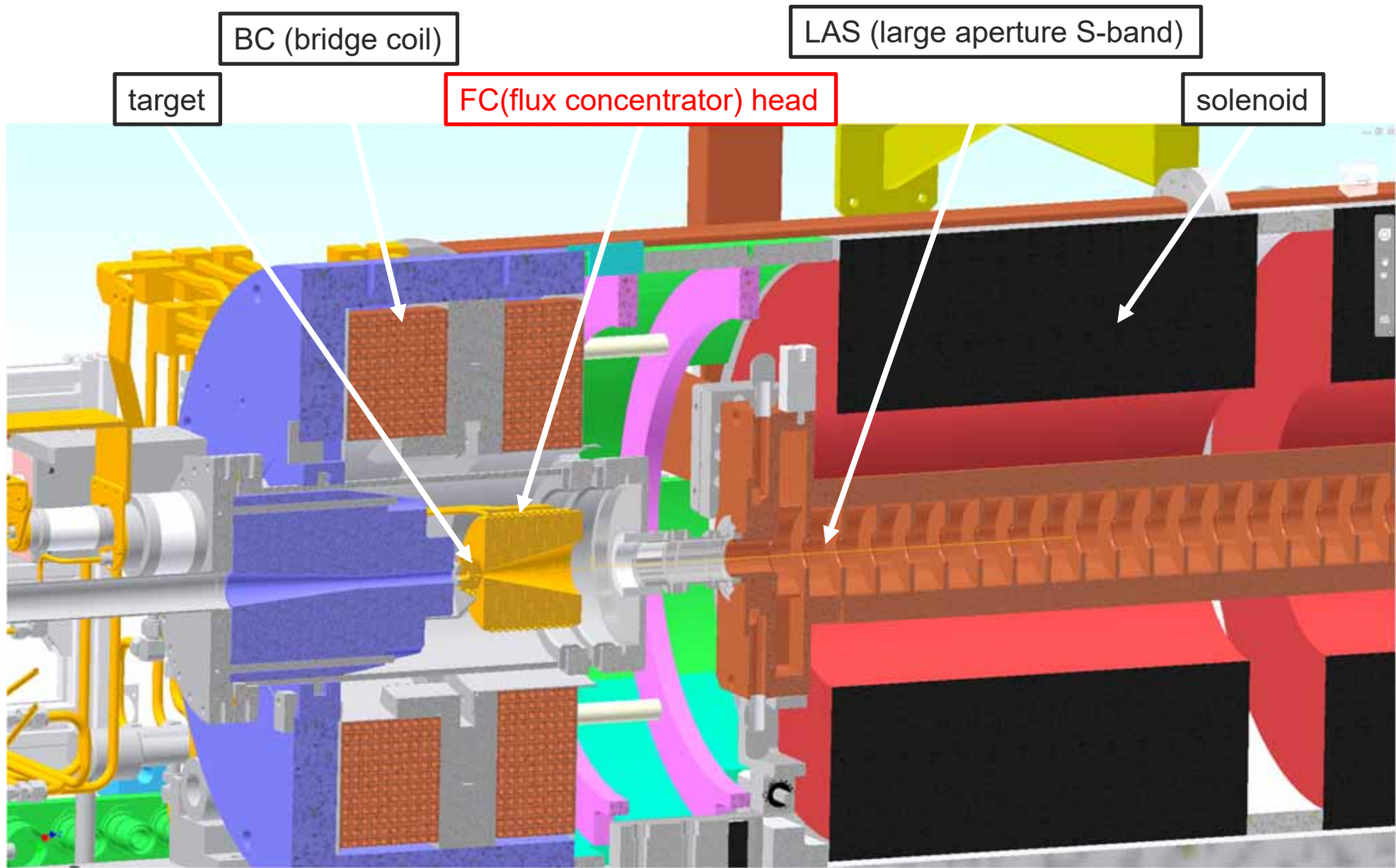
Positron target and capture section





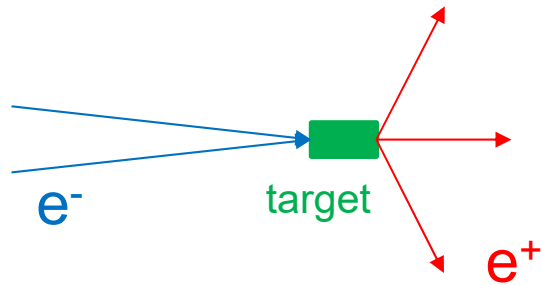
# SuperKEKBの陽電子源 3

FC head + BC + target = FC assembly

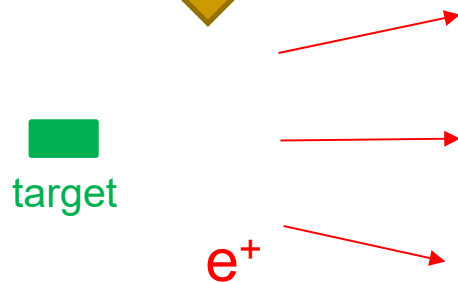


# SuperKEKBの陽電子源 4

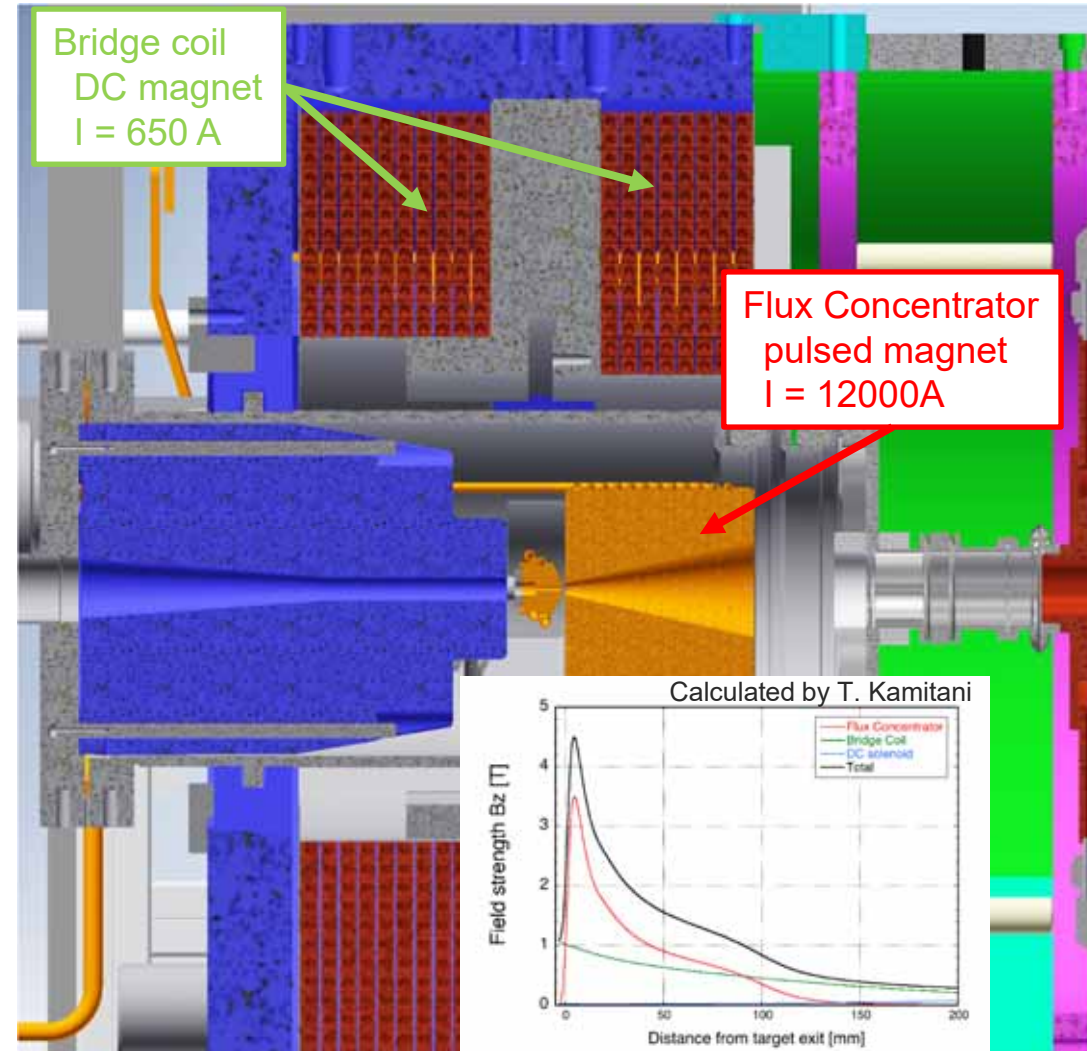
## Flux Concentratorの役割



- 電子を絞ってターゲットにあてる
- 陽電子はターゲットにあたった電子と同程度のスポットから出てくる
- 陽電子の角度広がり大きい

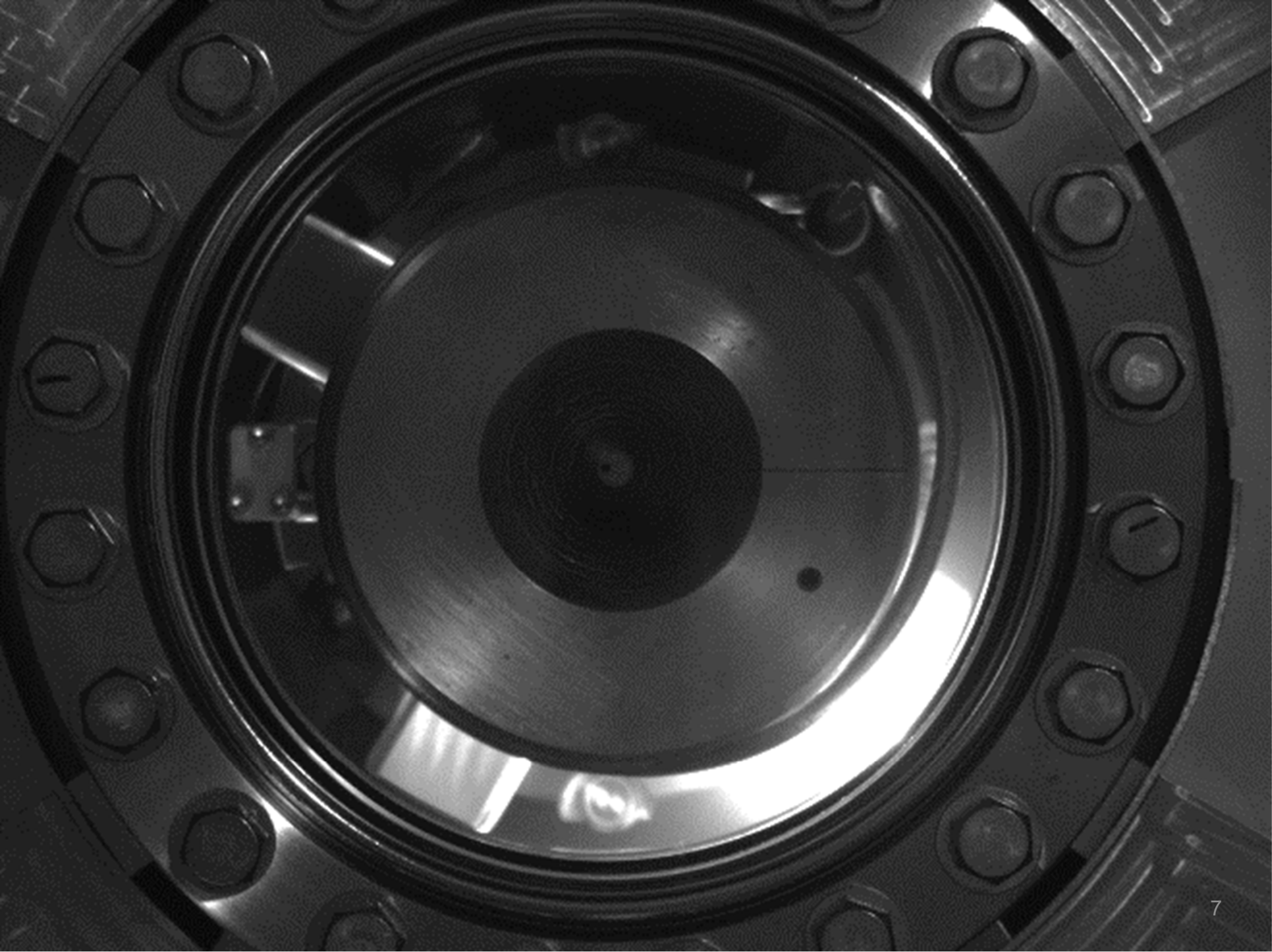


- 断熱的に(磁力線にそって)陽電子の位置広がりを拡大する
- 角度広がり減少する
- 後段セクションのアーチャーにマッチする

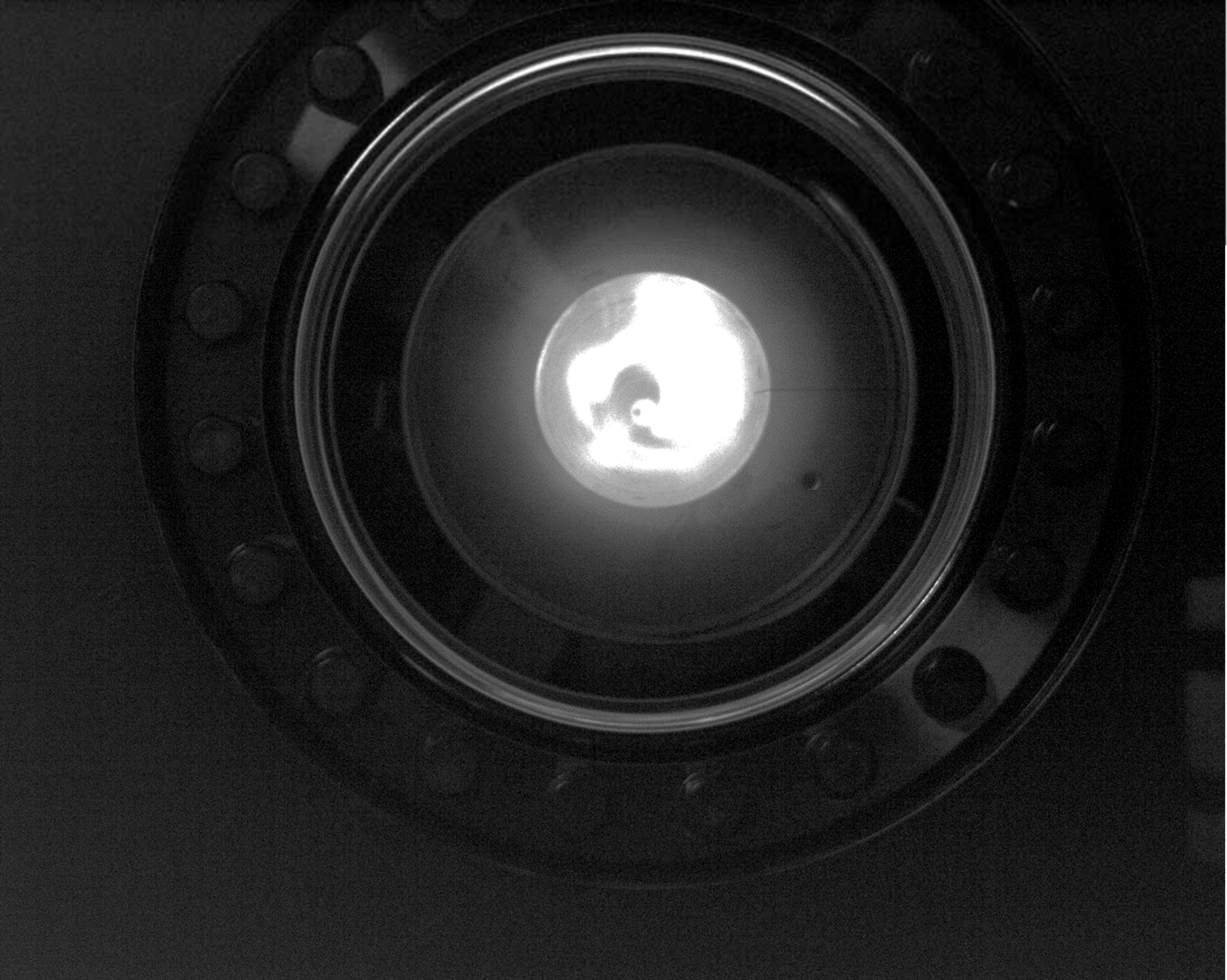


Flux Concentratorは内面がテーパ状のソレノイドコイル  
→徐々に弱くなる磁場を作る

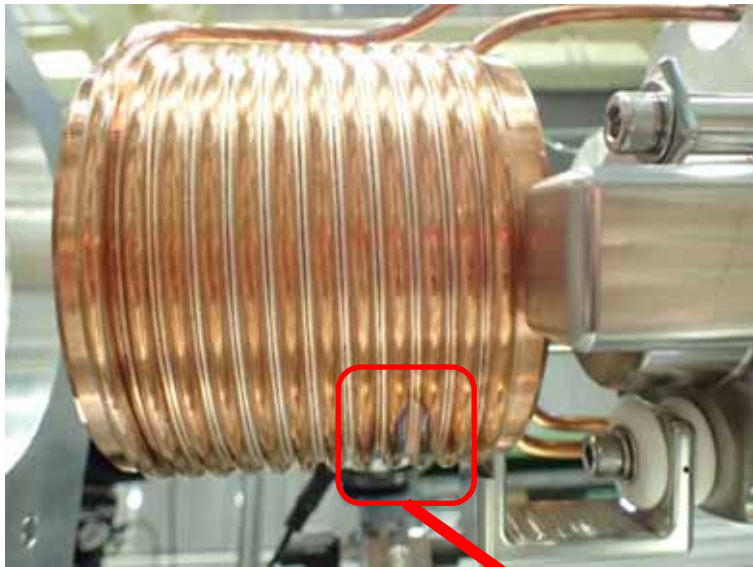




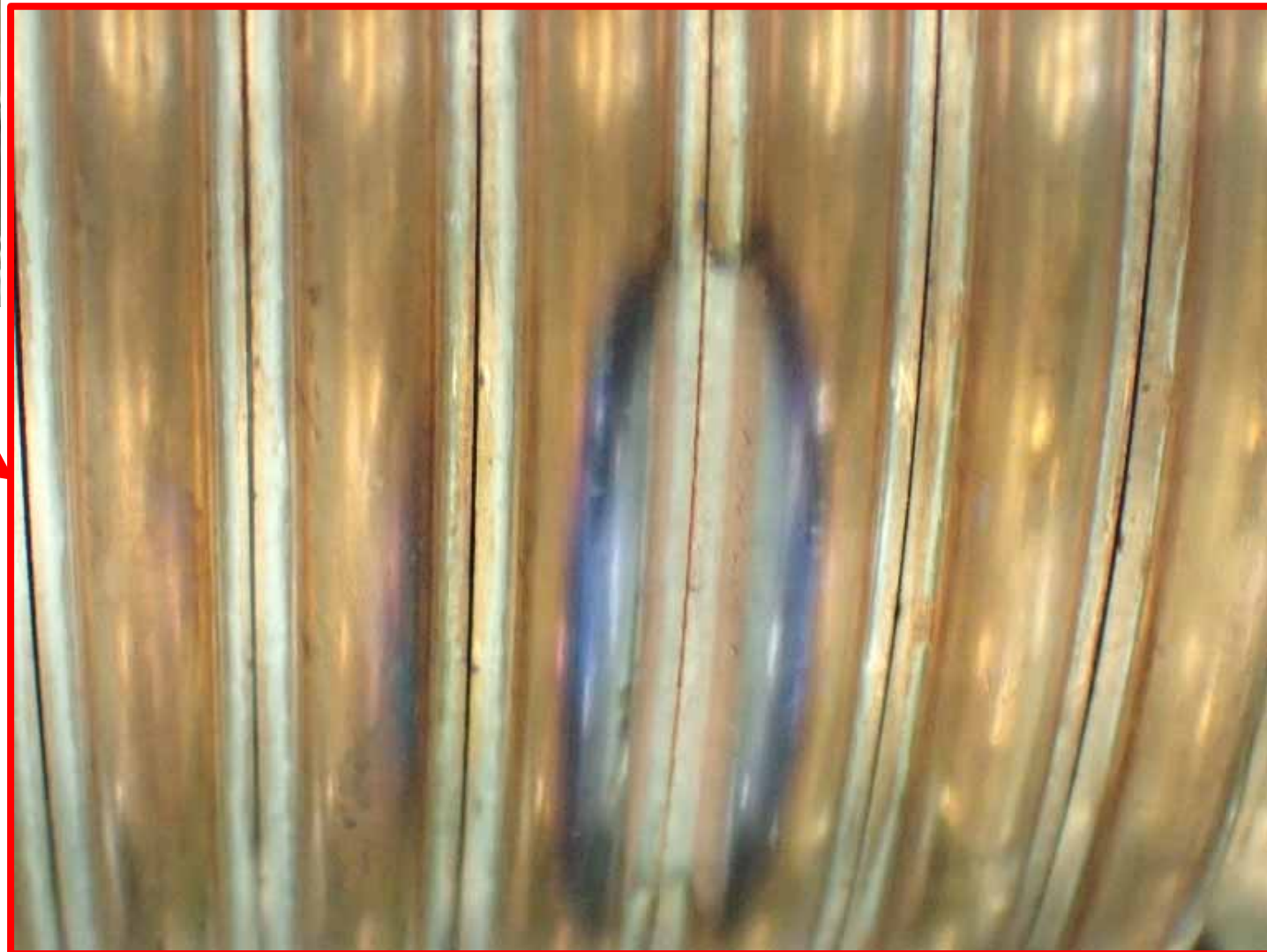




# 大きな放電後...



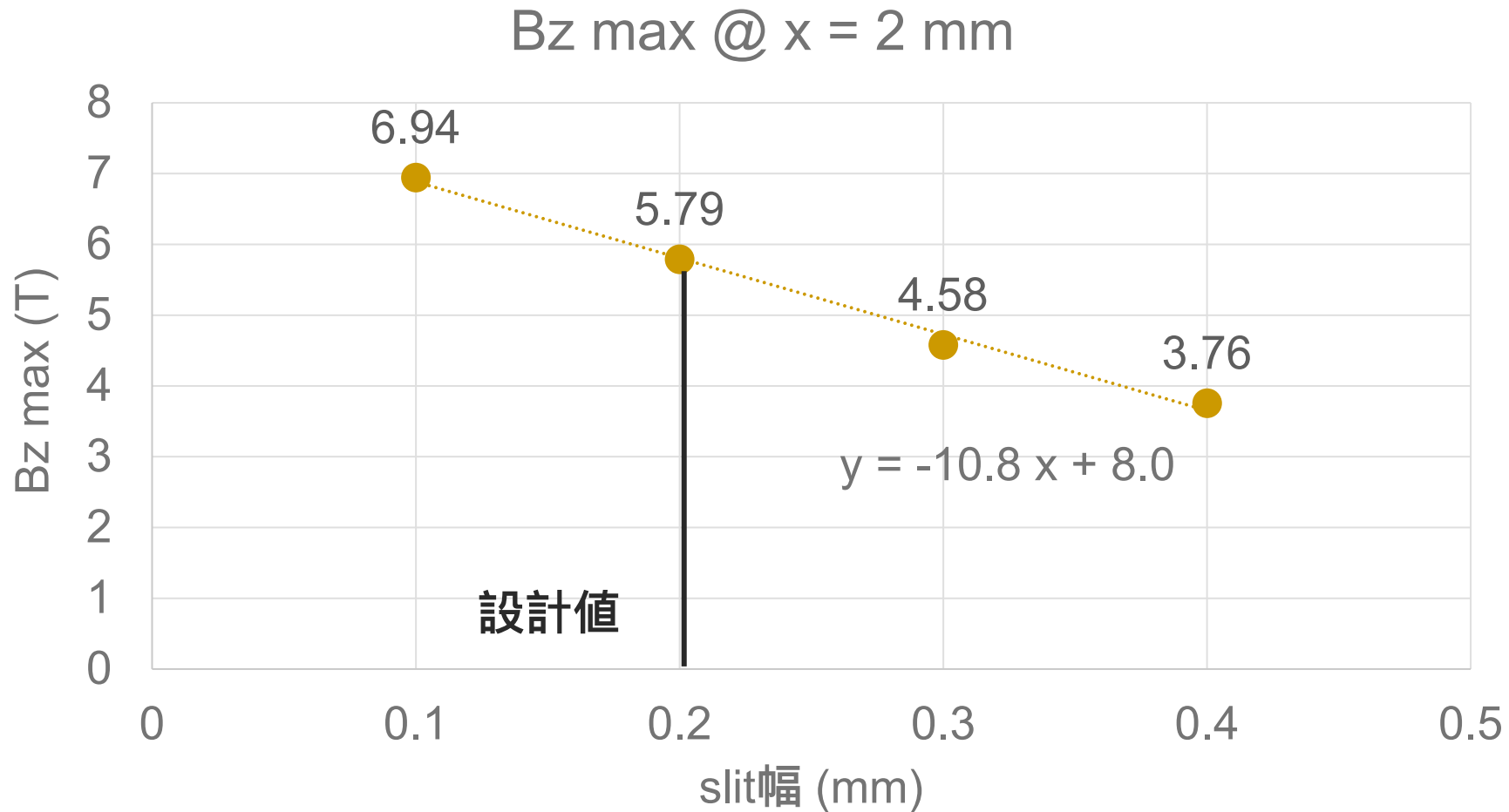
放電部の様子を見るとslit幅が狭くなっている



slit幅は0.2 mm  
設計電流値12 kAを流した  
場合、slit間には約1 kVの  
電圧がかかる。電場にす  
ると約5 MV/m



# FC磁場のSlit幅依存性



Slit幅を広げると磁場が下がる(0.1 mm広げると1.08 T)



# New material for FC head



放電を避ける  
→slit間の電場を下げる  
→slitの距離を管理する  
→変形を避ける

- 材料の耐力を上げる
- 加工硬化処理をテスト
  - SLACで以前行われていた方法
  - 明らかな改善は見られなかった
- 材料自体を変更することに

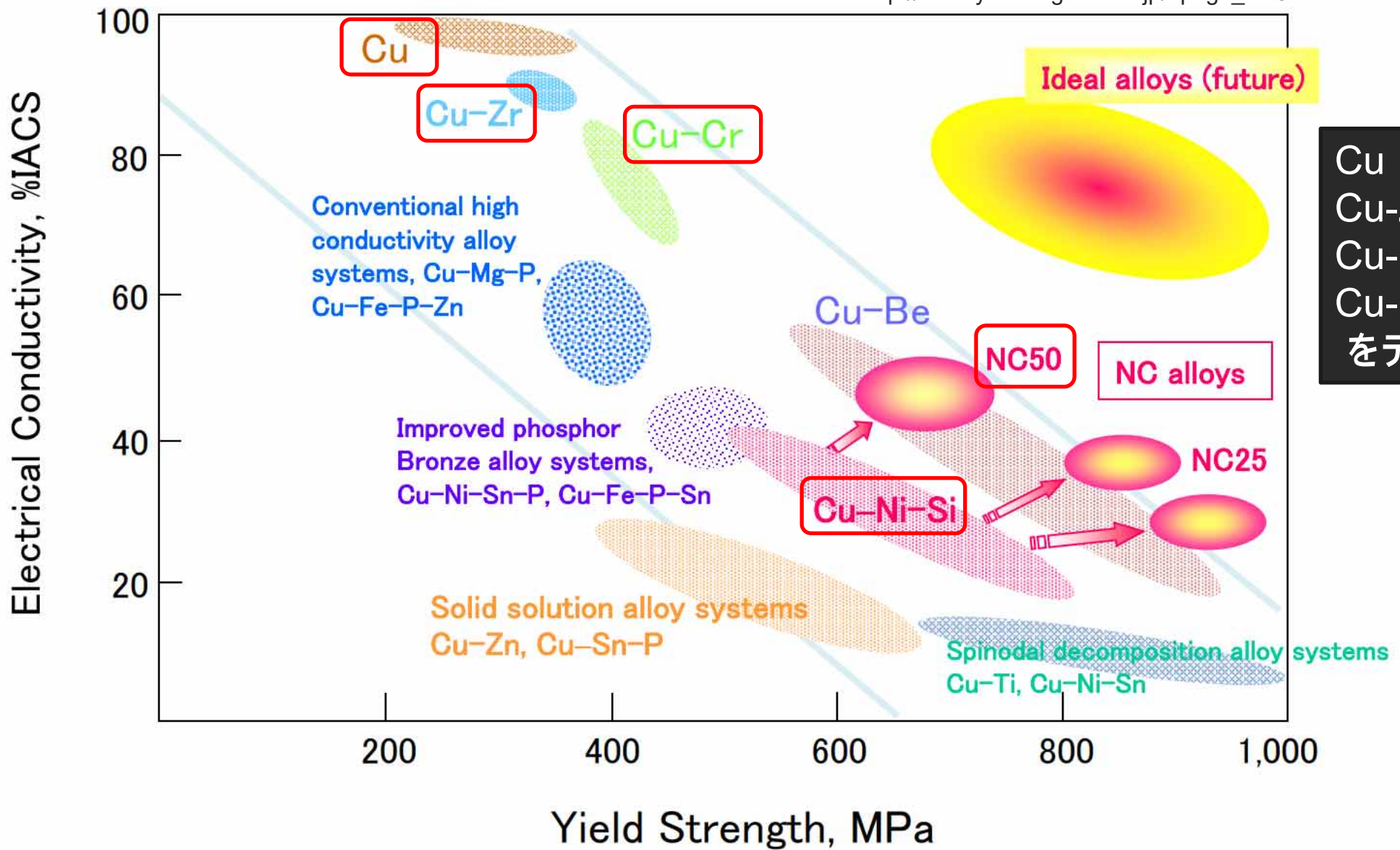


FC head材料に要求されること

- ロウ付け生が良い
- ロウ付け後も耐力が高い
- 電気、熱伝導率が高い

# 各種銅合金

[http://www.yamatogokin.co.jp/?page\\_id=34](http://www.yamatogokin.co.jp/?page_id=34)

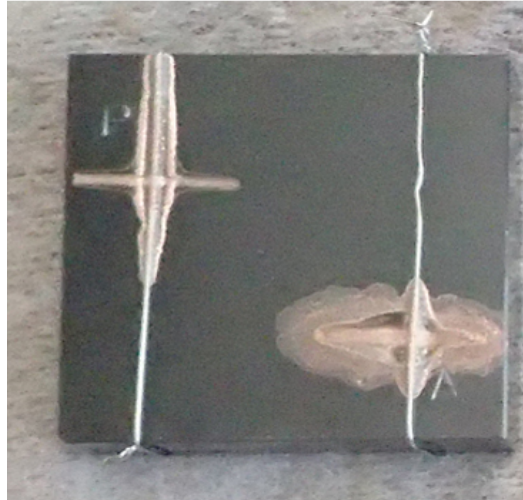


Cu  
Cu-Zr  
Cu-Cr  
Cu-Ni-Si  
をテストした

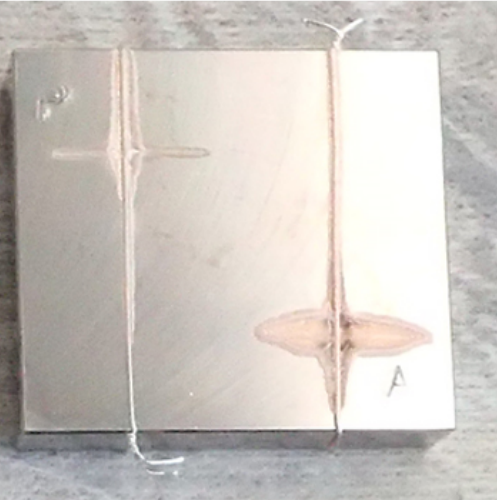
Positions of various copper alloy systems in conductivity–strength map

# ろう付け性の評価

SH-2



SH-1



SH-1

Cu-Cr

SH-2

Cu-Zr

C1020

Cu

NC50

Cu-Ni-Si

銀ろう、パラジウムろうの2種類のろう材をワイヤーで固定し真空炉で加熱。濡れ性を評価した。

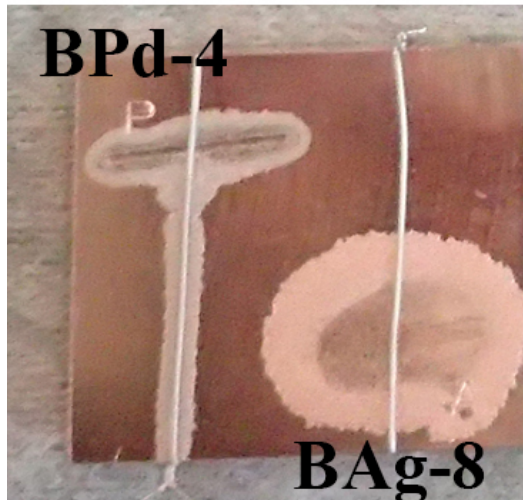
NC50はC1020と同等の良好なろう付け性を示した。

一方他の合金はろうの流れが悪く成分の析出による(?)変色が見られた。

P:パラジウムろう C1020

NC50

BPd-4



B<sub>Ag</sub>-8

A:銀ろう

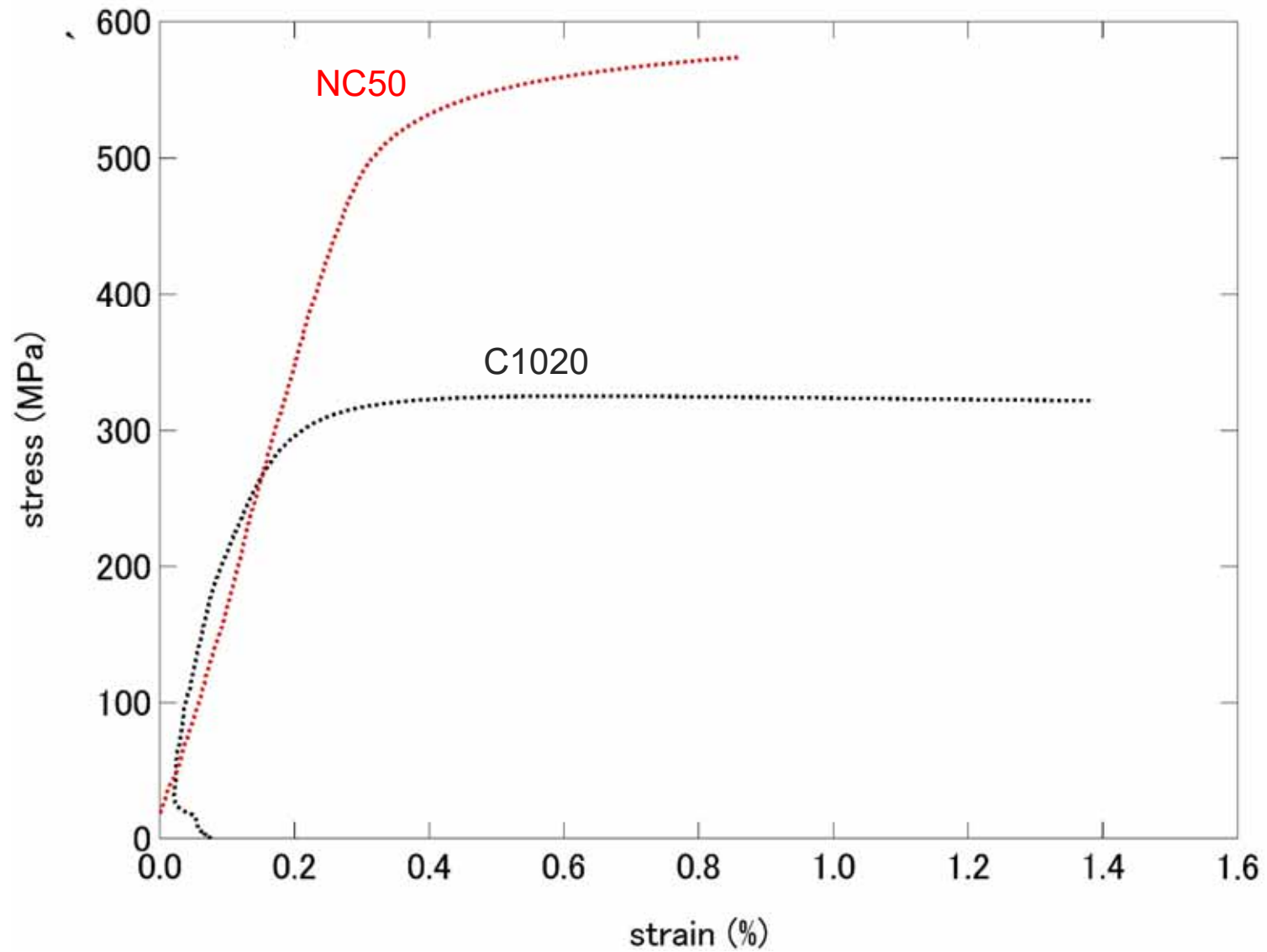




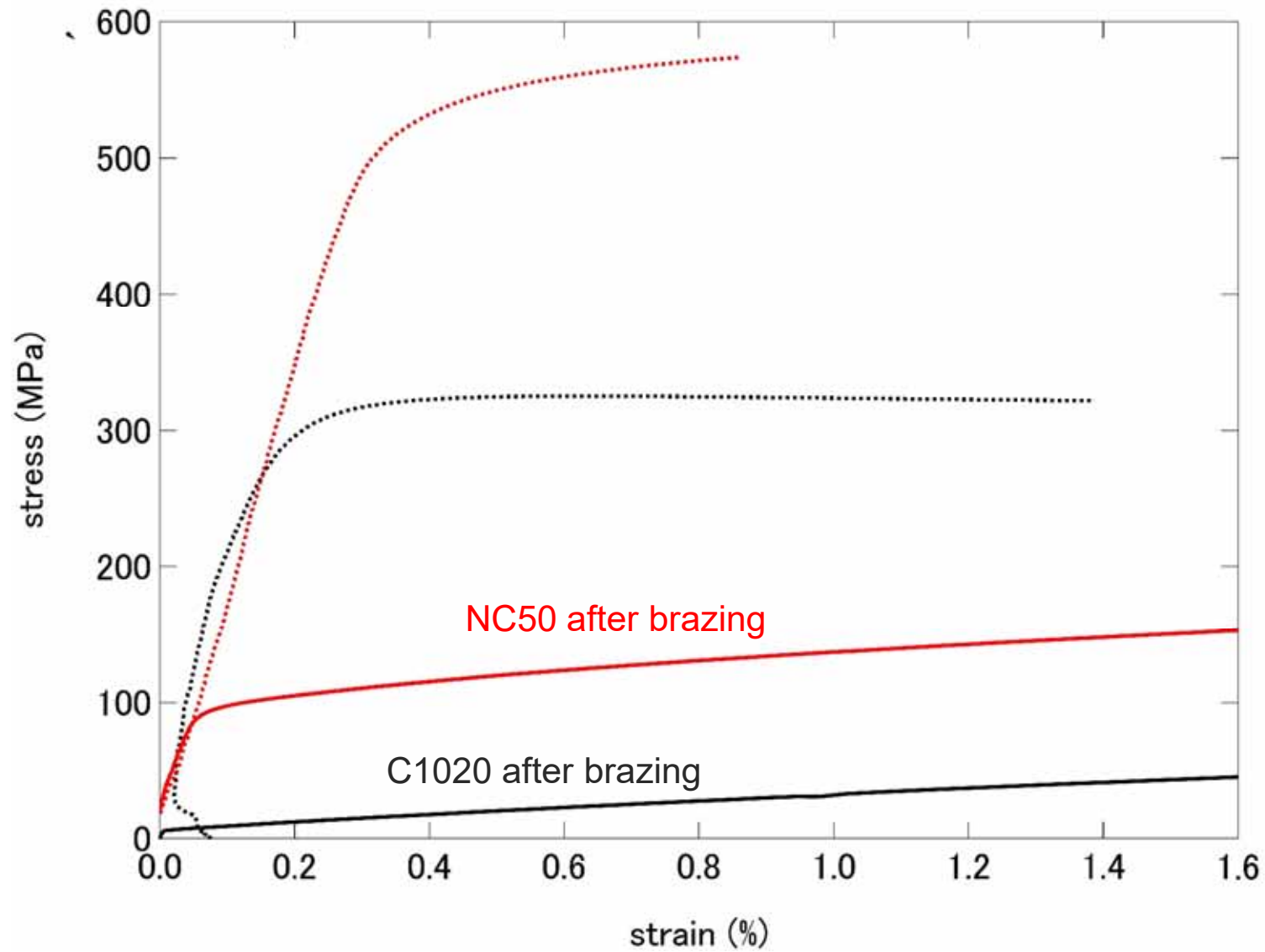
# 引張試験



# 応力ひずみ線図

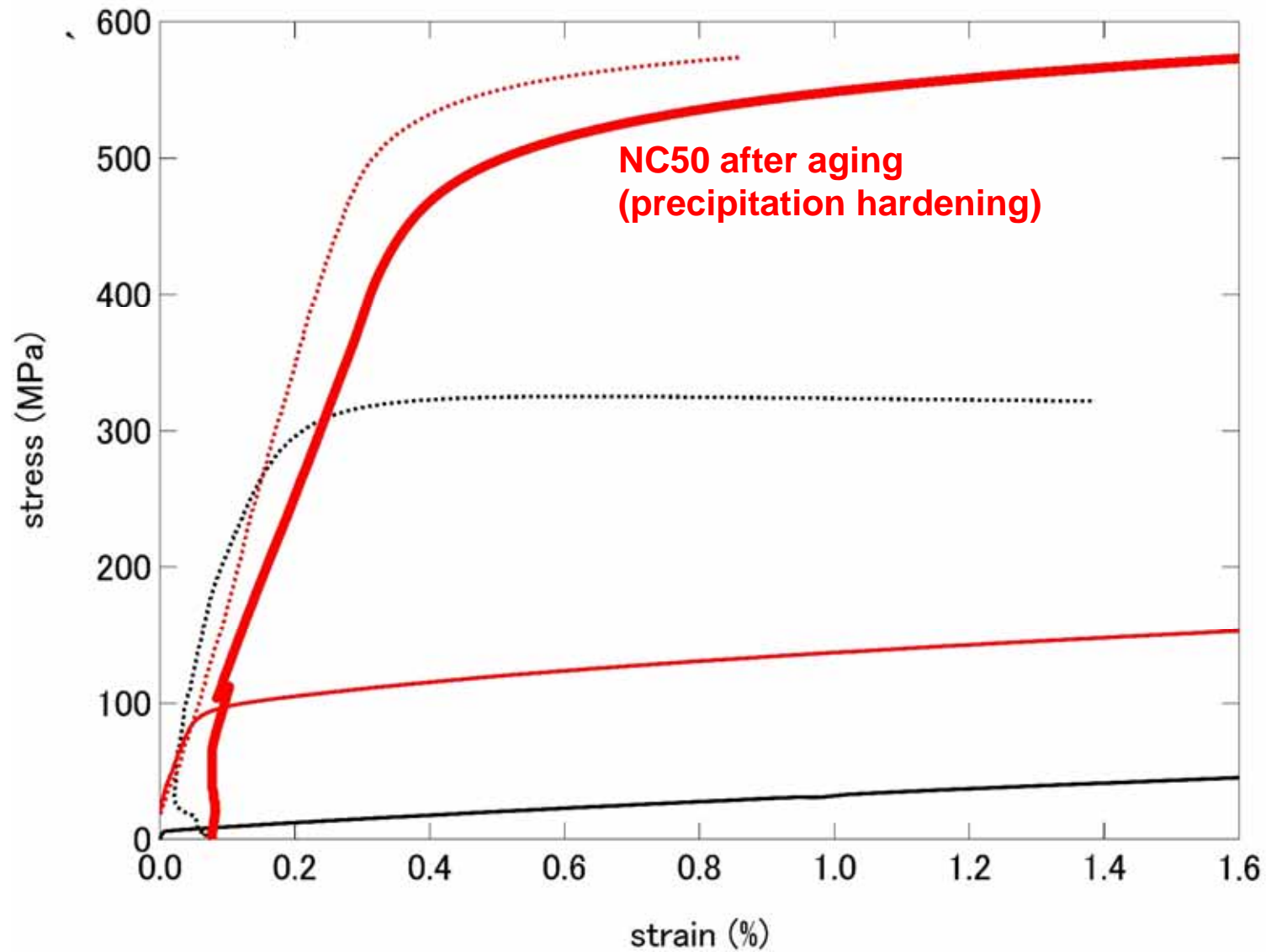


# 応力ひずみ線図

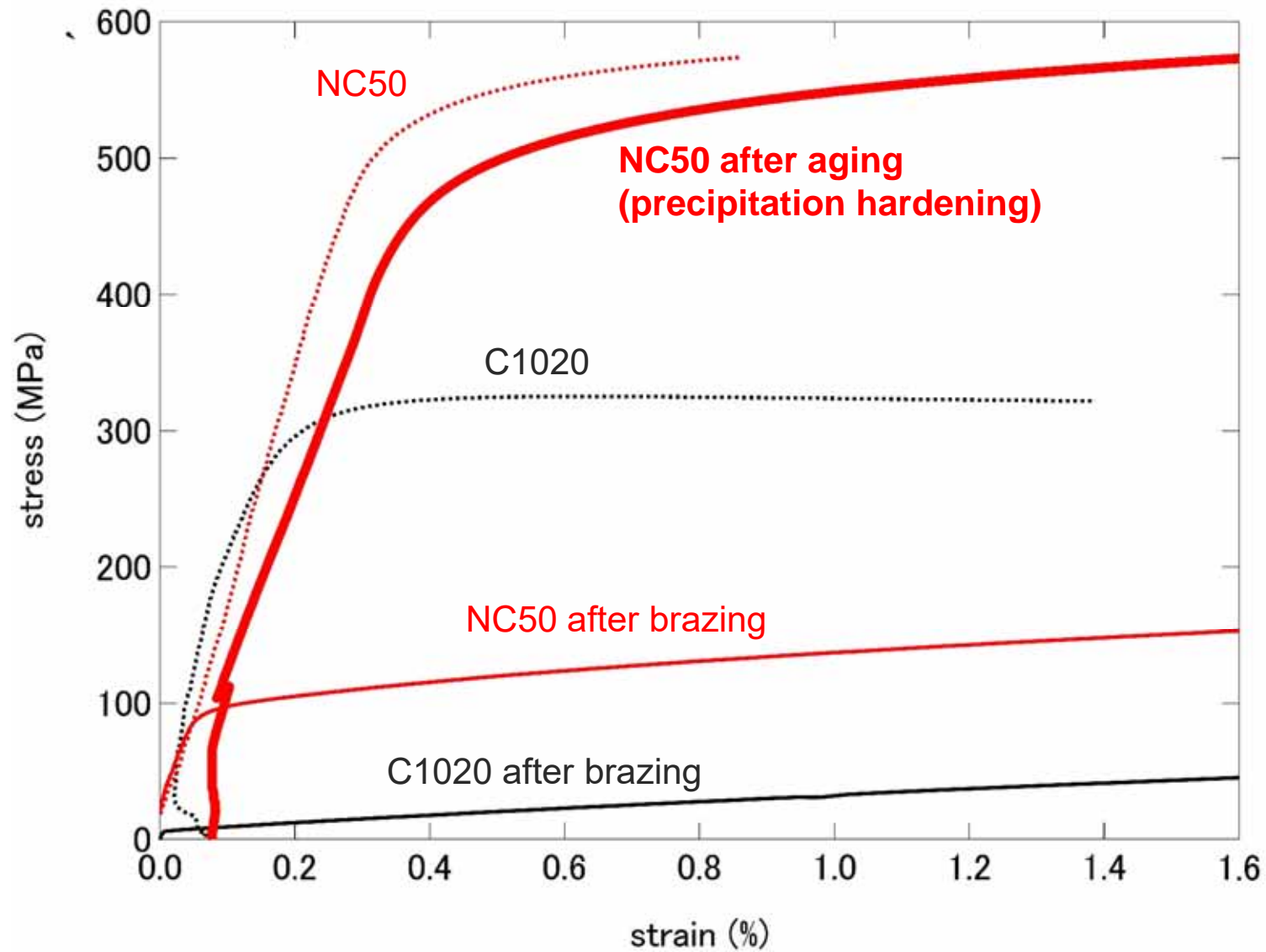




# 応力ひずみ線図

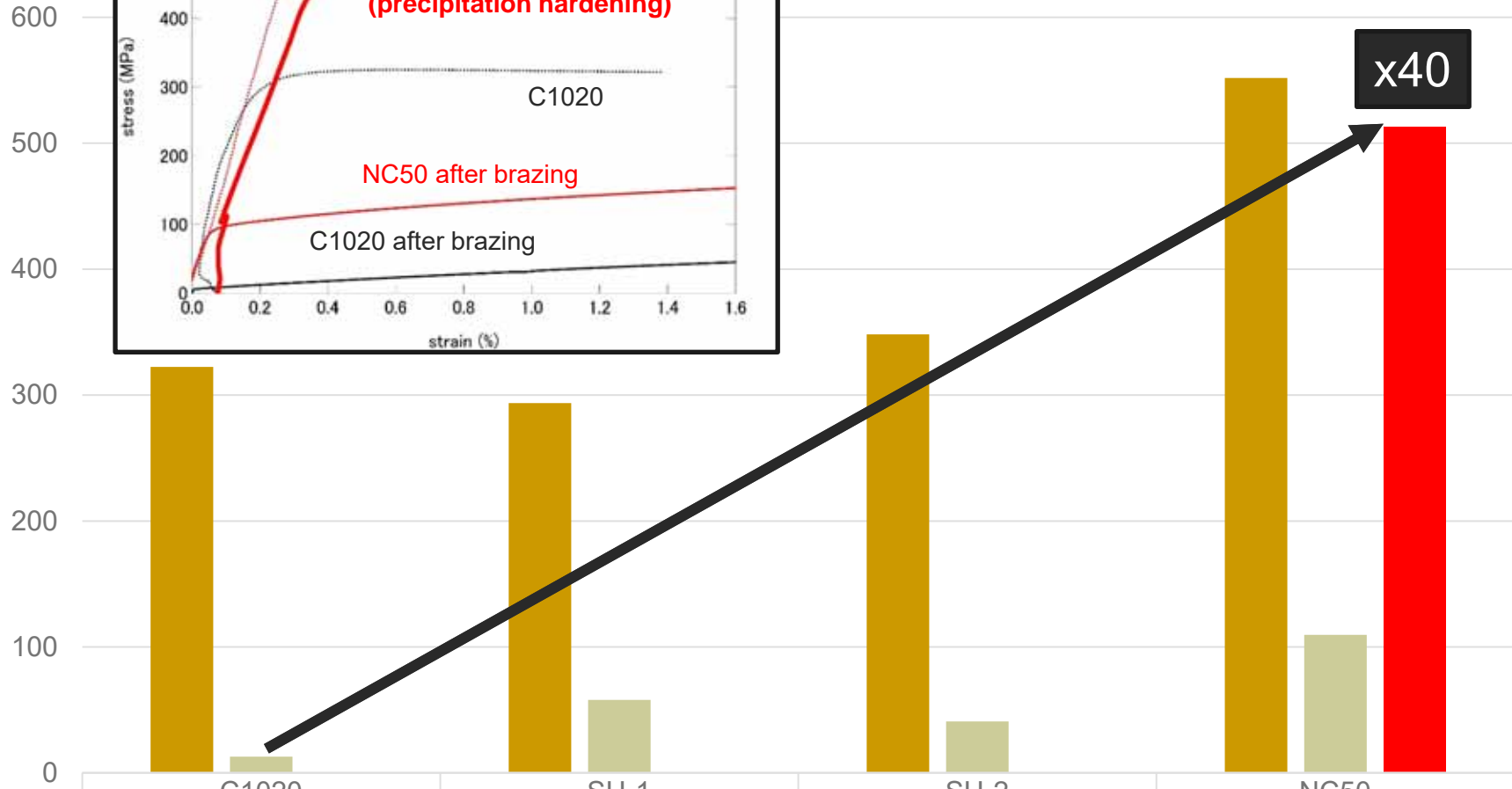
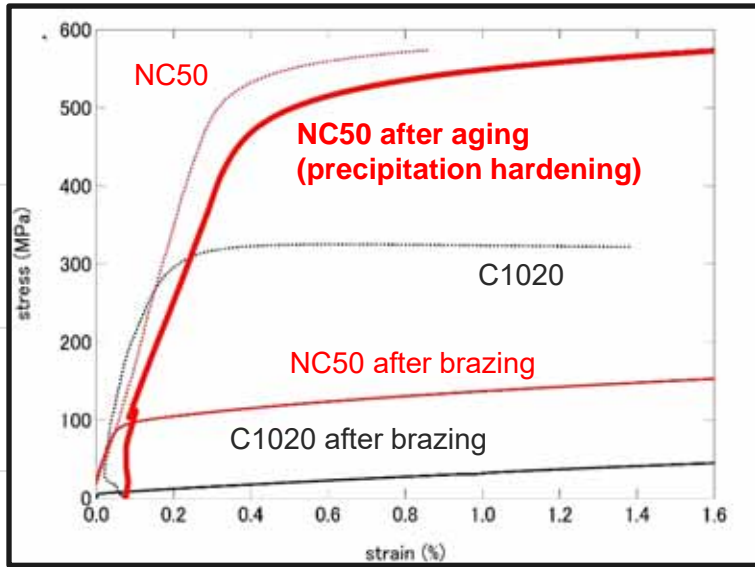


# 応力ひずみ線図



# 耐力

耐力 (MPa)



	C1020	SH-1	SH-2	NC50
■ before brazing	322.3	293.6	348.2	551.8
■ after brazing	12.9	57.9	40.8	109.7
■ brazing + aging				513.1

■ before brazing    ■ after brazing    ■ brazing + aging

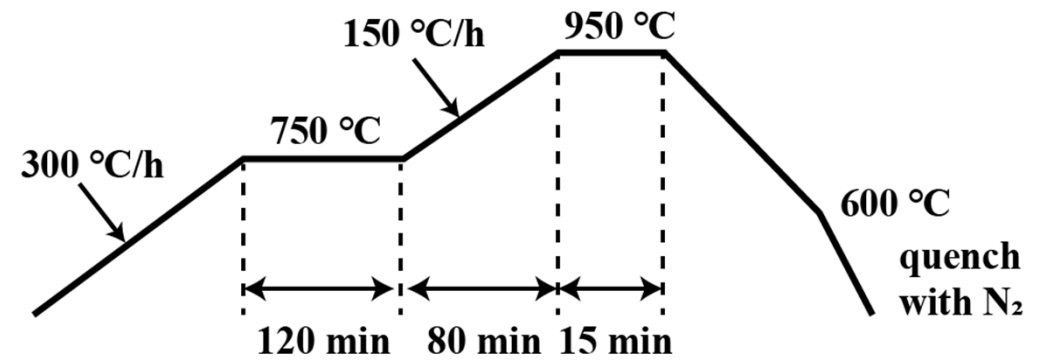
# 各材料の機械的性質

Material	Cu (C1020)		Cu-Cr (SH-1)		Cu-Zr (SH-2)		Cu-Si-Ni (NC50)		
		After brazing		After brazing		After brazing		After brazing	After aging
<b>conductivity %IACS</b>	102.2	102.1	90.8	76.0	81.1	68.5	50.3	25.1	48.8
<b>Hardness</b>	87.4	30.4	71.6	60.0	45.9	55.8	95.3	61.2	95.4
<b>Tensile strength Mpa</b>	327.4	232.1	402.6	237.2	443.1	238.3	648.7	323.7	658.8
<b>Elongation %</b>	21.6	54.4	36.8	56.8	32.6	51.4	14.8	46.6	10.6
<b>Yield strength Mpa</b>	322.3	12.9	293.6	57.9	348.2	40.8	551.8	109.7	513.1

# 製作

- 外形加工
- 真空炉でパイプロウ付け
  - 溶体化処理
- 導電率測定
- 真空炉で時効硬化処理
- 導電率測定
- ワイヤーカット
- 真空フランジ上へ組み立て
- 静的試験(リーク、水圧等)
- 組み込み
- 通電試験

赤字はKEK内作業、それ以外は外注  
製作期間約6ヶ月/台(材料手配含まず)



パイプロウ付け時の温度プロファイル



ワイヤーカット中の様子

# 導電率測定による時効硬化処理の評価



加工前



ロウ付け後  
(溶体化処理)



時効硬化処理後

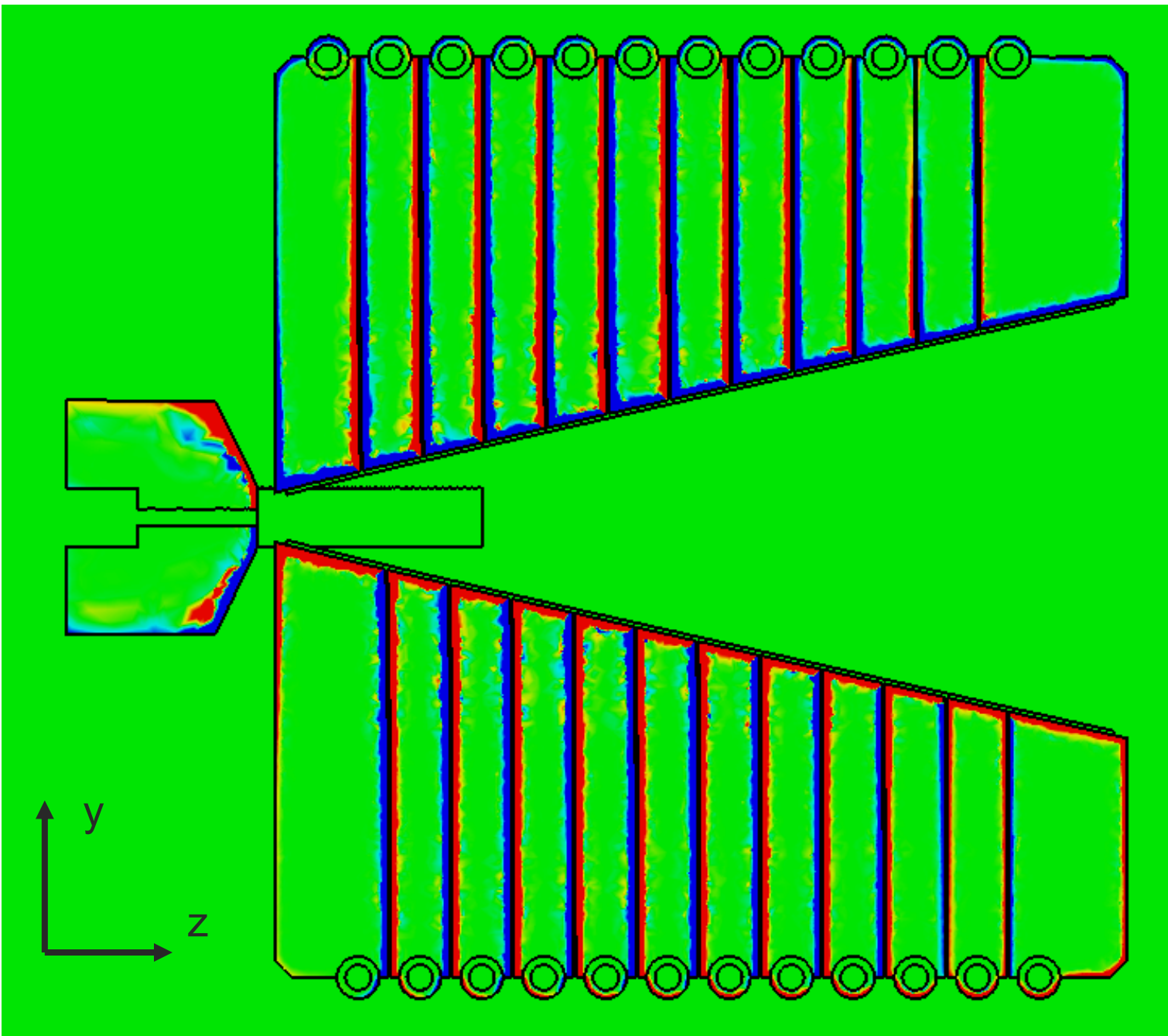
渦電流で表面抵抗を図る測定器(Ether NDE, Sigma check)で抵抗を測定  
溶体化後は 25%IACS, 時効硬化処理後は50%IACSになっていれば良い。



# 材料変更に伴う懸念事項

- 材料変更に伴い抵抗が無酸素銅(C1020)の2倍になる。
  - 発熱
  - 磁場

# Conduction current distribution in FC



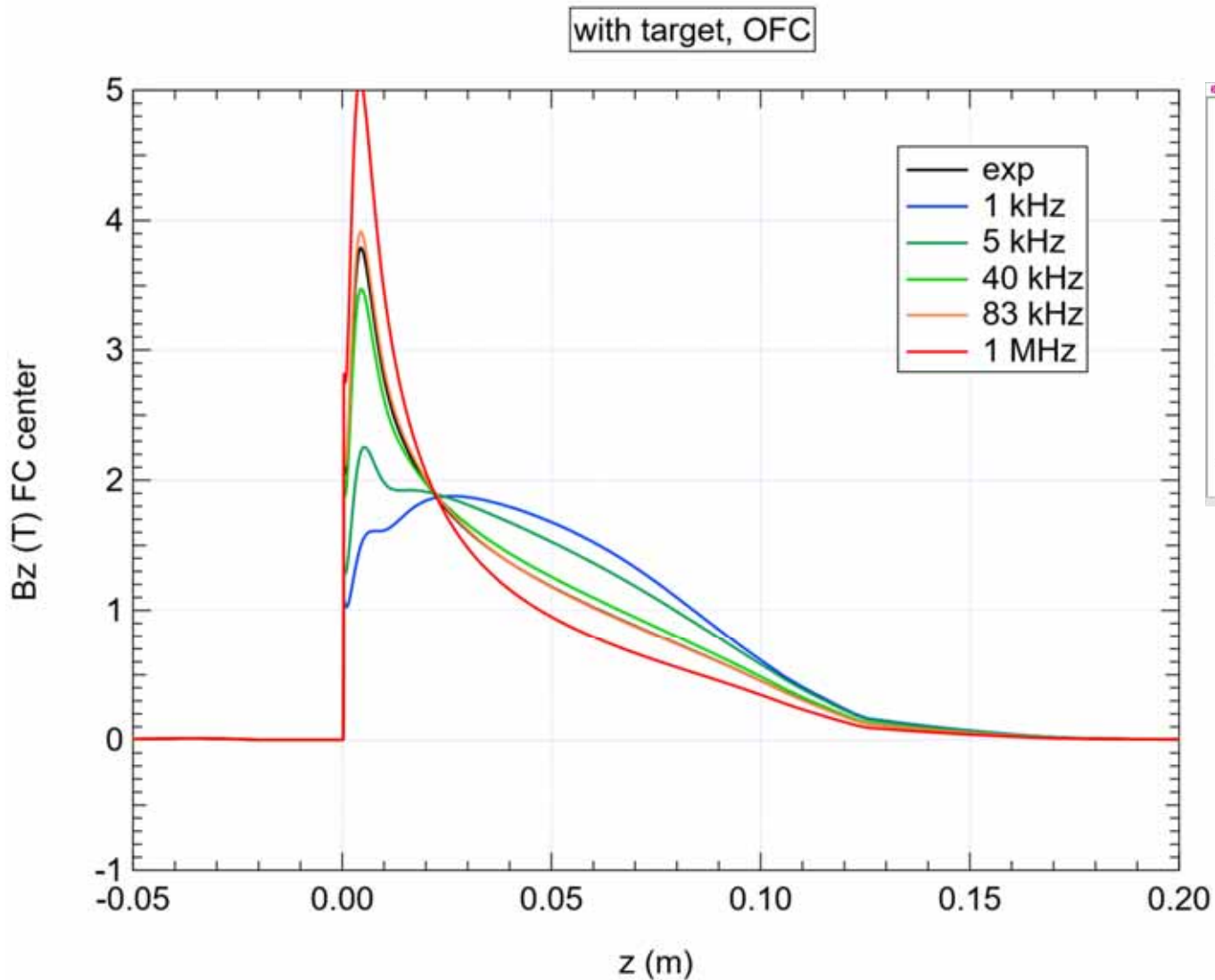
$J_x$  : conduction current density in x direction

- パルス電流なので表皮効果により電流は表面のみを流れる。
- ・テーパ内面を流れる電流が磁場を作る
  - ・Slit側面を流れる電流は両サイドで打ち消し合う

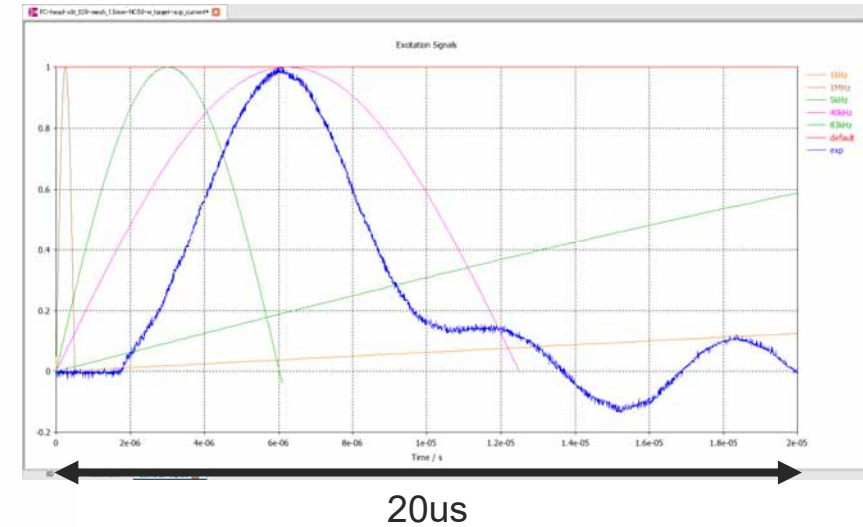
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

$\rho$ : electrical resistivity  
 $\omega$ : angular frequency  
 $\mu$ : permeability

# Pulse width dependence



Simulationに用いた電流波形



ある一定の電流に対して

パルス幅	短	長
磁場	強	弱
電圧	大	小

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

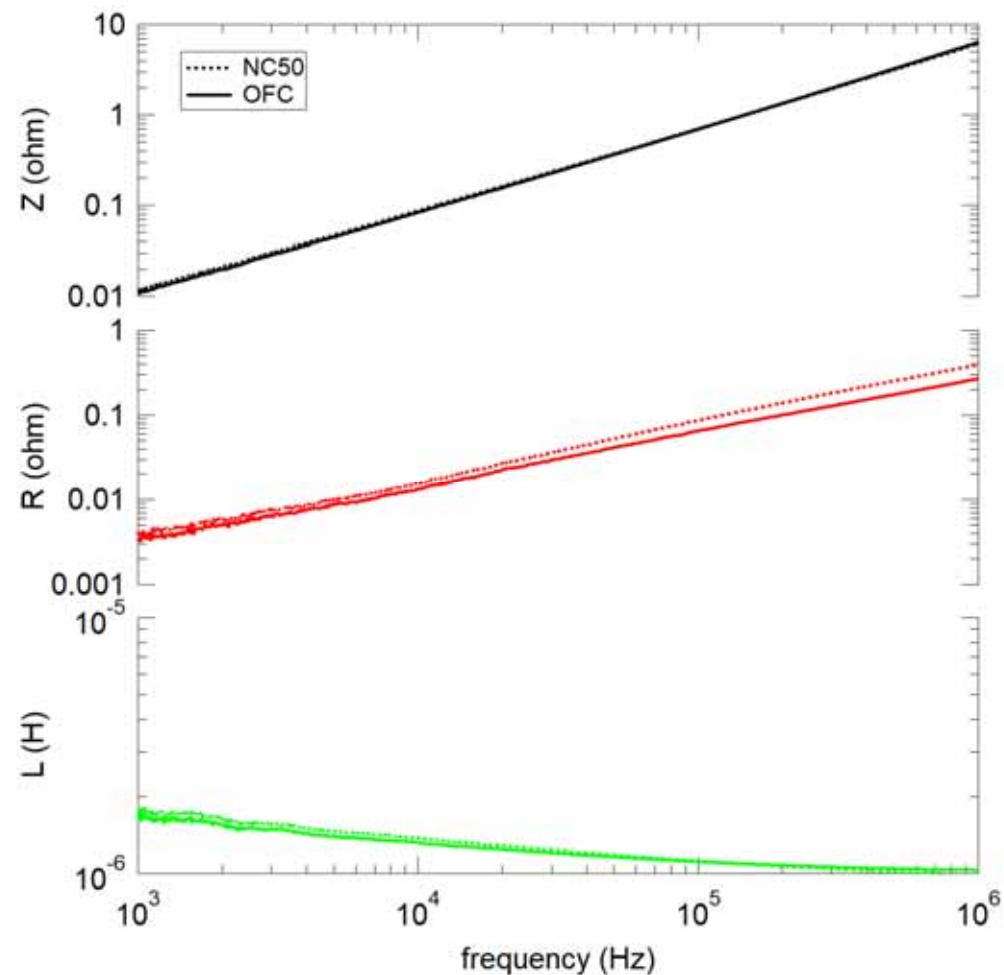
抵抗率( $\rho$ )が2倍 = 表皮深さ( $\delta$ )が $\sqrt{2}$ 倍 = パルス幅が2倍と同じ効果  
若干ピーク磁場が下がる(黒→黄緑)

# 全発熱量とLCR測定



矢印部にインピーダンスアナライザ  
(keysight, E4990B)を接続して測定

全発熱量はRに比例するが、  
銅パイプ部はどちらも無酸素銅なので、R  
は2倍にはならない



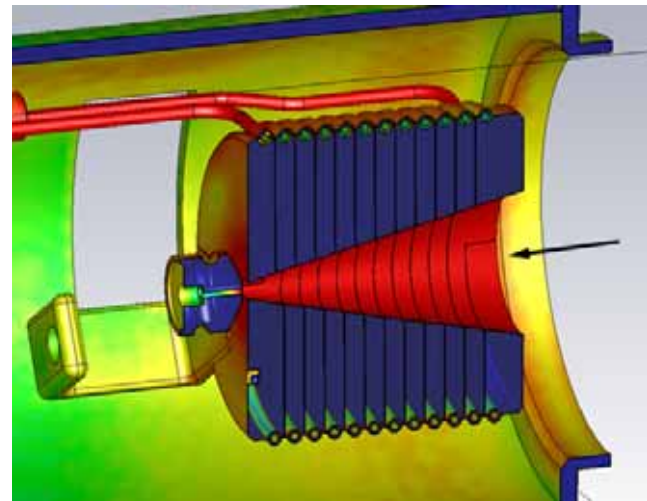
Frequency	R_C1020	R_NC50	R_NC50/R_C1020
kHz	mΩ	mΩ	
1	3.24	3.78	1.17
10	12.8	15.1	1.18
100	65.0	86.3	1.33
1000	268	392	1.46



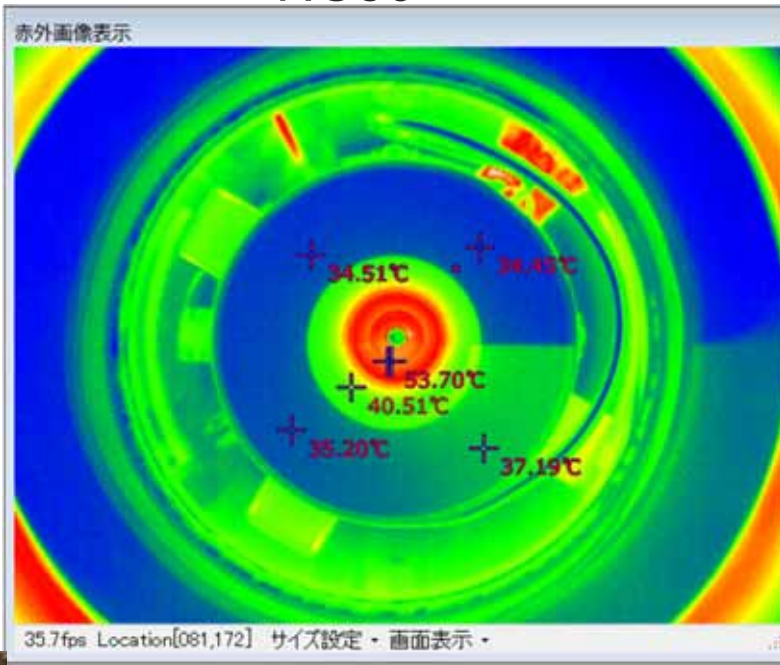
# 発熱分布の計算と測定

NC50

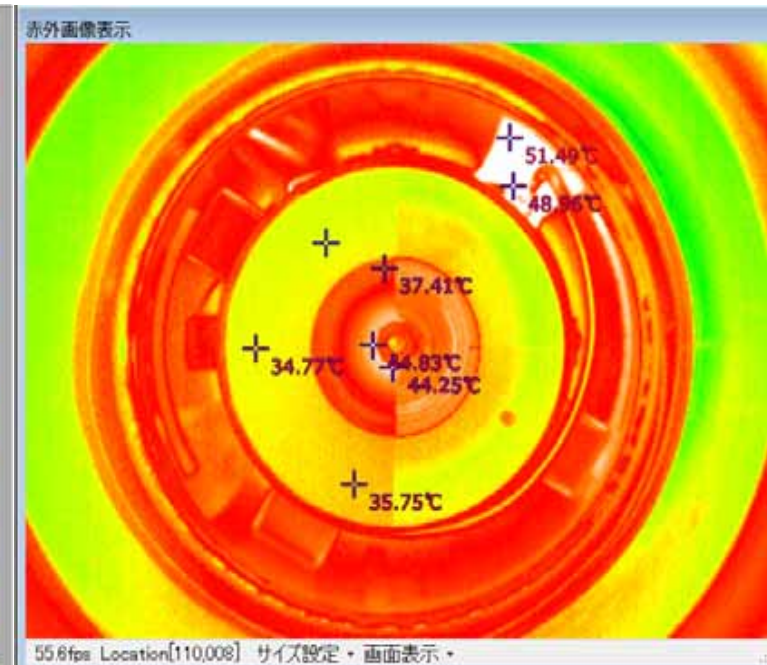
C1020



発熱分布のsimulation  
測定は黒矢印の向きより

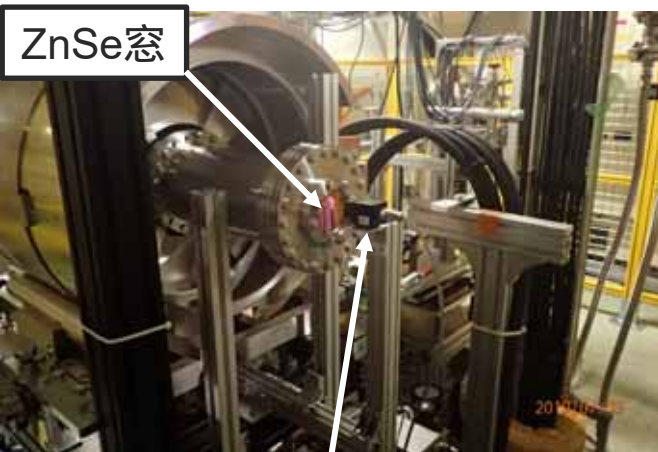


ピーク値 : 53.7



ピーク値 : 44.8

\*色スケールは異なることに注意



赤外線カメラ  
Vision sensing, VIM-384G2EL

	C1020	NC50
冷却水入り口温度	32.20	31.85
冷却水出口温度	39.04	39.87
冷却水温度上昇	6.84	8.02
冷却水流量	1.42 L/min	1.41 L/min
<b>全発熱量</b>	<b>680 W</b>	<b>790 W</b>

# 新FCの設置

- 2020夏のメンテナンス期間に
  - **新FC**
  - ソレノイド内BPM
  - ソレノイド内steering磁石を設置

Remove old positron source



Install new positron source

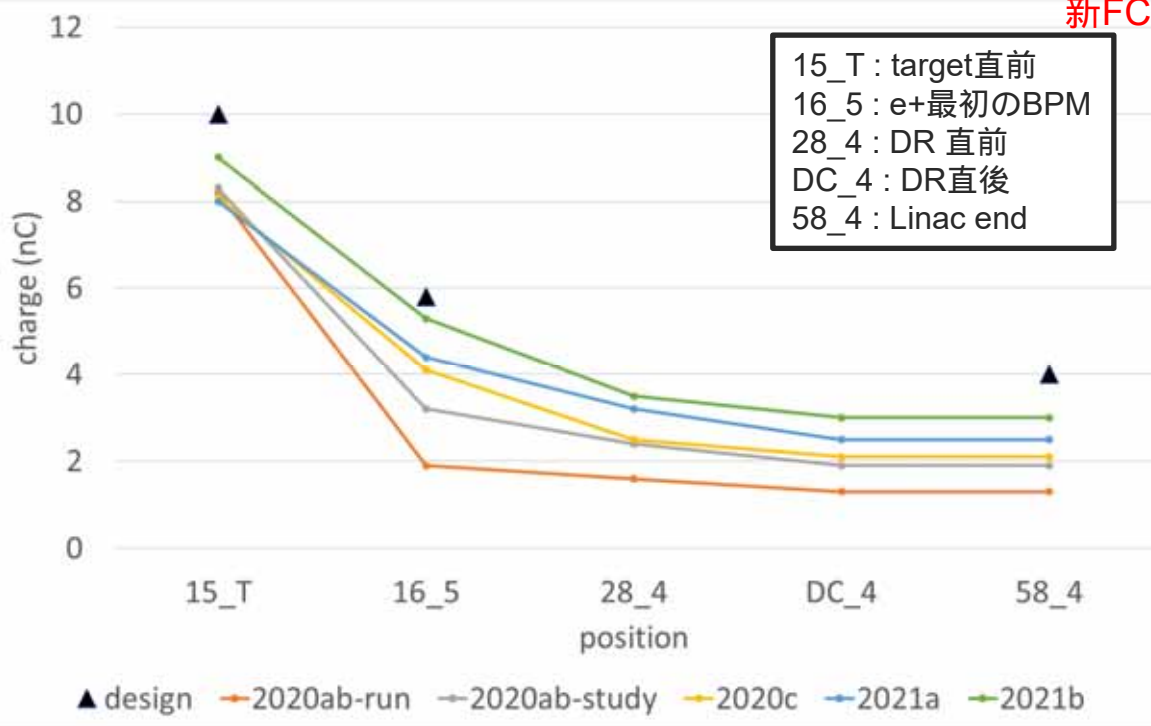




# 陽電子電荷量 history

	design	2020ab (operation)	2020ab	2020c	2021a	2021b
Study date		2020/7/1	2020/7/2	2020/10/12	2021/2/12	2021/7/6
Energy (e-)*	3.46 GeV	3.01 GeV	3.01 GeV	2.87 GeV	2.89 GeV	2.92 GeV
Bunch charge (e-)	10 nC	8.2 nC	8.3 nC	8.1 nC	8 nC	9.0 nC
e+/e- @ SP_16_5	0.58	0.23	0.38	0.51	0.55	0.59
e+ @ SP_16_5	5.8 nC	1.9 nC	3.2 nC	4.1 nC	4.4 nC	5.3 nC
e+ @ SP_28_4	-	1.6 nC	2.4 nC	2.5 nC	3.2 nC	3.5 nC
e+ @ SP_DC_4	-	1.3 nC	1.9 nC	2.1 nC	2.5 nC	3.0 nC
e+ @ SP_58_4	4 nC	1.3 nC	1.9 nC	2.1 nC	2.5 nC	3.0 nC
e+ @ QMF8P_K**	4 nC				2.77 nC	2.95 nC

## 新FCインストール



\*LliOP:AC\_13\_4:GAINSUM:KBP

\*\*BTpBPM:QMF8P\_K\_1:NC\_1Hz × CGpBPM:QMF8P\_K:FQ (0.475575)

数回のビームスタディーを経て  
 変換効率: 0.59  
 バンチチャージ@linac end: 3.0 nC  
 を達成

# まとめ

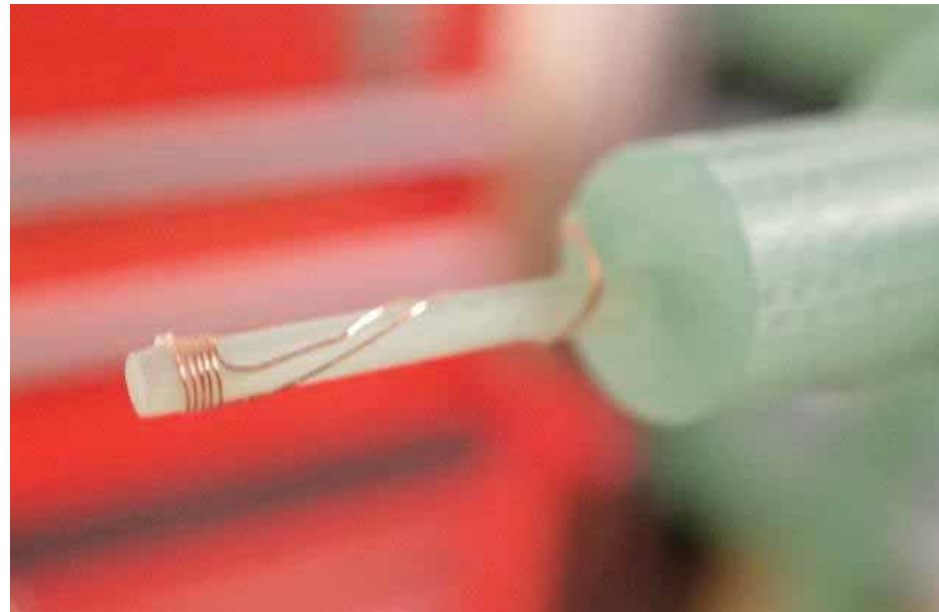
- 銅合金(NC50)を用いたFCを製作
  - 放電問題を克服し、定格電流(12 kA)で安定運転を達成
  - 電子陽電子変換効率は設計値0.59を達成
  - 抵抗率増大(C1020の2倍)による磁場の变化、発熱増加は許容範囲内

NC50はロウ付けが必要で、かつ高い機械的特性が求められる用途に無酸素銅の代替品として適用できる可能性がある。



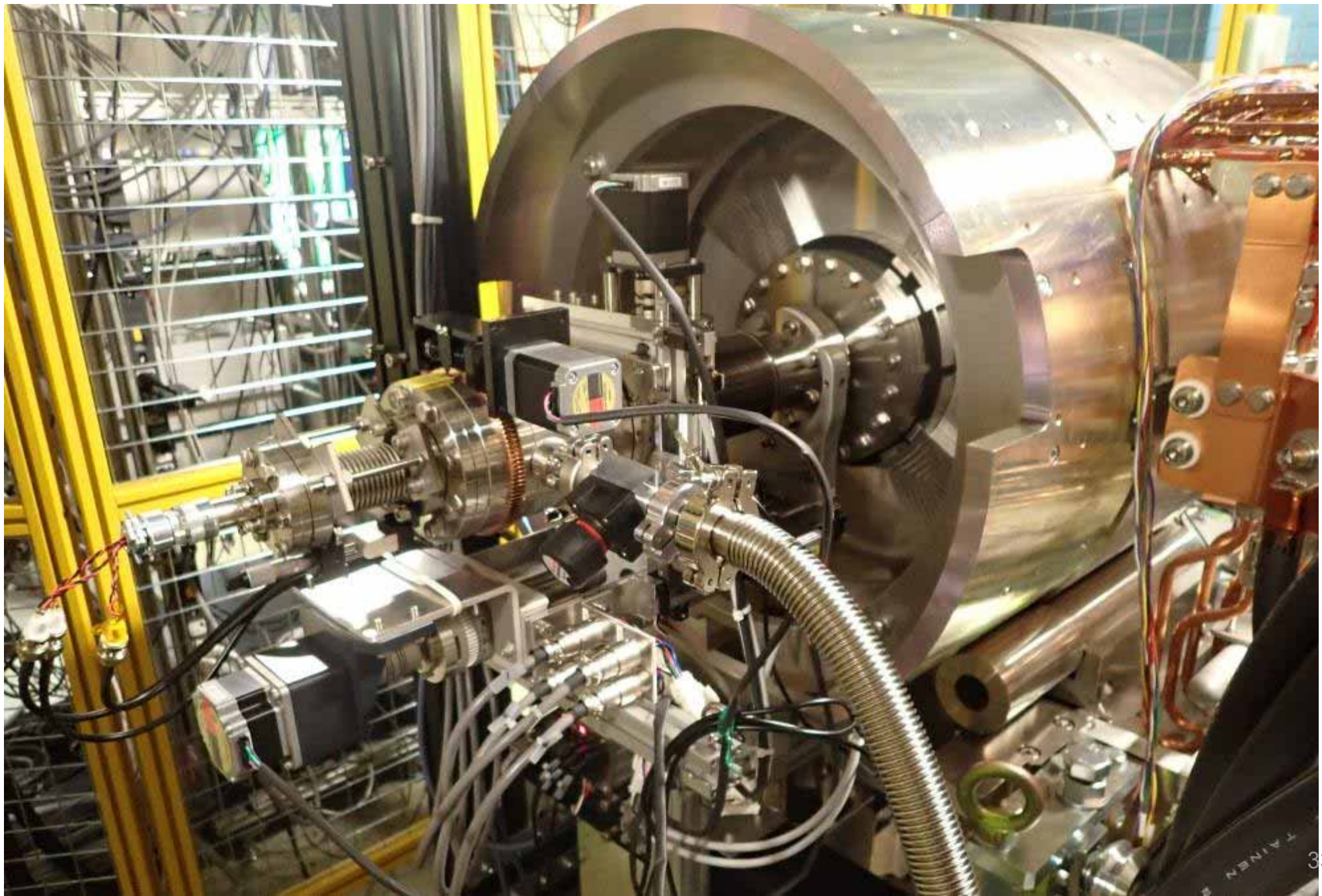
# 磁場測定

- XYZ stage with motor drive
- Rotary stage with motor drive
- XYZ positions are monitored by linear gauge by 10um precision

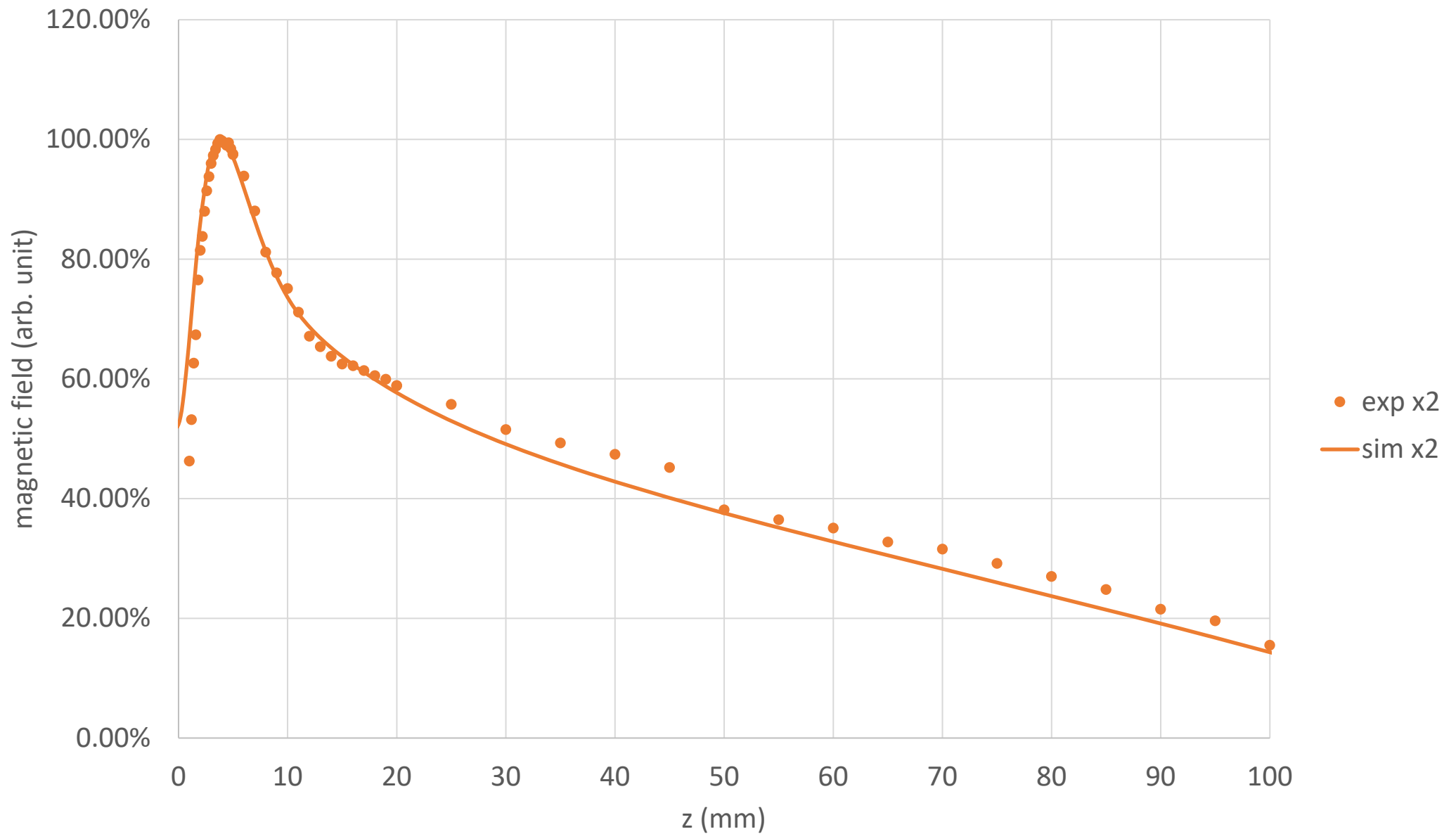


Pick up coil is mounted on FRP rod.





# 測定値とsimulationの比較 (Bz)



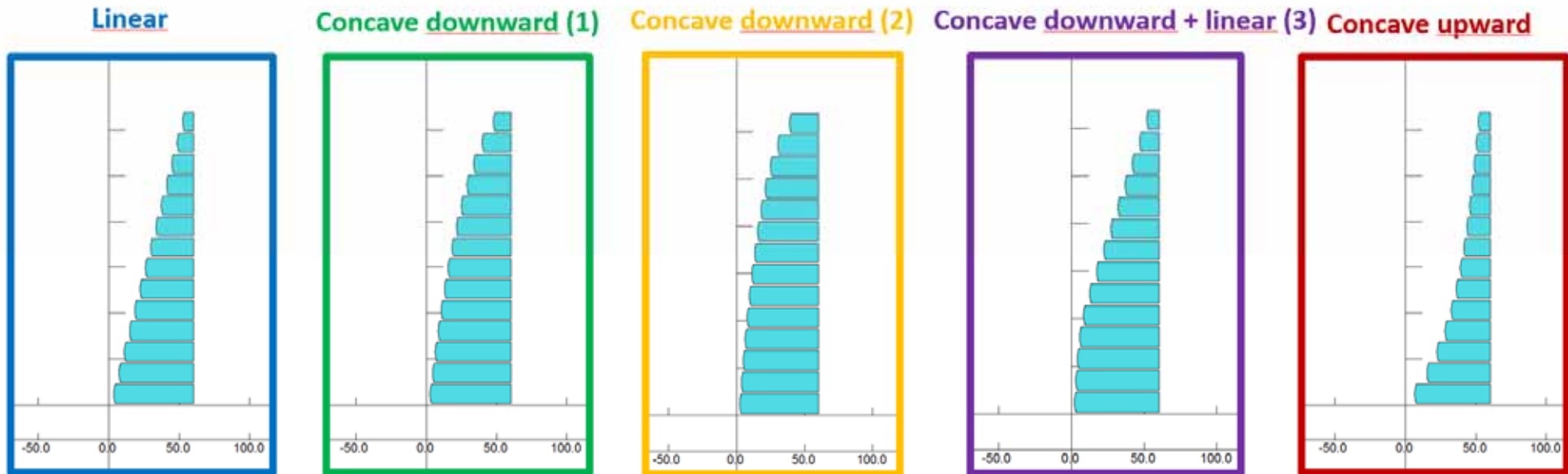


# FC形状の最適化

H. Bajas氏 (CERN) LCWS2021発表資料より

## Design optimization for the CLIC e<sup>+</sup> source

- From linear to non-linear profile for the FC aperture:



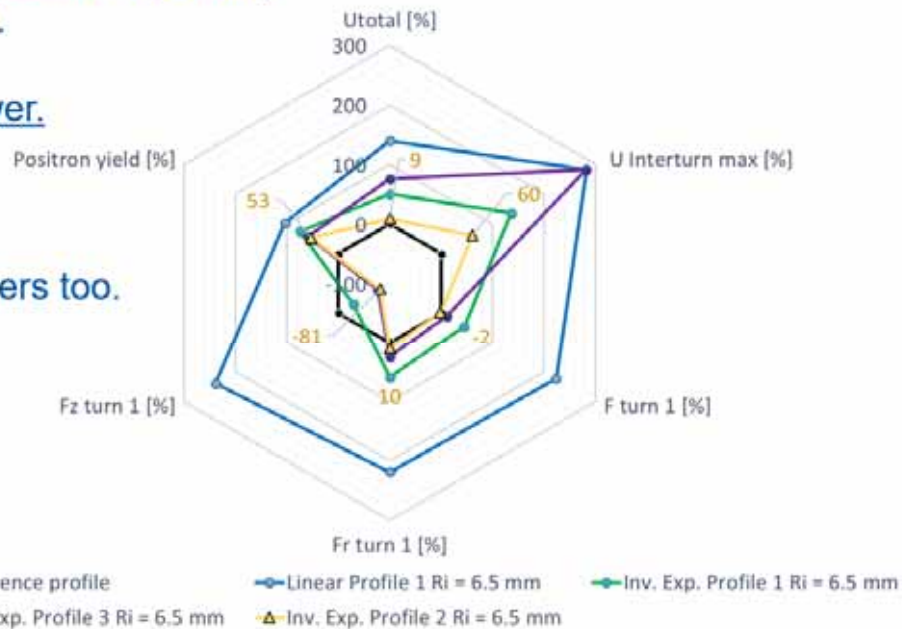
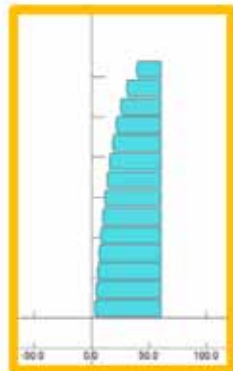
How does the shape impact the parameters to optimize?

# FC形状の最適化

H. Bajas氏 (CERN) LCWS2021発表資料より

## Design optimization for the CLIC e+ source

- Adapting the non-linear shape (green vs. yellow) preserves the yield (53% higher).
- The voltages get significantly lower.
- The detrimental forces directed along the coil axis Z lowers too.



SLAC design  
@ 25 kHz & 13 kA

Vs.

**linear modified design  
with large aperture**

Vs.

**Non-linear design (1)  
Concave downward**

Vs.

**Non-linear design (3)  
Concave downward + linear**

Vs.

**Non-linear design (2)  
Concave downward**

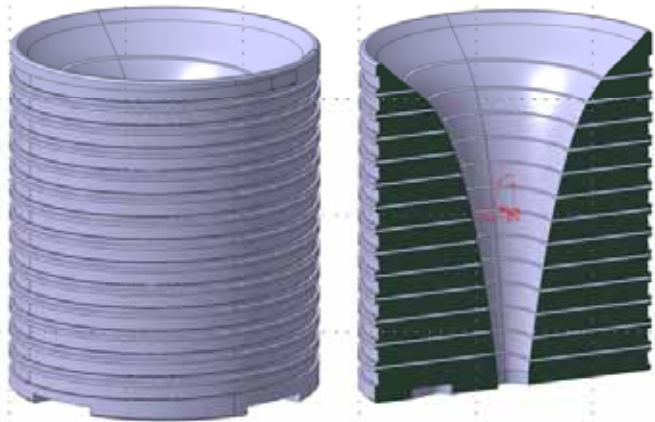
# FC形状の最適化

H. Bajas氏 (CERN) LCWS2021発表資料より

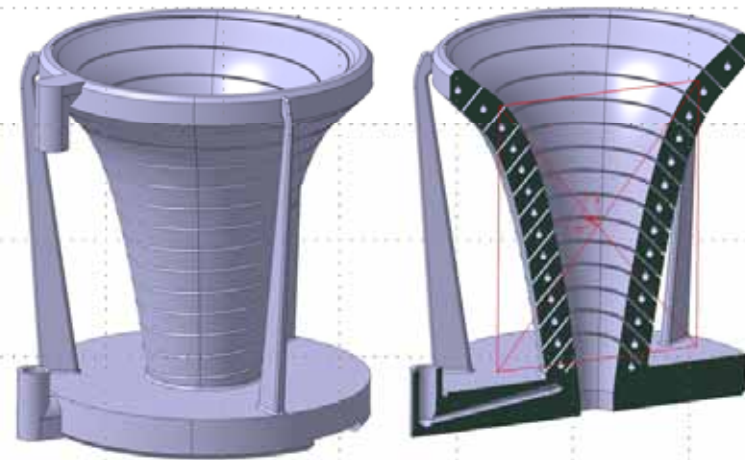
## Update on manufacturing and testing

### Manufacturing techniques consideration

“Classic” Machining with  
Electric Discharge Machining (EDM)



“Innovative” Machining with  
3D printed (available at CERN with Titanium)

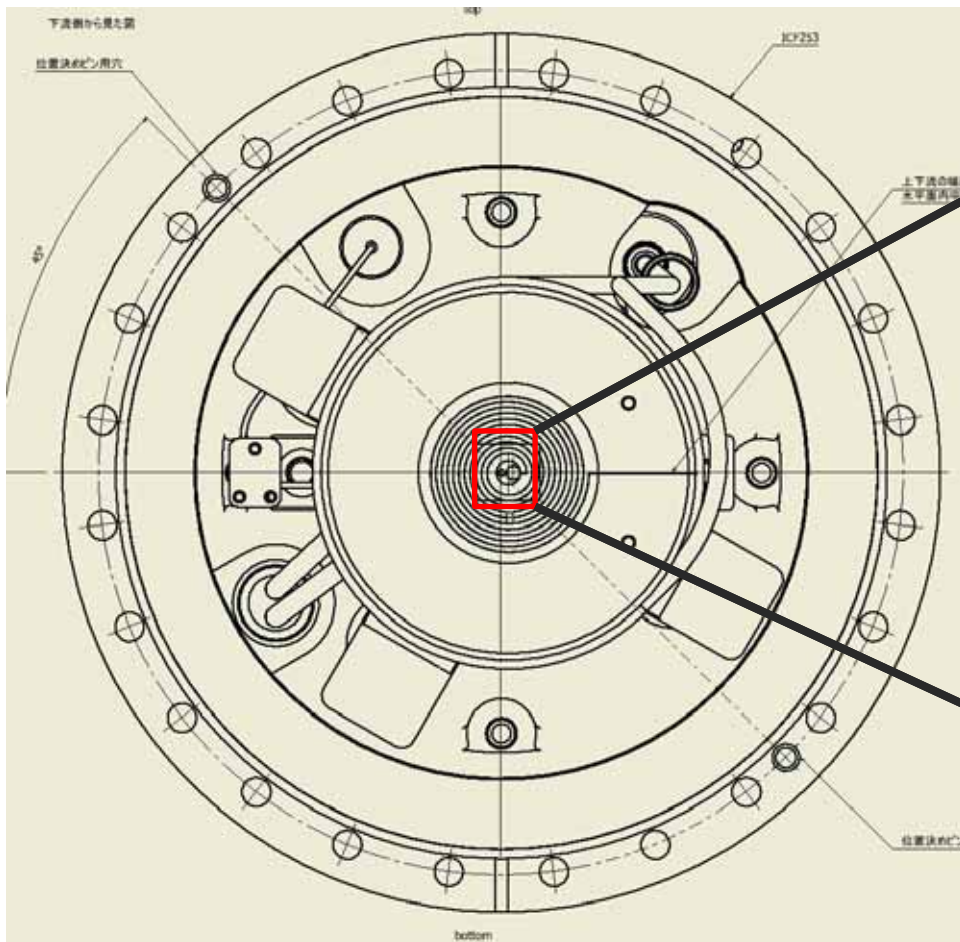




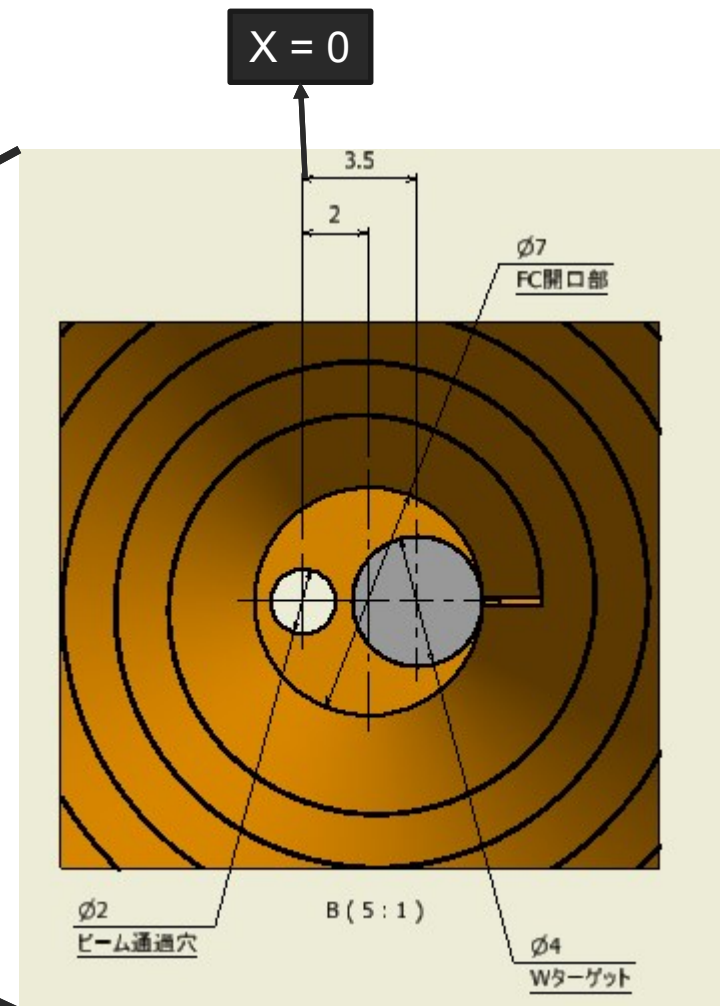
# SuperKEKBの陽電子源 5

Target material : W  
Target size :  $\Phi 4 \times 14$   
Inserted in the pule Cu block  
Connected by HIP process

looking from downstream side

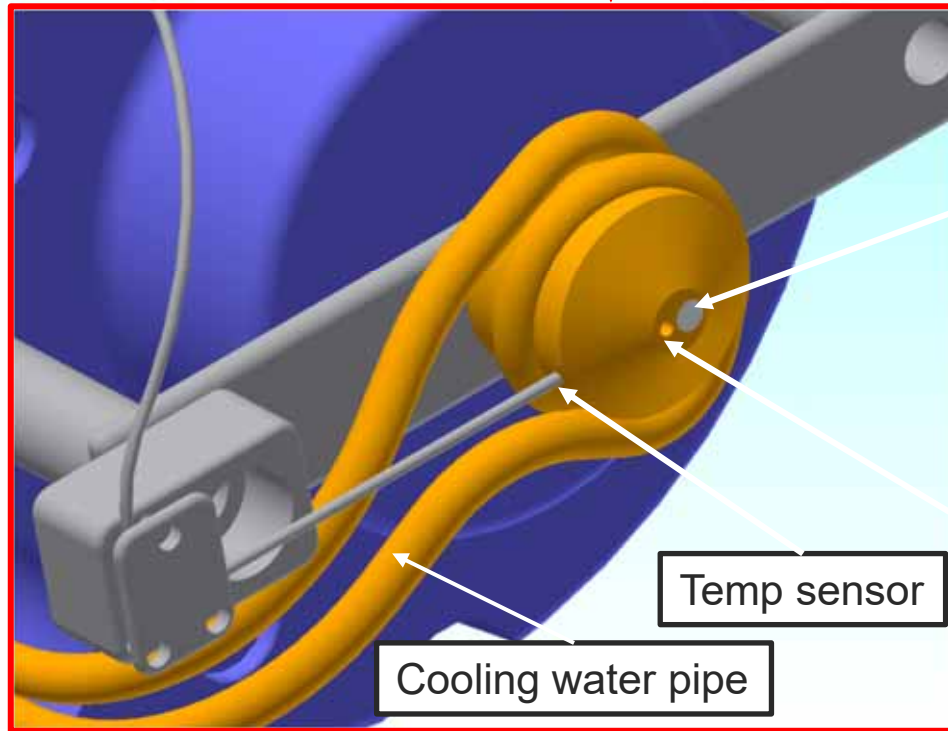
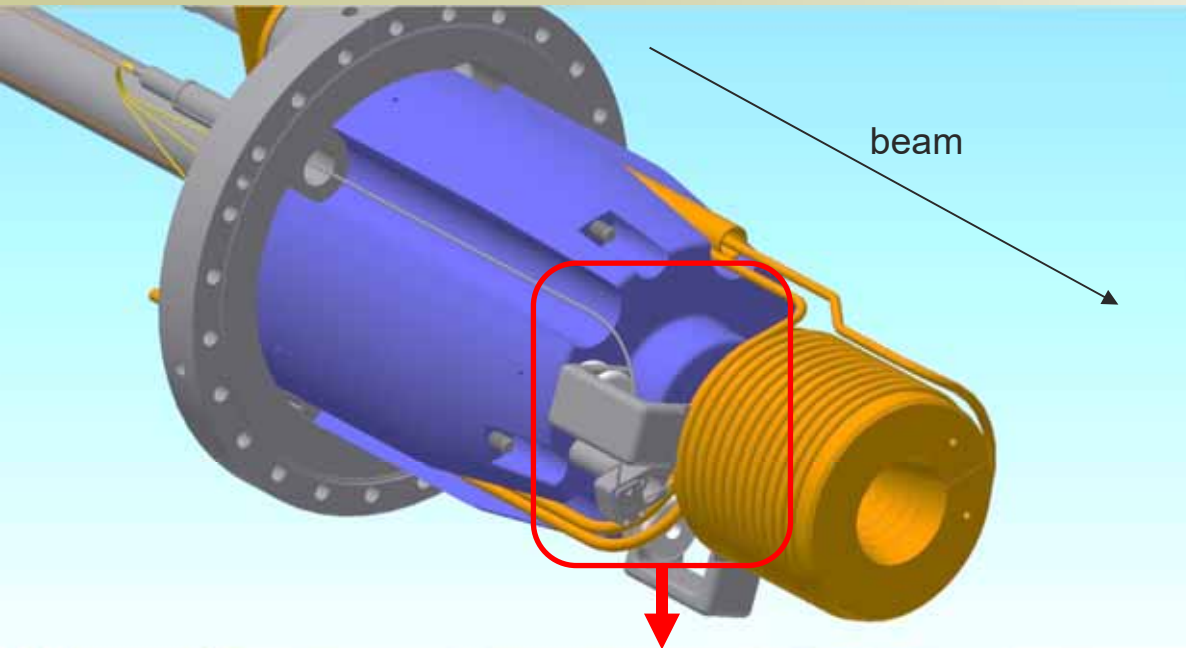


Evaluate field at 3 x-point.  
X = 0 electron path  
X = 2 center of FC  
X = 3.5 positron path





# SuperKEKBの陽電子源 4



W target

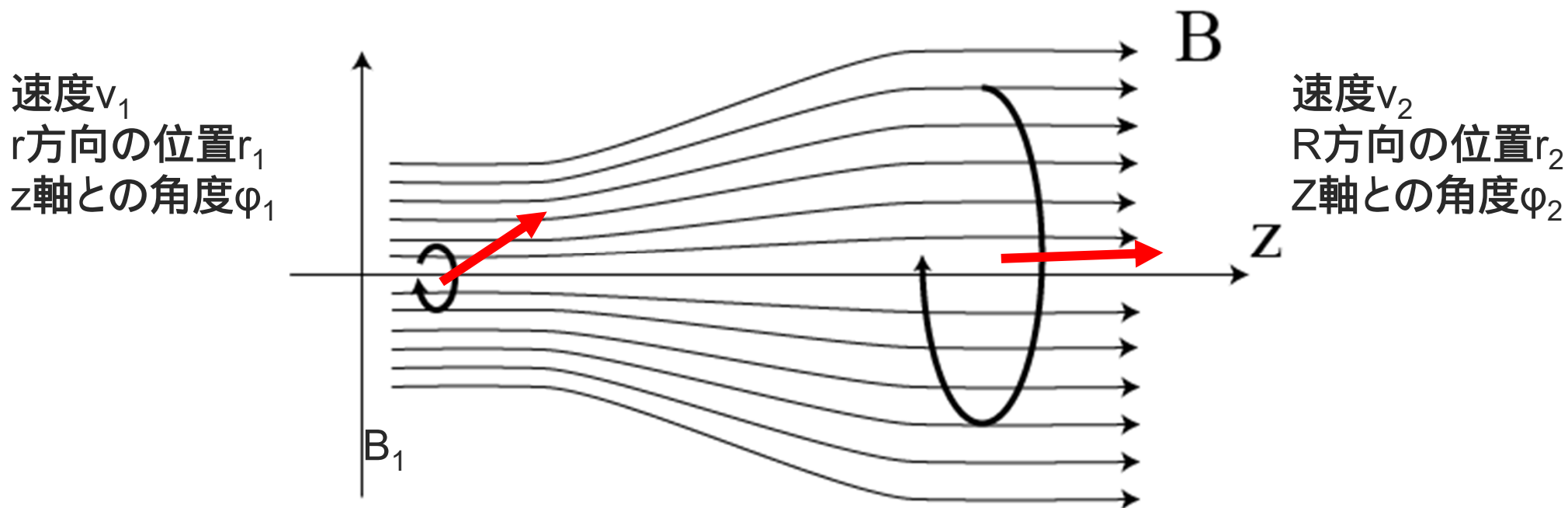
$\Phi 2$  mm hole for electron

Temp sensor

Cooling water pipe



# ミラー磁場中での粒子の運動 - AMDの原理



$B_2 < B_1$ , 磁場の強い領域から弱い領域へ進むと

$v_1 = v_2$       速度は変わらない

$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{B_1}{B_2}}$       半径は大きくなる

$\varphi_2 = \varphi_1 \sqrt{\frac{B_2}{B_1}}$       Z軸となす角は小さくなる。

**磁場の強さの比に応じて  
角度と位置を調整できる。**