

# 超伝導空洞技術－1

# 超伝導空洞技術－2

第12回加速器学会年会 技術研修会  
2015年 8月 6, 7日 (敦賀)

高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設  
加古 永治

# 超伝導空洞技術 — 1

2015年 8月 6日 (15:10 ~ 16:10)

- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- まとめ

# 超伝導空洞技術－2

2015年 8月 7日 (9:00 ~ 10:00)

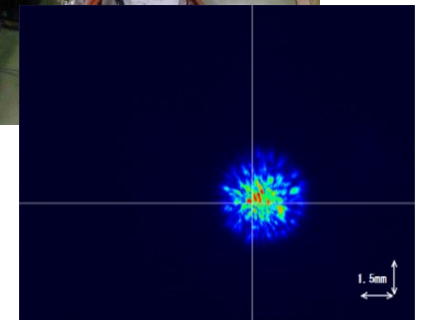
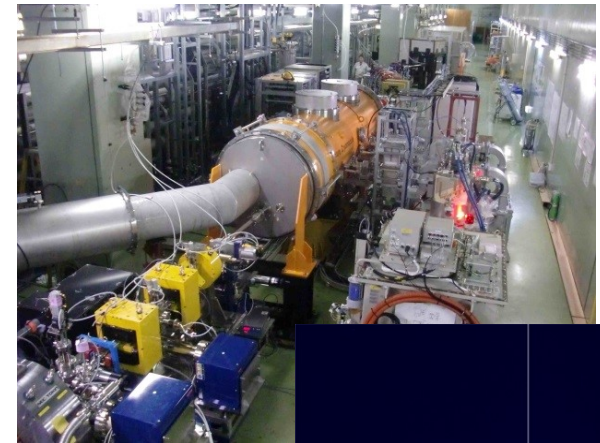
- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから(後半)
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- まとめ

# 超伝導空洞技術 — 1

- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- まとめ

# はじめに

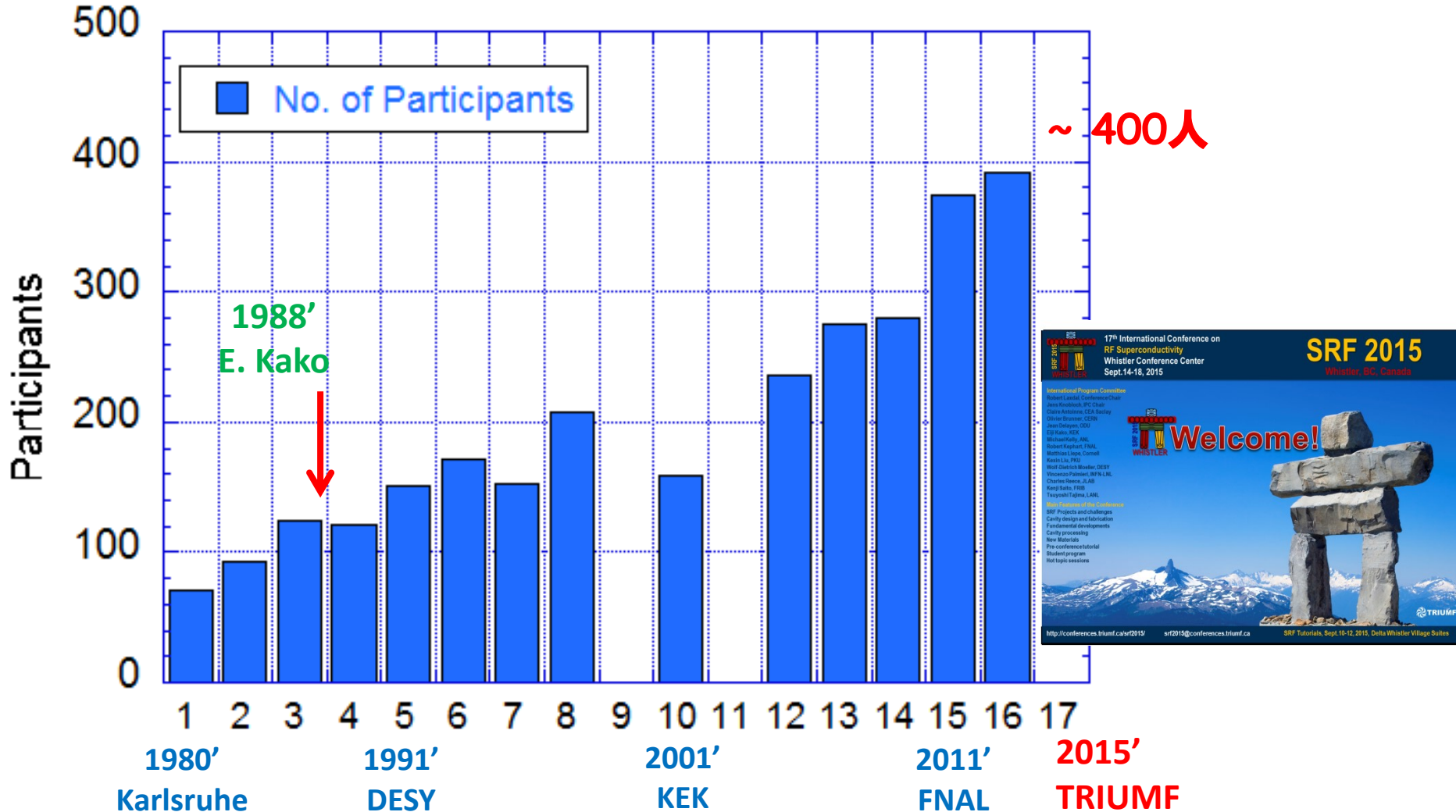
明日からでも超伝導空洞の研究開発の最前線で、  
実践的に活躍できる人材育成・確保を目指して、  
超伝導空洞に関する基本的な技術を解説します。



ニオブ材料の開発からビーム加速運転まで

# はじめに(2)： 35年間の超伝導空洞人口の増加

Participants of SRF Workshop/Conference



# はじめに(3): 25年間での技術的進歩

[T. Furuya, SRF'89]

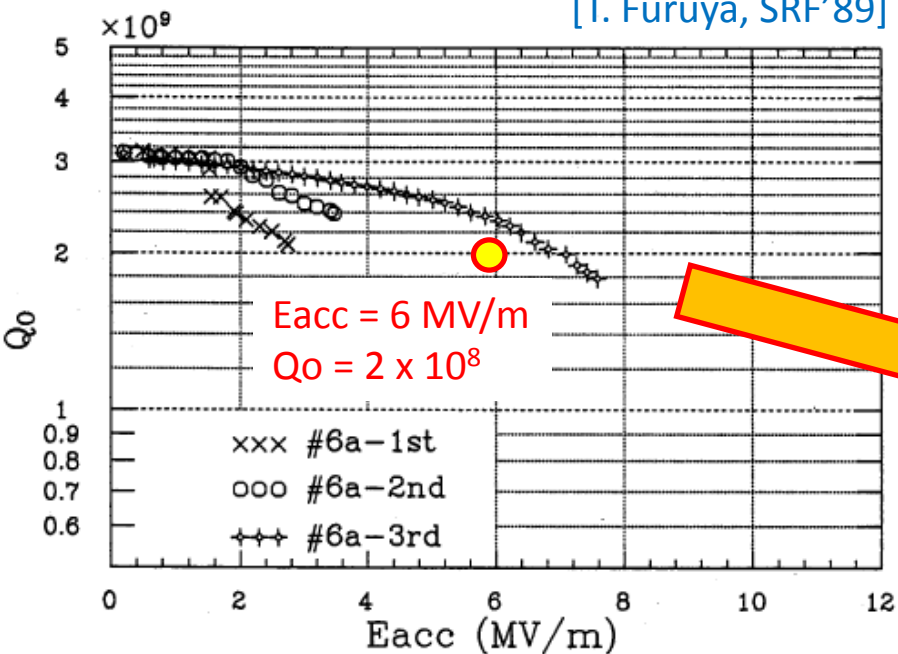
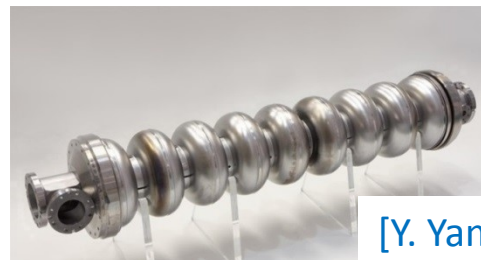


Figure 7:  $Q_0$  and  $E_{acc}$  of TRISTAN #6a cavity.

## TRISTAN 508MHz 5-cell Cavity

He temperature  
at 4.2 K  
CW operation



[Y. Yamamoto, NIM-A (2013)]

Test Results of 9-cell Cavity Performance at STF

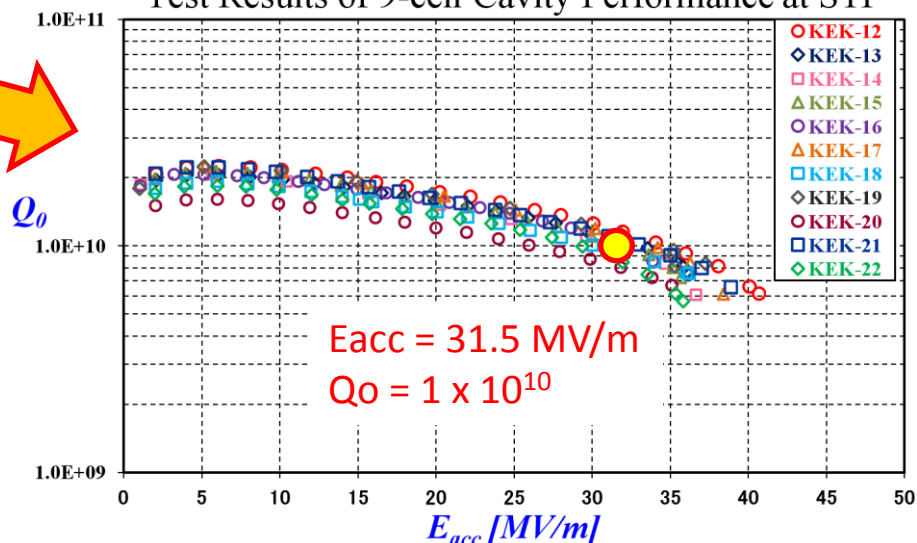


Figure 1: Best  $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  curves obtained from performance tests for KEK-12 through KEK-22.

## STF 1.3GHz 9-cell Cavity

He temperature at 2.0 K  
1 ms, 5 Hz pulsed operation

# はじめに(4): KEKで開発された超伝導空洞



TRISTAN  
508MHz 5-cell Cavity



KEKB 508MHz Crab Cavity



J-ADS 972MHz  
9-cell Cavity  
( $\beta=0.73$ )



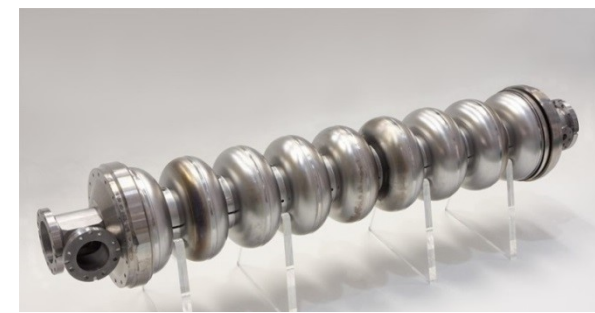
KEKB 508MHz 1-cell Cavity



cERL Injector  
1.3GHz 2-cell Cavity



cERL ML  
1.3GHz 9-cell Cavity



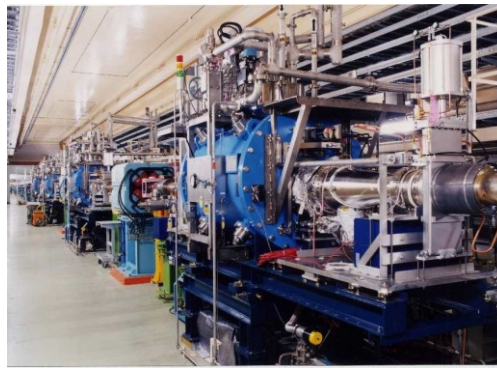
STF 1.3GHz 9-cell Cavity



# はじめに(5): KEKで開発されたクライオモジュール

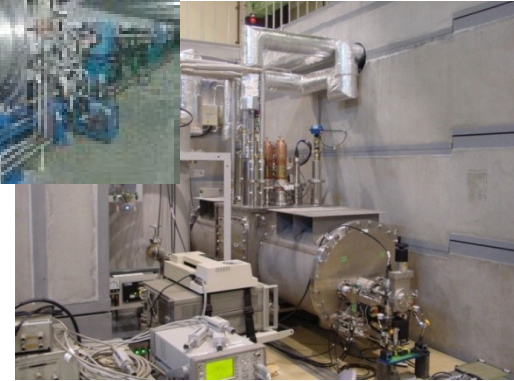


TRISTAN  
508MHz Cryomodule



KEKB  
508MHz Cryomodule

KEKB Crab Cryomodule



J-ADS 972MHz Cryomodule



cERL 1.3 GHz  
Injector Cryomodule

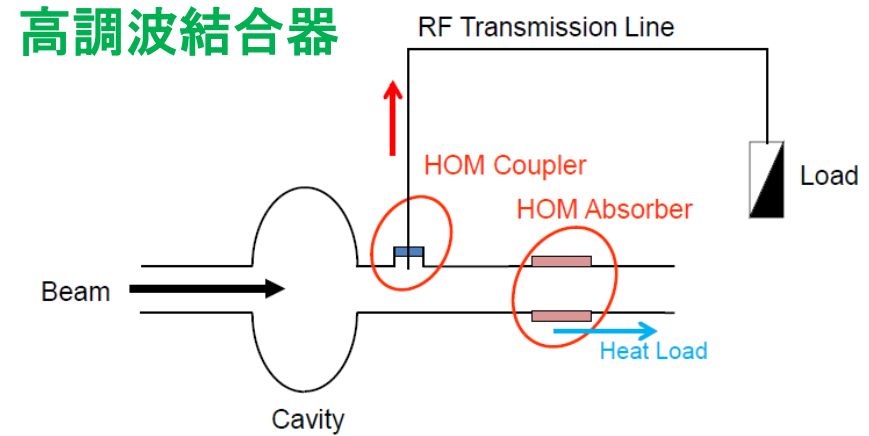
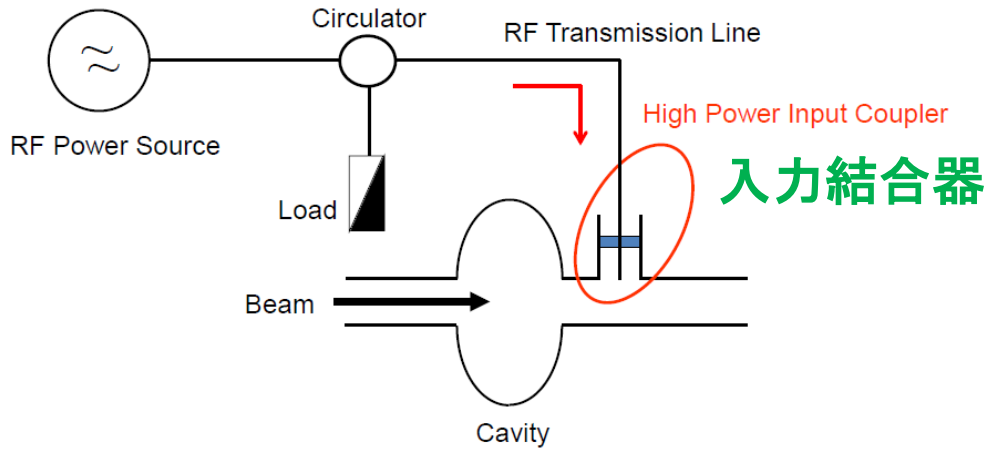


cERL 1.3 GHz  
ML Cryomodule

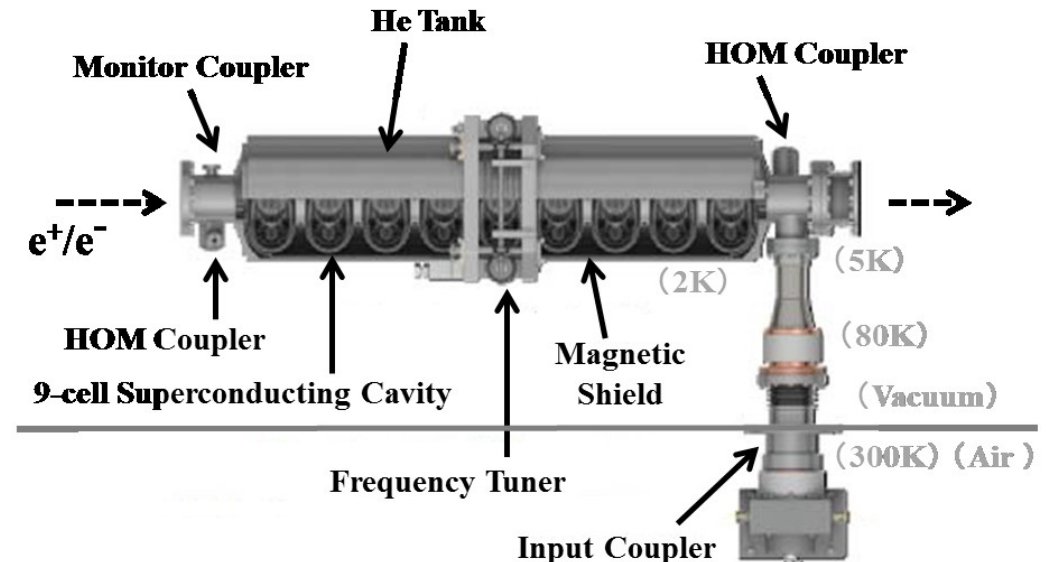
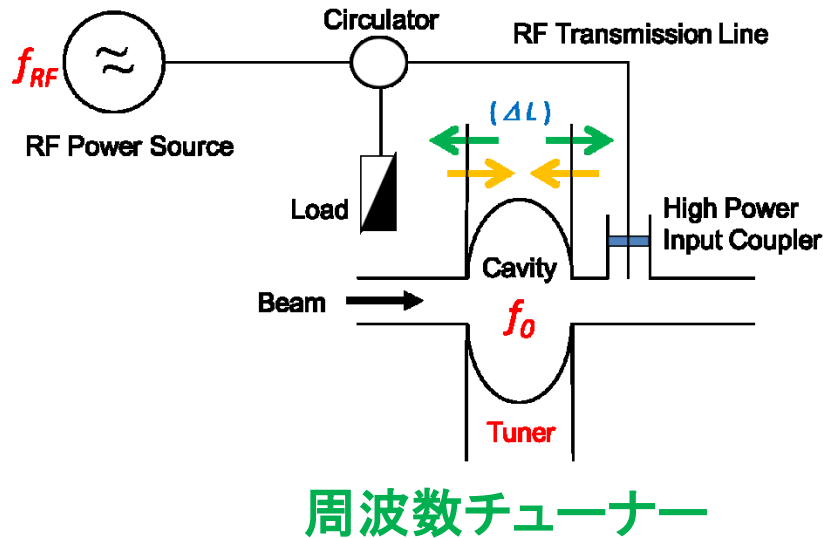


STF 1.3GHz Cryomodule

# はじめに(6): 超伝導加速器の主要開発要素



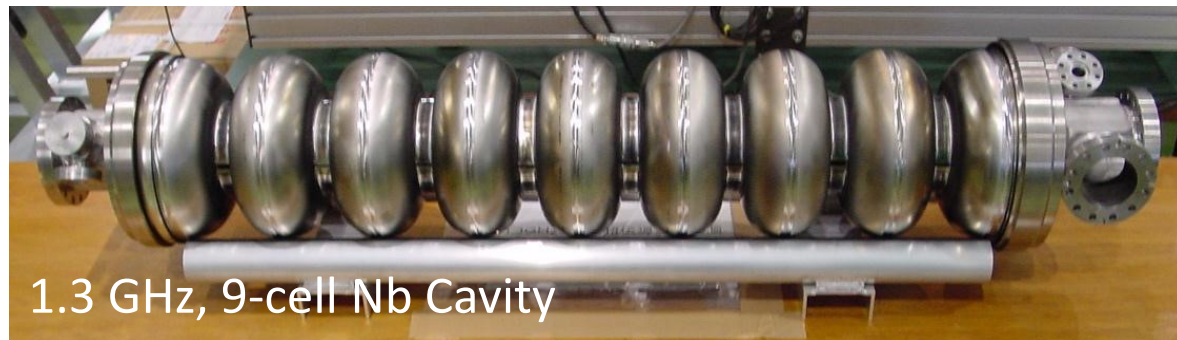
## クライオモジュール(断熱真空槽内に収納)



# はじめに(7): 超伝導加速器システム



Input Coupler



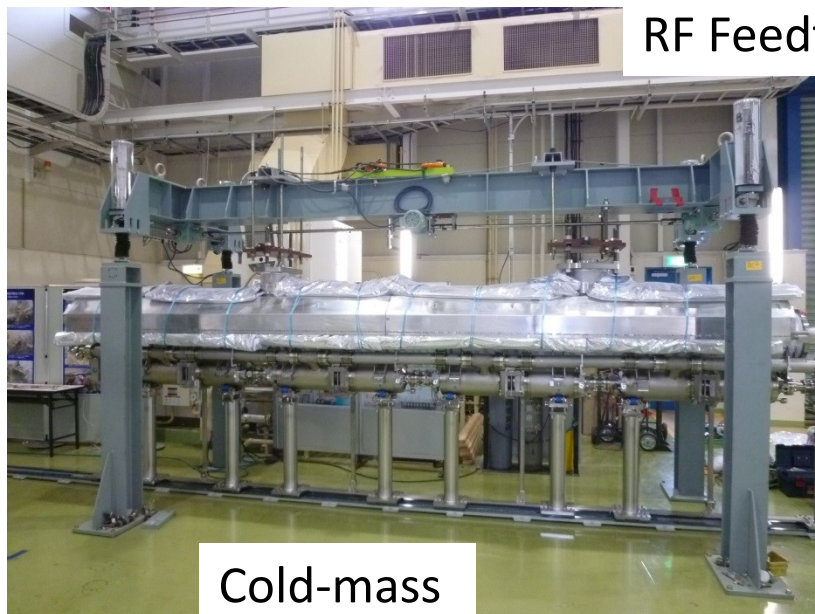
1.3 GHz, 9-cell Nb Cavity



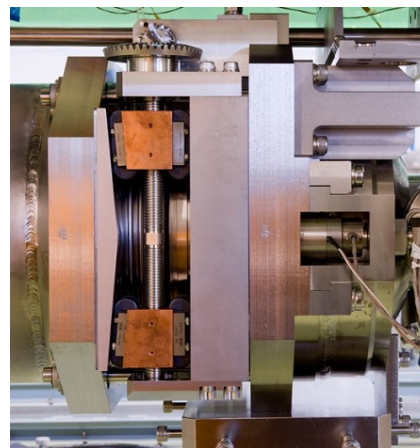
RF Feedthrough



HOM Coupler



Cold-mass

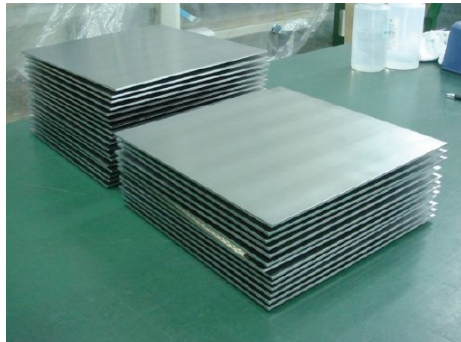


Slide-Jack Tuner

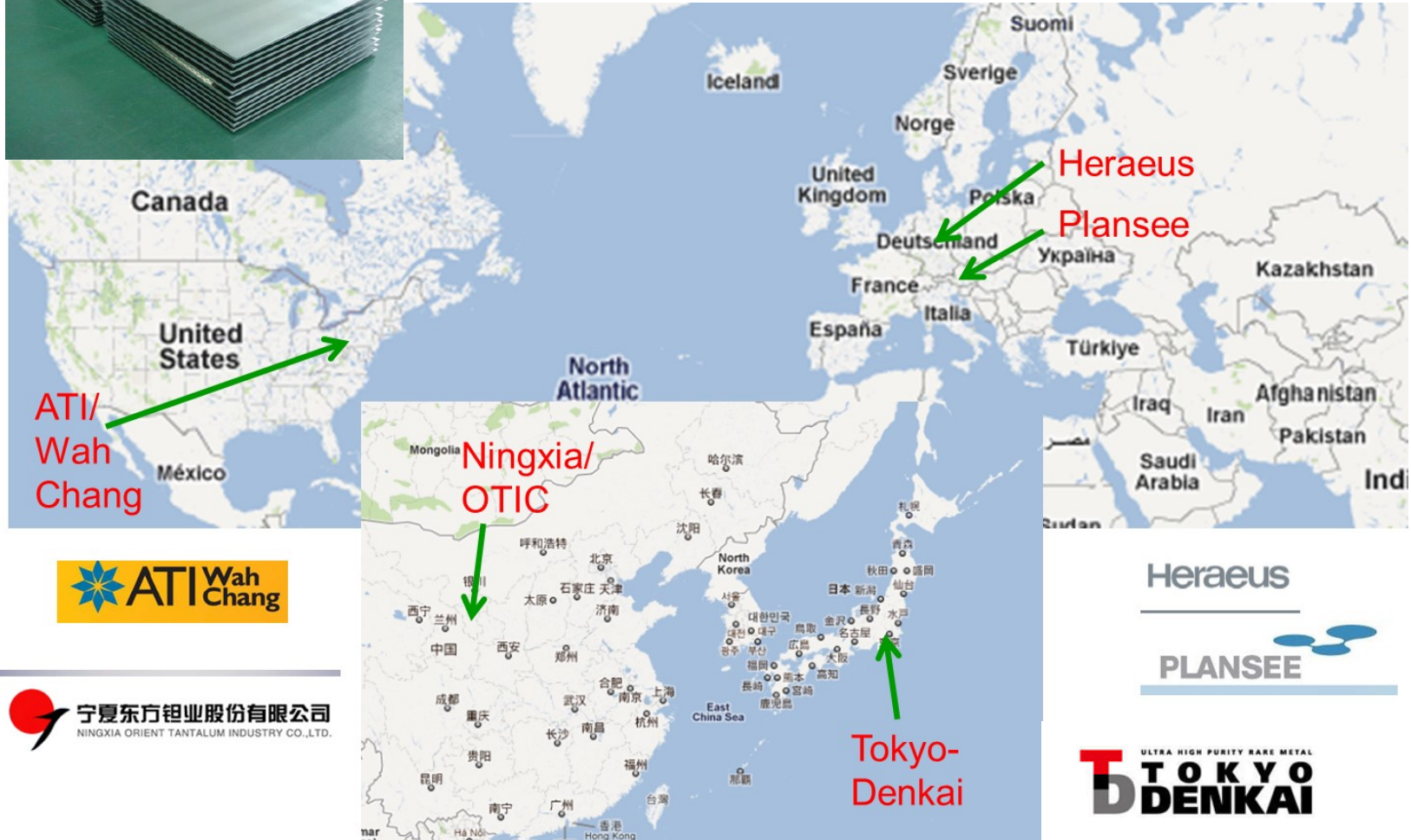


Magnetic Shield  
He Jacket (Ti)

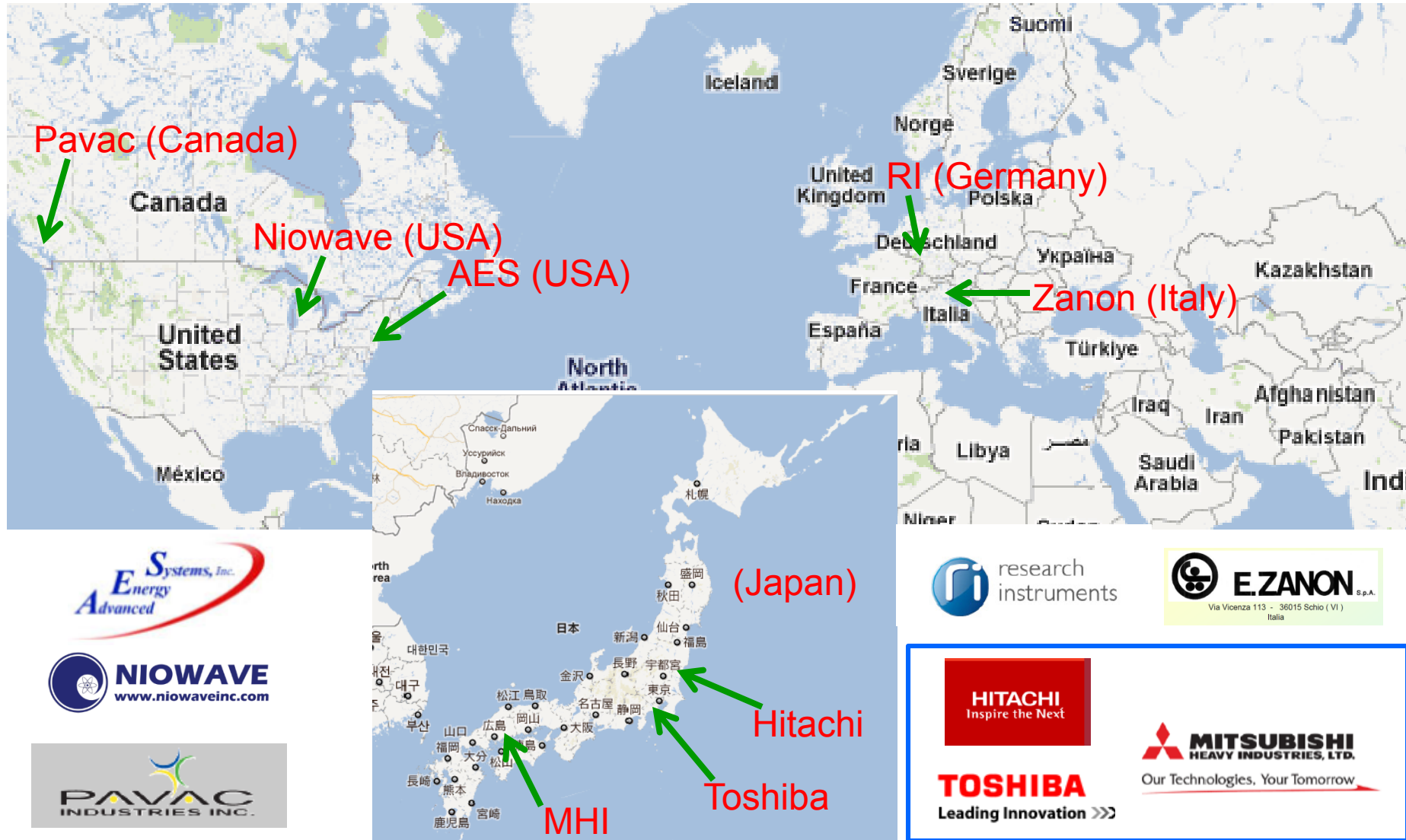
# はじめに(8)： 高純度ニオブ材料



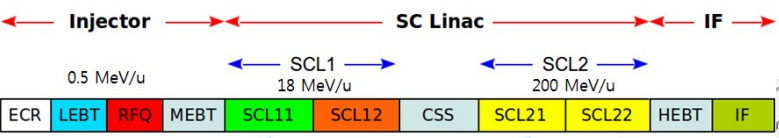
## Suppliers of high purity Nb in the world



# はじめに(9)： 世界中の超伝導空洞製造元



# はじめに(10): 日本(韓国)の超伝導加速器建設

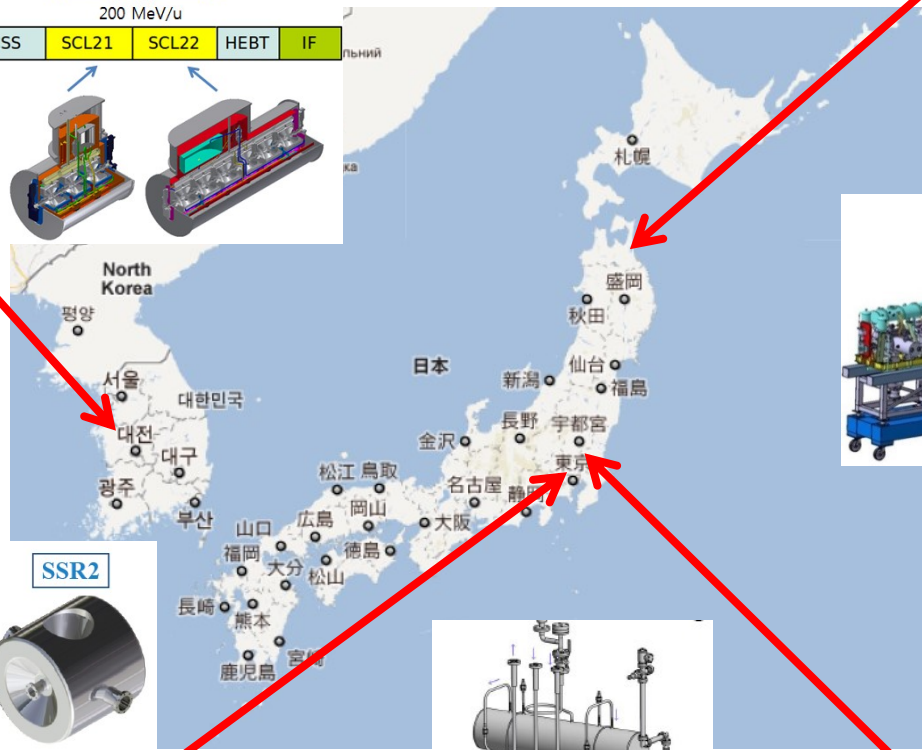
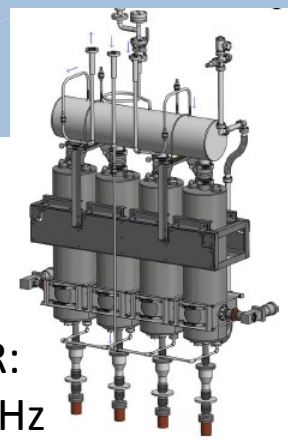


IBS/Daejeon  
RISP-RAON  
重イオン加速器

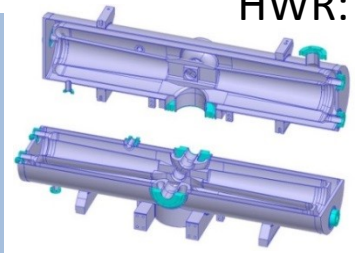
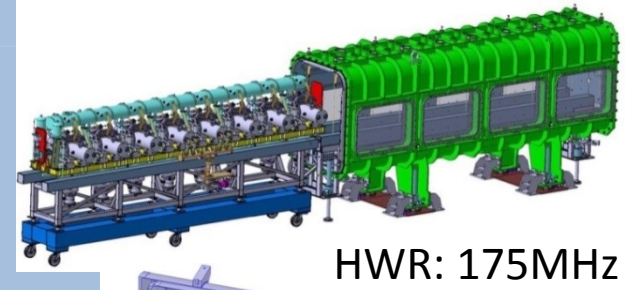


RIKEN/Wako  
SC-Linac  
重イオン加速器

QWR:  
73MHz



JAEA/Rokkasho  
IFMIF  
重水素加速器



KEK/Tsukuba  
KEKB, STF, cERL  
電子加速器  
(Low-β cavity)

# はじめに(11): 超伝導空洞にとって、

- 超伝導、極低温、高周波、超高真空、表面物性、、、  
→ 広範囲におよぶ知識と総合的な技術
- 加速装置 → 超伝導空洞 + 周辺機器
- 安定な運転 → 信頼性の高い、維持・管理の  
しやすい超伝導空洞システムの構築

# はじめに(12): 現場を支える若手人材の育成





# 超伝導空洞技術－1

- はじめに
- **まずは基本から**
- ずっと昔のことから
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- まとめ

# 超伝導空洞の基本(1): RFパラメーター

## Summary of cavity RF parameters;

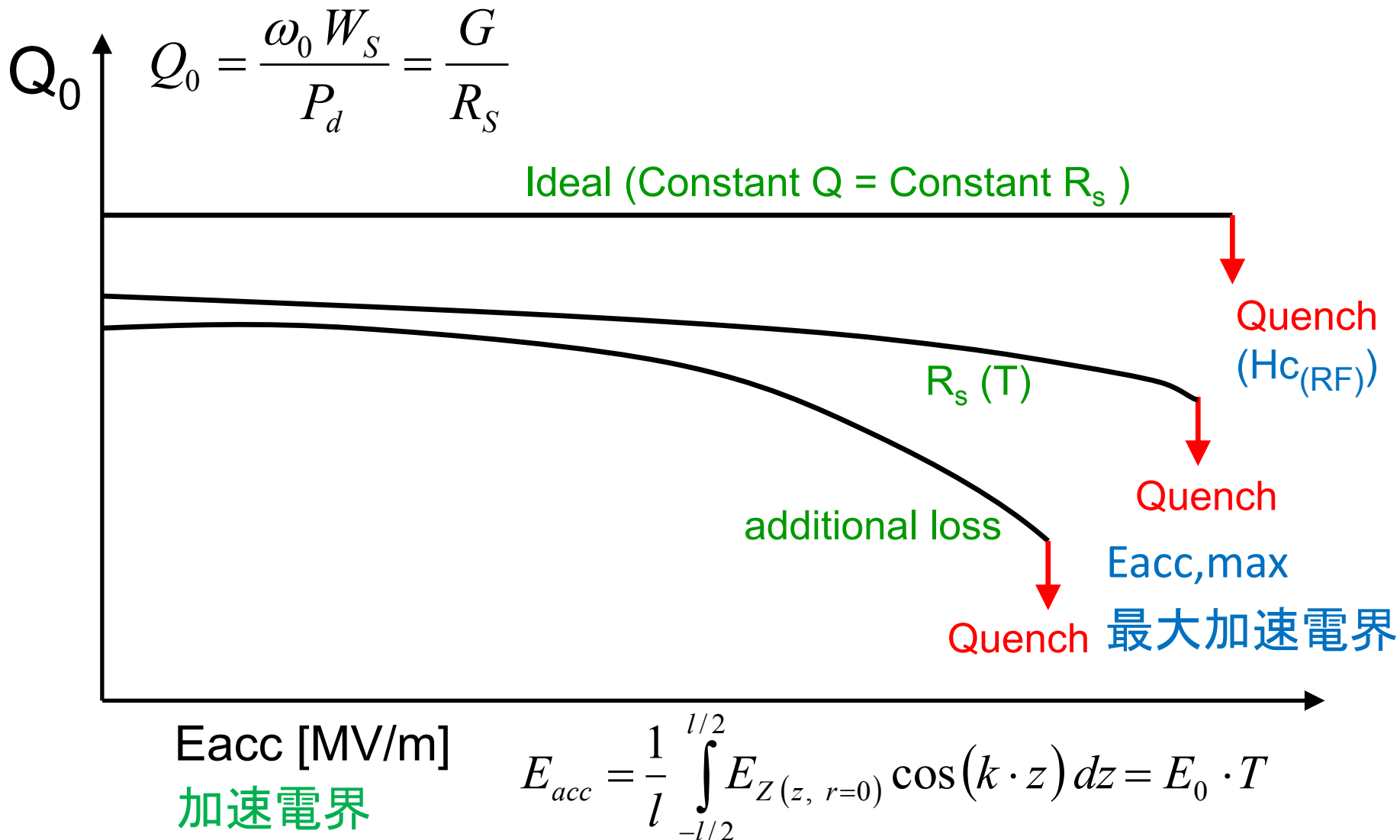
$$E_{acc} = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} E_Z(z, r=0) \cos(k \cdot z) dz = E_0 \cdot T$$

$$P_d = \frac{R_s}{2} \int^A |\vec{H}|^2 dA, \quad W_s = \frac{\mu_0}{2} \int^V |\vec{H}|^2 dV = \frac{\epsilon_0}{2} \int^V |\vec{E}|^2 dV$$

$$Q = \frac{\omega_0 W_s}{P_d} = \frac{G}{R_s}, \quad G = \omega_0 \mu_0 \frac{\int^V |\vec{H}|^2 dV}{\int^A |\vec{H}|^2 dA}$$

$$R_{sh} = \frac{V_{acc}^2}{P_d} = \frac{E_{acc}^2}{P_d} L_{cavity}^2, \quad \left( \frac{R}{Q} \right) = \frac{E_{acc}^2}{\omega W_s} L_{cavity}^2$$

# 超伝導空洞の基本(2): $Q_0 - E_{acc}$ 曲線



# 超伝導空洞の基本(3)：高周波表面抵抗( $R_s$ )

## Normal-conducting Cavity ;

- Surface resistance;  $R_s$  [ $\Omega$ ]

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \sigma}} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad [\Omega]$$

$$f = 1.3 \text{ GHz}, \quad G = 270 \Omega$$

$$\text{Cu (20}^\circ\text{C)} ; \quad \sigma = 0.58 \times 10^8 \text{ [1/}\Omega\text{m]}$$

$$R_s = 9.4 \text{ m}\Omega, \quad (\delta = 1.8 \mu\text{m})$$

$$Q = G / R_s = 2.9 \times 10^4$$

## Superconducting Cavity ;

- Surface resistance;  $R_s$  [ $\Omega$ ]

$$R_s = R_{BCS(T)} + R_{res}$$

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B \cdot T}\right)$$

$$f = 1.3 \text{ GHz}, \quad G = 270 \Omega$$

$$\text{Nb (2K)} ; \quad R_{BCS(2K)} = 7 \text{ n}\Omega, \quad R_{res} = 10 \text{ n}\Omega$$

$$R_s = 17 \text{ n}\Omega, \quad (\lambda_0 = 44 \text{ nm})$$

$$Q = G / R_s = 1.6 \times 10^{10}$$

$R_{BCS}$  : BCS resistance

$R_{res}$  : Residual surface resistance

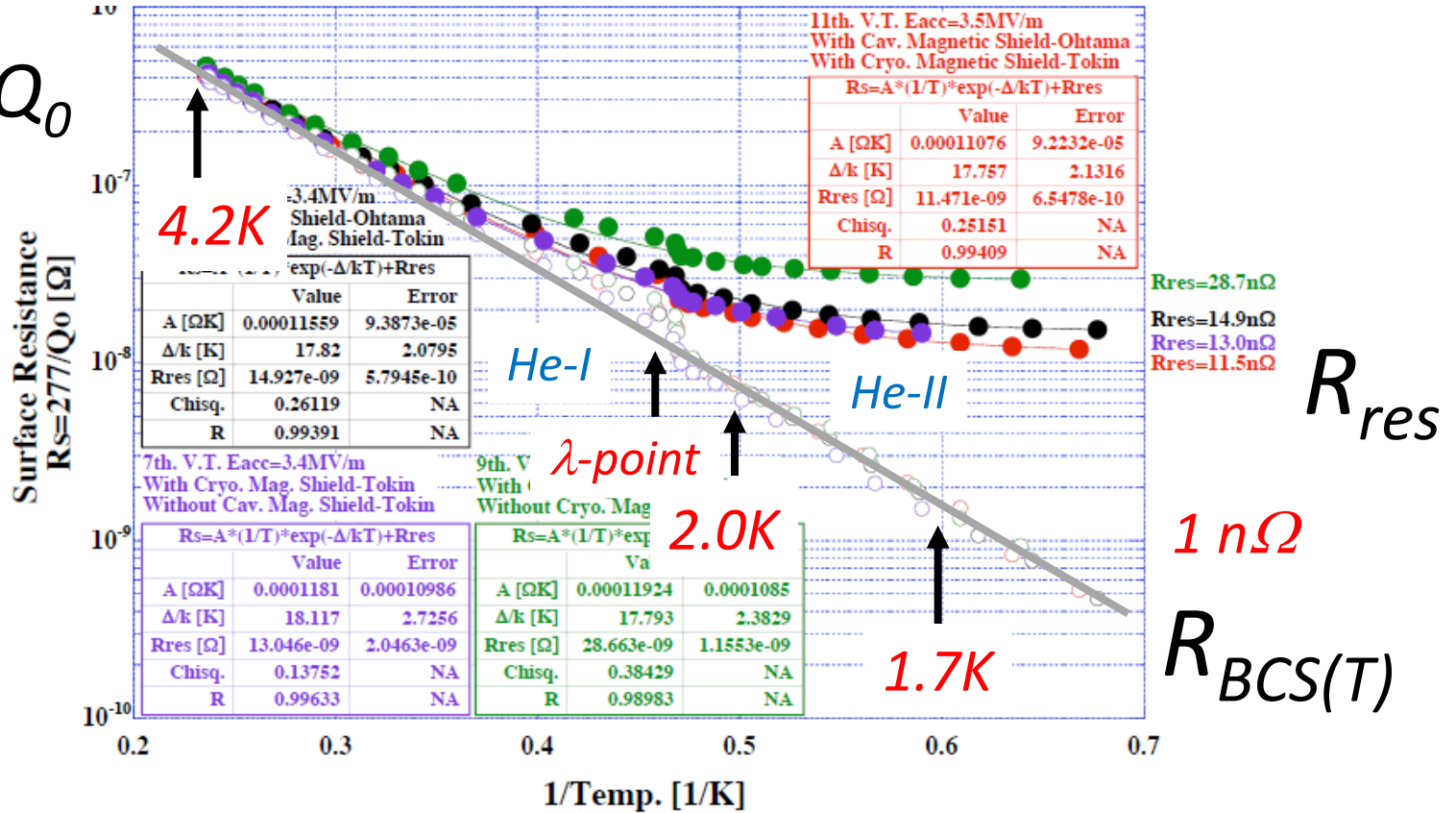
$k_B$  : Boltzmann constant

$\Delta$  : Gap energy of Cooper pair

# 超伝導空洞の基本(4): $R_s$ の温度依存性

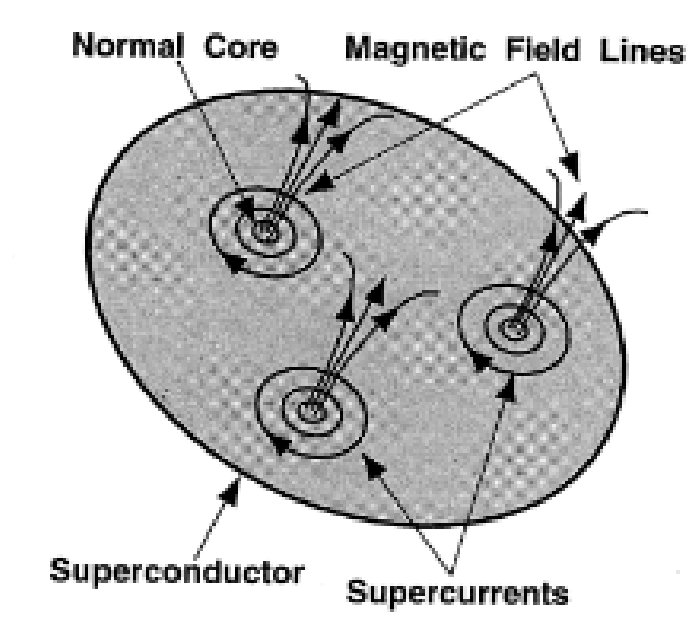
## Superconducting Cavity

$$R_s = G/Q_0$$



$$R_S = R_{BCS}(T) + R_{res}, \quad R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B \cdot T}\right)$$

# 超伝導空洞の基本(5): 残留磁界の影響



磁気シールドによる  
残留磁場の遮蔽効果  
を調べる実験

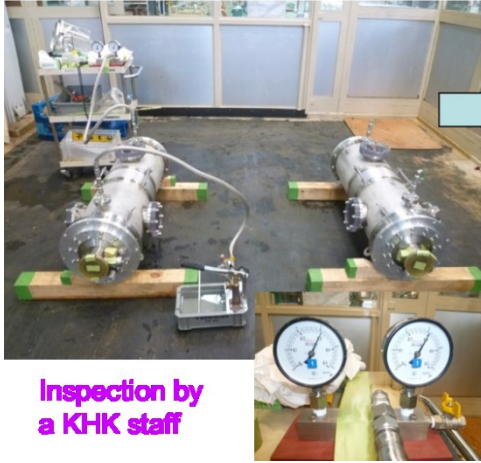
*(0.3 nΩ / mGauss)*

この感度は、ニオブの  
表面状態に大きく依存する。

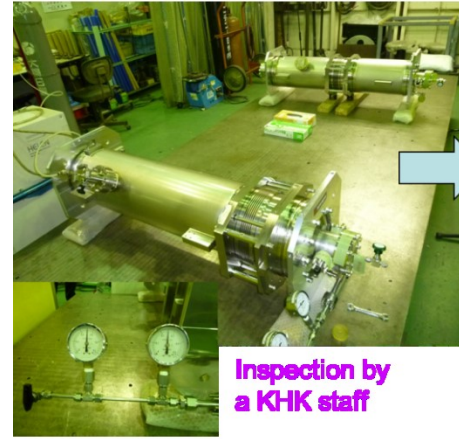
残留磁界は、ニオブ空洞が超伝導状態に転移するとき、その芯が常伝導の磁束量子としてトラップされるため、残留表面抵抗の主な原因のひとつとなる。

# 超伝導空洞の基本(6)： 高压ガス対応

**Nb Cavity**  
at 1.5 times of design pressure  
(test with water : 0.3 MPa)



**Cavity unit with Jacket**  
at 1.25 times of design pressure  
(test with He gas : 0.25 MPa)



## ニオブ材料の機械強度：(高压ガス保安法)

純ニオブ材の引張強さ

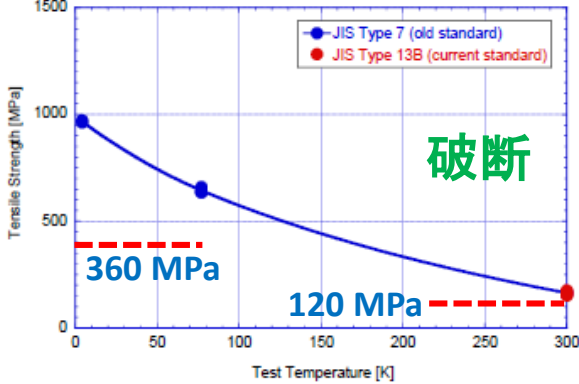


Fig. (5)a Tensile strength of Nb.

純ニオブ材の0.2%耐力

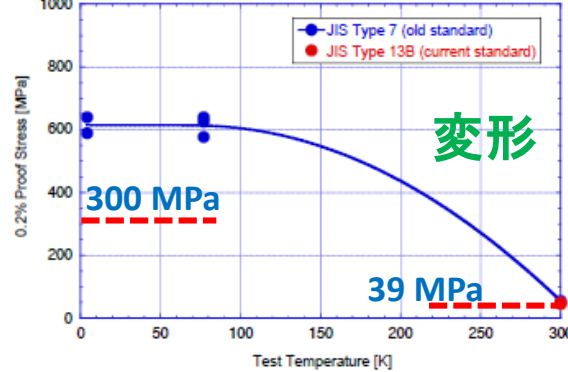


Fig. (5)b 0.2% proof stress of Nb.

純ニオブ材のシャルピー衝撃試験

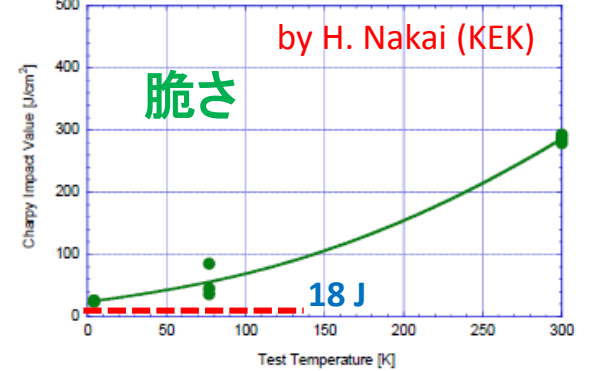


Fig. 5(b) Charpy impact value of Nb (10 mm wide).

# 超伝導空洞の基本(7): 関連する技術・知識

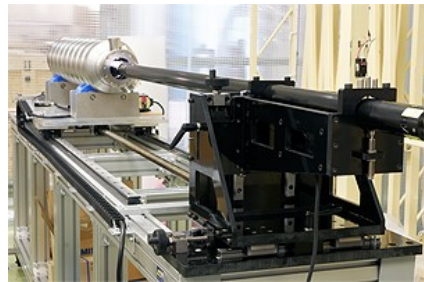
- ニオブ材料 (Fine-grain, Large-grain)
- 成形技術 (液圧、深絞り、スピニング)
- 接合技術 (EBW, TIG, LBW, Brazing, ....)
- 表面処理技術 (化学研磨、電解研磨、....)
- 水洗・清浄化技術 (超純水、高圧水洗、....)
- クリーンルーム環境
- 組立技術



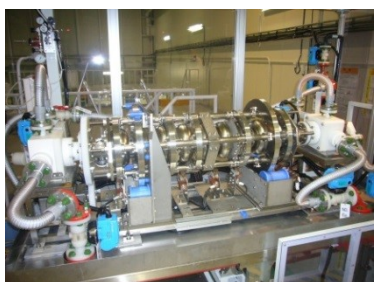
# 超伝導空洞の基本(8): 関連する技術・知識

- ニオブ材料 (Fine-grain, Large-grain)
- 成形技術 (液圧、深絞り、スピニング)
- 接合技術 (EBW, TIG, LBW, Brazing, ....)
- 表面処理技術 (化学研磨、電解研磨、....)
- 水洗・清浄化技術 (超純水、高圧水洗、....)
- クリーンルーム環境
- 組立技術 期待されているかもしれませんが、本日の話題として、深入りしません。

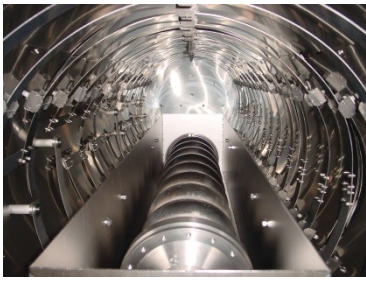
# 超伝導空洞の基本(9): 現在確立している処理工程



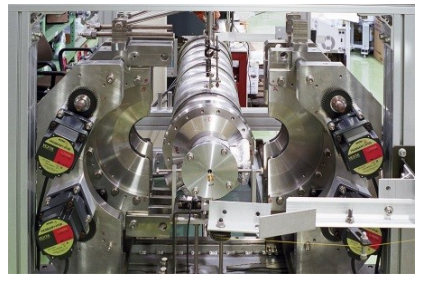
Inspection of inner surface



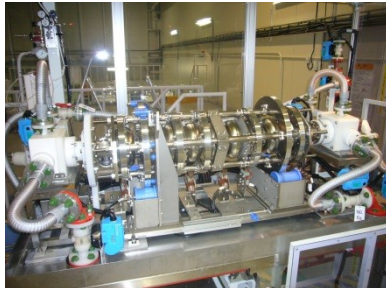
Pre-EP + EP-I (5+100 μm)



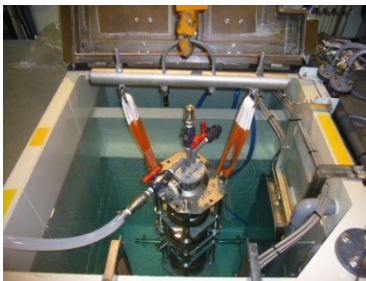
Anneal (750°C, 3h)



Pre-tuning (flatness,  $f_0$ )



EP-II (5~20 μm)



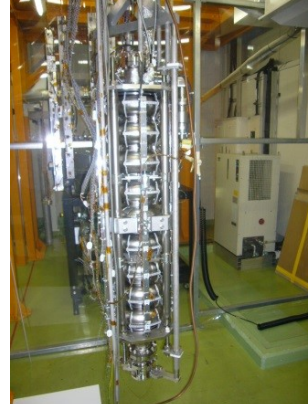
Hot bath rinsing by ultra-sonic agitation with ultra-pure water



HPR

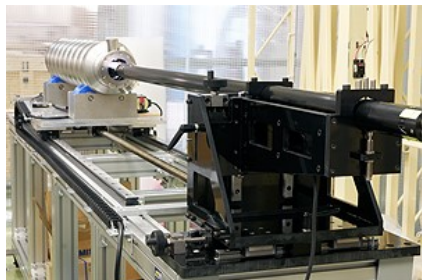


Assembly (Class 10) Baking (120°C, 48h) Hanging stand with T-map (Class 1000)

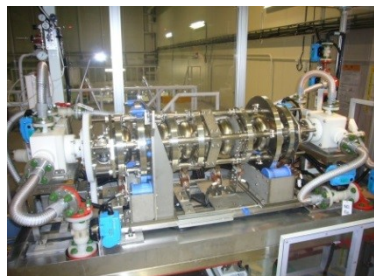


Vertical Test

# 超伝導空洞の基本(10): 80年代には、



Inspection of inner surface



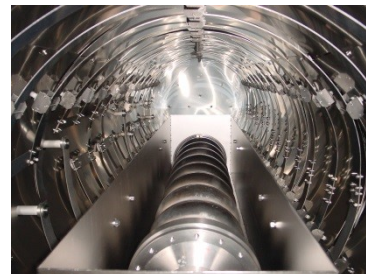
Pre-EP + EP-I (5+100 μm)

EP-II

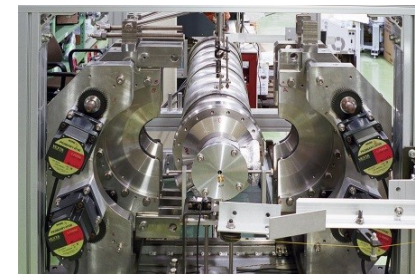
(5~20 μm)

## 電界放出電子の抑制

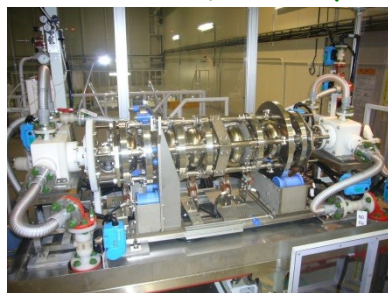
- 超純水洗浄
- クリーンルーム組立



Anneal (750°C, 3h)



Pre-tuning (flatness,  $f_0$ )



Hot bath rinsing by ultra-sonic agitation with ultra-pure water



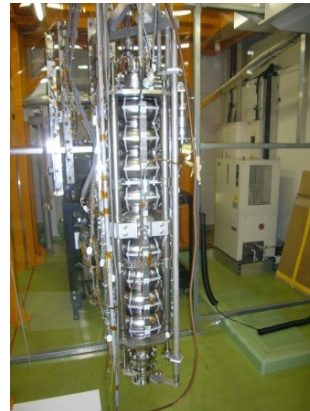
HPR



Assembly (Class 10)



Baking (120°C, 48h)



(Class 1000)

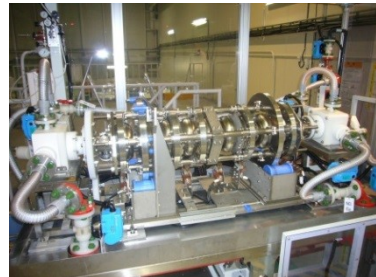


Vertical Test

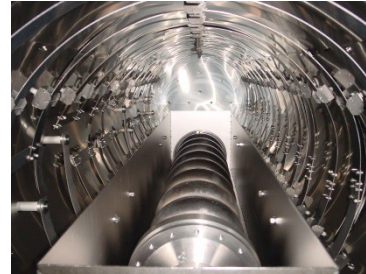
# 超伝導空洞の基本(11): 特に不可欠な処理



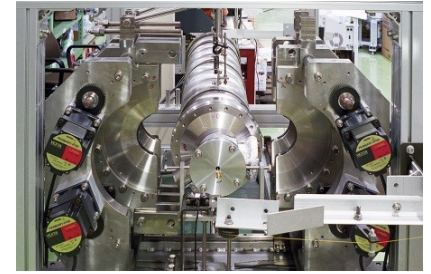
Inspection of inner surface



Pre-EP + EP-I (5+100  $\mu\text{m}$ )

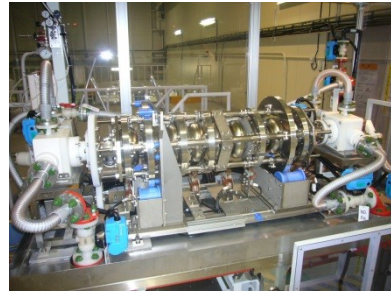


Anneal (750°C, 3h)



Pre-tuning (flatness,  $f_0$ )

EP II (5~20  $\mu\text{m}$ )



Hot bath rinsing by ultra-sonic agitation with ultra-pure water



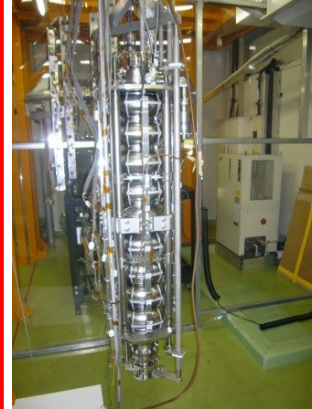
HPR



Assembly (Class 10)



Baking (120°C, 48h) (Class 1000)



Hanging stand with T-map



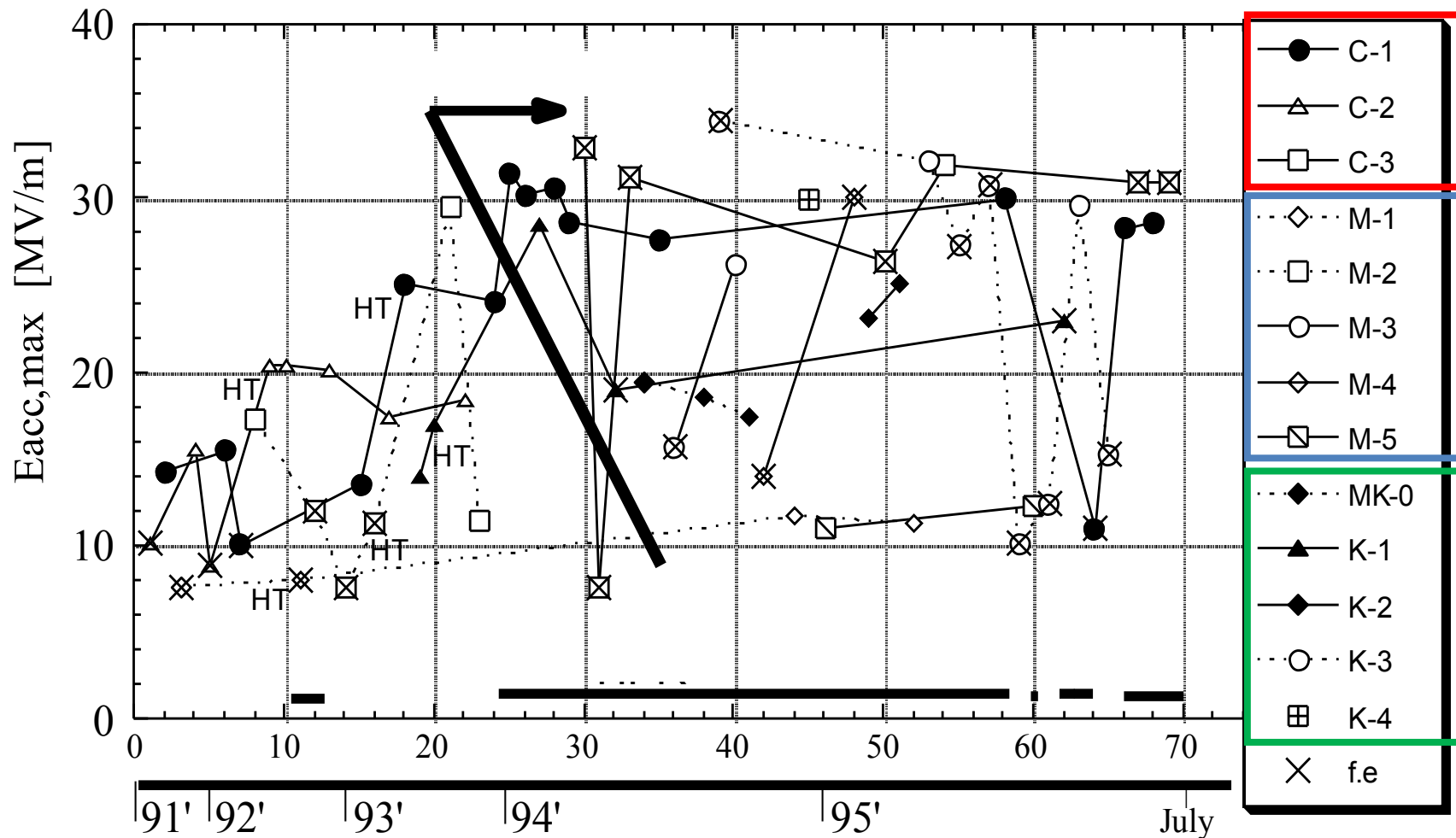
Vertical Test

# 超伝導空洞技術－1

- はじめに
- まずは基本から
- **ずっと昔のことから**
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- まとめ

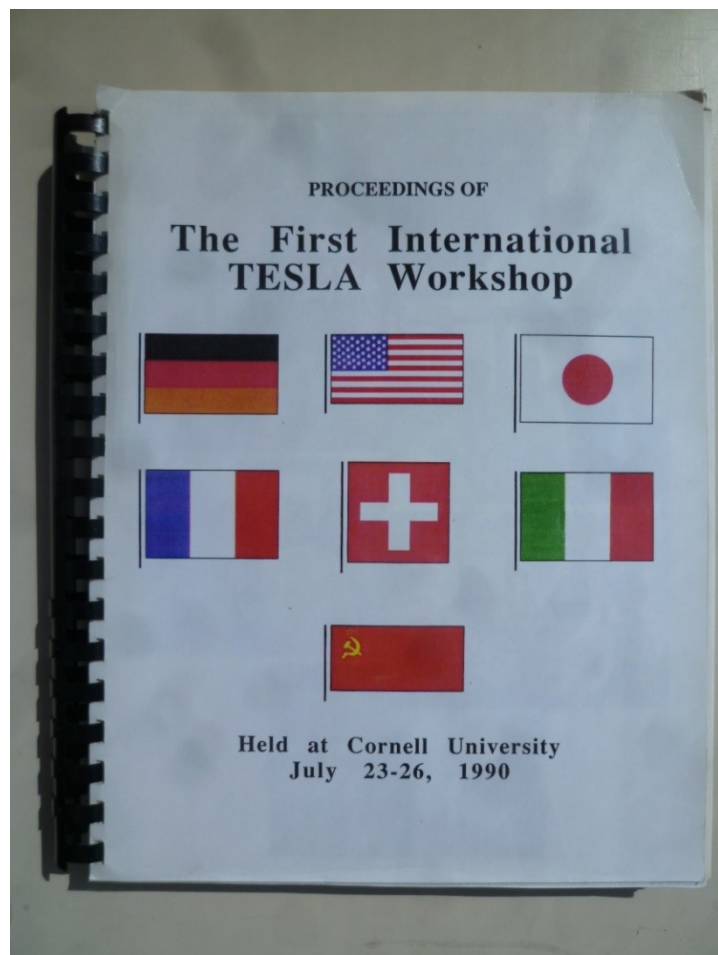
# ずっと昔のことから： 25年前

## 最大加速電界



1.3GHz-単セル空洞13台について70回の測定結果

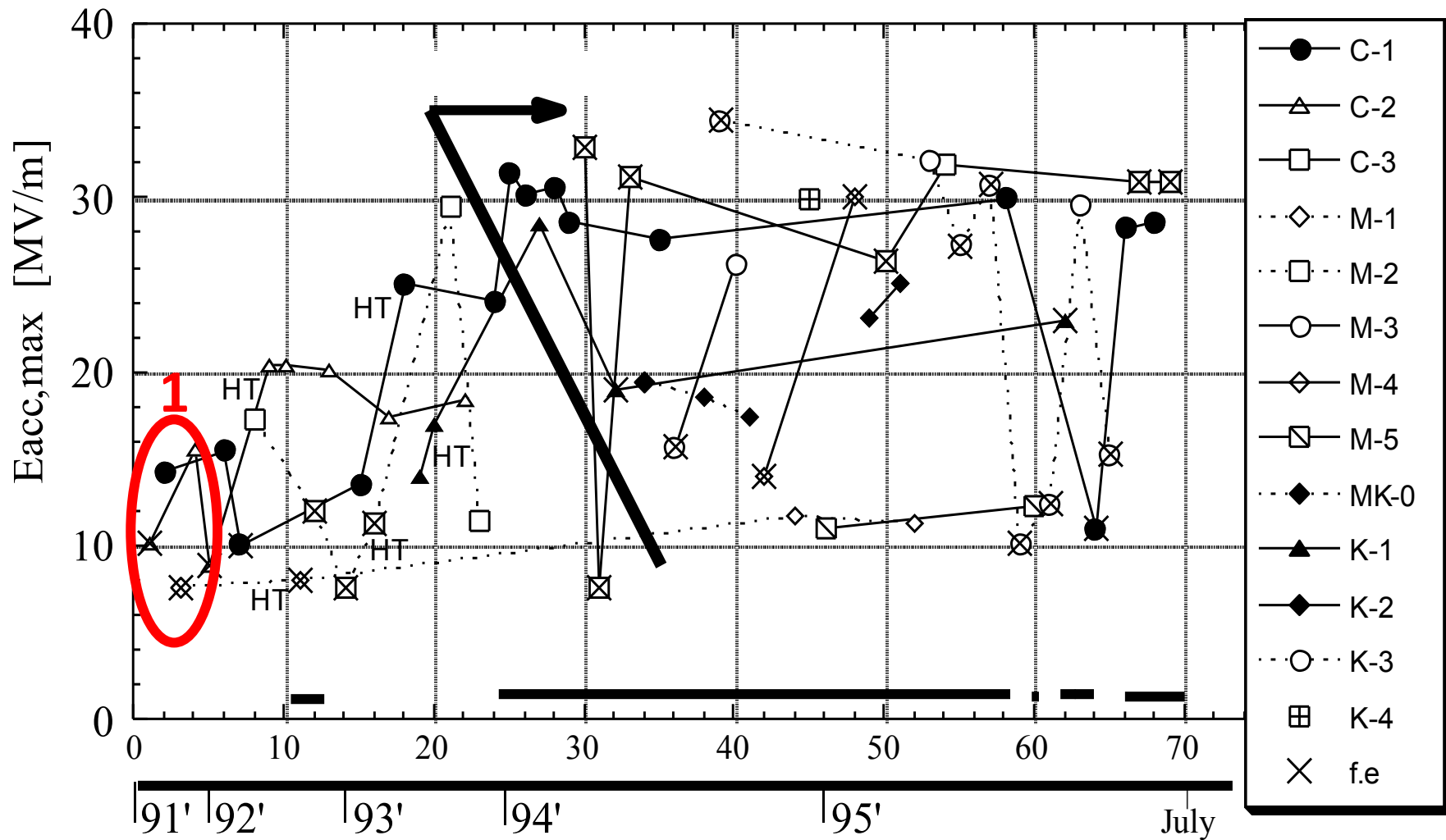
# KEKでの1.3GHz-単セル空洞についての研究



1990' July 23-26, Cornell Univ.

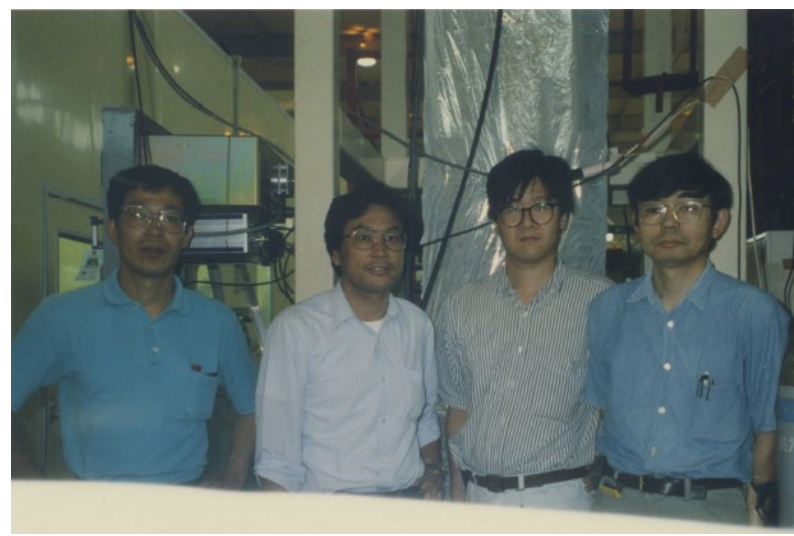
[TESLA : TeV Energy Superconducting Linear Accelerator]

# ずっと昔のことから (1)





# 1.3GHz-単セル空洞(1-1): 空洞製作

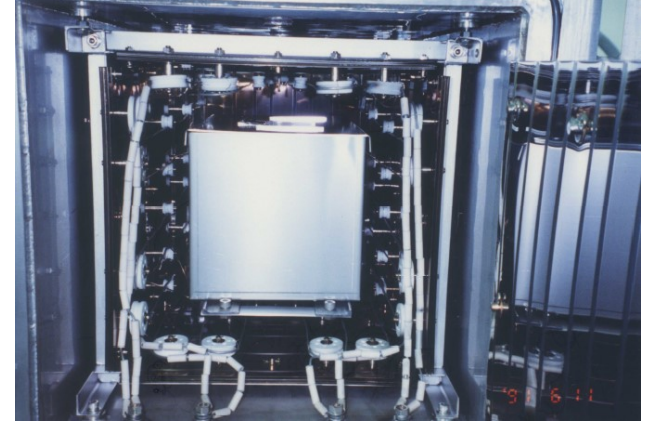


# 1.3GHz-単セル空洞(1-2): 表面処理装置

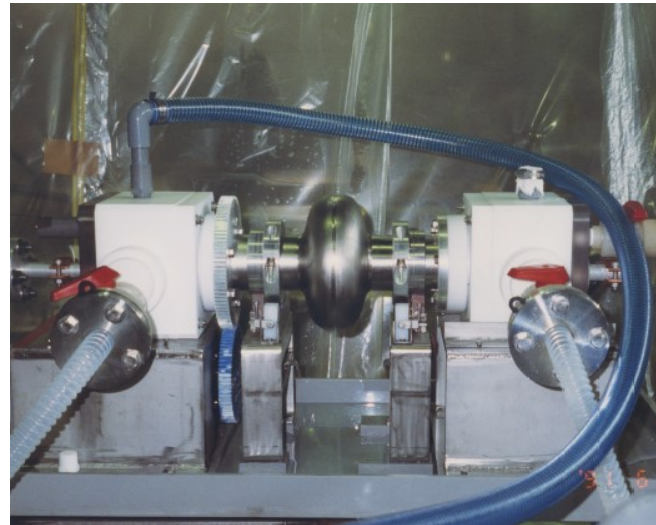


VT set-up

CP



Vacuum Furnace



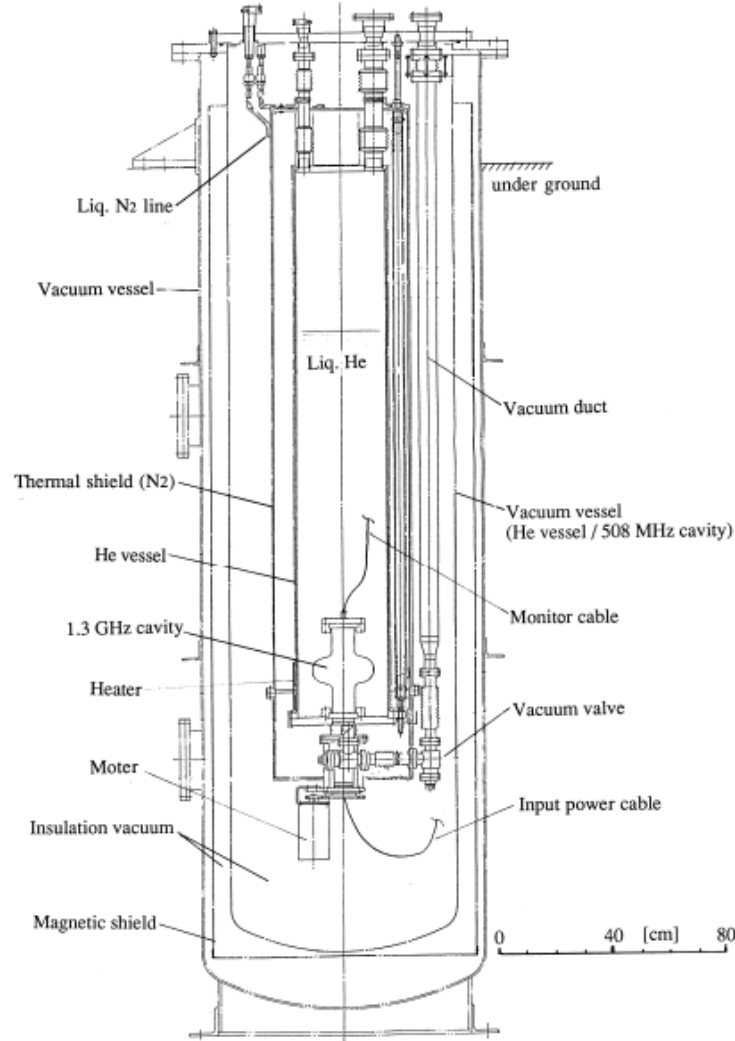
EP



HPR

**NOMURA PLATING**  
株式会社野村鍍金

# 1.3GHz-単セル空洞(1-3): たて型クライオスタット



トリスタン用クライオスタットの内部に設置



Vertical Cryostat

# 1.3GHz-単セル空洞(1-4): たて測定の結果

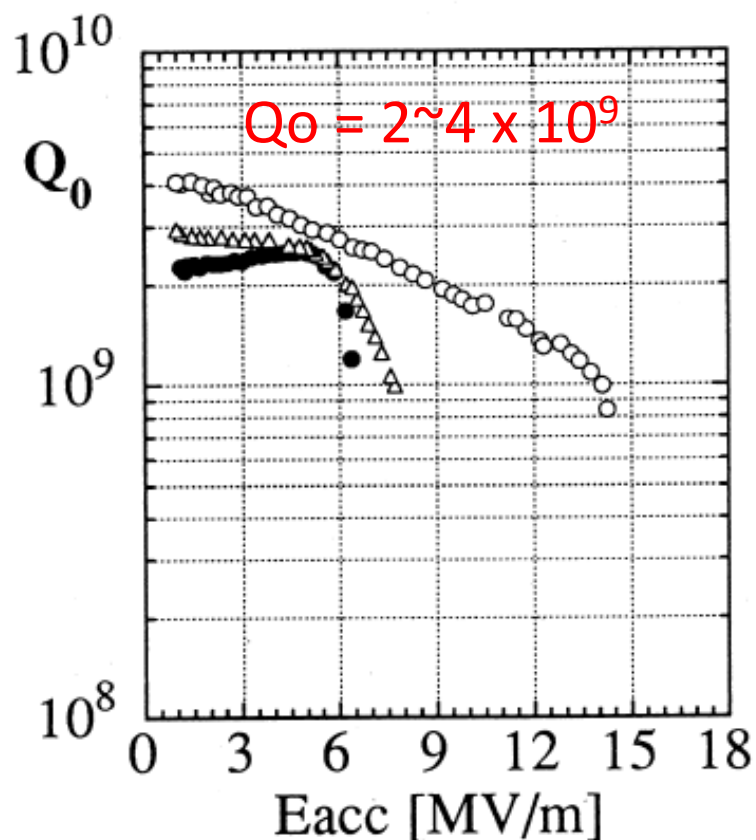


Fig. 6  $Q_0$  -  $E_{acc}$  plots for three niobium cavities measured at 2.1K.  
[ o ; C.P- CEBAF/KEK, ● ; E.P- CEBAF/KEK, Δ ; E.P- IHM/KEK ]

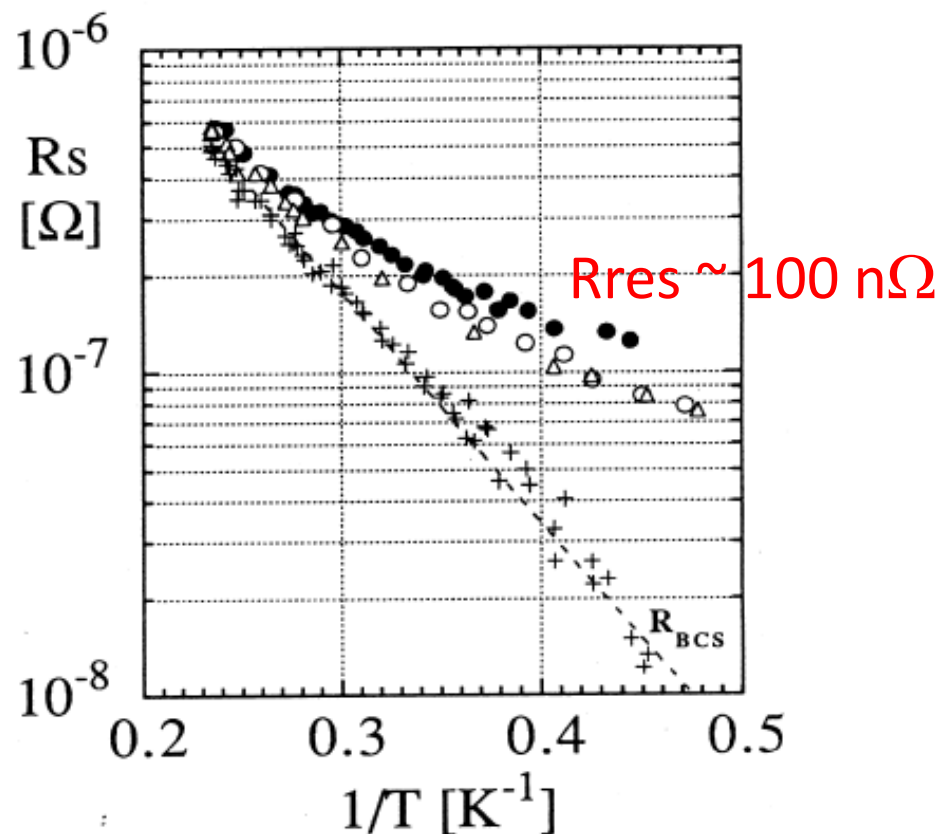


Fig. 7 Temperature dependence of the rf surface resistance ( $R_s$ ).  
[ o ; C.P- CEBAF/KEK, ● ; E.P- CEBAF/KEK, Δ ; E.P- IHM/KEK ]

# 1.3GHz-単セル空洞(1-5): 残留磁場測定

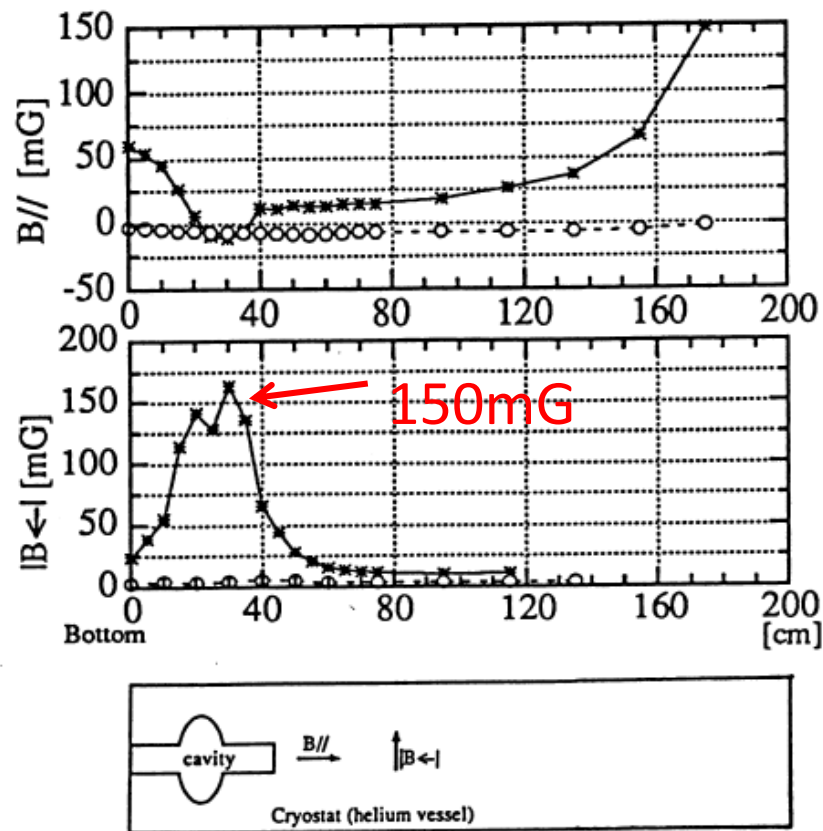
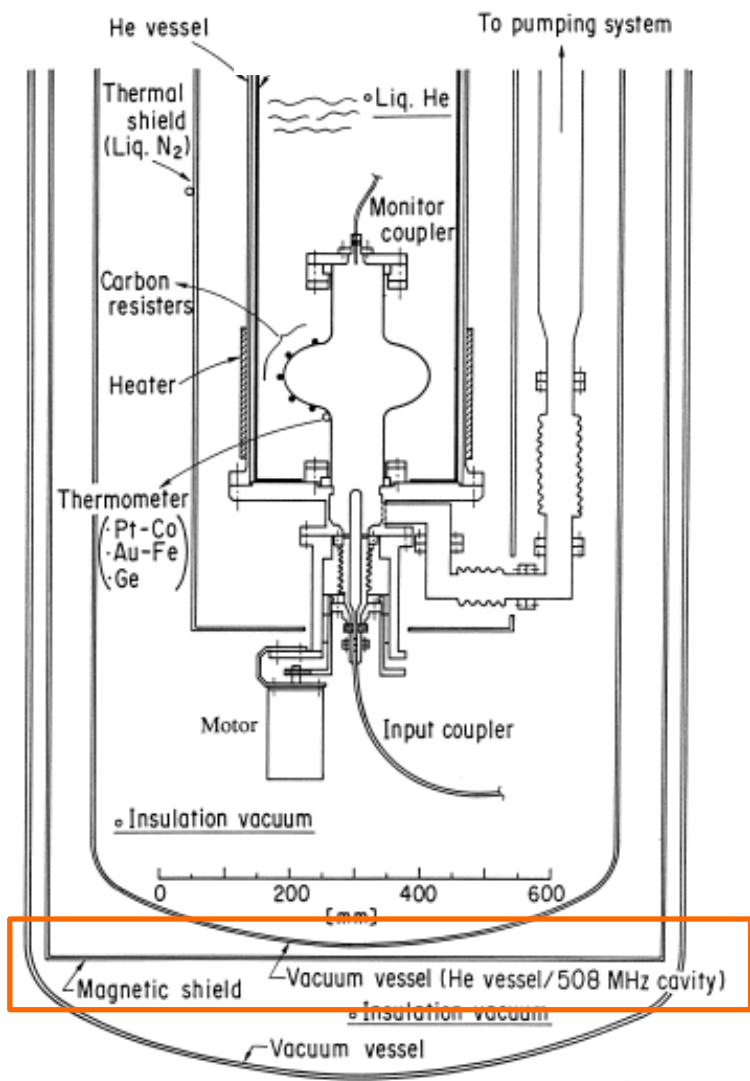
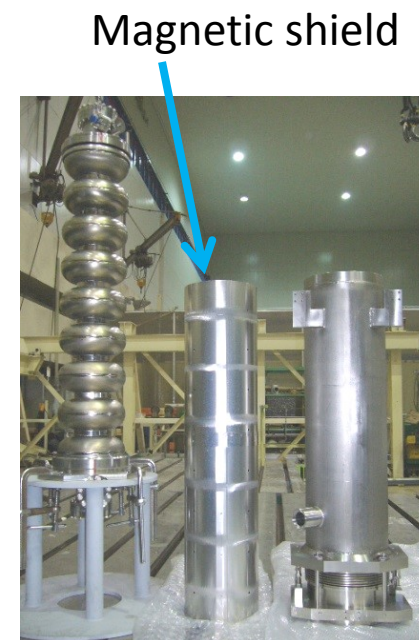
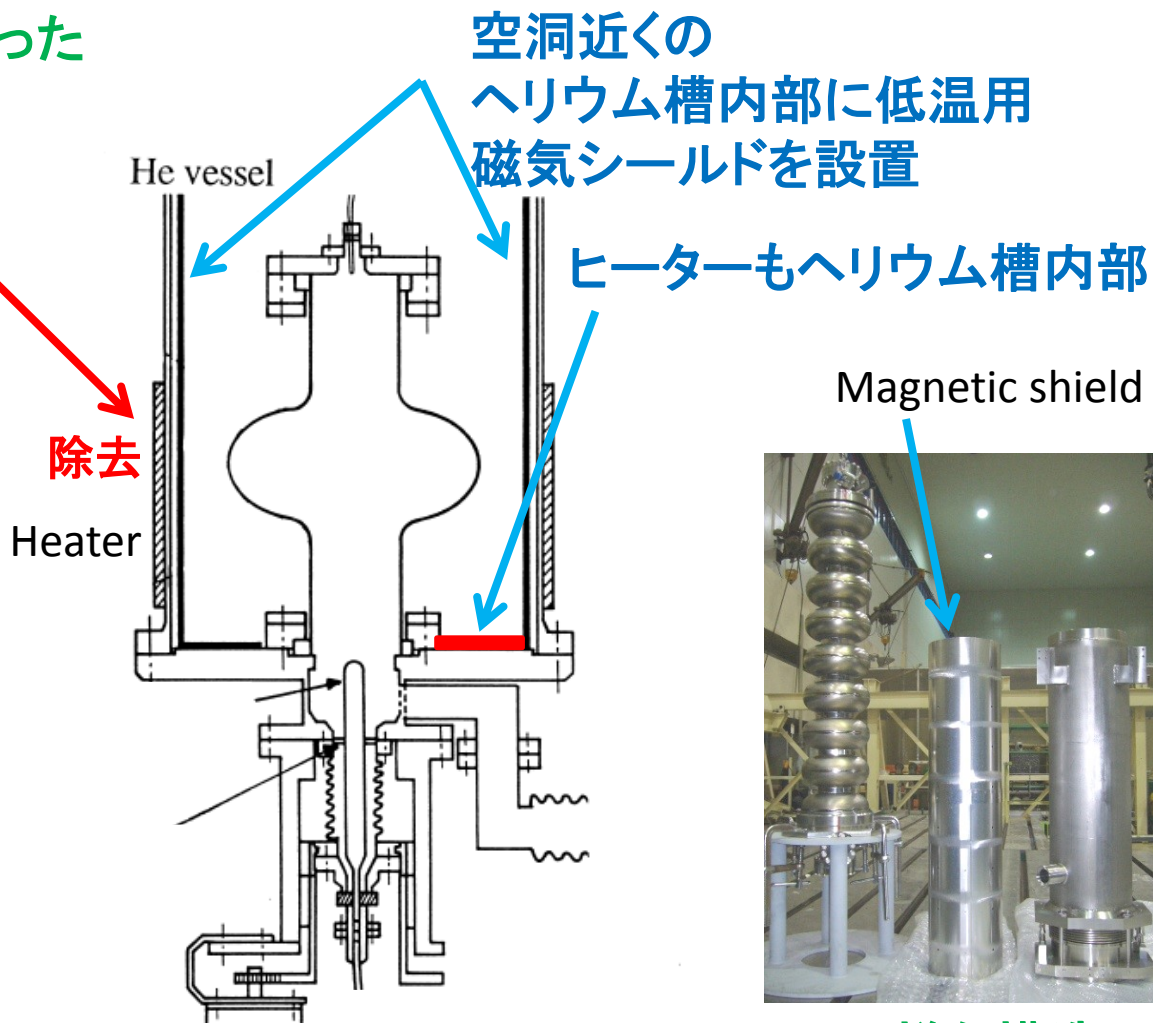
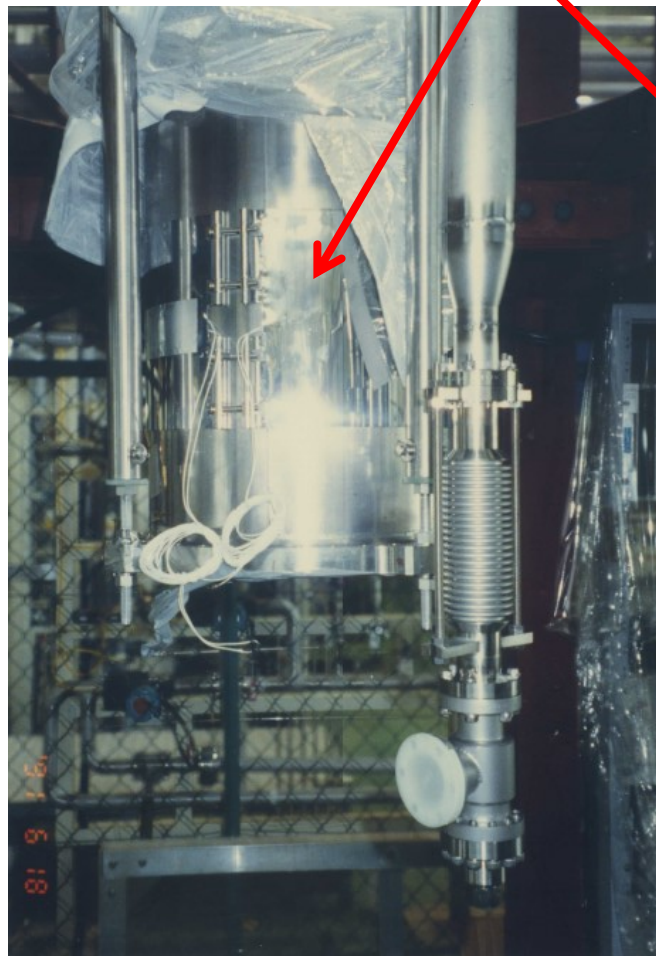


Figure 4. Distribution of the residual magnetic fields inside the helium vessel of the cryostat.  $B//$  and  $|B\leftarrow|$  are the magnetic fields in the direction parallel and perpendicular to the beam axis, respectively. (Initial- [\*]; Improved magnetic shield- [o]).

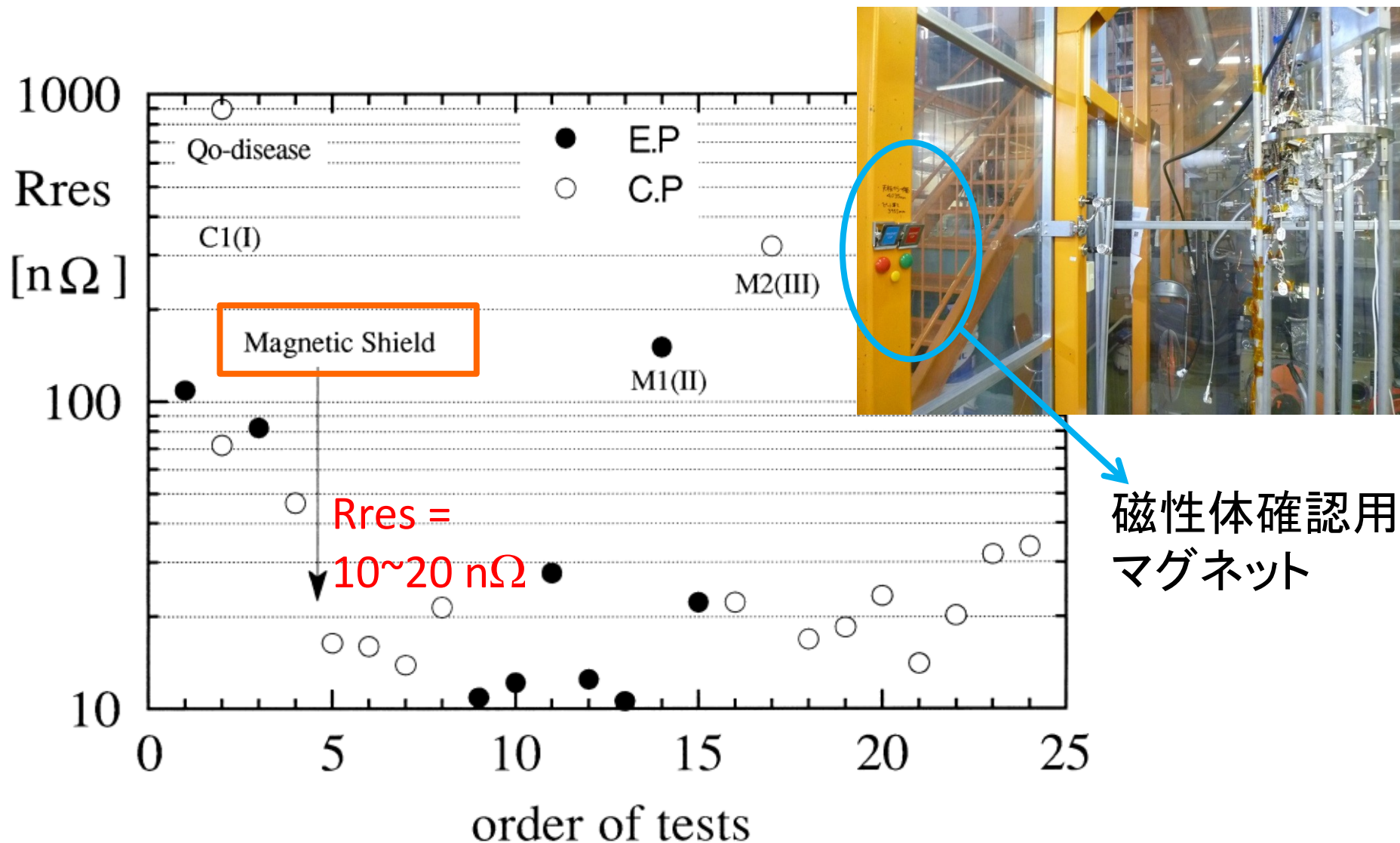
# 1.3GHz-単セル空洞(1-6): 低いQ値の改善策

ステンレスではなく、鉄製だった  
ヒータージャケット

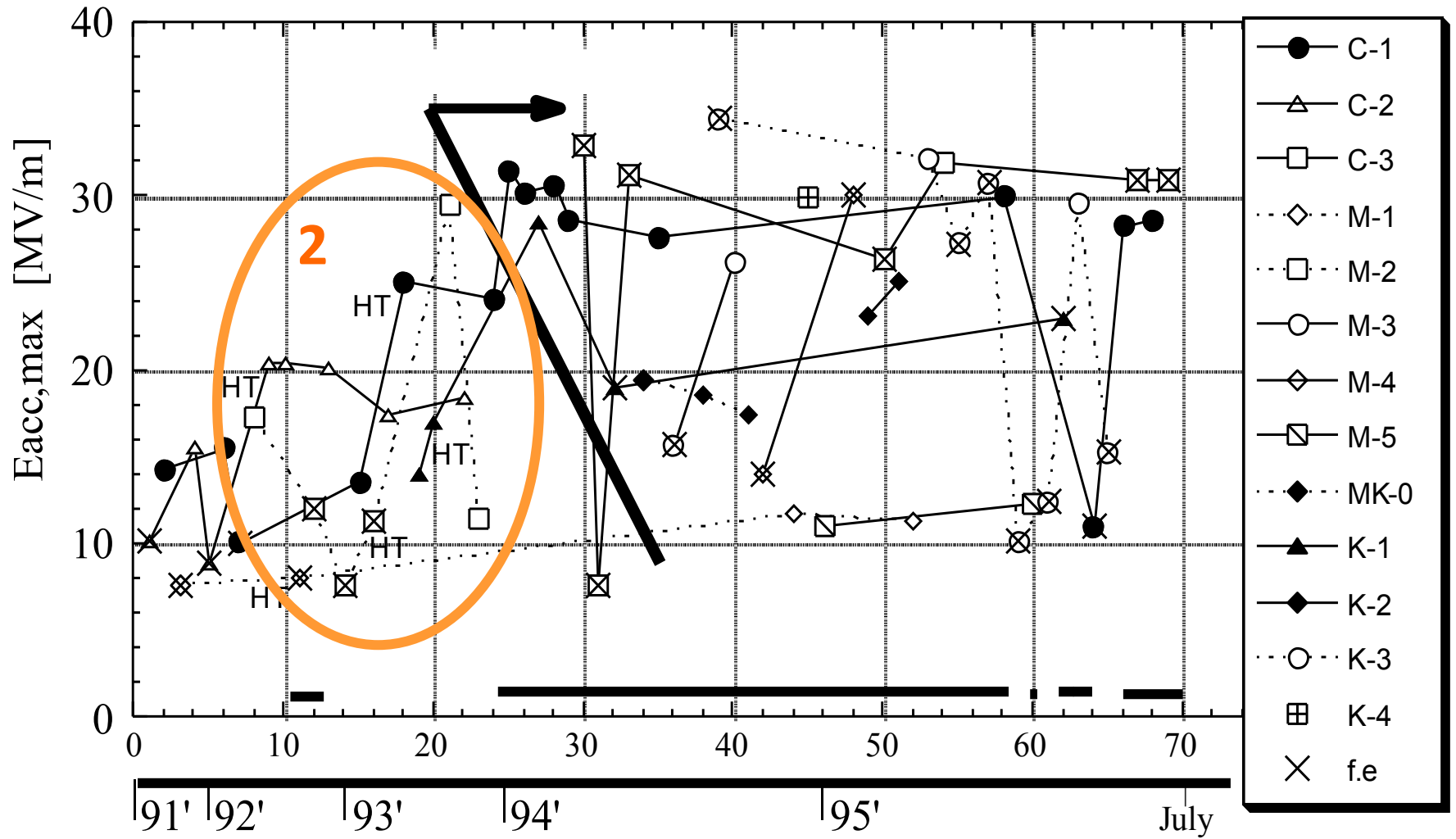


同様な構造は  
STFでも採用

# 1.3GHz-単セル空洞(1-7): 残留抵抗値

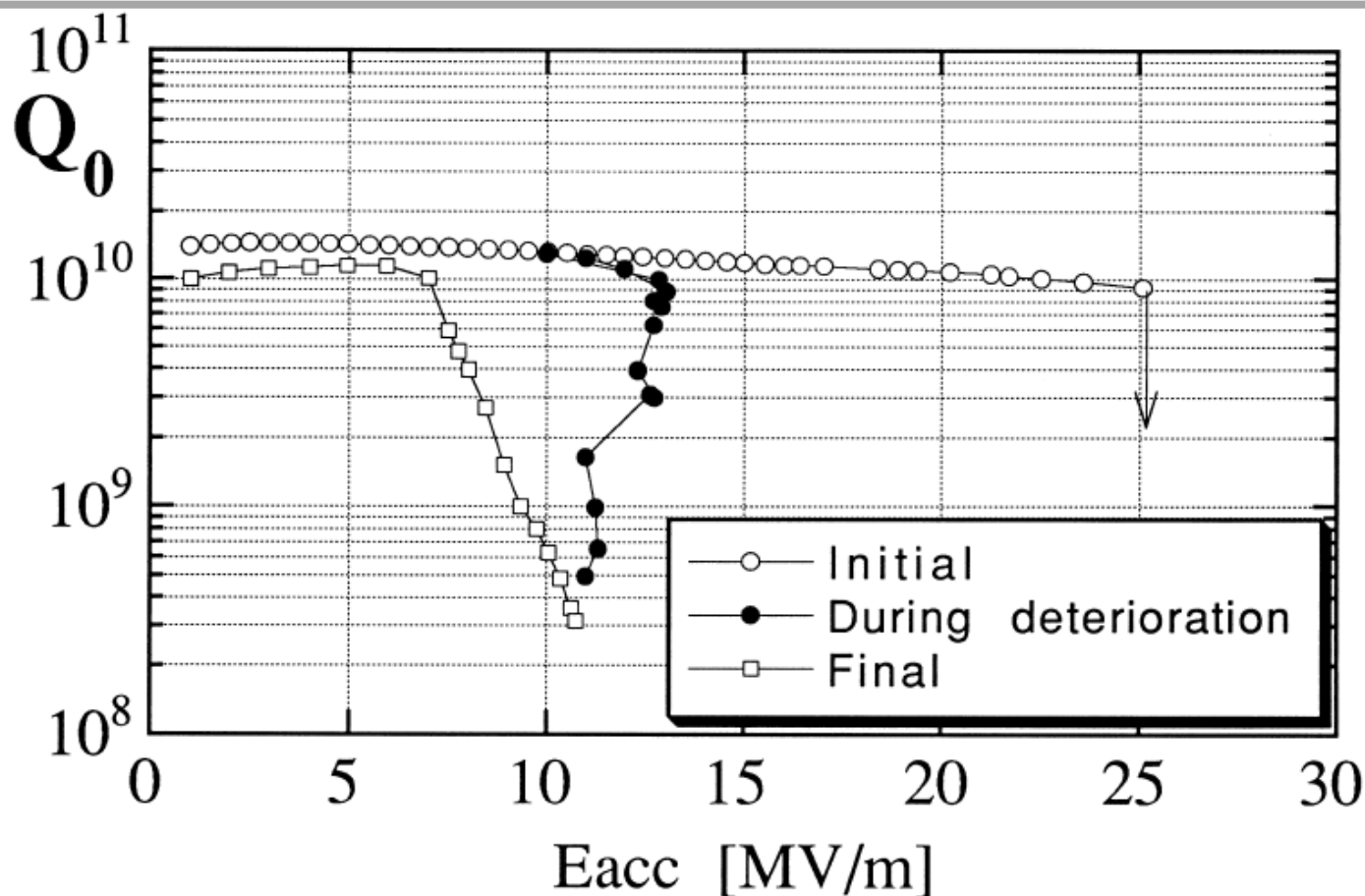


# ずっと昔のことから (2)



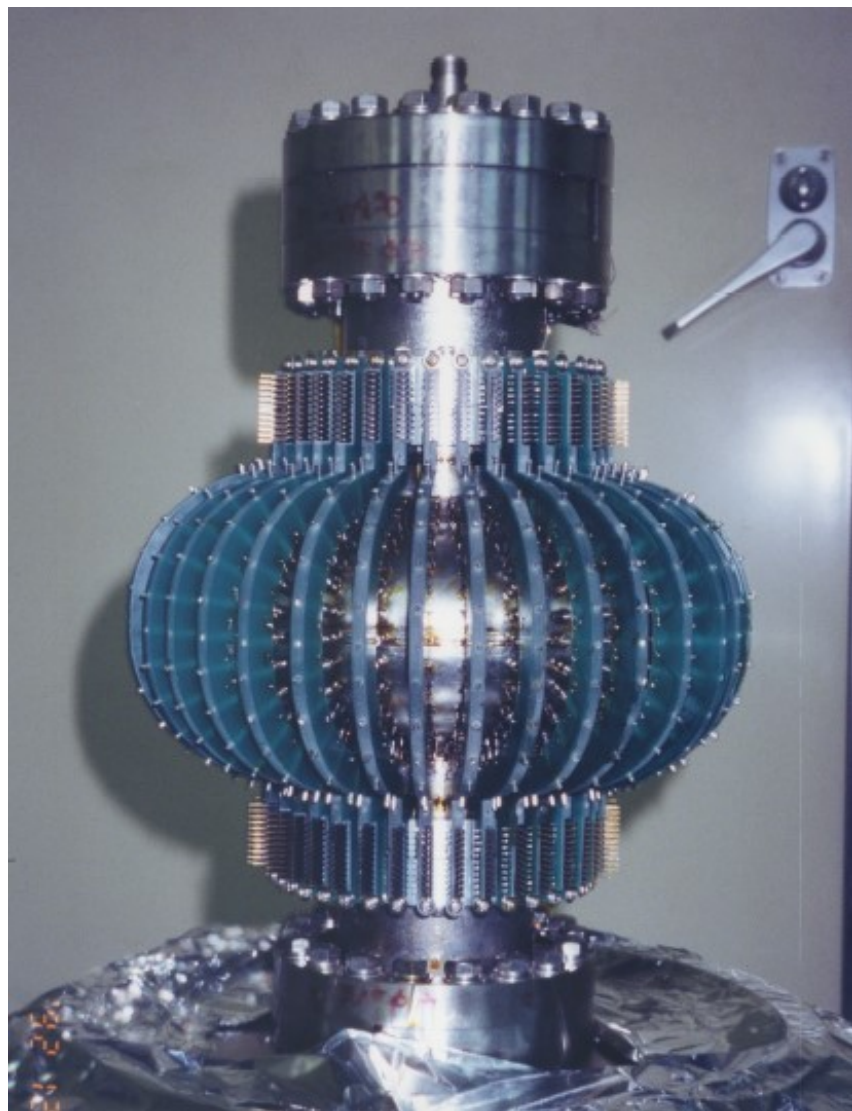


# 1.3GHz-単セル空洞(2-1): Q値の悪化現象

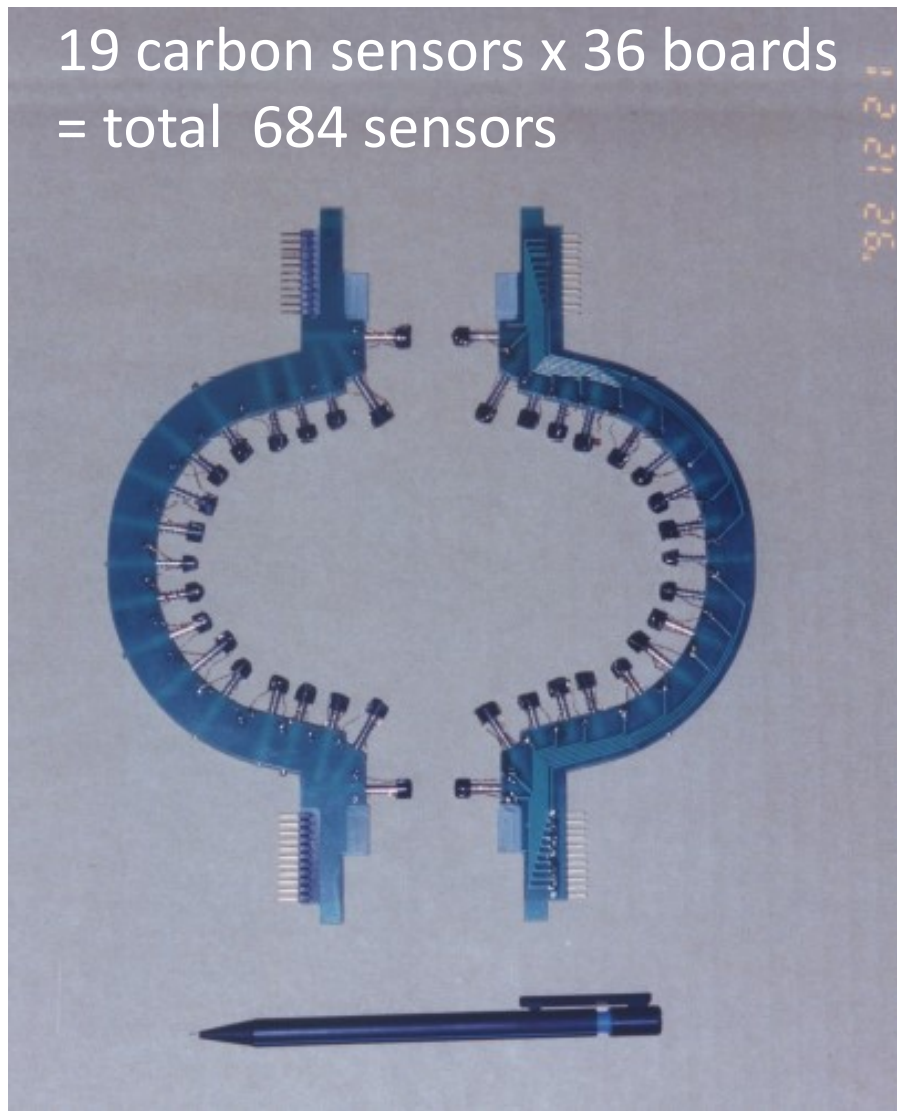


25MV/mに到達後、最初のQuench/Breakdown/Discharge??が発生。  
その後、Q値が段々と悪化して、最終的にはField Emissionで  
空洞性能が低いQ値にて制限される現象が、再現性良く観測される。

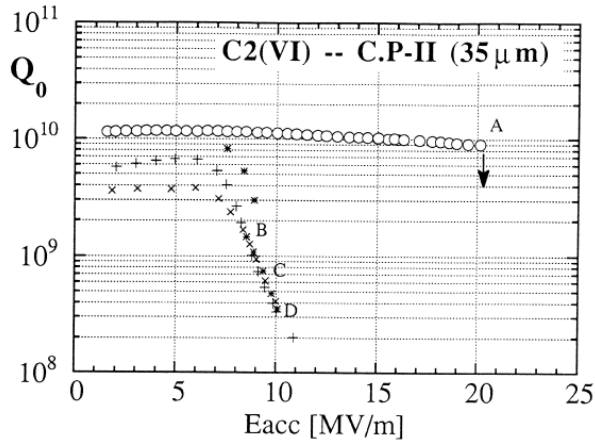
# 1.3GHz-単セル空洞(2-2): 表面温度測定装置



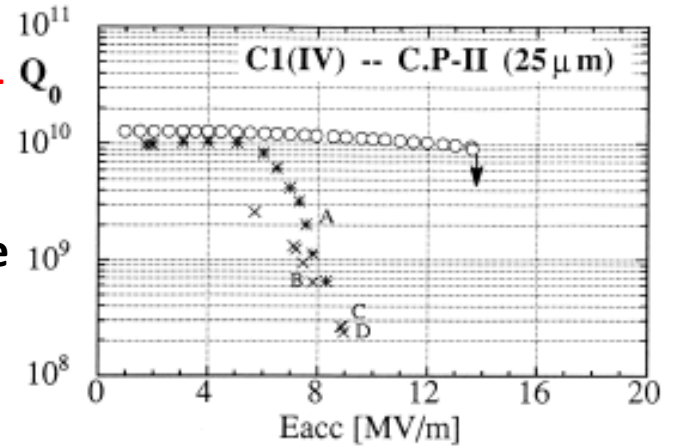
19 carbon sensors x 36 boards  
= total 684 sensors



# 1.3GHz-単セル空洞(2-3): 表面温度測定の結果

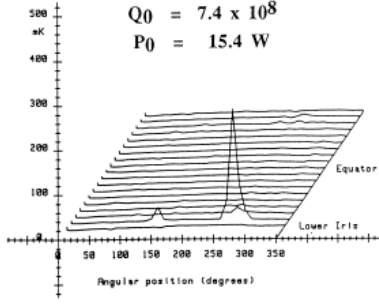
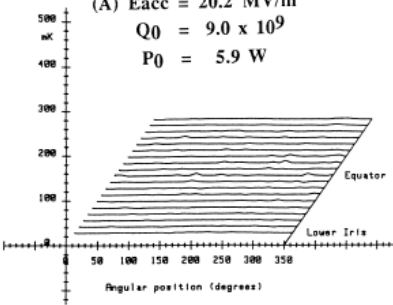


最初の **Quench/Break-down/Discharge??**  
 の後で、数か所の  
 Field EmissionのSource  
 が発生していることが、  
 分かった。



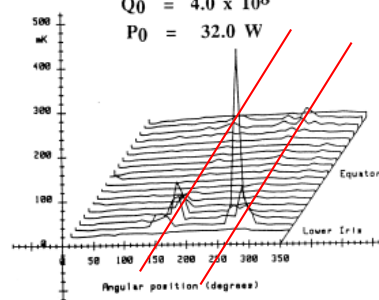
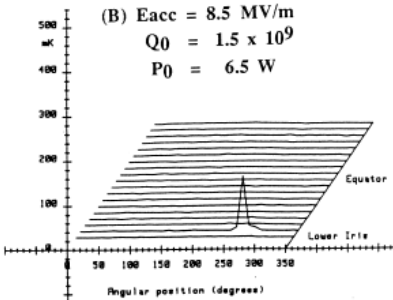
(A) Eacc = 20.2 MV/m  
 $Q_0 = 9.0 \times 10^9$   
 $P_0 = 5.9 \text{ W}$

(C) Eacc = 9.3 MV/m  
 $Q_0 = 7.4 \times 10^8$   
 $P_0 = 15.4 \text{ W}$



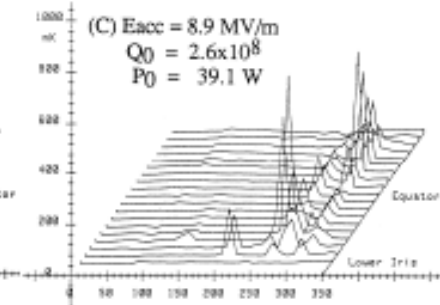
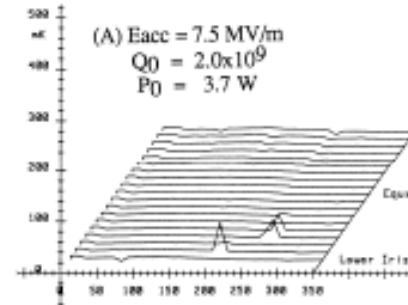
(B) Eacc = 8.5 MV/m  
 $Q_0 = 1.5 \times 10^9$   
 $P_0 = 6.5 \text{ W}$

(D) Eacc = 9.8 MV/m  
 $Q_0 = 4.0 \times 10^8$   
 $P_0 = 32.0 \text{ W}$



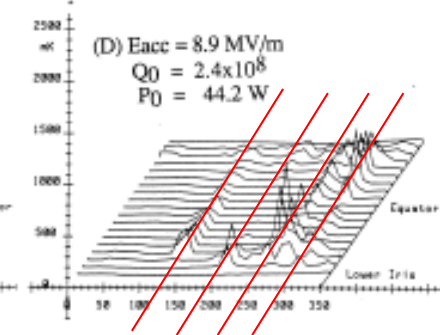
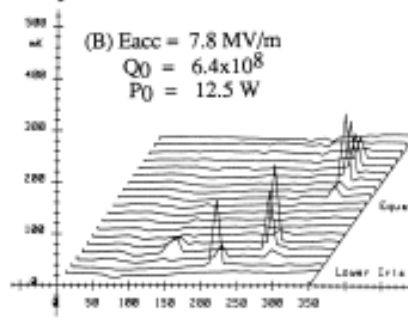
(A) Eacc = 7.5 MV/m  
 $Q_0 = 2.0 \times 10^9$   
 $P_0 = 3.7 \text{ W}$

(C) Eacc = 8.9 MV/m  
 $Q_0 = 2.6 \times 10^8$   
 $P_0 = 39.1 \text{ W}$

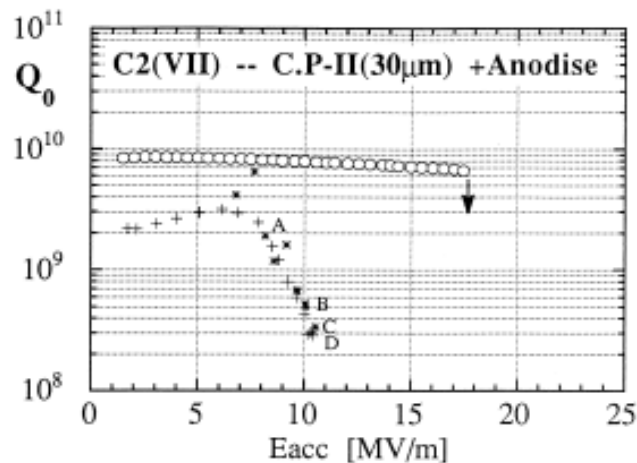


(B) Eacc = 7.8 MV/m  
 $Q_0 = 6.4 \times 10^8$   
 $P_0 = 12.5 \text{ W}$

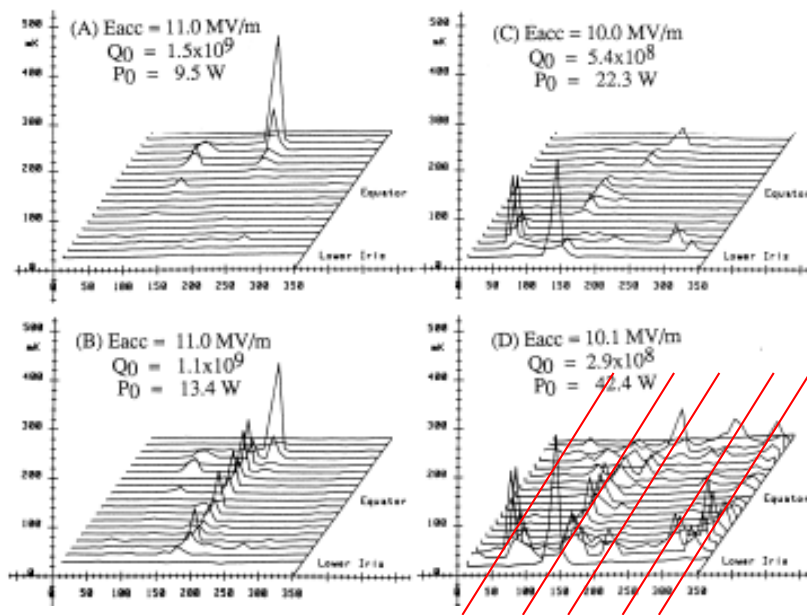
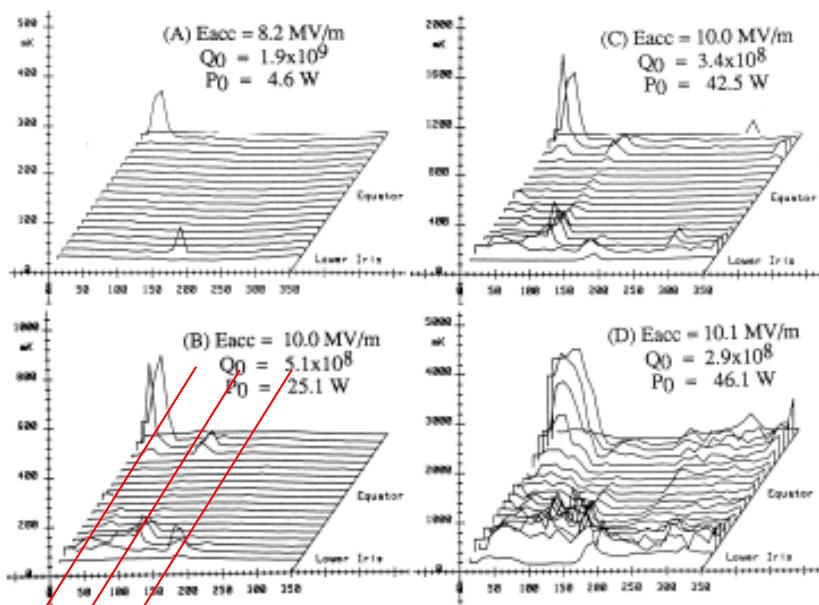
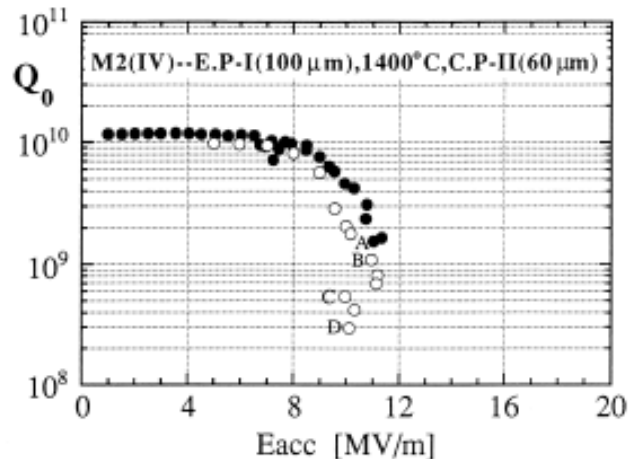
(D) Eacc = 8.9 MV/m  
 $Q_0 = 2.4 \times 10^8$   
 $P_0 = 44.2 \text{ W}$



# 1.3GHz-単セル空洞(2-4): 表面温度測定の結果



再現性良く  
発生する。



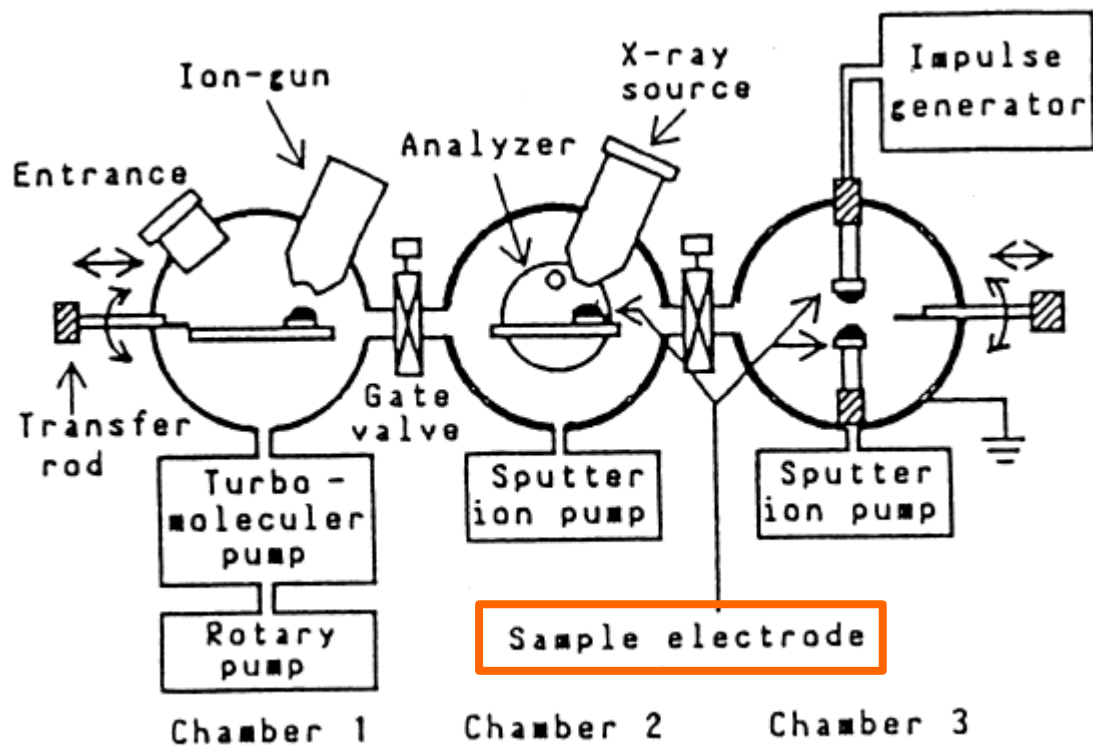
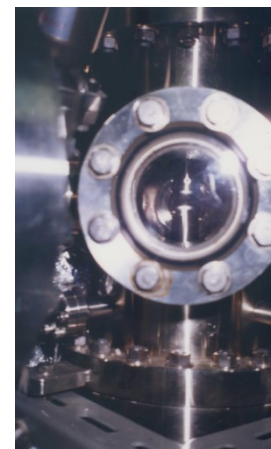
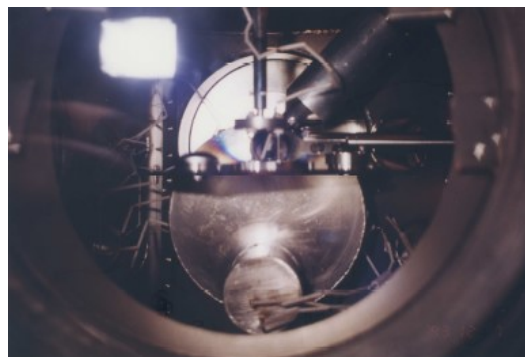
# 1.3GHz-単セル空洞(2-5): ニオブのDC放電実験

高電圧発生装置での真空放電現象

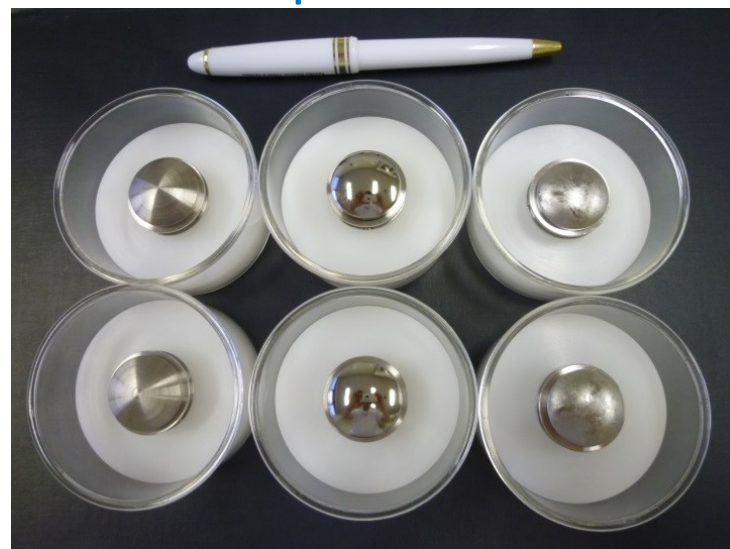
埼玉大学 工学部

電気工学科

小林 研究室



Nb samples

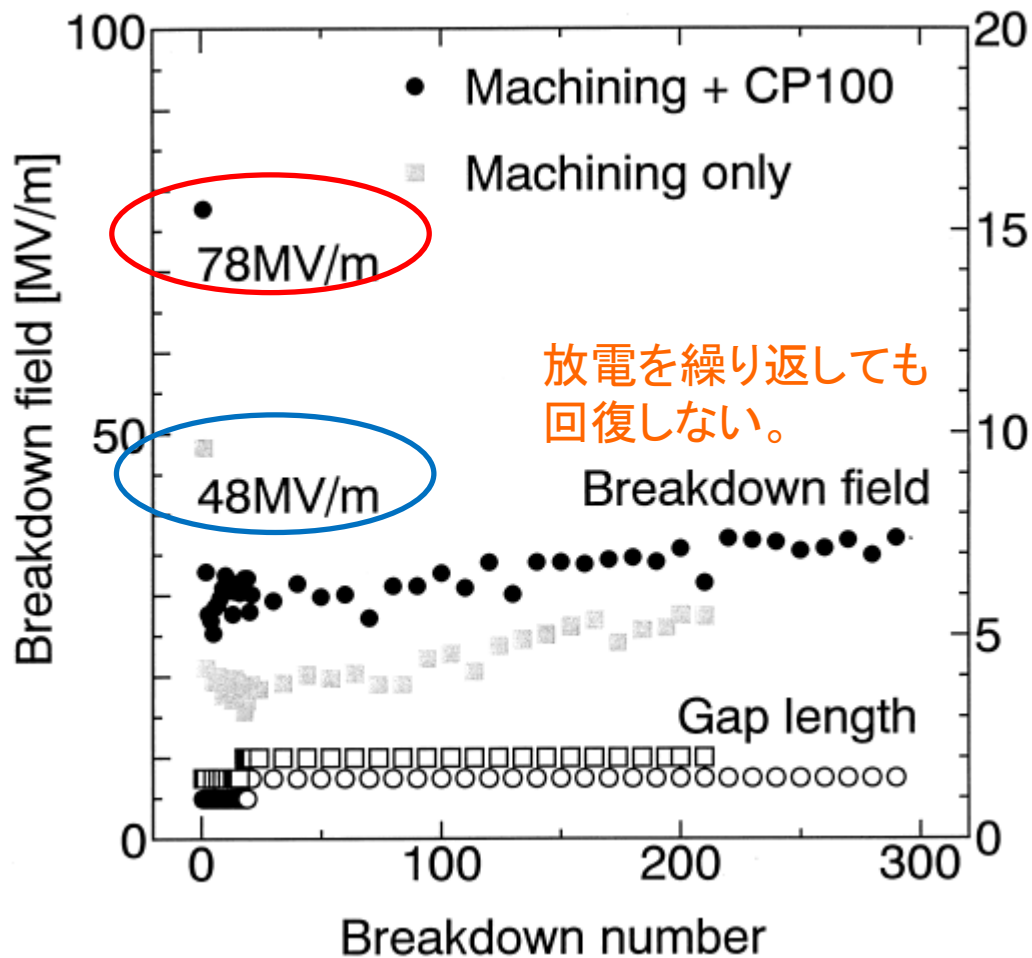


Machining

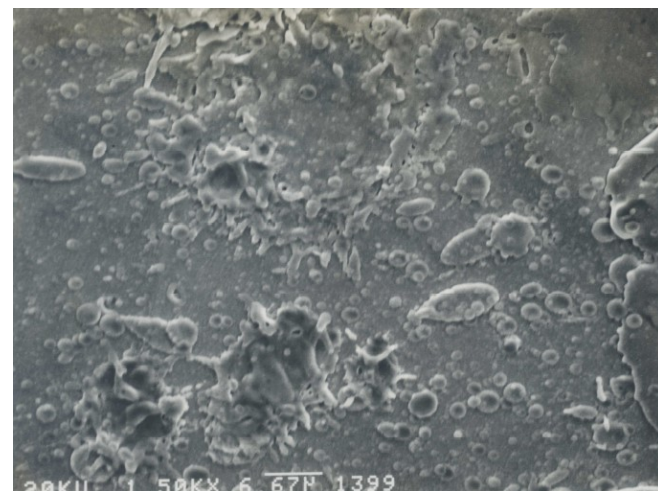
EP

CP

# 1.3GHz-単セル空洞(2-6): DC放電実験の結果

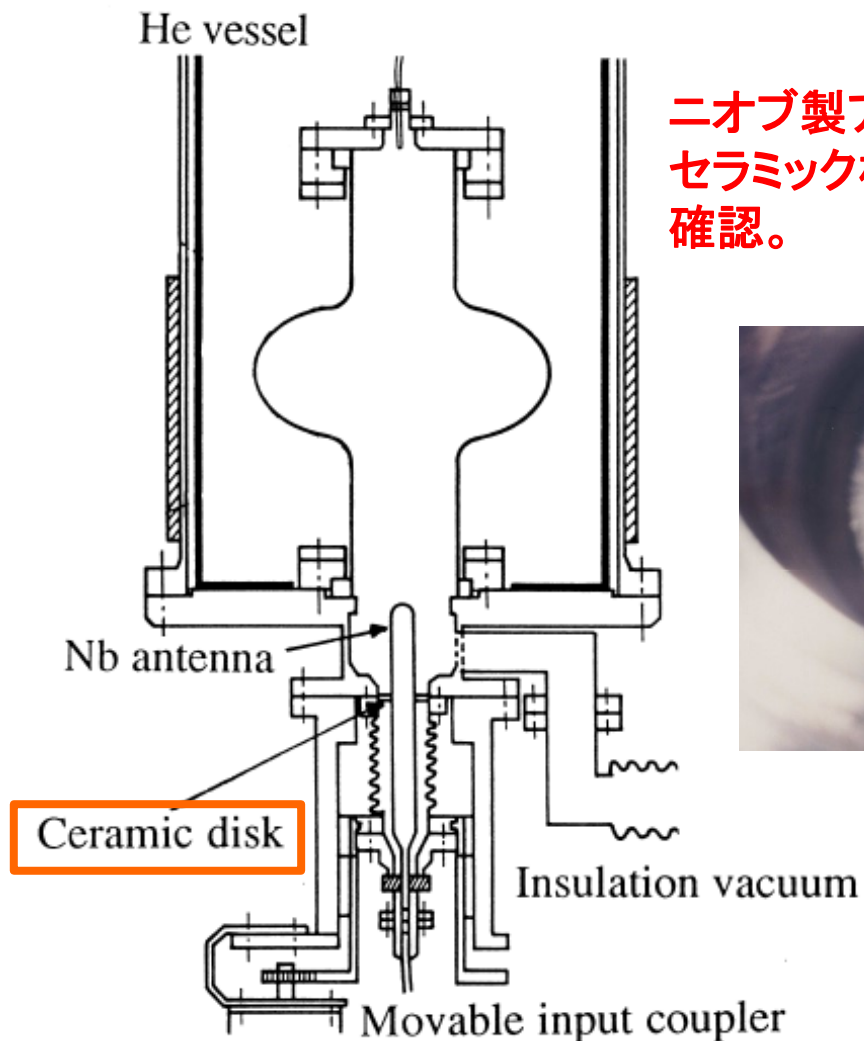


CP after 10 discharges

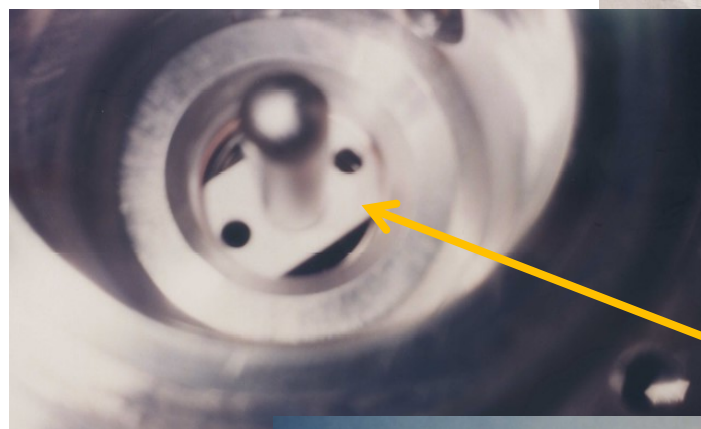
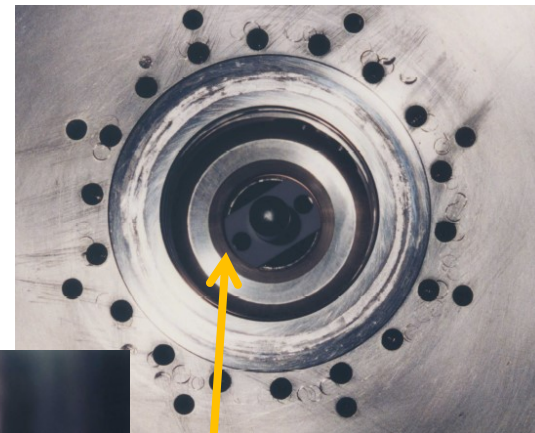


CP after 300 discharges

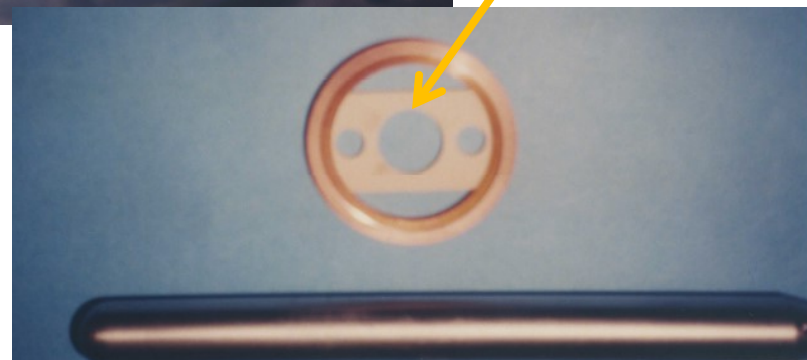
# 1.3GHz-単セル空洞(2-7): Q値悪化の原因



ニオブ製アンテナのサポート用セラミック板での放電現象を確認。



Ceramic disk



# 1.3GHz-単セル空洞(2-8): 改善後の測定結果

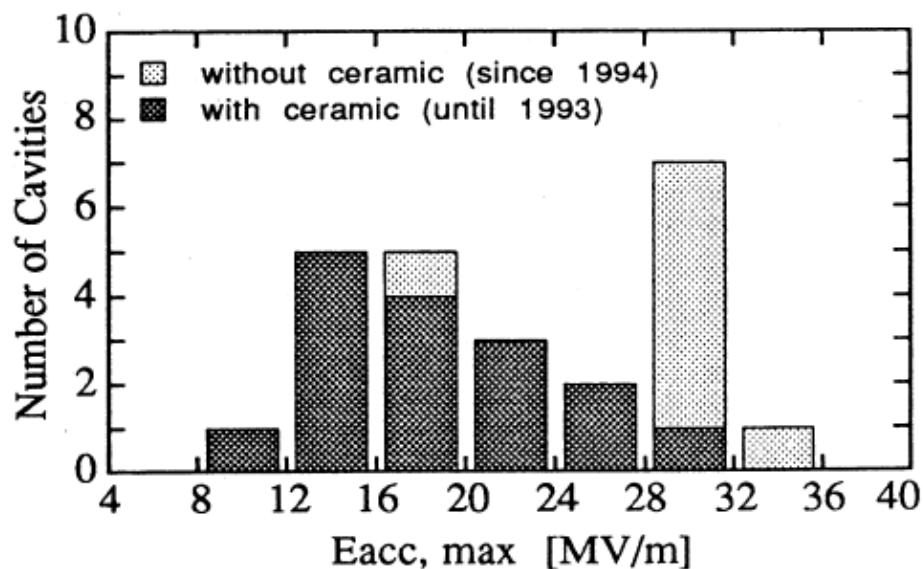


Fig. 3 Distribution of the maximum accelerating gradient before and after removing the ceramic disk.

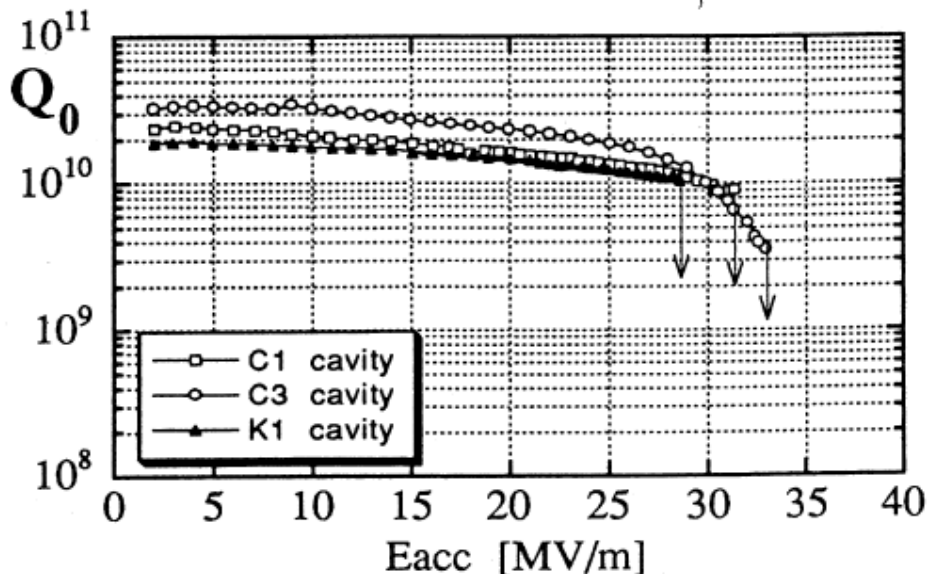


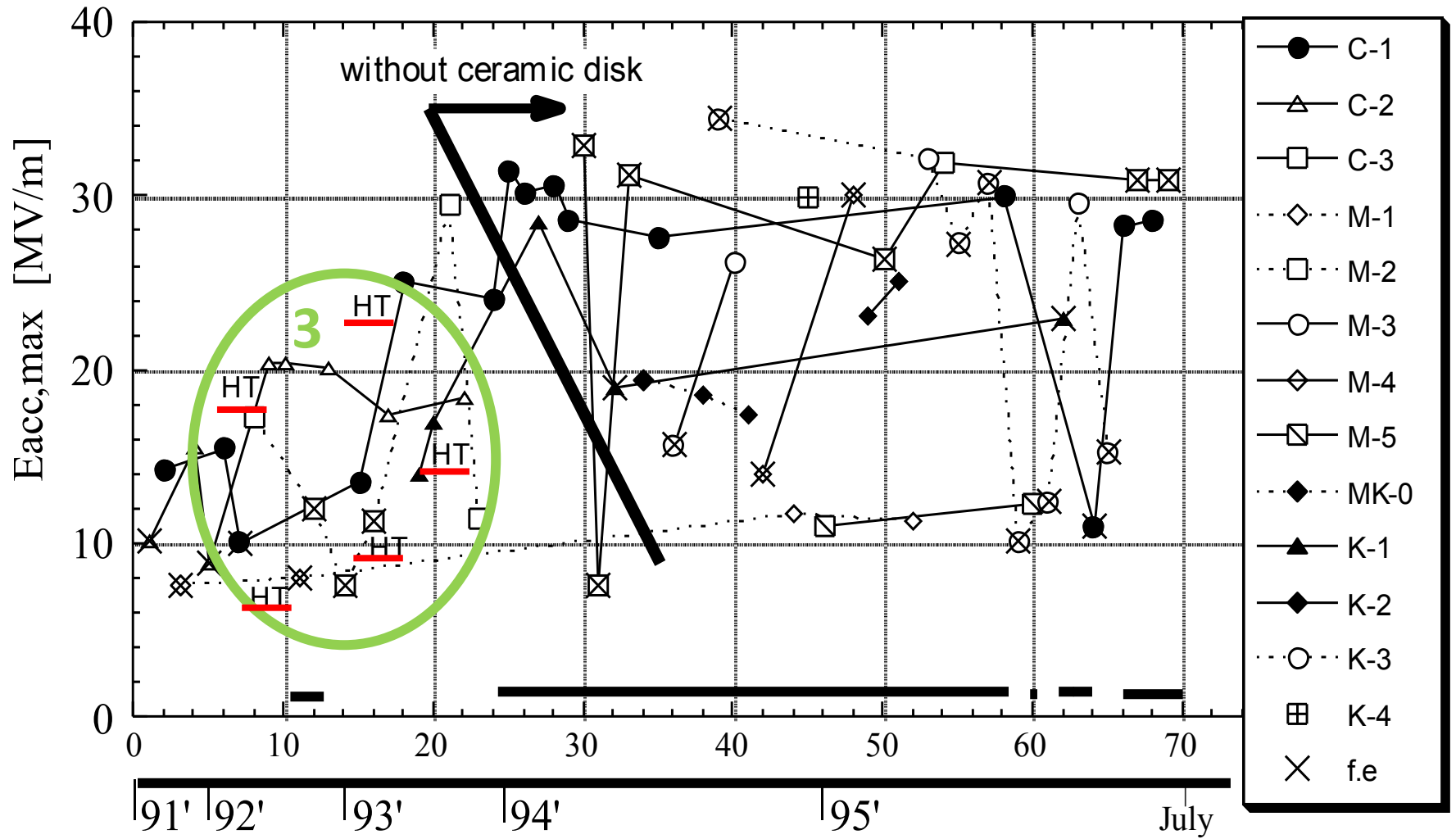
Fig. 4  $Q_0$  - Eacc plots for three single-cell cavities after removing the ceramic disk.

セラミック板での放電現象さえなければ、  
もっと早期に目標の 30 MV/m を達成していたのに。。。。

たて測定後には、すべての部品を分解して点検し、再洗浄する。

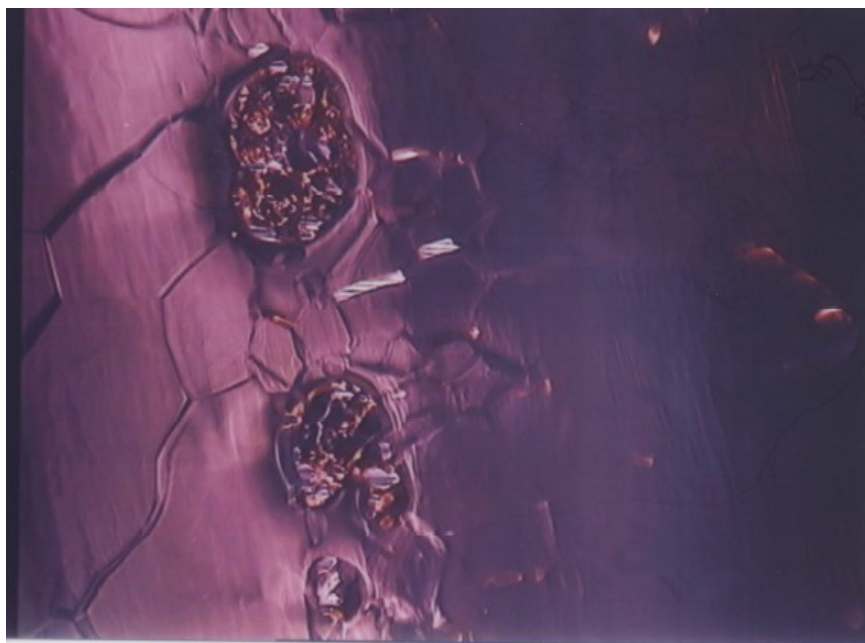
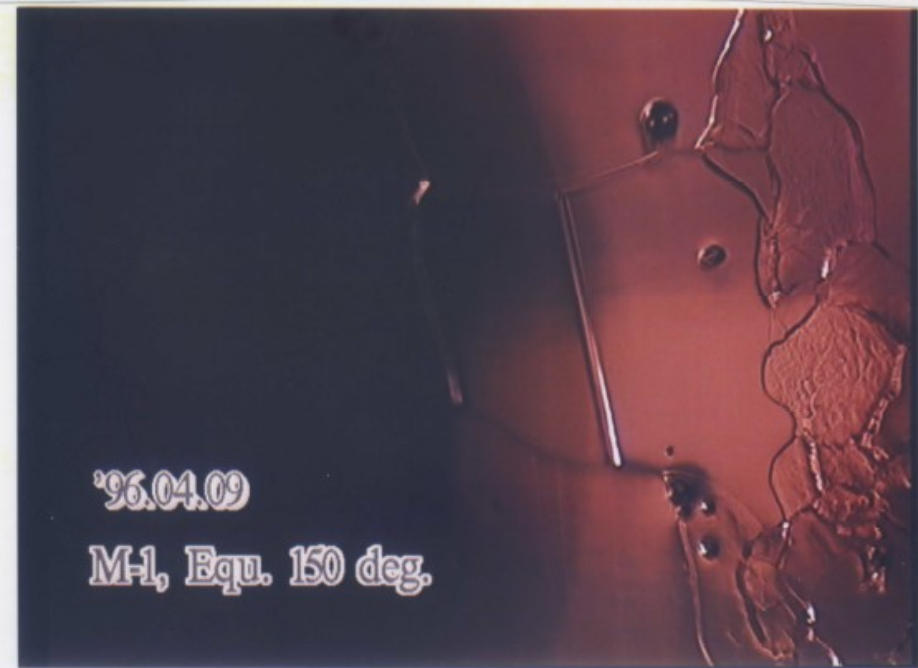


# ずっと昔のことから (3)



# 1.3GHz-単セル空洞(3-1): 内面観察の結果

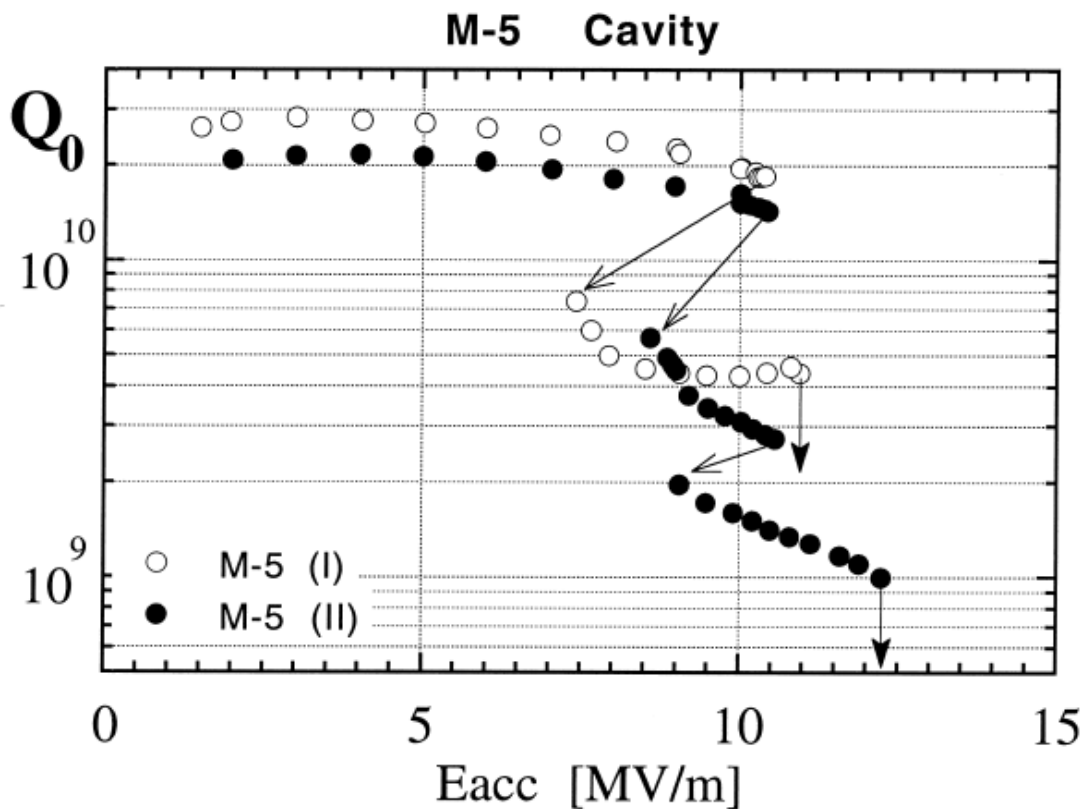
M - 1 Cavity ; Quench Location  
(EBW seam at Equator)



開発初期の空洞には、溶接欠陥が多い。C-1 Cavity ; iris EBW ( $\theta = 30^\circ$ )

# 1.3GHz-単セル空洞(3-2): Q-スイッチ

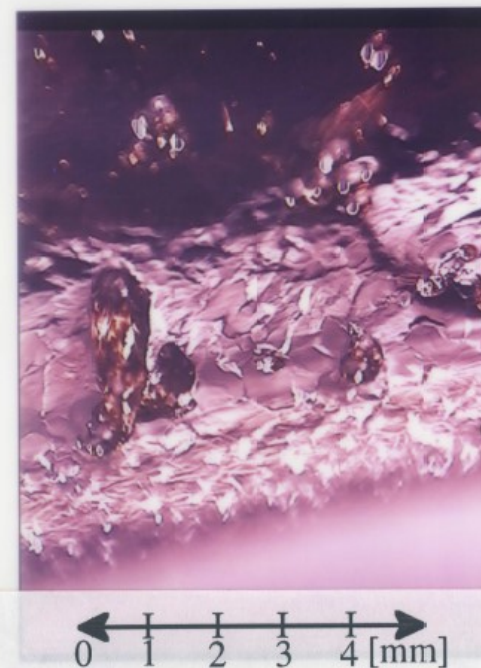
## Q - Switch



M - 5 Cavity ; Quench Location

EBW seam at lower Iris

Sputtering balls / welding imperfections



熱的に孤立した欠陥部での常伝導転移による発熱が原因

# 1.3GHz-単セル空洞(3-3): ニオブの材料証明書

Customer Messrs. 御納入先 高エネルギー加速器研究機構 殿		MATERIAL TEST RESULTS 試験成績表								No. 28378	
Surveyor 御立会者 殿		Date 日付 平成25年3月4日								TOKYO DENKAI CO., LTD. 東京電解株式会社	
Material 材質 Nb	Article 品名 Disc	Quantity 数量	Mechanical properties 機械的特性								
Specification No. 仕様書番号	Lot No.	pcs or gr	Spec 規格	min	max	T.S 引張強さ N/mm <sup>2</sup>	Y.S 耐力 N/mm <sup>2</sup>	Elongation 伸び %	Hardness 硬さ Hv		
						120	39	35			
4378	2.8t×258φ-56φ	58 pcs	Test Results 試験結果			Longitudinal					
						162	47	56	50.8		
						171	51	54			
Lot No.	Element 成分	Chemical Composition (in Wt%) 化学成分									
	Spec 規格	Ta	W	Ti	Fe	Si	Mo	Ni	Zr	Nb	
	min										
	max	0.15	0.02	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.01		
4378	Test Results 試験結果	0.0115	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	balance	
		<b>Ta</b>	<b>W</b>								
	Element 成分	Chemical Composition (in Wt%) 化学成分									
	Spec 規格	O	N	H	C						
	min										
	max	0.015	0.01	0.002	0.01						
	Test Results 試験結果	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.001						
		<b>O</b>	<b>N</b>	<b>H</b>	<b>C</b>						
Remarks 備考	Starting Ingot Lot No. NC-1830 RRR Value of Sheet: 298 Grain size ASTM #6									Inspection Section Manager 課長	
<p><b>RRR = 298 純度・熱的特性</b></p> <p>T.S.=Tensile Strength Y.S.=Yield Strength E.V.=Erichsen Value</p>											
									Engineer 担当		

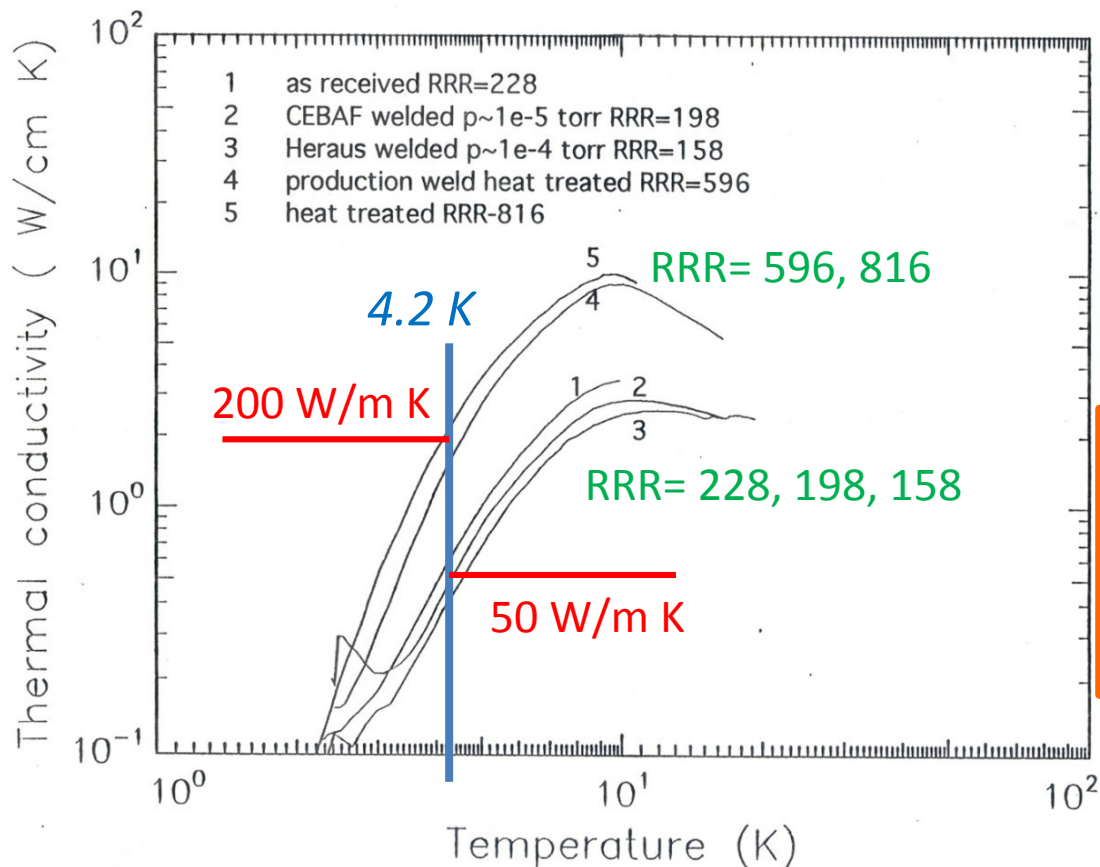
機械的特性

化学的成分



# 1.3GHz-単セル空洞(3-4): ニオブの熱伝導率

## ニオブの熱伝導率( $\kappa$ )



$$RRR = \frac{\rho(300\text{K})}{\rho(9.2\text{K})}$$

$$\kappa(4.2\text{K}) \approx RRR / 4$$

[W / m · K]

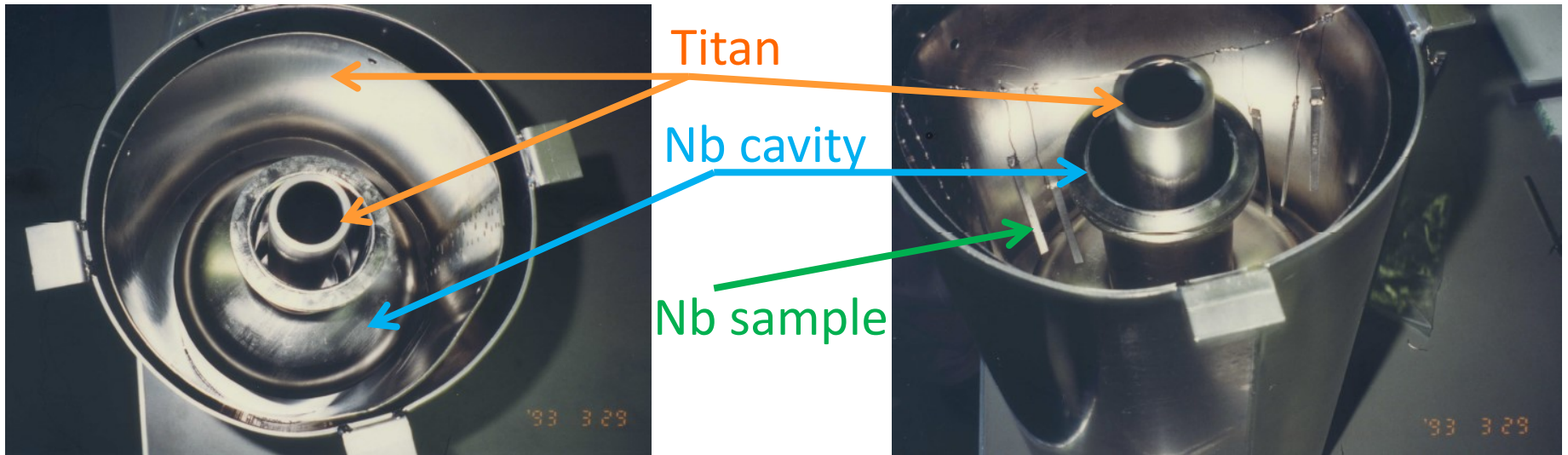
$$H_{quench} = \sqrt{\frac{4 \kappa (T_c - T_{He})}{a R_{defect}}}$$

( $a$ : defect size)

( $R$ : resistance of defect)

ニオブの高純度化＝高熱伝導率化は、最大加速電界を上げる。

# 1.3GHz-単セル空洞(3-5): 高温熱処理



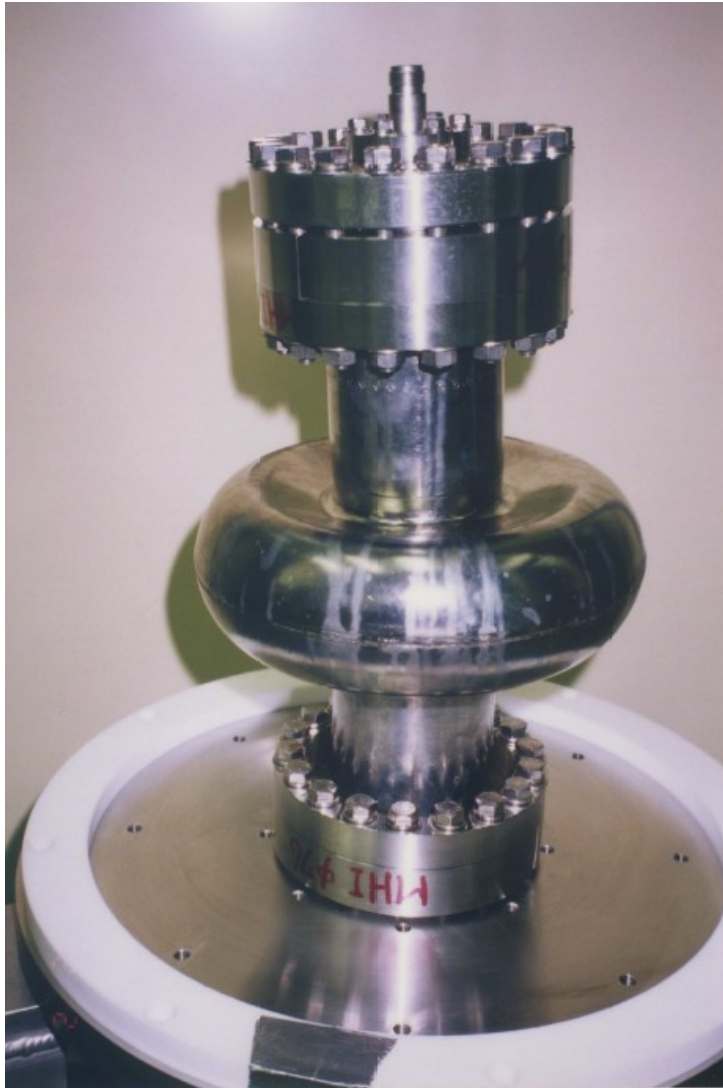
**1400°C Heat Treatment  
with Titan for purification**

高温熱処理によるニオブの高純度化  
(高熱伝導率化、再結晶化)は、  
ニオブの強度を下げ、柔らかくなる。



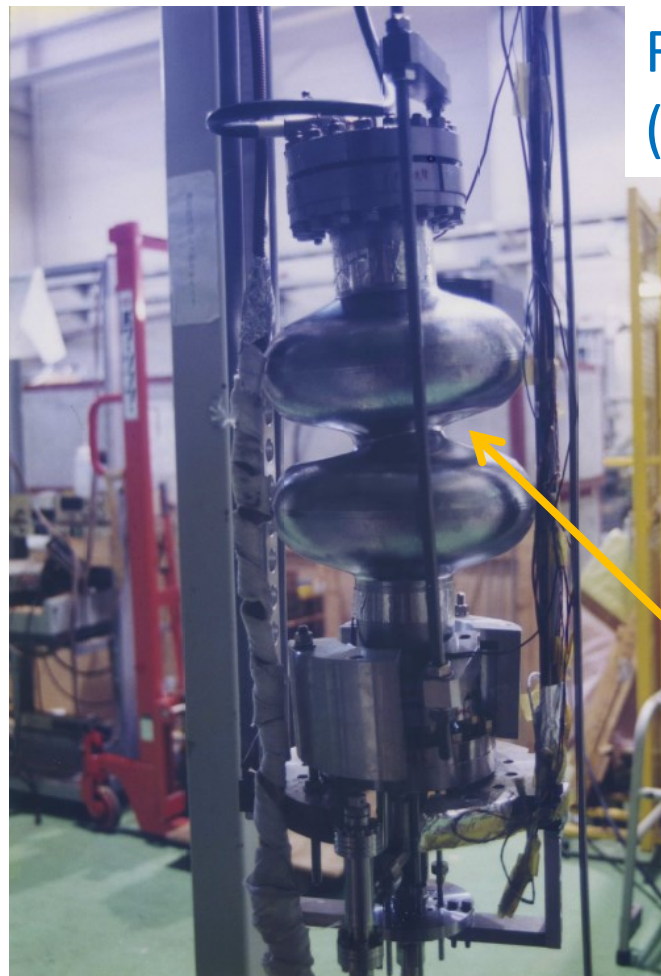
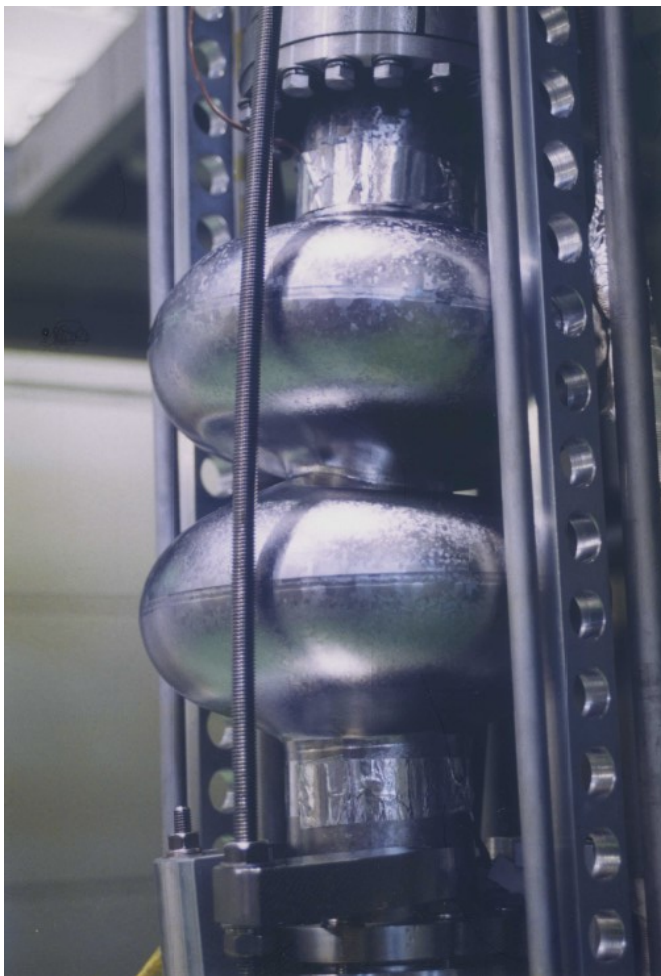
ULTRA-HIGH PURITY RARE METAL  
**TOKYO DENKAI**

# 1.3GHz-単セル空洞(3-6): 座屈空洞



RRR= 100/200  
before/after H.T.

# 1.3GHz-2セル空洞(3-7): 座屈空洞



RRR= 800 after H.T.  
(Cornell 2-cell cavity)



アイリス部の強め輪  
(Stiffening Ring)  
による補強は重要

溶接欠陥のない空洞製作が本質であり、  
高温熱処理による空洞性能の改善は、好ましい方法ではない。



---

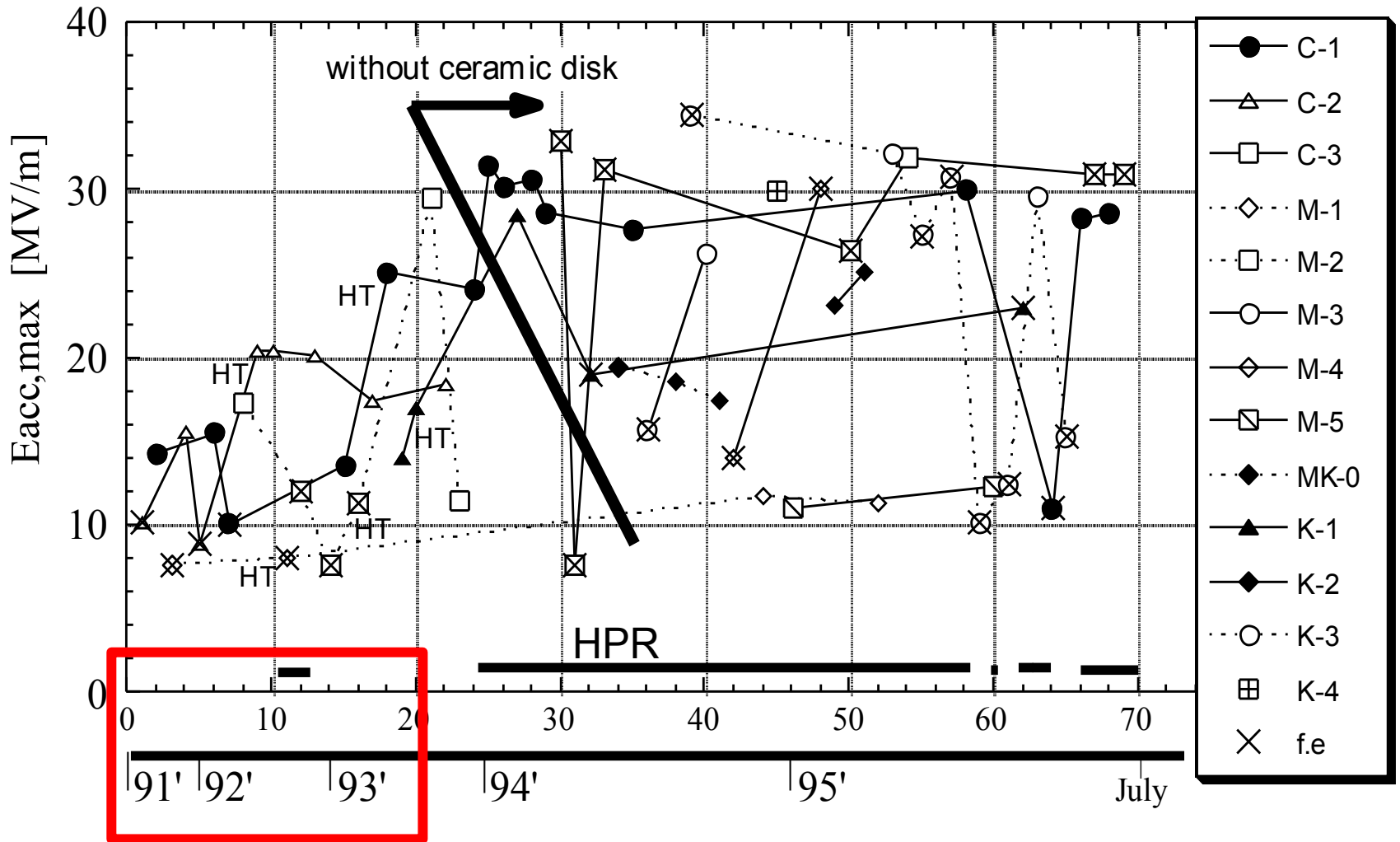
本日の技術研修会は、終了です。

遠慮なく、ご質問ください。

# 超伝導空洞技術－2

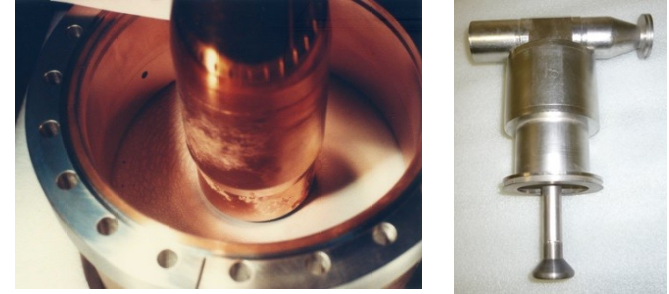
- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから(後半)
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- まとめ

# その頃、海外の研究所では



# その頃、海外の研究所では

- TRISTAN at KEK : **ビーム運転 → トラブル対策**  
(32, 508MHz 5-cell cavity)



- HERA at DESY :  
(16, 500MHz 4-cell cavity)

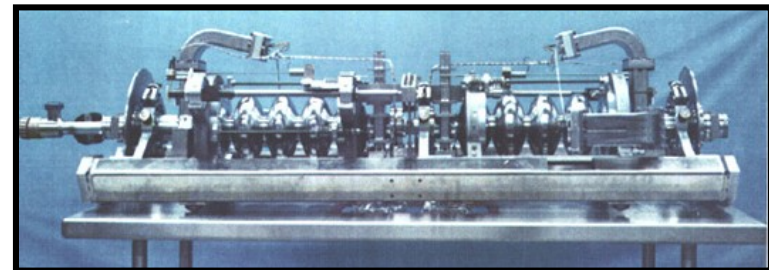
**原因不明の性能低下現象**

[SRF'91 at DESY]

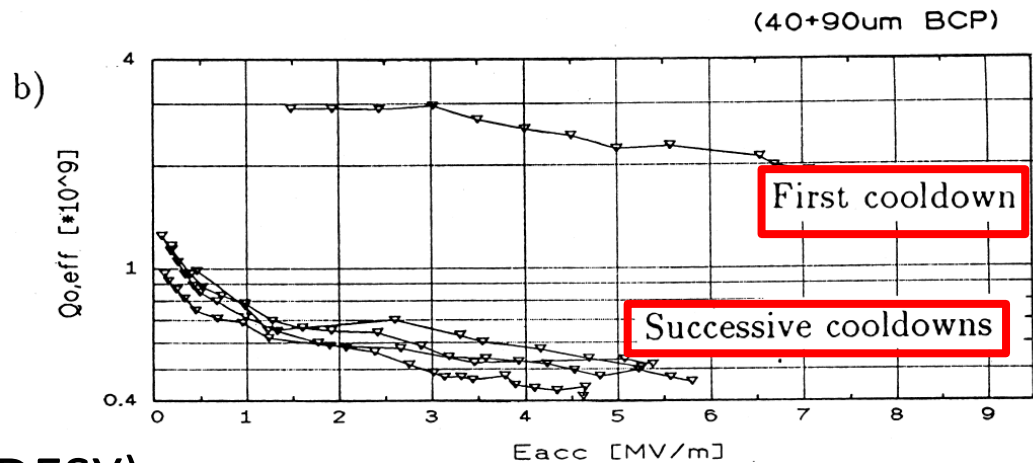
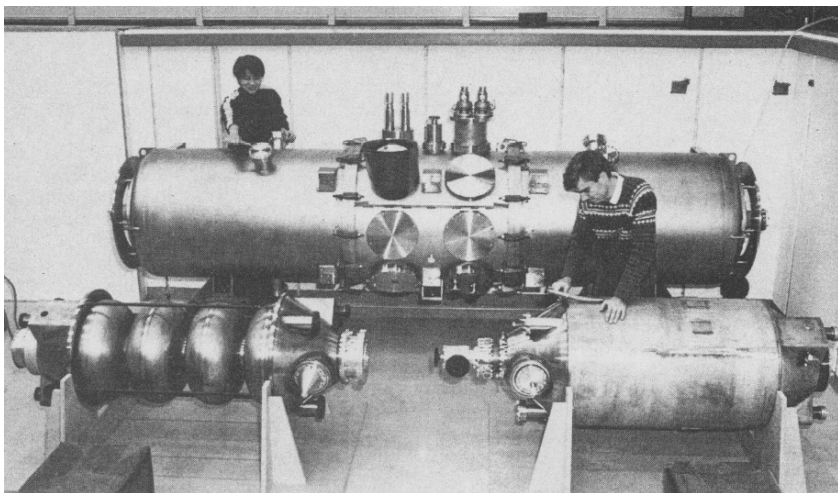
- LEP at CERN : **Nb空洞から、Nb/Cu空洞へ**  
(20+160, 352MHz 4-cell cavity)

- CEBAF at JLAB :  
(350, 1500MHz 5-cell cavity)

**空洞量産体制へ**



# 海外の研究所 (DESY): Q - disease



[SRF'91 at DESY]

HERA cavities and cryomodule (DESY)

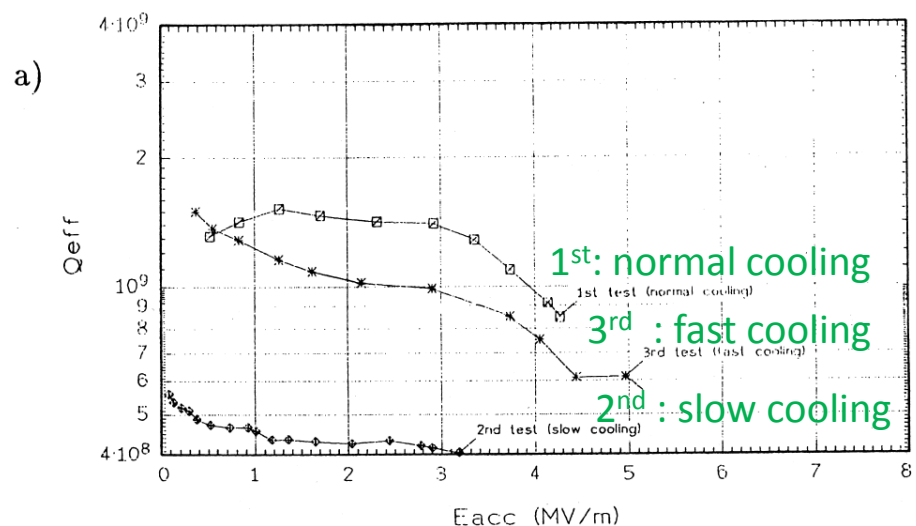
クライオモジュールでは、熱容量が大きいので、  
たて測定時のように急速冷却が困難である  
ことから判明した。

HERA cavities (DESY):

BCP + no Anneal

TRISTAN cavities (KEK):

EP + 800°C Anneal  $\rightarrow$  no Q-disease



# 海外の研究所 (DESY): Q - disease

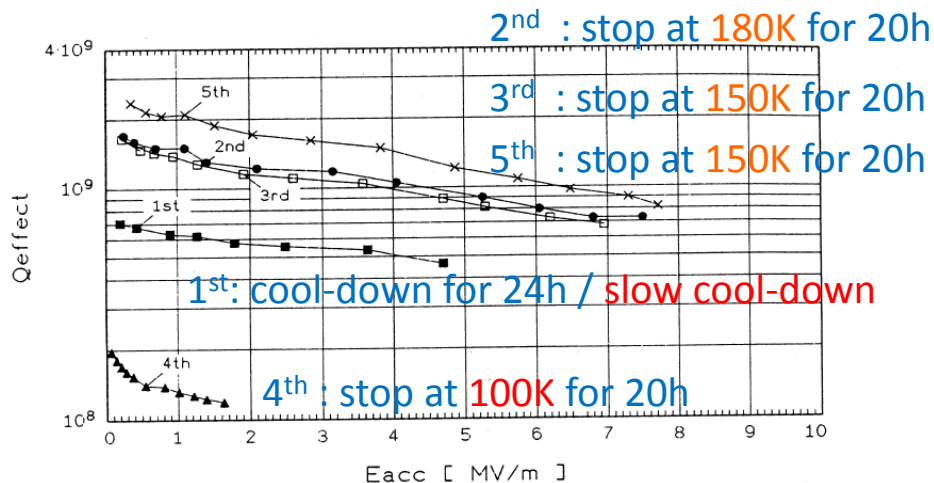


Fig. 3: Measured  $Q$  vs  $E_{acc}$  curves for different cooldown conditions  
 1st: continuous cooldown from 300 K to 4.2 K in 24 h  
 2nd (3rd, 4th, 5th): stop during cooldown at 180 K (150 K, 100 K, 150 K) for 20 h; afterwards fast cooldown to 4.2 K in about 1.5 h (1.8 h, 1.5 h, 1.3 h)

[SRF'91 at DESY]

## Cool-down condition in Cryomodule

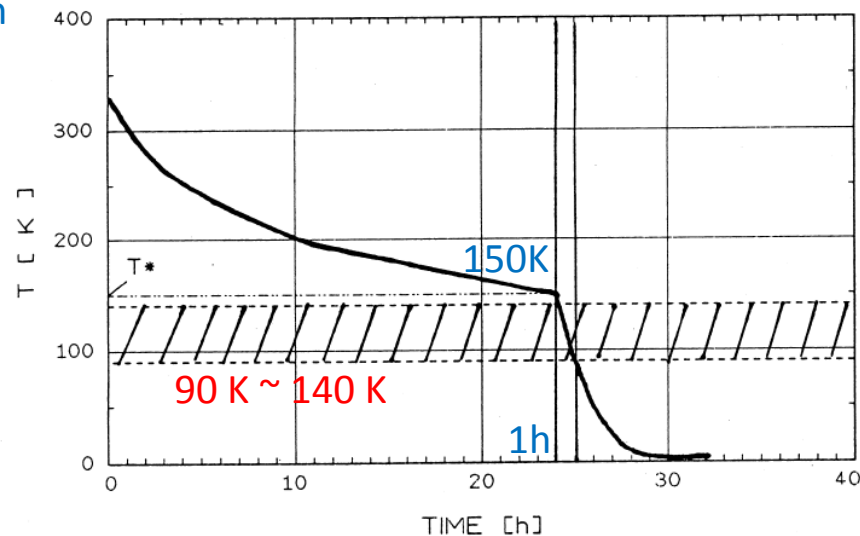


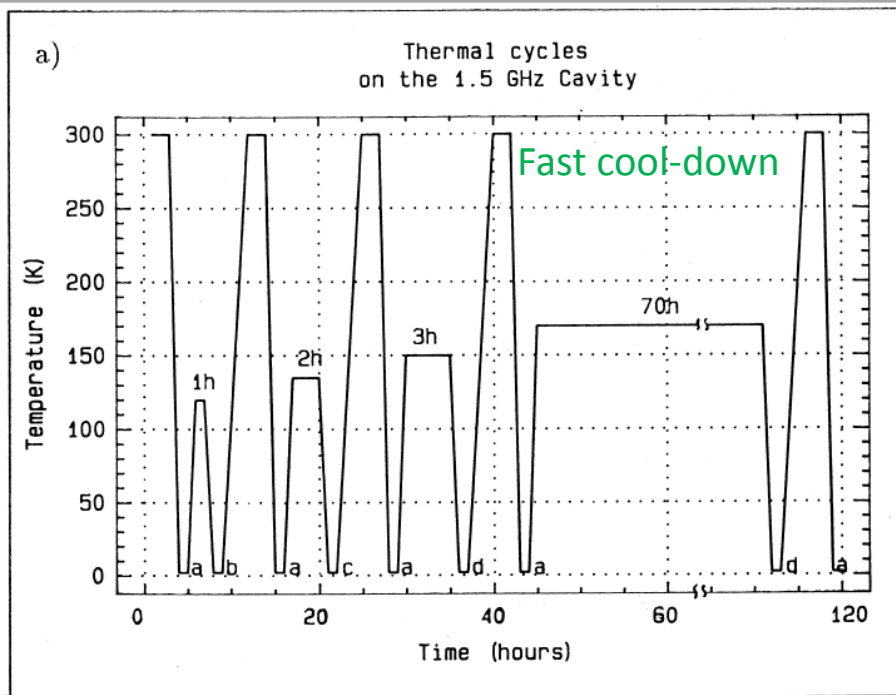
Fig. 4: Cooldown conditions to reduce the effect of the Q disease.

DESYでのQ-diseaseに関する実験結果:

危険領域 (90K~140K) の急速冷却による回避

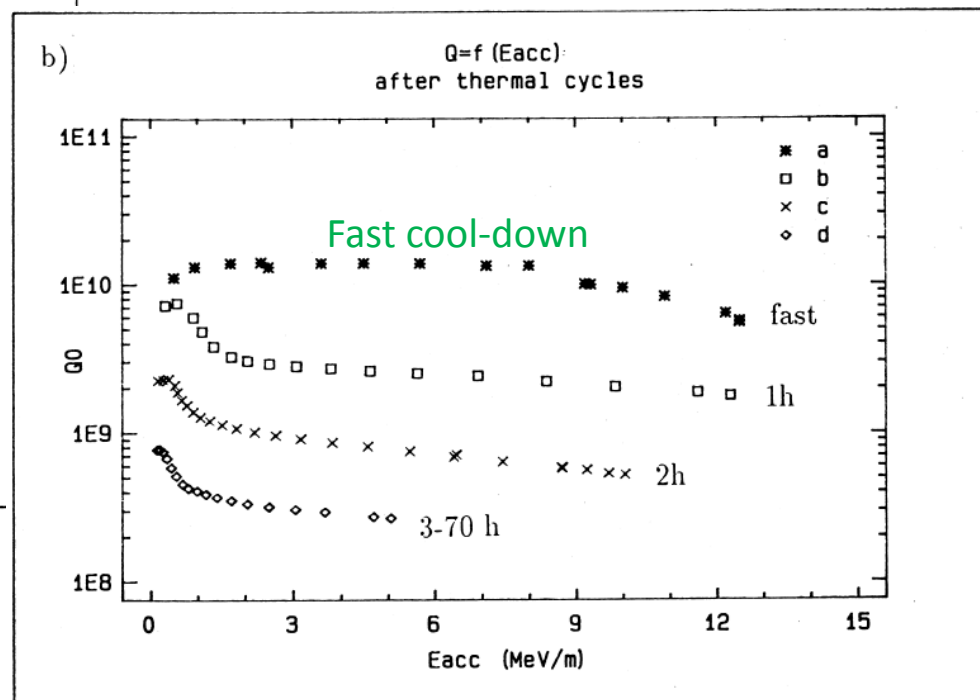
(ニオブ中に溶解している水素が、表面層に析出してニオブの水素化合物を形成する。)

# 海外の研究所 (Saclay): Q - disease



1.5 GHz Nb 1-cell Cavity at Saclay

[SRF'91 at DESY]



SaclayでのQ-diseaseに関する実験結果:  
水素脱ガスの必要性 (800°C Anneal)

# 海外の研究所 (CERN): HPR

## The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology

Werner Kern\*

Lam Research Corporation, Advanced Research Center, San Diego, California 92126

J. Electrochem. Soc., Vol. 137, No. 6, June 1990 © The Electrochemical Society, Inc.

**High-pressure fluid jet cleaning** consists of a high-velocity jet of liquid sweeping over the surface at pressures of up to 4000 psi (55, 56). The liquid can be DI water or organic solvents. The shear forces effectively dislodge submicron particles and penetrate into dense topography, but damage to the wafer can result with improperly adjusted pressure (18).

### 半導体産業からの加速器への応用

[EPAC'92 at Berlin]

Superconducting Niobium Sputter-Coated Copper Cavities at 1500 MHz

Ph. Bernard, D. Bloess, T. Flynn, C. Hauviller and W. Weingarten  
CERN  
CH-1211 Geneva 23

P. Bosland and J. Martignac  
CEN Saclay  
F-91191 Gif-sur-Yvette, Cedex

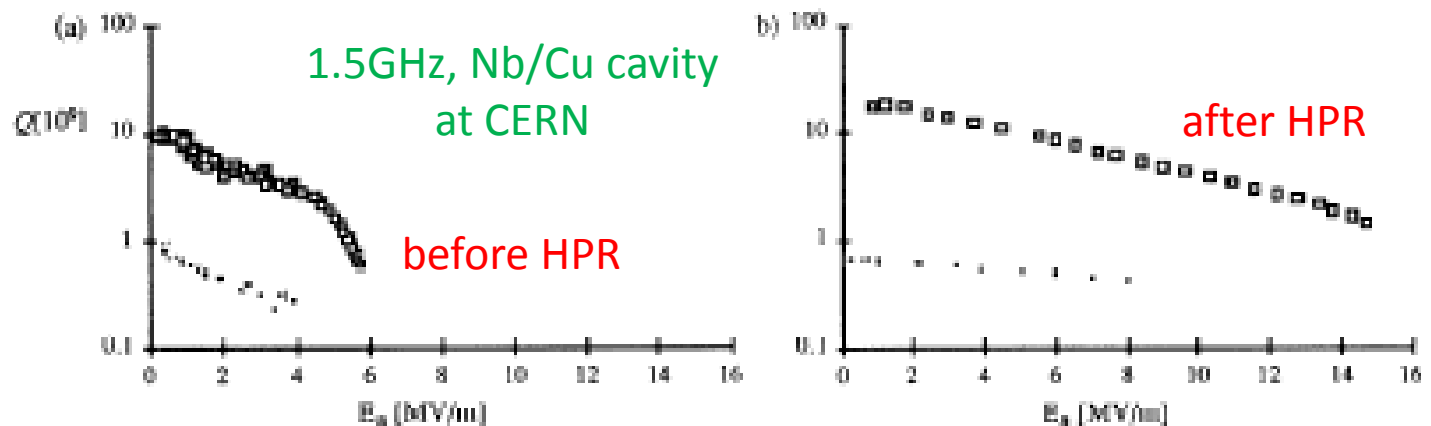
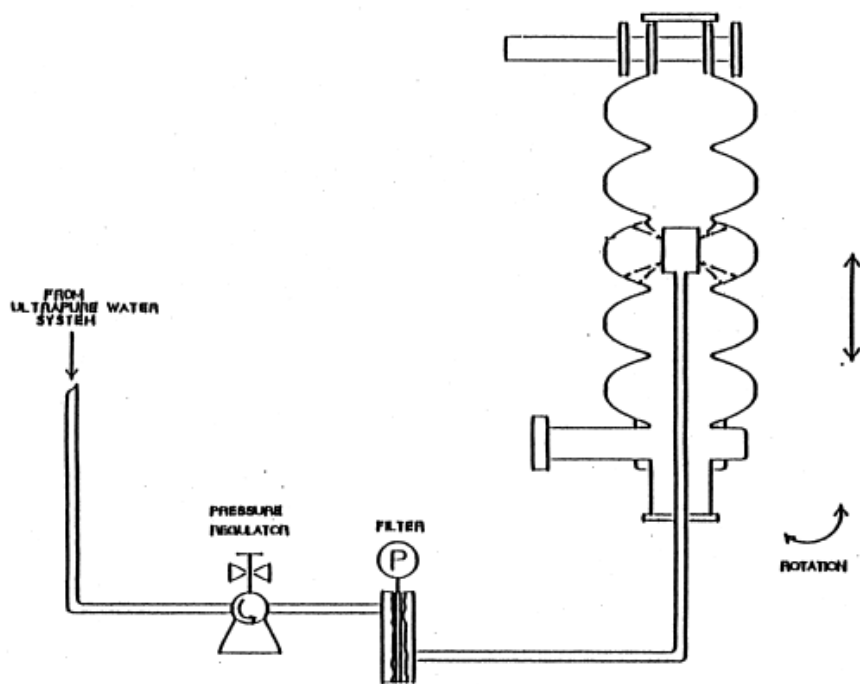


Figure 1. Q-value vs accelerating field for the fundamental mode at 4.2 K (lower) and 1.6 K (upper), a) before and b) after high-pressure water rinsing.



# 海外の研究所 (JLAB): HPR



[SRF'93 at JLab]

Figure 1 : Schematic of High Pressure Rinsing System

P. Kneisel氏: 超純水高圧洗浄による  
 空洞性能回復の実験結果:  
**HPRの有効性**

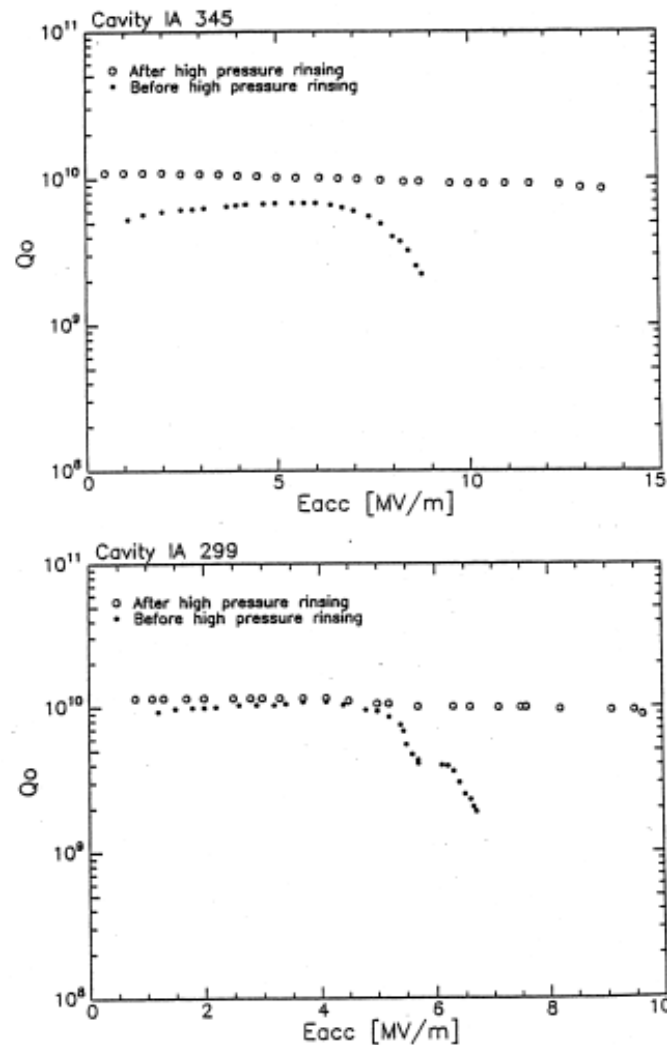


Figure 3 : Results of Production Cavity Pair IA345/IA299 before and after High Pressure Rinsing ( measurements have been

# 国内の研究所 (KEK): HPR

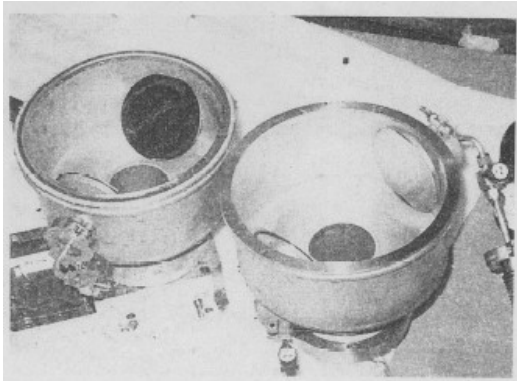


Fig. 4 A half divisible cavity to set silicon wafers inside.

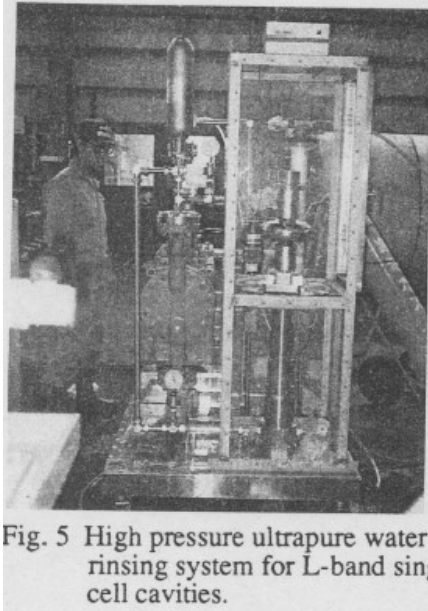
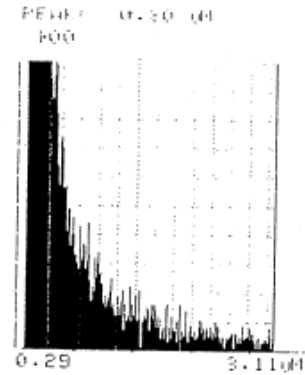


Fig. 5 High pressure ultrapure water rinsing system for L-band single-cell cavities.



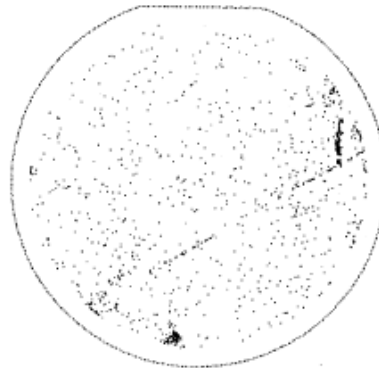
## トリスタンでの処理工程

Fig. 6 Residual particles on a wafer surface after the TRISTAN final rinsing.



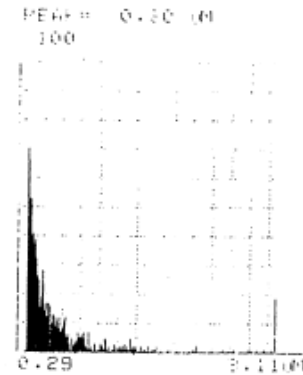
[SRF'93 at JLab]

Particle size	Count
0.30-1.20 μm	5825
1.20-2.01 μm	405
2.01-3.00 μm	2720
> 3.00 μm	1069
Total	10019



## After HPR

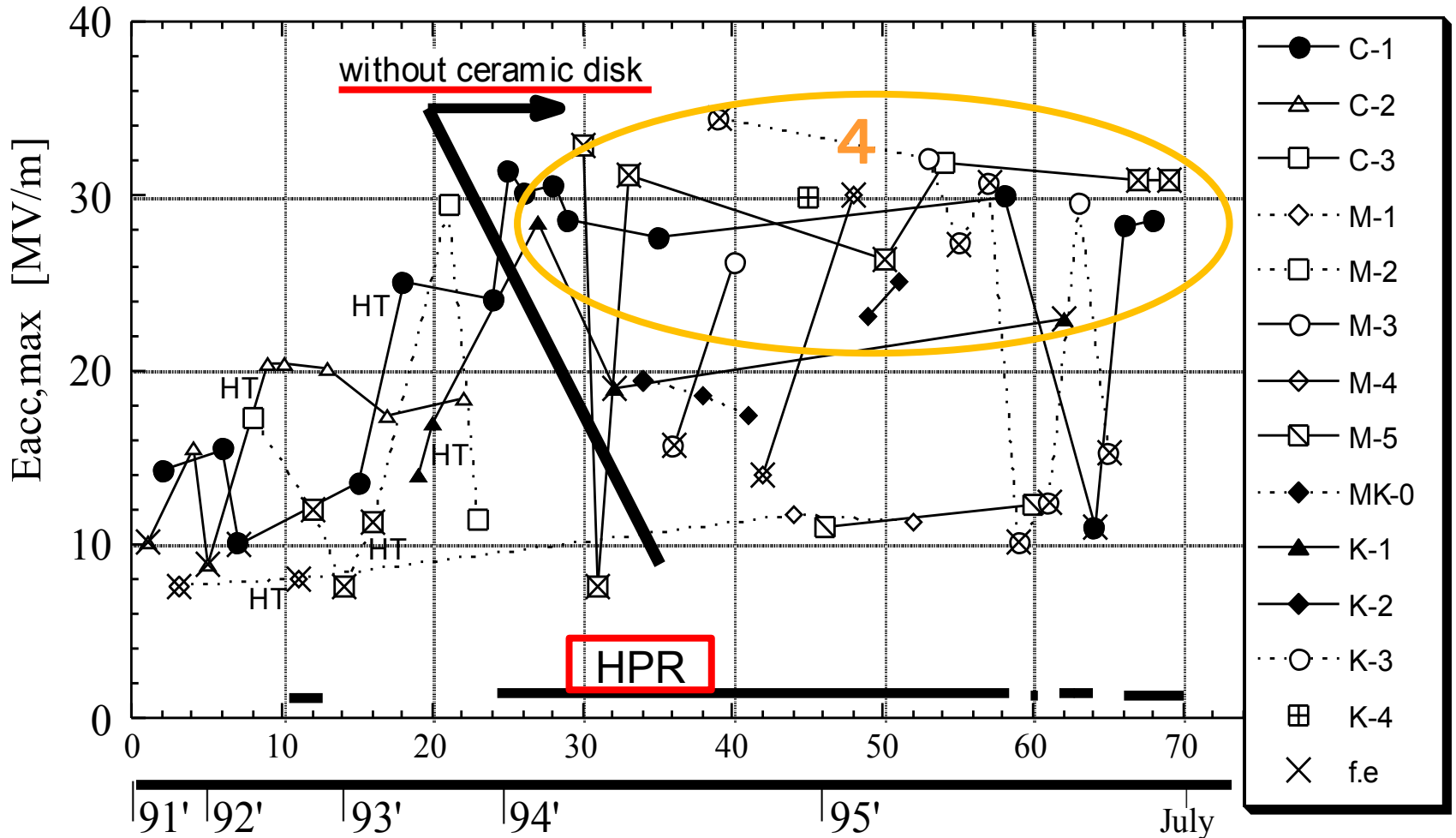
Fig. 7 Residual particle on a wafer surface after HPR.



Particle size	Count
0.30-1.20 μm	646
1.20-2.01 μm	52
2.01-3.00 μm	282
> 3.00 μm	37
Total	1017

## K. Saito氏: 超純水高圧洗浄による効果の検証

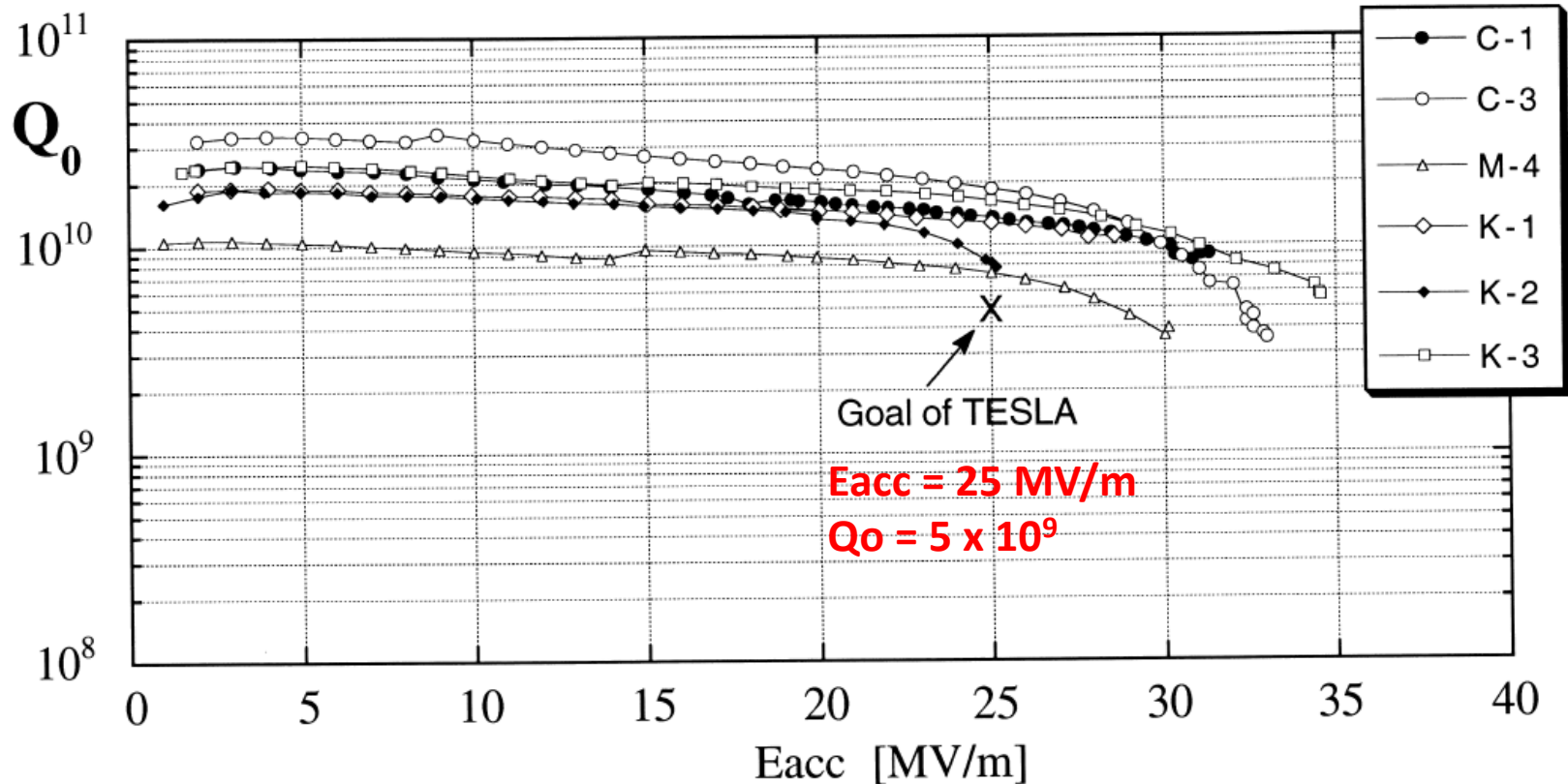
# ずっと昔のことから (4)



空洞自身の性能評価ができるようになる。

# 1.3GHz-単セル空洞(4-1): Q<sub>0</sub>と加速電界

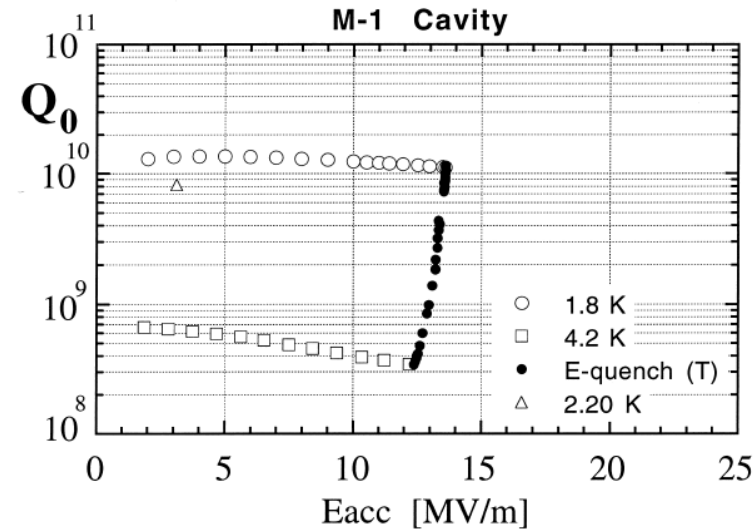
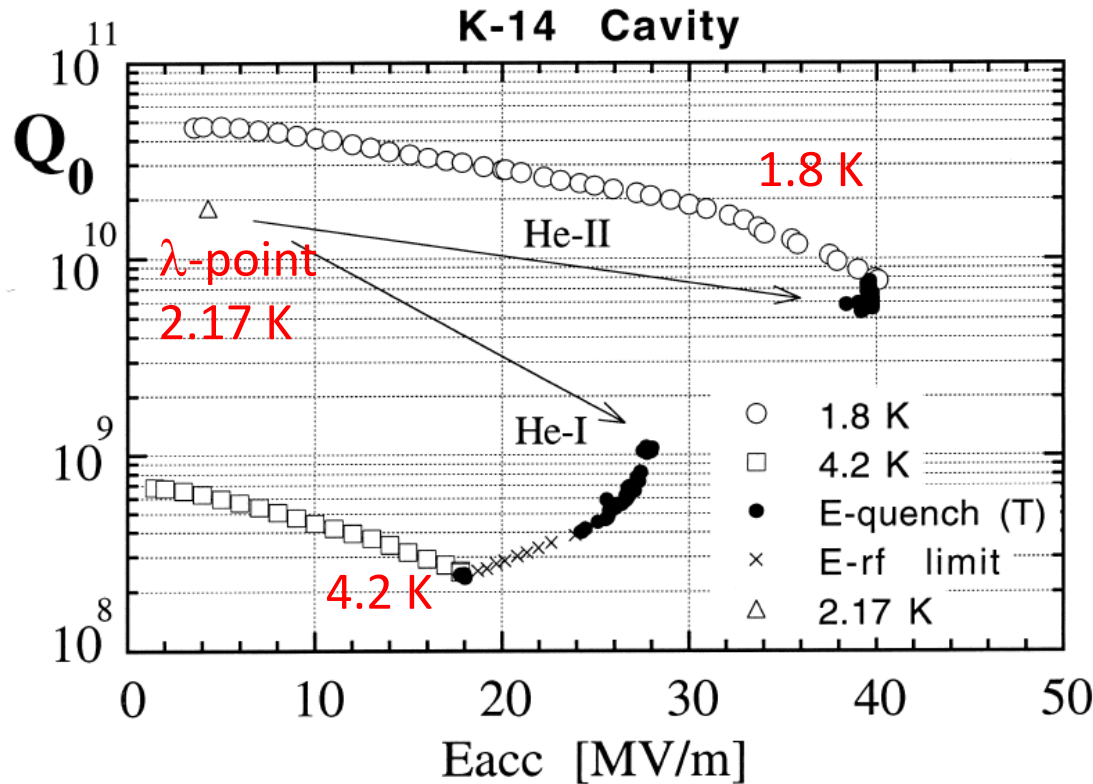
KEK - 1.3 GHz, Single-cell Nb Cavities



数台の単セル空洞で、TESLAの目標値を超える空洞性能を達成された。

# 1.3GHz-単セル空洞(4-2): 最大加速電界

ついに、理論限界に近い **40 MV/m** が達成される。

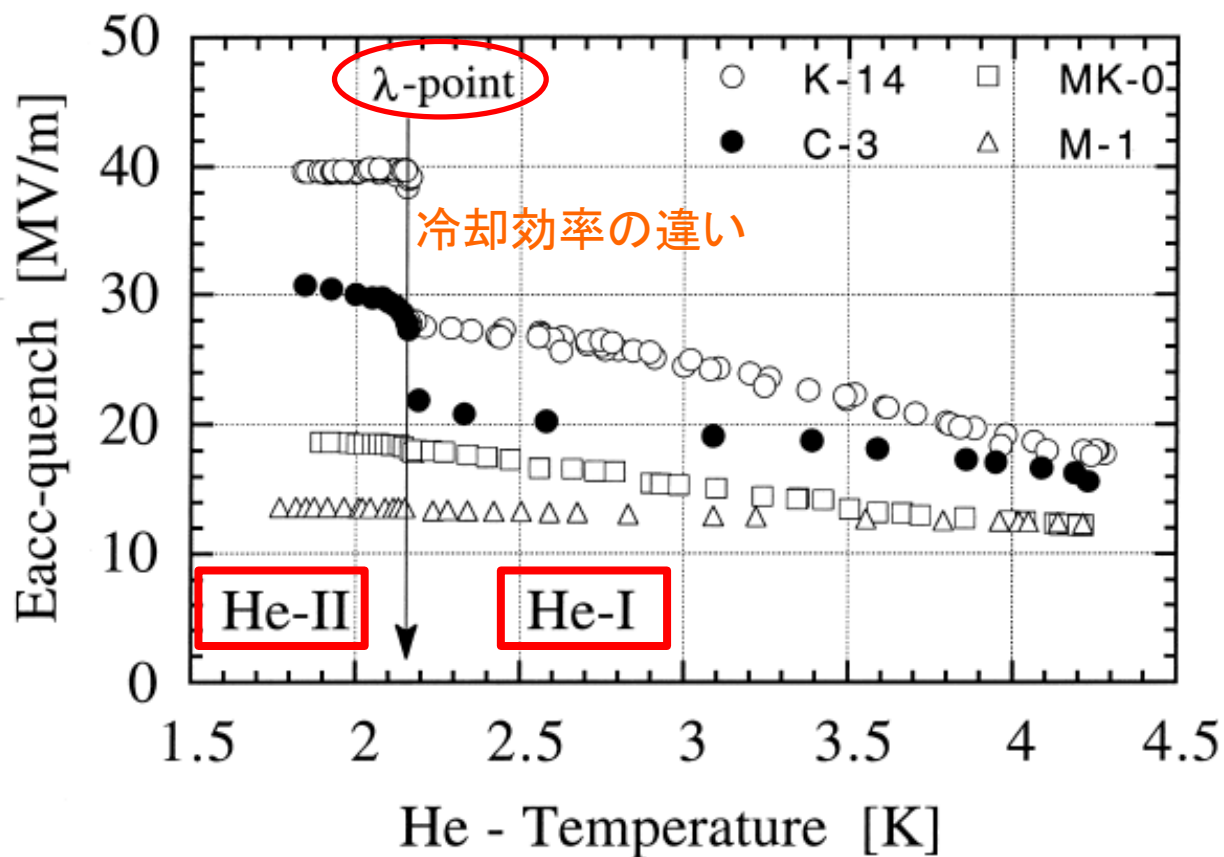


赤道部のEBWビード上で、クエンチ時の発熱が観測され、1.8 K~4.2 Kで、同一の場所であった(溶接欠陥)。

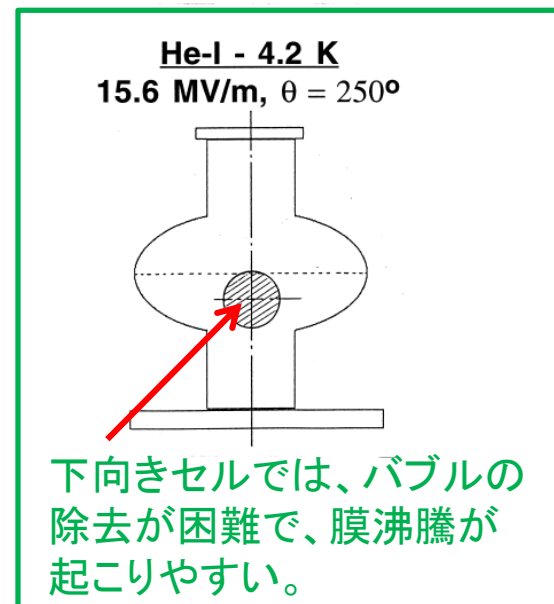
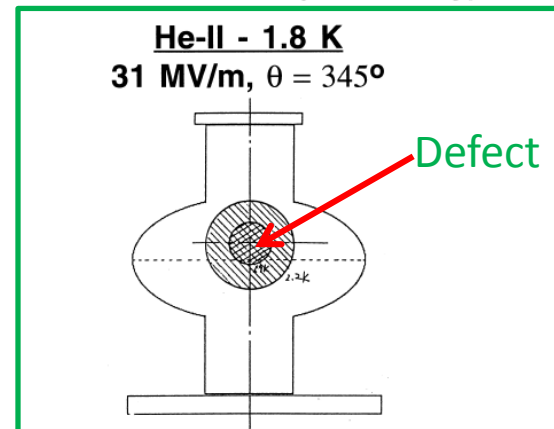
最大加速電界 (Eacc, max) の温度依存性が調べられた。

クエンチ時の発熱場所は、λ-pointの前後で変化し、4.2 Kでは 18 MV/m へ低下する。

# 1.3GHz-単セル空洞(4-3): 温度依存性



Quench Location (C-3 Cavity)



He-II では超流動ヘリウムにより、He-I では核沸騰により冷却されるが、過大な熱流速により、膜沸騰へと進展し、冷却効率が著しく悪化し、超伝導破壊が起こる。

# 1.3GHz-単セル空洞(4-4): 熱流束と性能限界

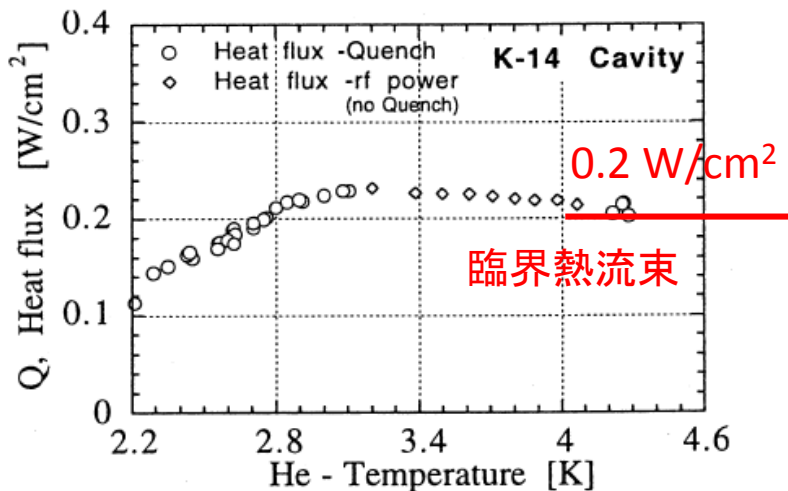


図4. クエンチ時における熱流束の温度依存性

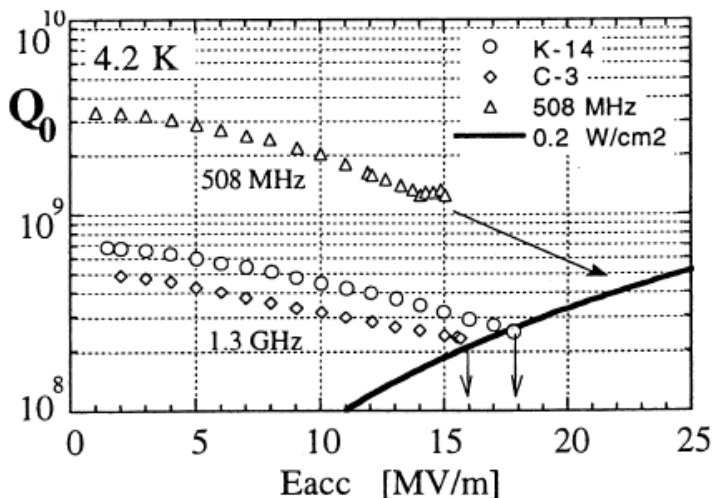
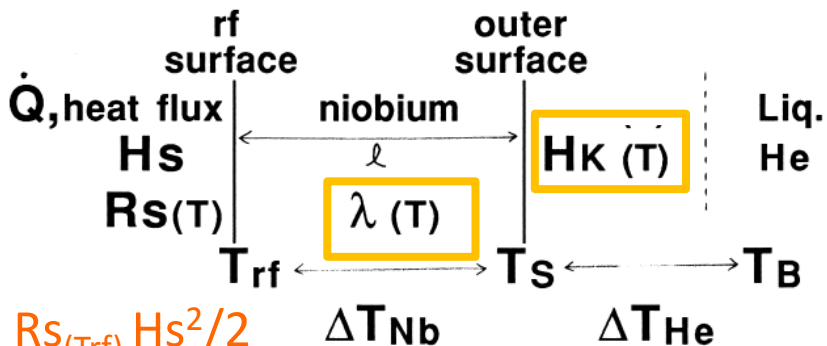


図5. 膜沸騰による空洞性能限界

**At 4.2 K**  
 ● 508 MHz  
 Eacc = 22 MV/m  
 ● 1.3 GHz  
 Eacc = 18 MV/m

## Global Heating : (defect free)



$$Q = R_{s(T_{rf})} H_s^2 / 2$$

$\lambda(T)$  : Thermal conductivity of Nb  
 $H_K(T)$  : Kapitza conductivity of He-II

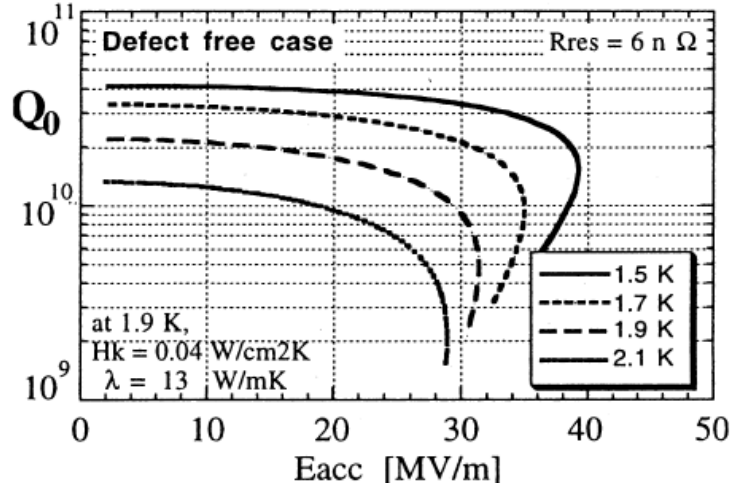


図8. 低いHkにおけるQ0 - Eacc の計算結果

# 超伝導空洞技術－2

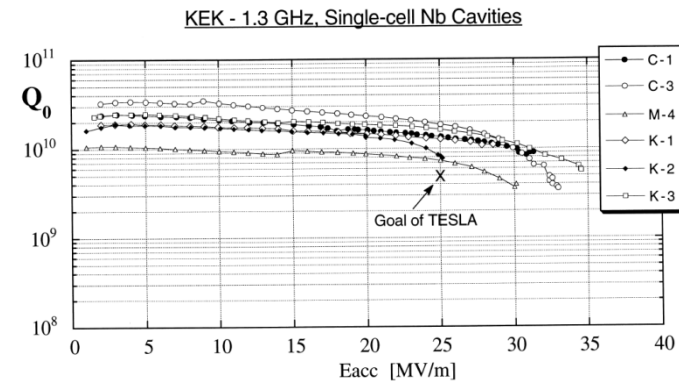
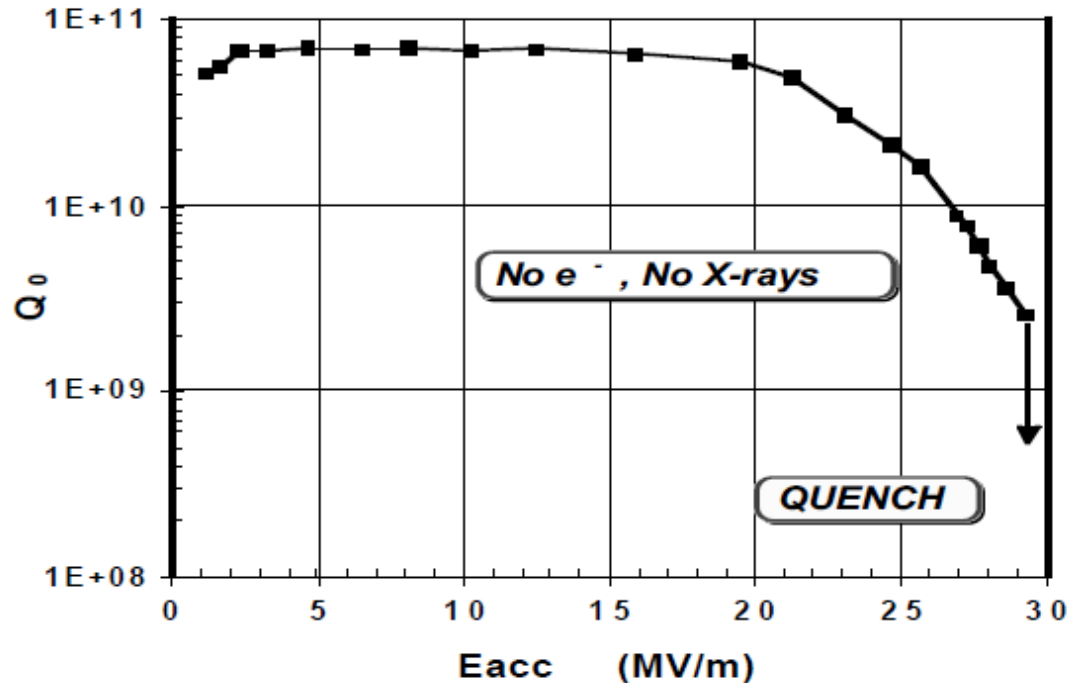
- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから(後半)
- **かなり前のことから**
- 最近の話題から
- まとめ



# 超伝導空洞の性能制限(1): その頃海外では、

HPR の効果により、 $> 25 \text{ MV/m}$  の高加速電界が達成されるようになったが、..

## Q- Slope without x-rays at $> 25 \text{ MV/m}$



No observation at KEK

## 1.3 GHz Nb 1-cell Cavity at Saclay [by H. Safa : SRF'97 at Padova]

Figure 8 - Example of anomalous losses obtained at high fields with no field emission. The  $Q$ -degradation is observed above 20 MV/m. (Cavity C105,  $F = 1300 \text{ MHz}$ ,  $T = 1.7 \text{ K}$ ).

# 超伝導空洞の性能制限(2): Q-Slope

[by E. Kako: SRF'97 at Padova]

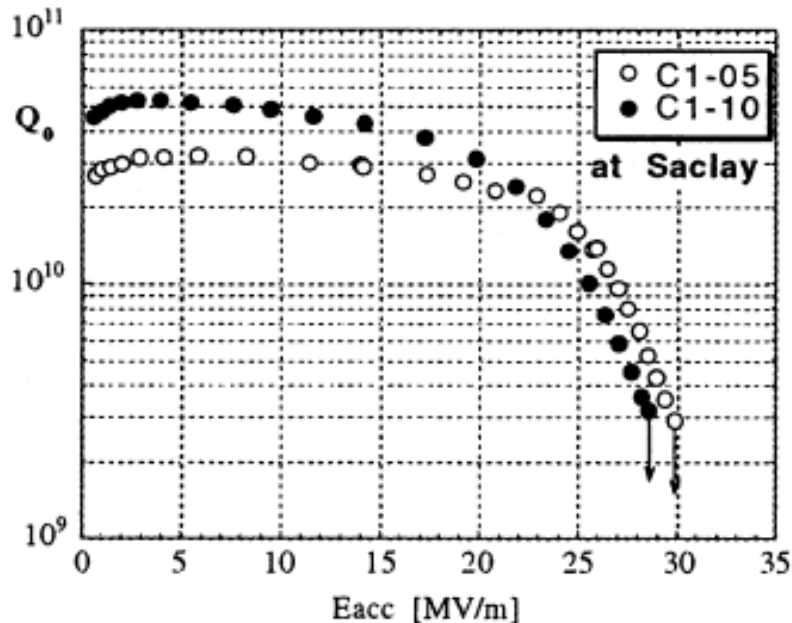


図 2. Saclayでの測定結果

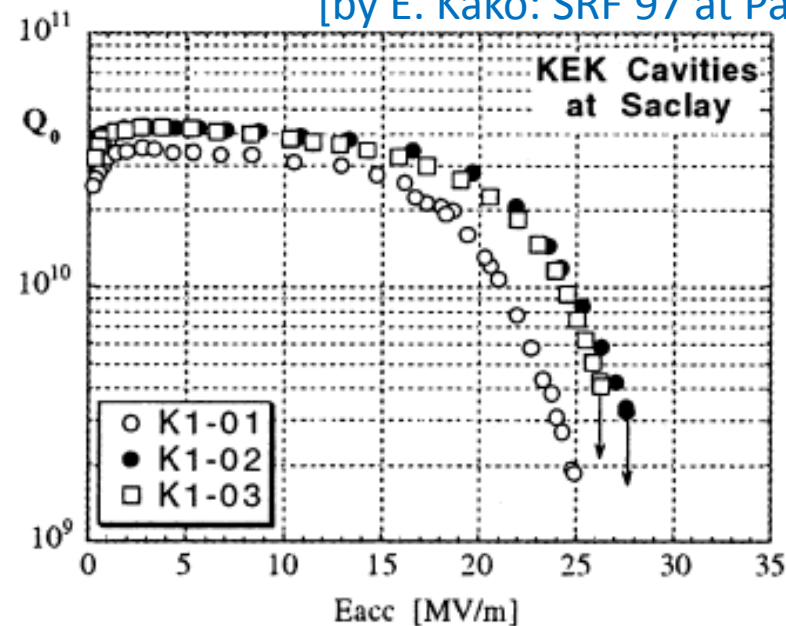


図 3. KEK空洞のSaclayでの測定結果

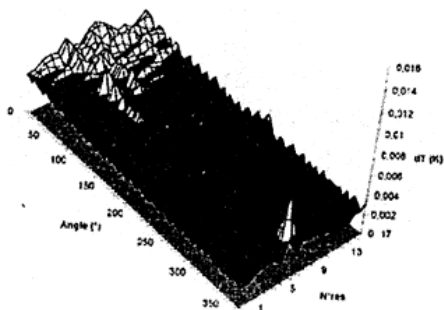


図 5. C1-10空洞の表面温度分布(E<sub>acc</sub>=29MV/m)

## Q-Slope without x-ray

再現性良く観測される。  
表面温度計測により、  
空洞表面全体での発熱が  
確認された。

(No Field Emission)

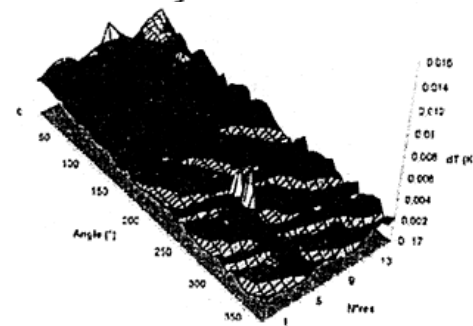


図 6. K1-02空洞の表面温度分布(E<sub>acc</sub>=28MV/m)

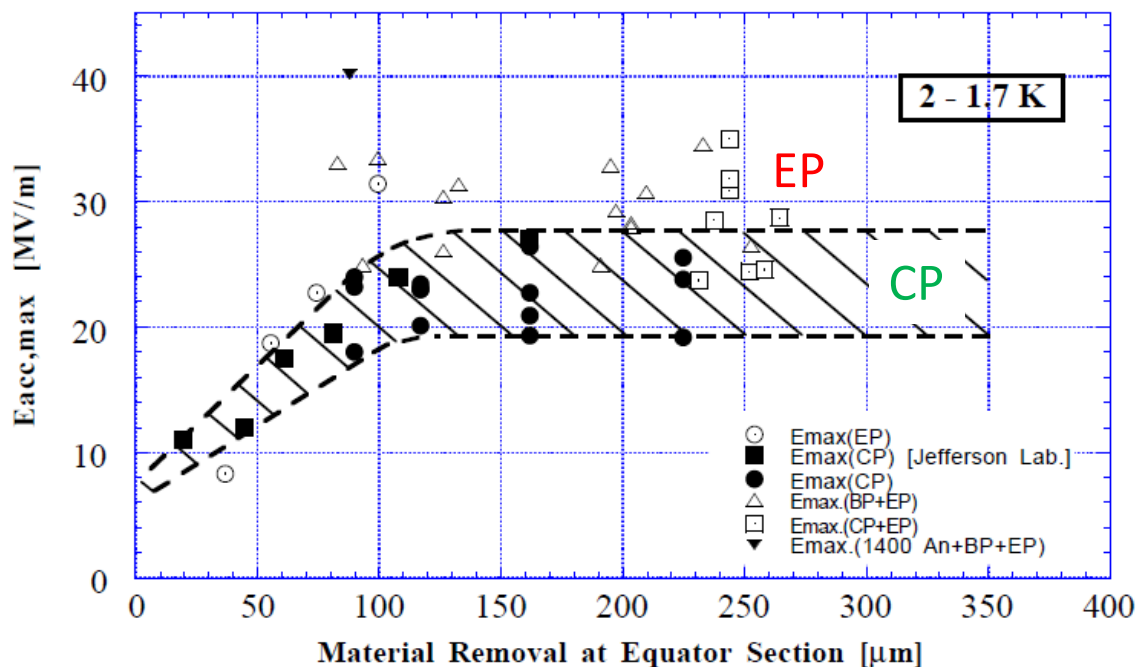
# 超伝導空洞の性能制限(3): CP/EP

Proceedings of the 1997 Workshop on RF Superconductivity, Abano Terme (Padova), Italy

[by K. Saito: SRF'97 at Padova]

## Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients

Kenji SAITO, Hitoshi INOUE, Eiji KAKO, Takeo FUJINO,  
Shuichi NOGUCHI, Masaaki ONO and Toshio SHISHIDO



EP > CP

Fig.10 Relationship between a material removal at equator section and the maximum field gradient.

# 超伝導空洞の性能制限(4): CP/EP

Saclayとの単セル空洞に関する研究:

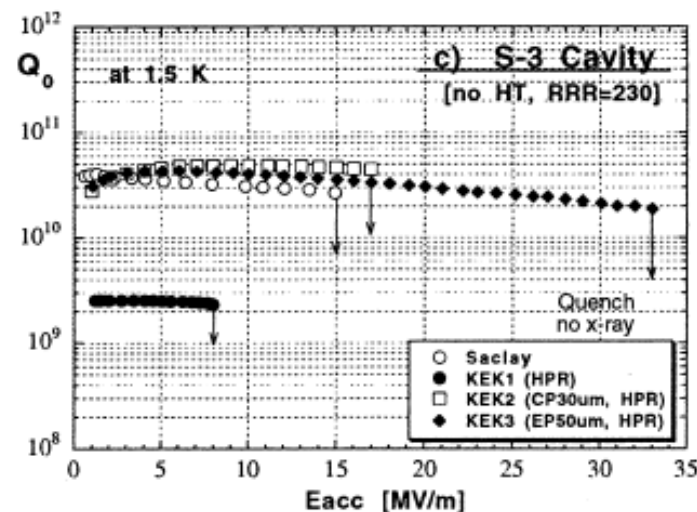
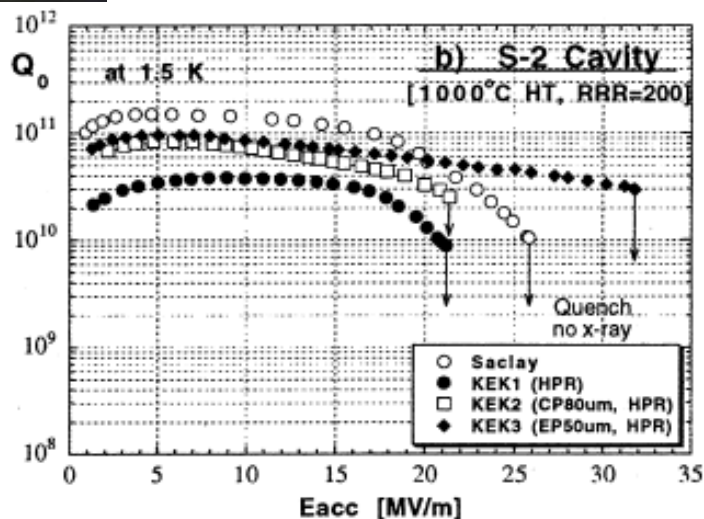
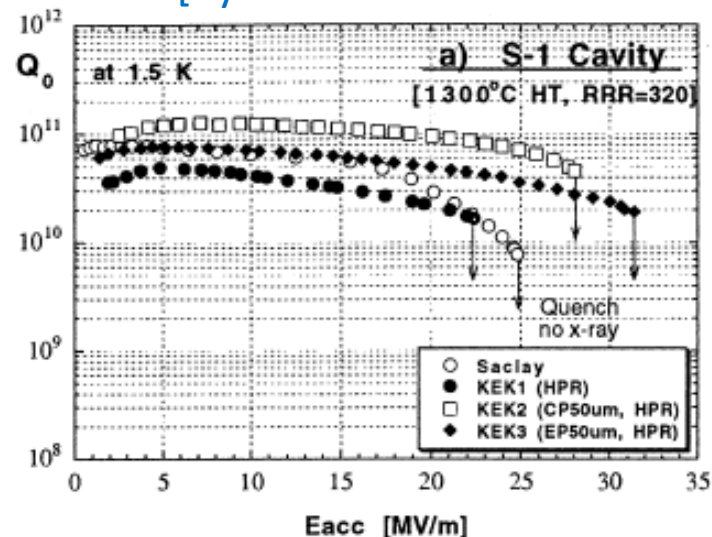


## Three Saclay Cavities

1. Saclay results
2. HPR (KEK)
3. CP+HPR (KEK)
4. EP+HPR (KEK)

1.3 GHz,  
1-cell Cavity  
from Saclay

[by E. Kako : SRF'99 at Santa Fe]

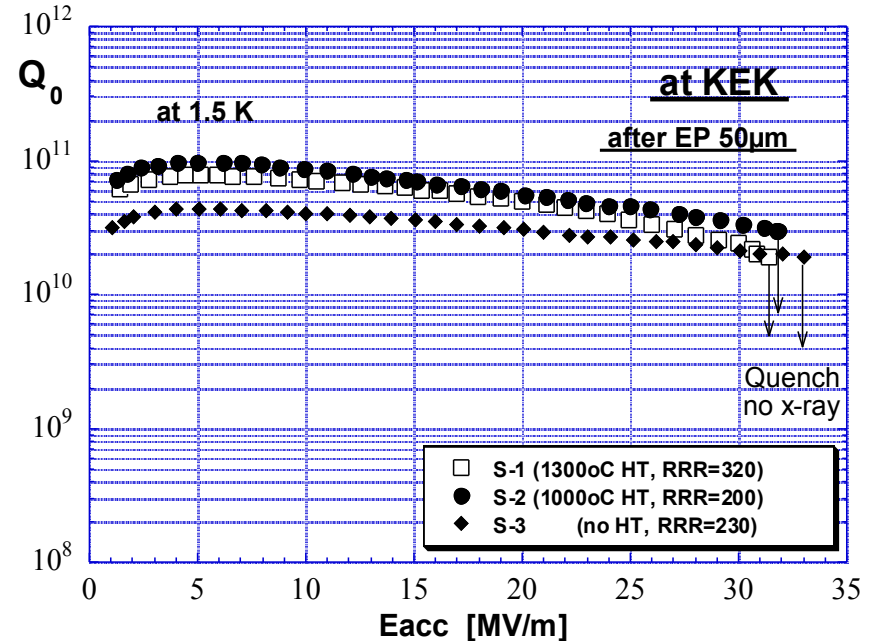
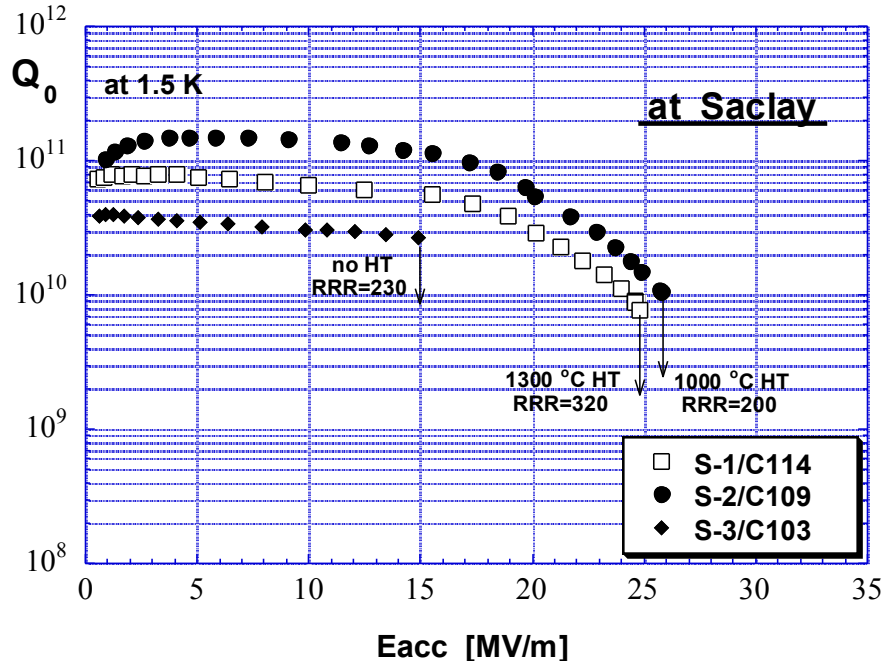


# 超伝導空洞の性能制限(5): CP/EP

Saclayとの単セル空洞に関する研究:

## EPによる空洞性能改善

[by E. Kako : SRF'99 at Santa Fe]



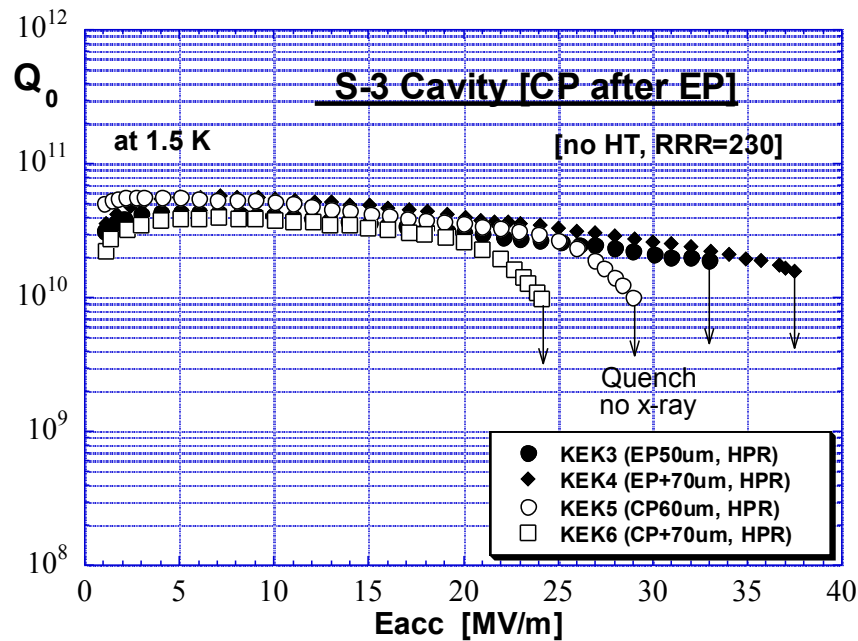
CP空洞 @ Saclay

EP @ KEK

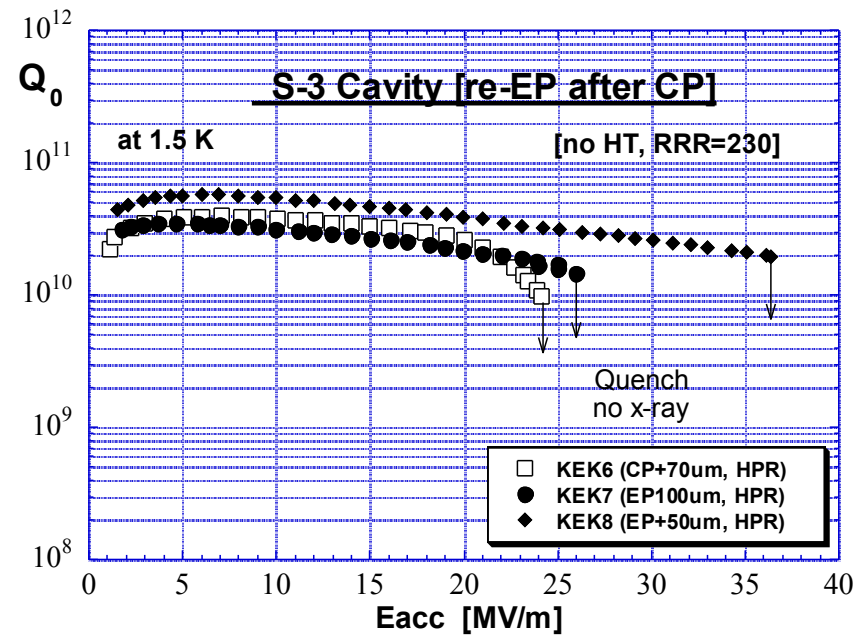
# 超伝導空洞の性能制限(6): CP/EP

Saclayとの単セル空洞に関する研究:

## EPの有効性の確認



EP後のCPによる性能低下

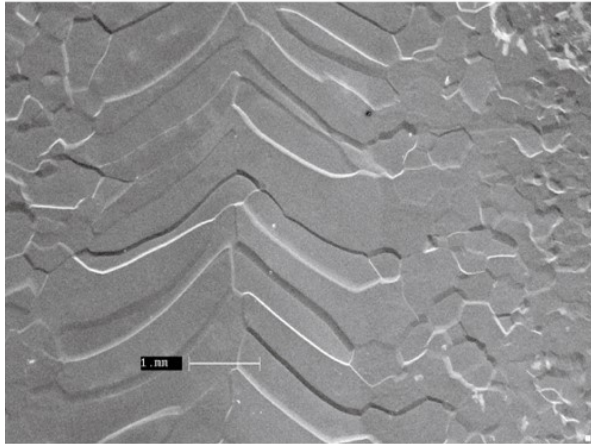


再EPによる性能回復

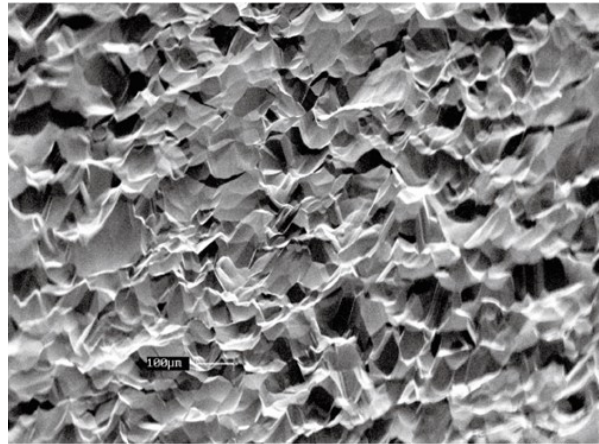
[by E. Kako : SRF'99 at Santa Fe]

# 超伝導空洞の性能制限(7): CP/EP

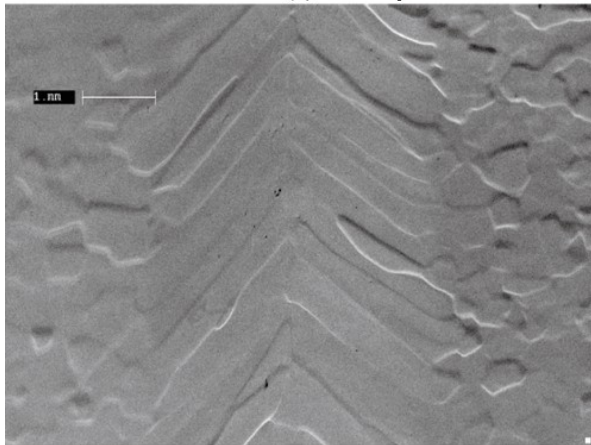
EBW Seam



(a) 117μm BCP

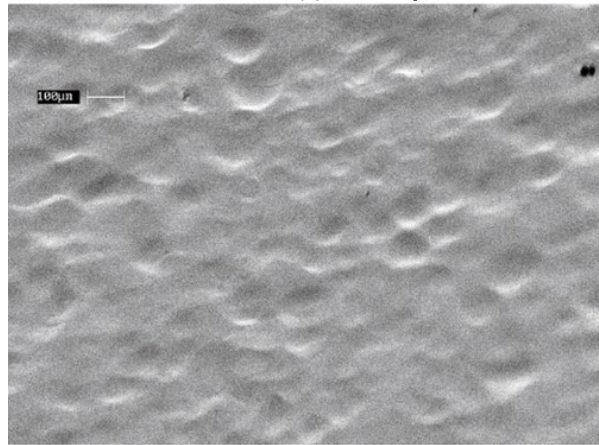


(a) 117μm BCP



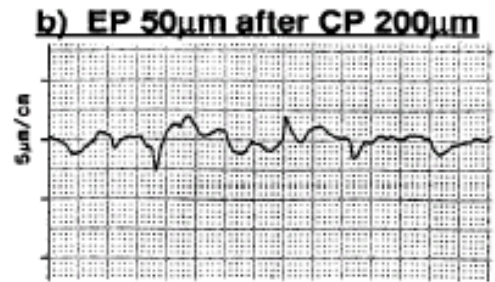
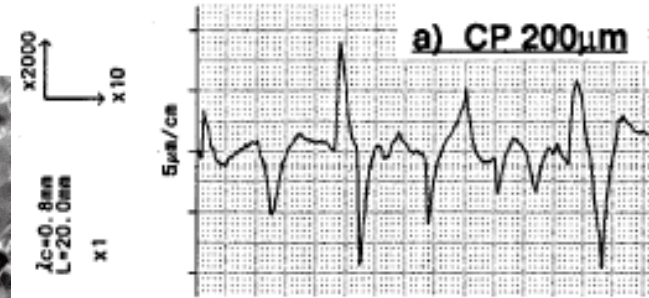
1 mm  
↔

(b) +90μm EP



100 μm  
↔

(b) +90μm EP

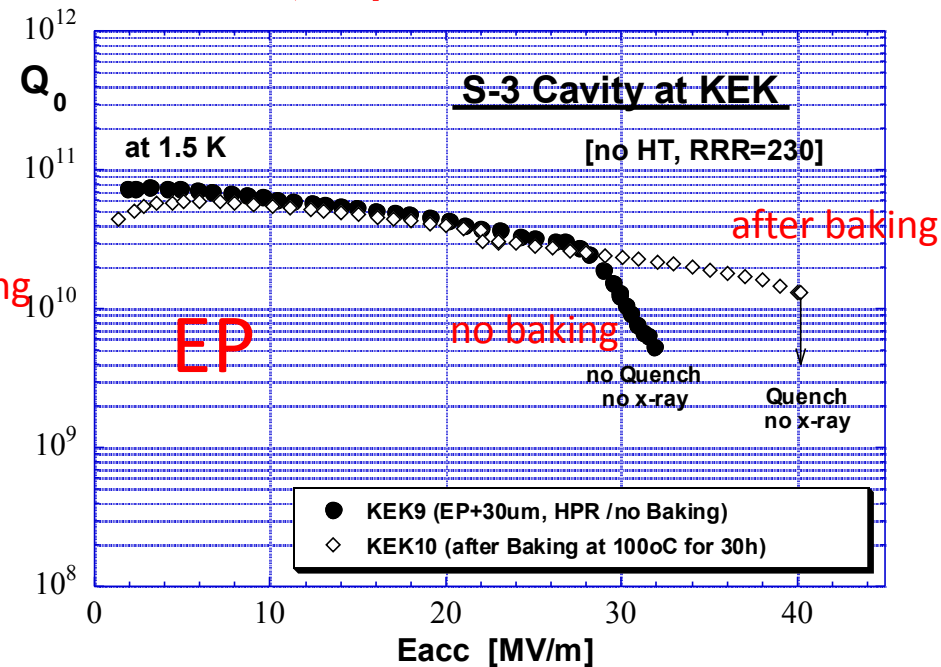
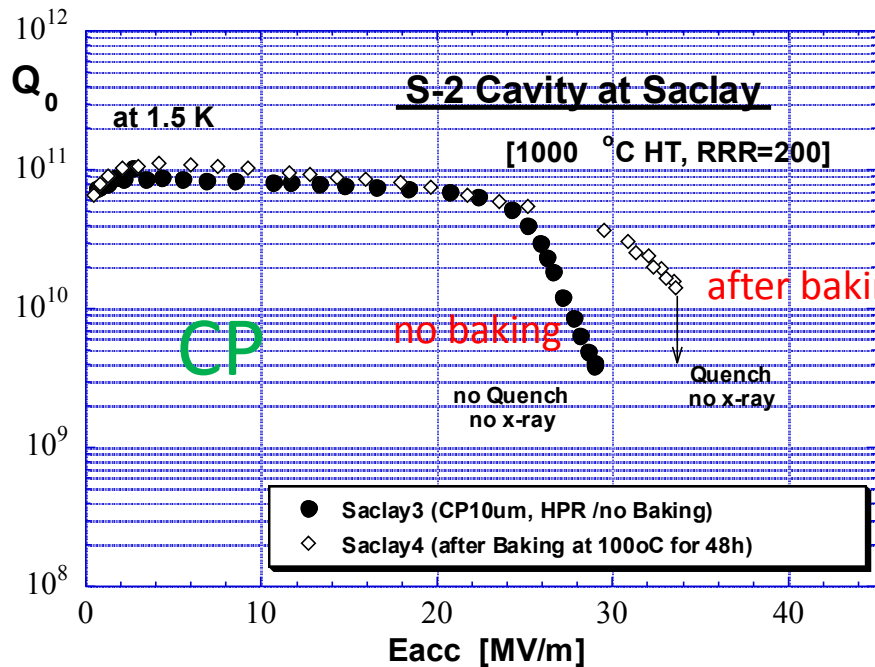


[by E. Kako : SRF'99 at Santa Fe]

# 超伝導空洞の性能制限(8): Q - Slope

Saclayとの単セル空洞に関する研究:

## 120°C ベーキングの効果



CP空洞 + 自然乾燥 @ Saclay

EP空洞 + 真空 & ベーキング @ KEK

真空乾燥を目的としていたが、意外な効果が存在していたことを確認。

>30 MV/m を達成するためには、EP + 120°C Baking が必要不可欠である。



# 超伝導空洞の性能制限(9) : Q - Slope

APPLIED PHYSICS LETTERS 89, 022507 (2006)



## Improved oxygen diffusion model to explain the effect of low-temperature baking on high field losses in niobium superconducting cavities

Gianluigi Ciovati<sup>a)</sup>

Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia 23606  
and Department of Physics, Old Dominion University, Norfolk, Virginia 23529

(Received 18 August 2005; accepted 1 June 2006; published online 13 July 2006)

By heating niobium in ultrahigh vacuum between 100 and 400 °C, the niobium pentoxide decomposes according to the following reduction sequence;<sup>3-5</sup>

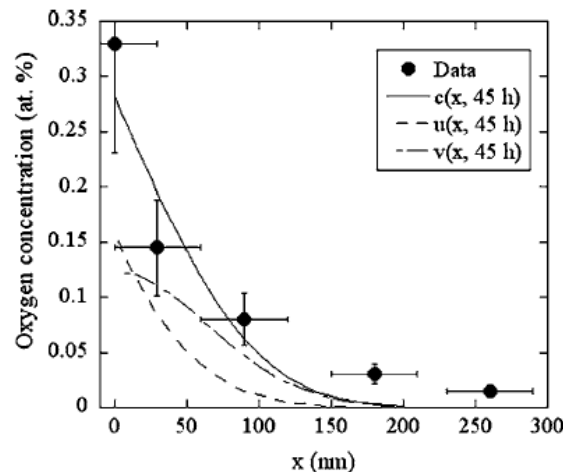
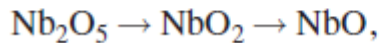


FIG. 2. Oxygen concentration as function of depth obtained from BCS surface resistance measurements (Ref. 2) and calculated with Eq. (10) with  $T=145$  °C and  $t=45$  h.

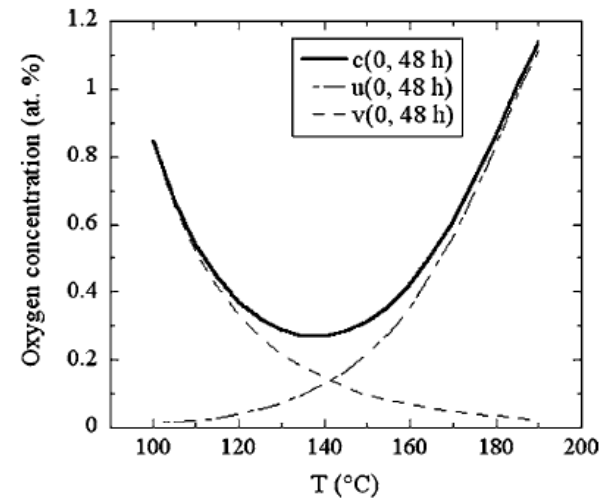


FIG. 3. Oxygen concentration at the niobium-oxide interface ( $x=0$ ) as function of baking temperature. The functions  $v$  and  $u$  represent the contribution due to the interstitial oxygen originally present and as a result of the oxide decomposition, respectively.

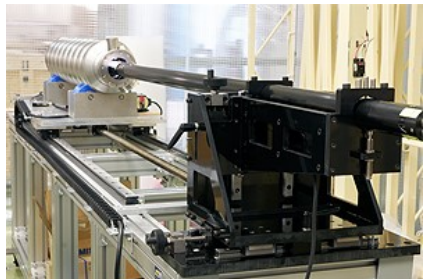
# 高加速電界達成のための表面処理 (1)

1. 電解研磨 (EP)
2. 750°C真空熱処理
3. 超純水高圧洗浄 (HPR)
4. クラス10クリーンルーム組立て
5. 120°Cベーキング
6. (電界放出電子の抑制効果のある組立法)

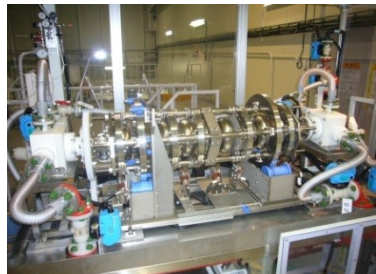
高加速電界を達成するために本質的に  
重要な表面処理工程として確立。

(トリスタンの空洞処理+HPR)

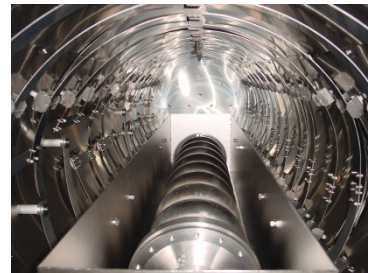
# 高加速電界達成のための表面処理 (2)



Inspection of inner surface



Pre-EP + EP-I (5+100  $\mu\text{m}$ )

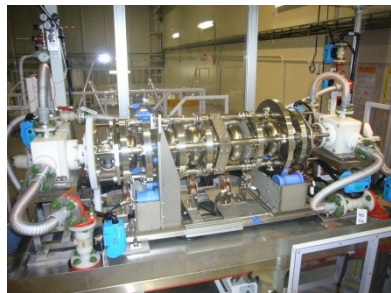


Anneal (750°C, 3h)



Pre-tuning (flatness,  $f_0$ )

EP II (5~20  $\mu\text{m}$ )



Hot bath rinsing with ultra-sonic



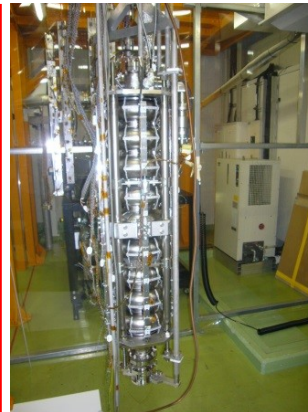
HPR



Assembly (Class 10)



Baking (120°C, 48h) (Class 1000)

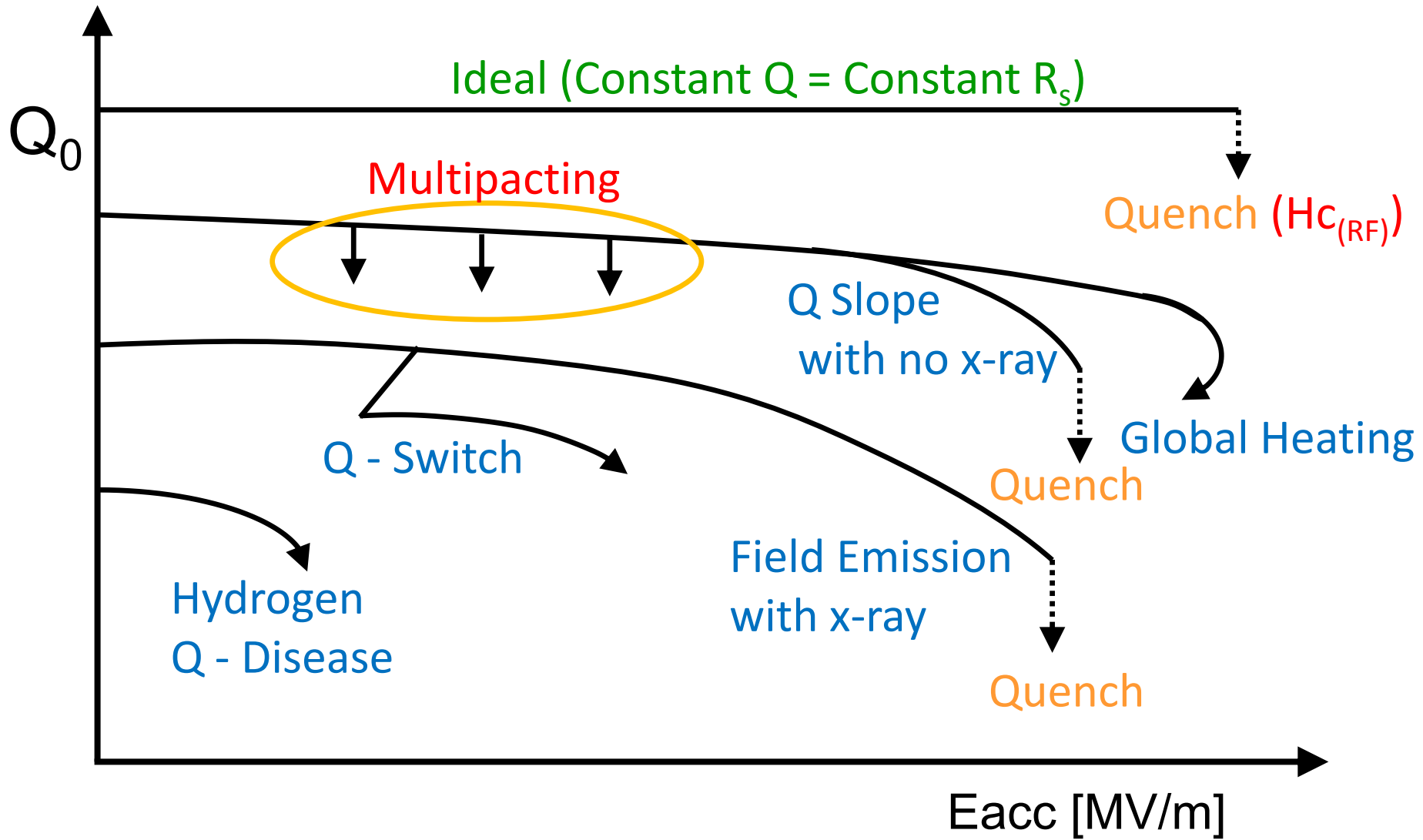


Hanging stand with T-map



Vertical Test

# 超伝導空洞の性能を制限する現象 (1)



# 超伝導空洞の性能を制限する現象 (2)

## RF Critical Magnetic field

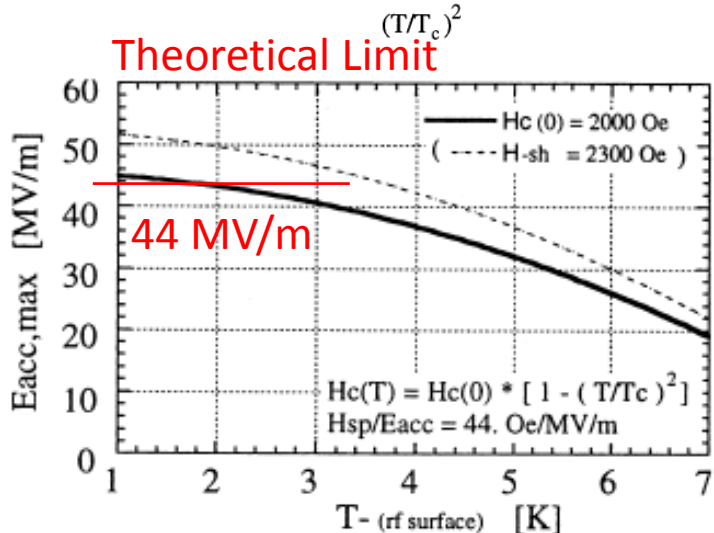
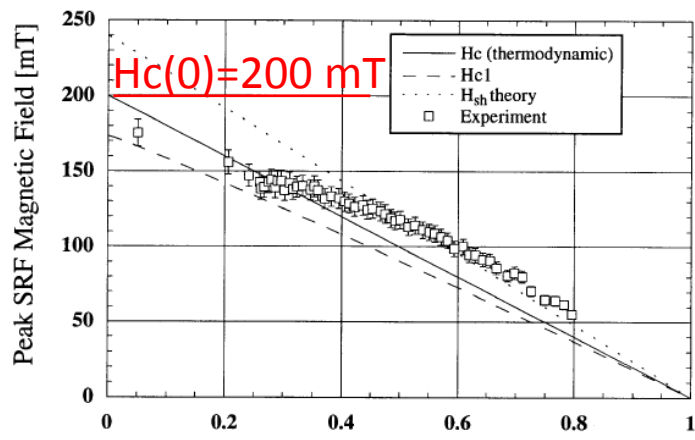
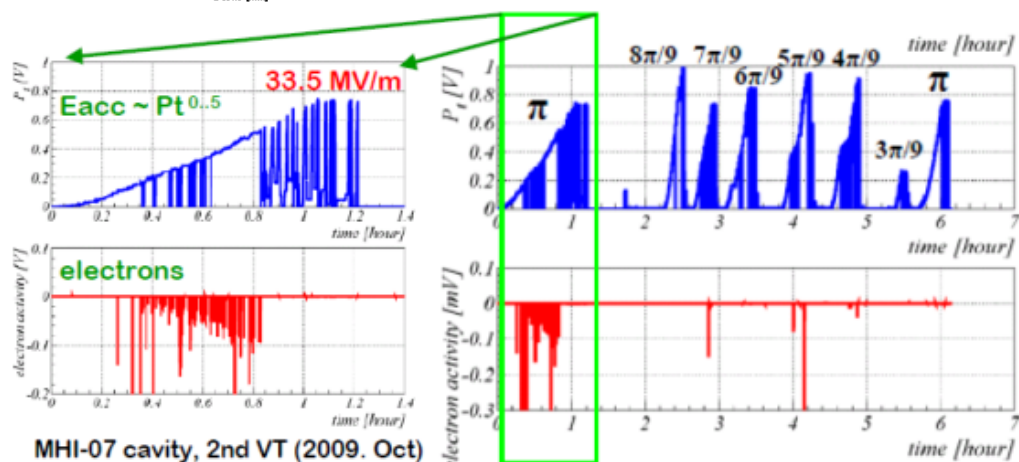
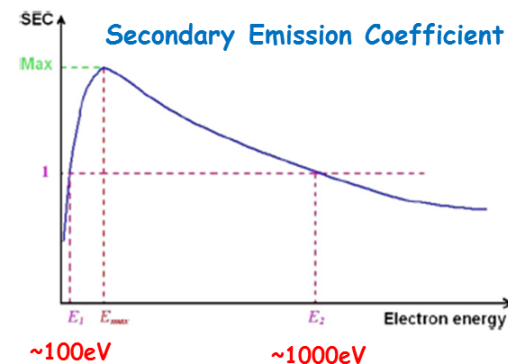
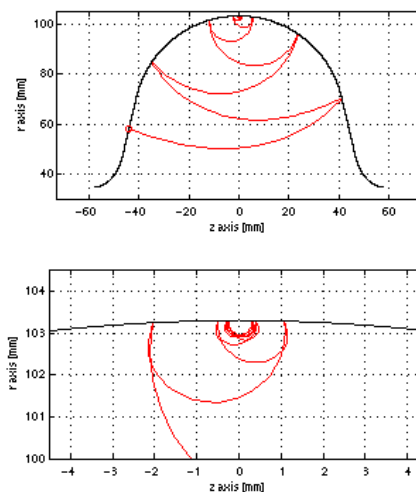


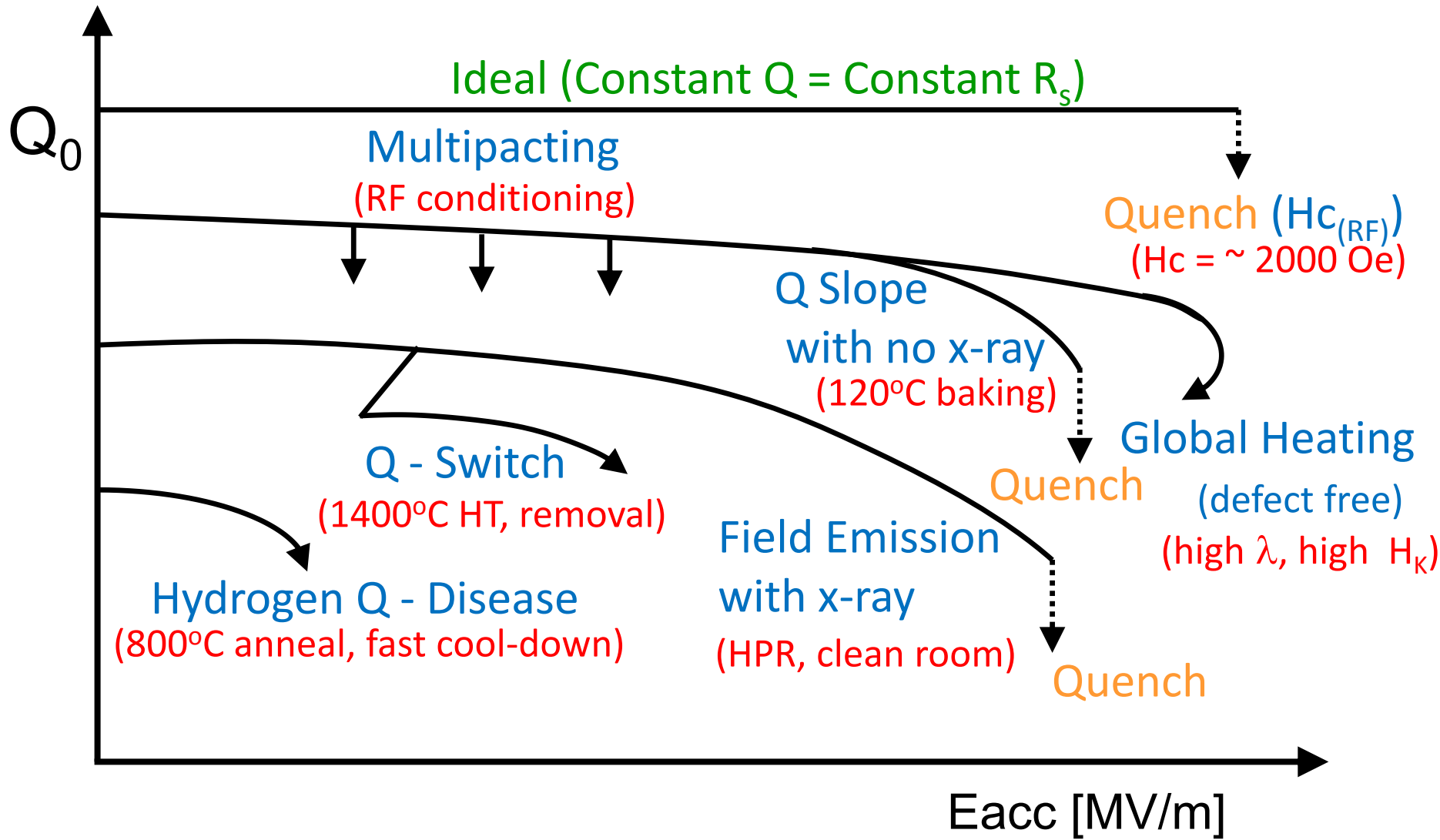
図1. 理論的 maximum 加速電界の温度依存性

## Multipacting

Multipacting is usually processed-out by RF conditioning.



# 超伝導空洞の性能を制限する現象 (3)



# DESYとの9セル空洞に関する研究(1)

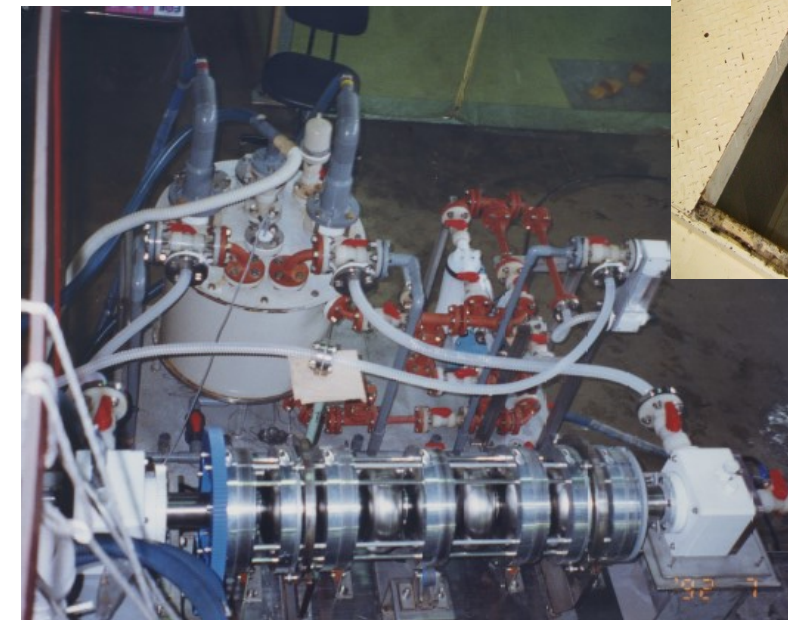


DESY 9-cell Cavity

9-cell EP



9-cell HPR



## KEKでEPを行なった 15台のDESY9セル空洞

(2000' - 2002')

	Cavity		Date of EP
1.	P-1	1400HT	1999, May ~
2.	A16	1400HT	2000, July 04
3.	Z49	1400HT	2000, Aug. 22
4.	AC63	800HT	2000, Oct. 24
5.	S35	1400HT	2001, Feb. 20
6.	Z50	1400HT	2001, Feb. 28
7.	AC70	800HT	2001, May 08
8.	AC71	800HT	2001, May 15
9.	AC70	800HT	2001, Nov.14
10.	AC74	800HT	2001, Nov.16
11.	AC72	1400HT	2001, Nov. 20
12.	AC73	1400HT	2002, Apr. 19
13.	AC76	800HT	2002, Apr. 23
14.	AC75	1400HT	2002, Apr. 25
15.	AC78	1400HT	2002, Apr. 30

**NOMURA PLATING**

株式会社野村鍍金

# DESYとの9セル空洞に関する研究(2)

Achievement of 35 MV/m in the superconducting nine-cell cavities for TESLA

[by L. Lilje, NIM-A (2004)]

NUCLEAR  
INSTRUMENTS  
& METHODS  
IN PHYSICS  
RESEARCH  
Section A

www.elsevier.com/locate/nima

L. Lilje<sup>a,\*</sup>, E. Kako<sup>b</sup>, D. Kostin<sup>a</sup>, A. Matheisen<sup>a</sup>, W.-D. Möller<sup>a</sup>, D. Proch<sup>a</sup>,  
D. Reschke<sup>a</sup>, K. Saito<sup>b</sup>, P. Schmüser<sup>c</sup>, S. Simrock<sup>a</sup>, T. Suzuki<sup>d</sup>, K. Twarowski<sup>a</sup>

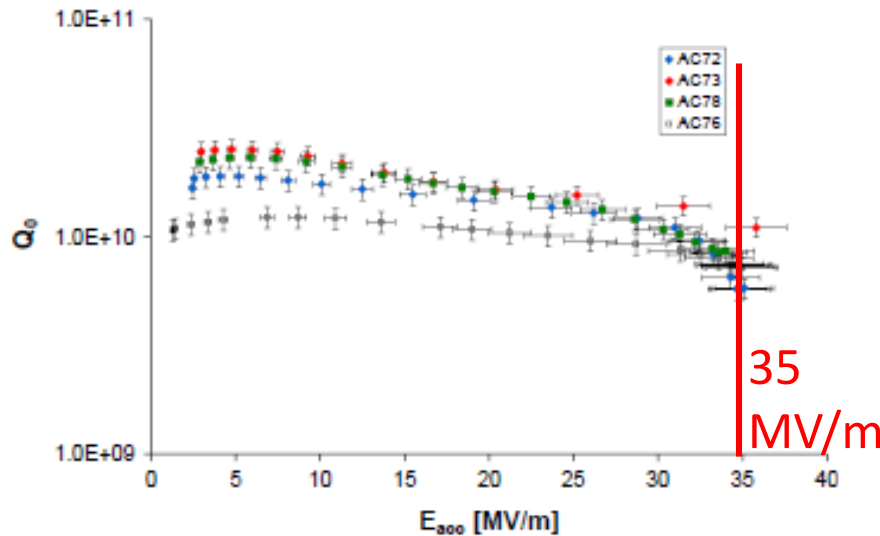


Fig. 2. Excitation curves of the 4 best electropolished nine-cell cavities after the EP at Nomura Plating. Plotted is the quality factor  $Q_0$  as a function of the accelerating field. The tests have been performed at 2 K.

35MV/m を達成した 4空洞  
EP @ KEK

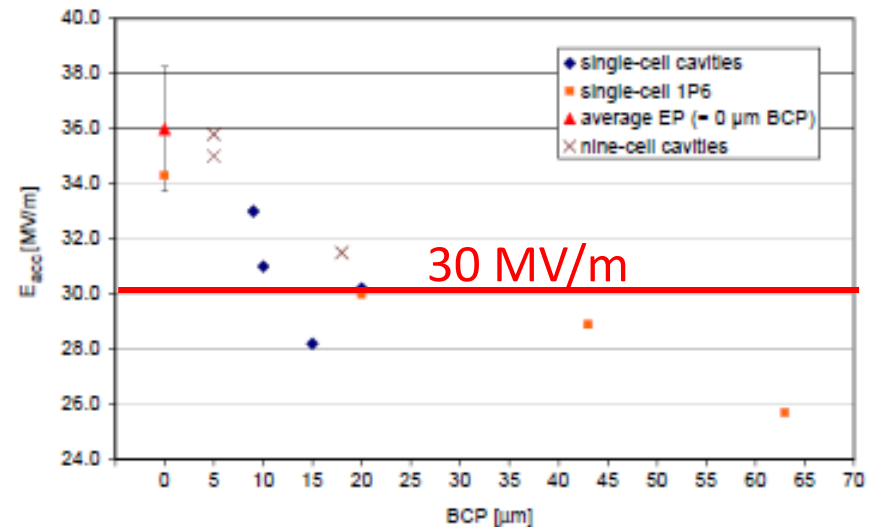


Fig. 7. Performance degradation of electropolished niobium cavities due to subsequent etching with a removal of 5–65  $\mu\text{m}$ .

EP後のCPによる性能低下  
(CP < 10  $\mu\text{m}$ , OK)



# DESYとの9セル空洞に関する研究(3)

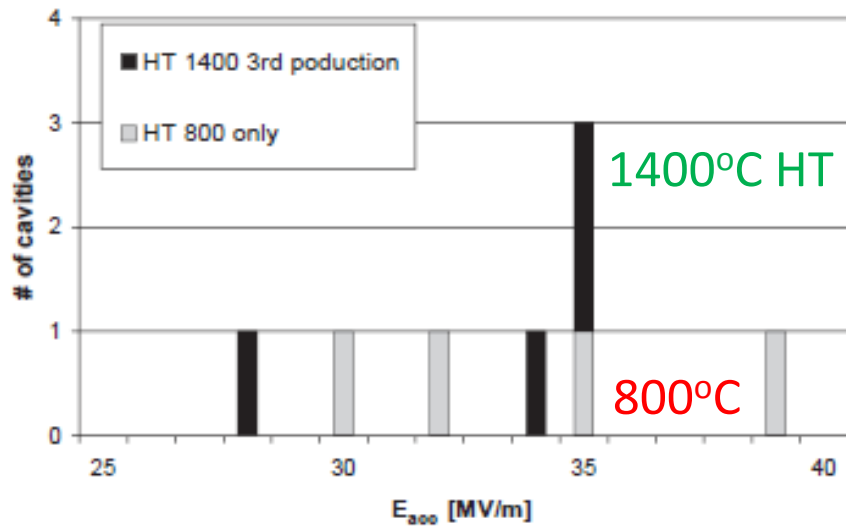


Fig. 4. Maximum accelerating field achieved in electropolished nine-cell cavities. Grey bars: cavities with 800°C annealing, black bars: cavities with 800°C and 1400°C annealings in sequence. This is an indication that the annealing at 1400°C can be avoided for EP cavities; see Section 3.4.2.

800°C HT と 1400°C HT での  
熱処理温度による比較

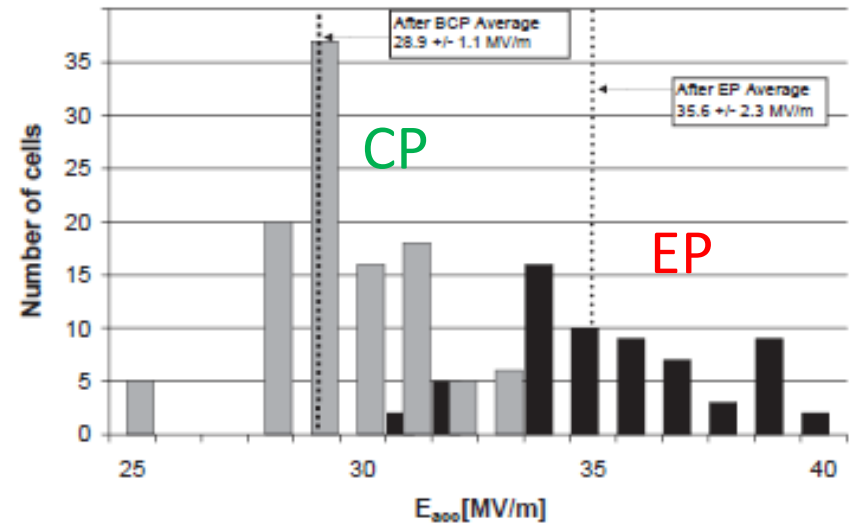


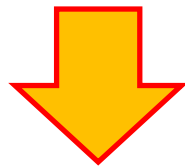
Fig. 5. Distribution of accelerating gradients in individual cells. The single-cell statistics derived from the coupled mode measurements are compared for chemically etched (grey) and electropolished (black) nine-cell cavities. The average maximum gradient is 28.9 MV/m for BCP-treated cavities and 35.6 MV/m for EP-treated cavities.

CP空洞とEP空洞での  
セル毎の到達加速電界の比較

# DESYとの9セル空洞に関する研究(4)

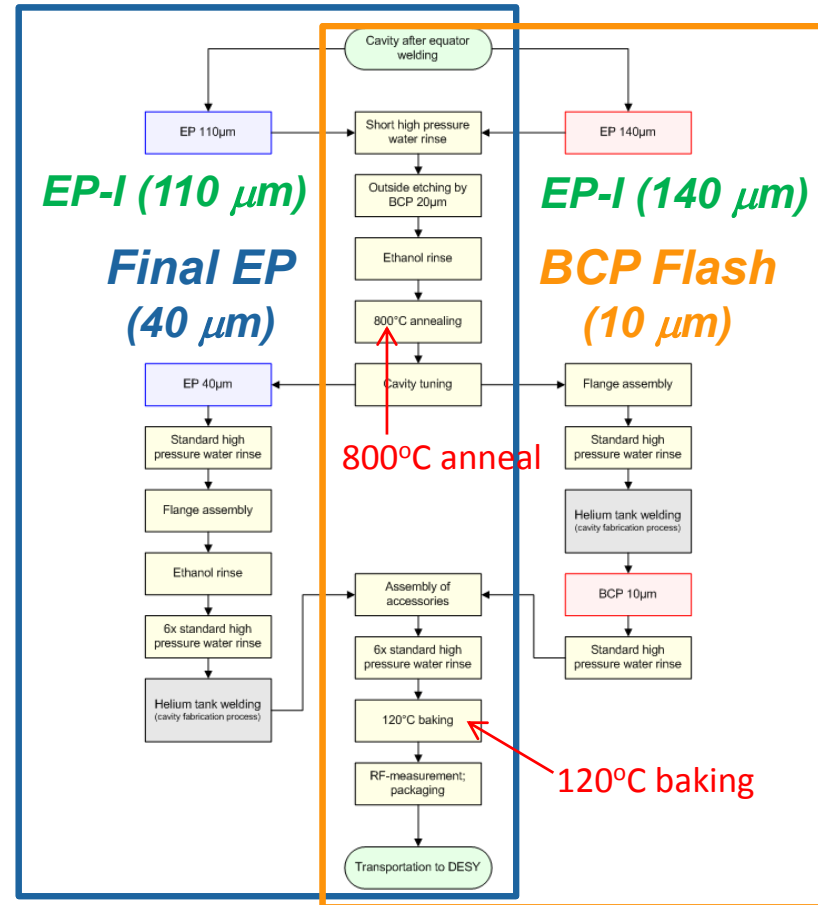
## 確認項目

- 高電界性能 by EP
- 性能低下 by CP
- $CP < 10\mu\text{m}$  はOK
- $1400^\circ\text{C}$  HTの不要
- EPの有効性



- Two schemes for the final surface treatment:

- E. Zanon: *BCP Flash*
- R.I.: *Final EP*

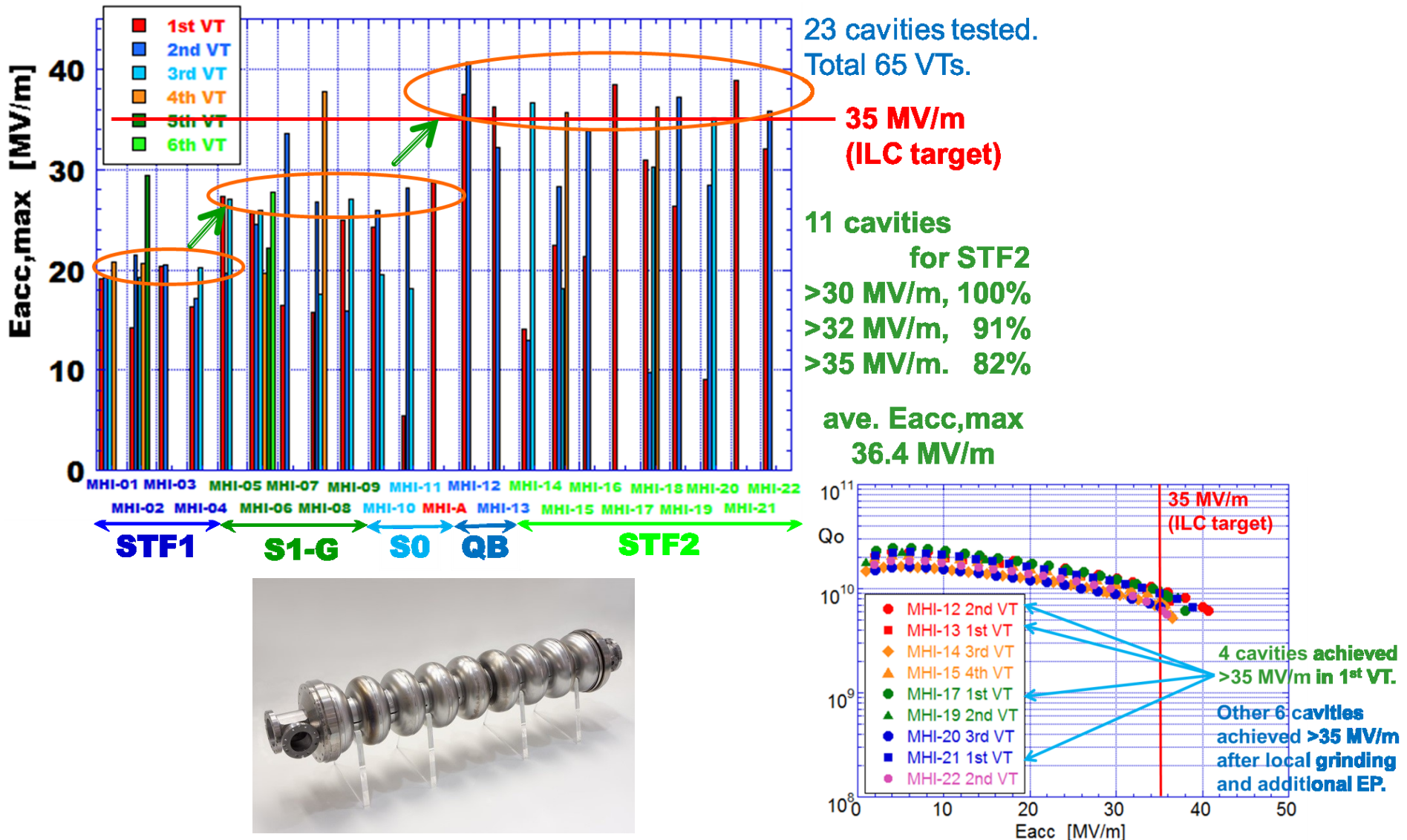


Construction of E-XFEL (DESY)

# International Technology Recommendation Panel (ITRP): 2004' Aug. 20



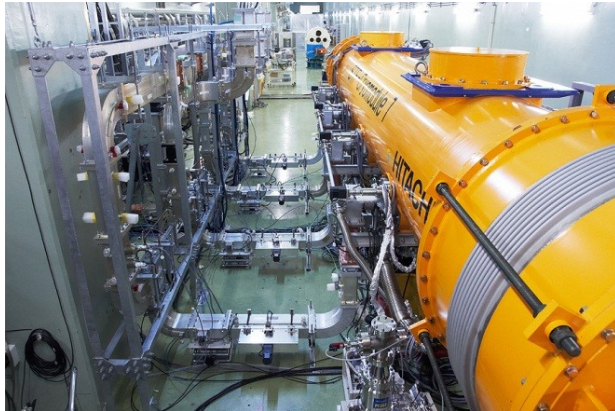
# STFにおける空洞性能評価 (2005-2015)



# STFにおけるクライオモジュール試験(2005-2015)

## STF Phase-1

Four 9-cell cavities (2008' )



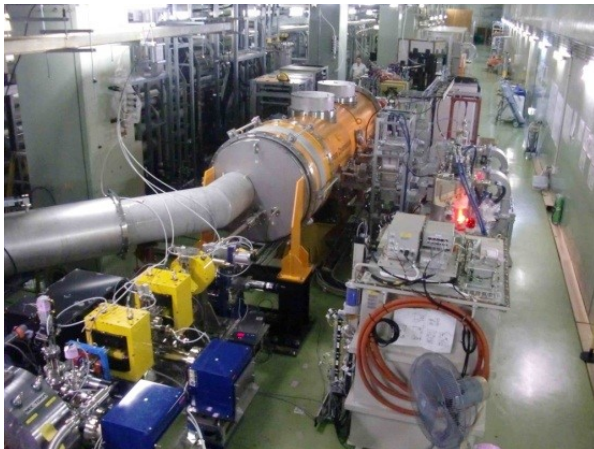
## S1-Global

(4+4) 9-cell cavities (2010' )



## STF2 - Capture Cryomodule

Two 9-cell cavities (2011' )



## STF2 - CM1+2a Cryomodule

Twelve 9-cell cavities (2015' )



# cERLの建設・ビーム運転 (2008-2015)

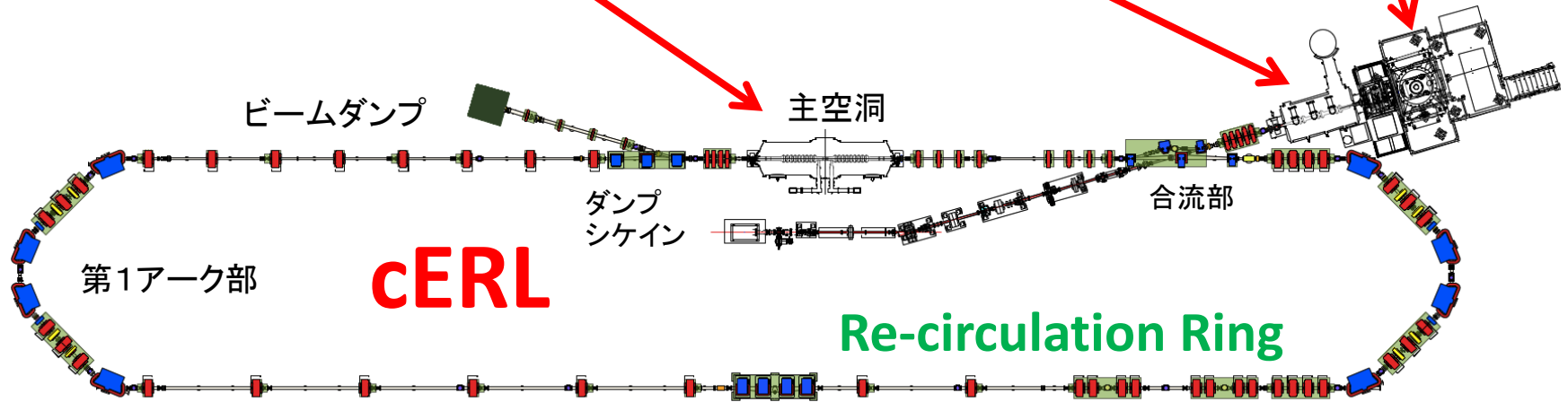
## Main-Linac Cryomodule



## Injector Cryomodule



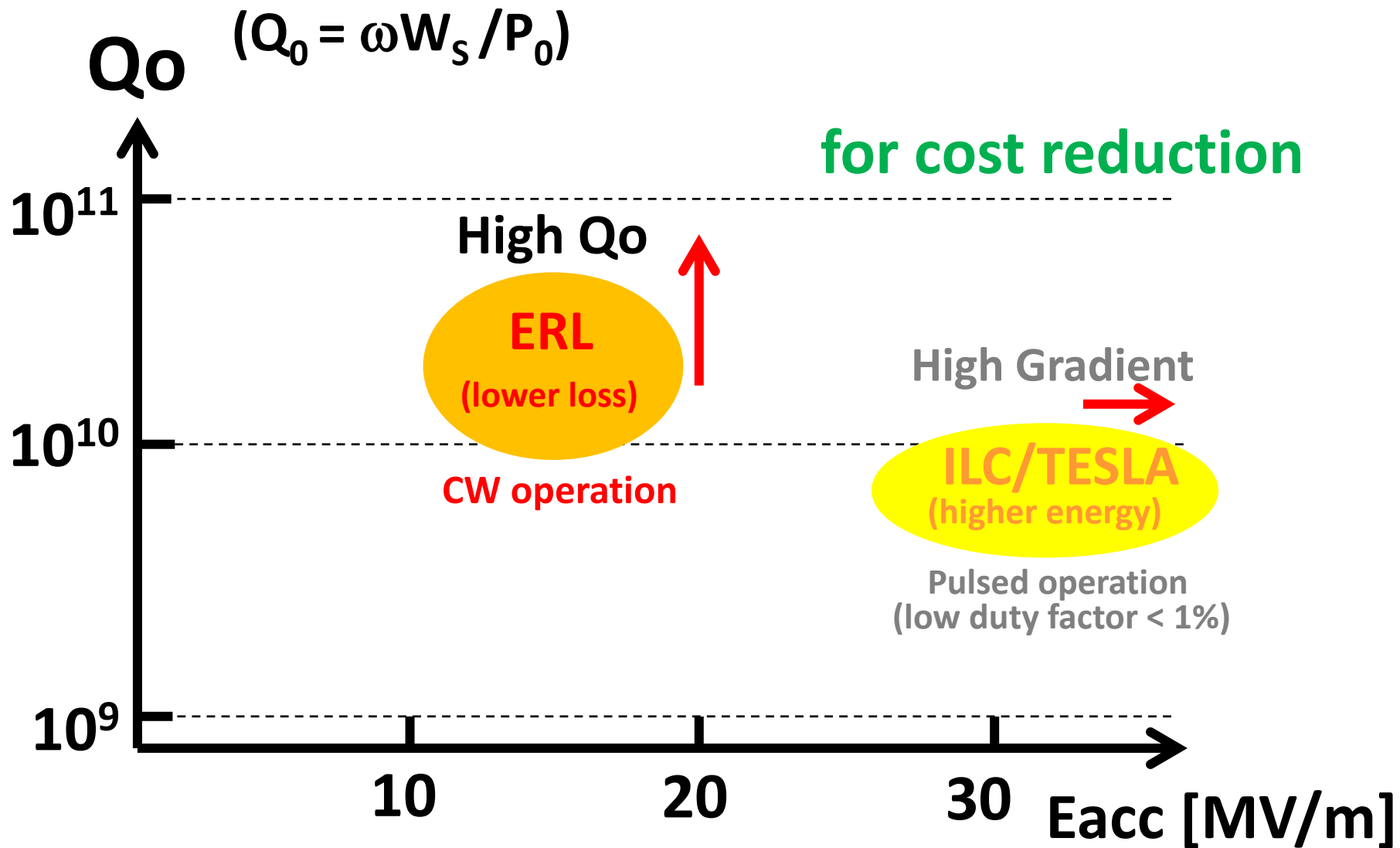
## 500kV DC-Gun



# 超伝導空洞技術－2

- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから(後半)
- かなり前のことから
- **最近の話題から**
- まとめ

# 最近の話題から(1)





## 最近の話題から(2)

---

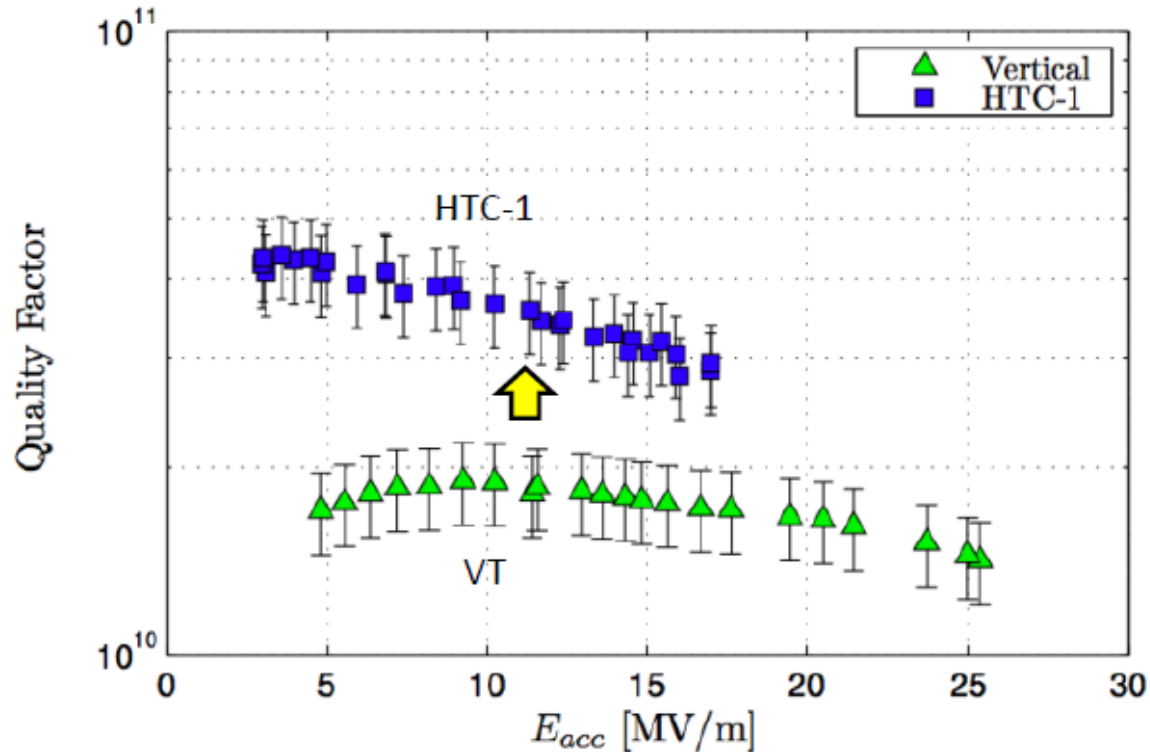
High-Q を目指した研究開発:

- Minimize a residual magnetic field
- Cool-down speed / Thermal current
- Nitrogen doping

# 最近の話題から(3)



## Flux control w/ mag. shielding



F. Furuta (Cornell)  
[ERL2015 at BNL]

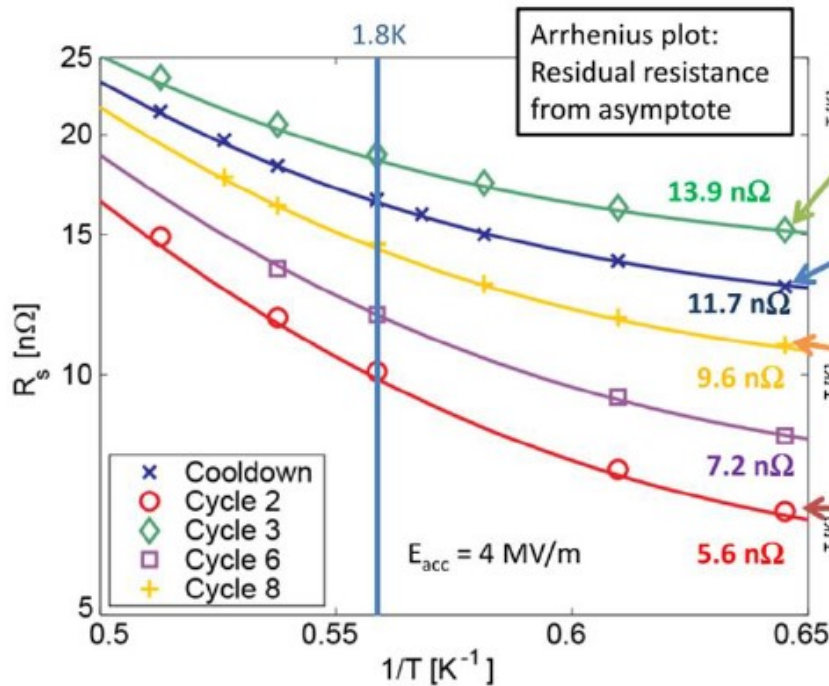
Cornell

HTC has much better mag. shielding than VT dewar.

$R_{res}$  was reduced from 11nOhm (VT) to 3.2nOhm (HTC-1)

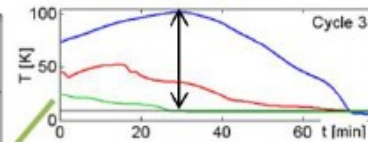
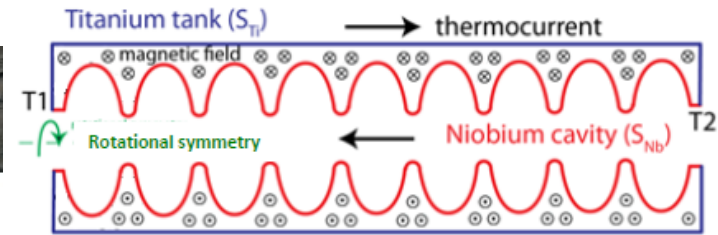
# 最近の話題から(4)

## R<sub>res</sub> vs. dT over cavity

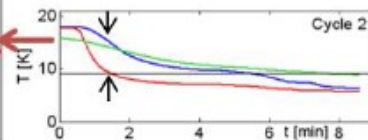
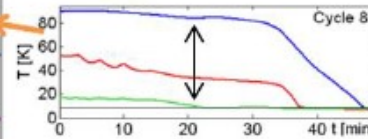


HZB

- Different Seebeck coefficients for Nb and Ti



Initial cooldown  
 $Q_0 = 1.6 \times 10^{10}$  @ 1.8 K



Oliver Kugeler,  
TTC high-Q working  
group 17 Feb 2014

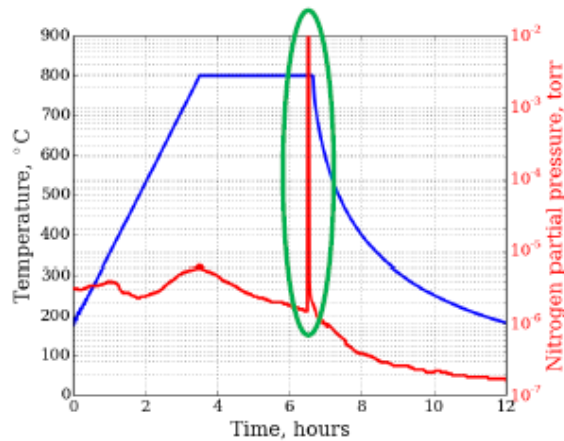
dT over cavity need to be minimized to avoid any increase of R<sub>res</sub>.

F. Furuta (Cornell)  
[ERL2015 at BNL]

# 最近の話題から(5)

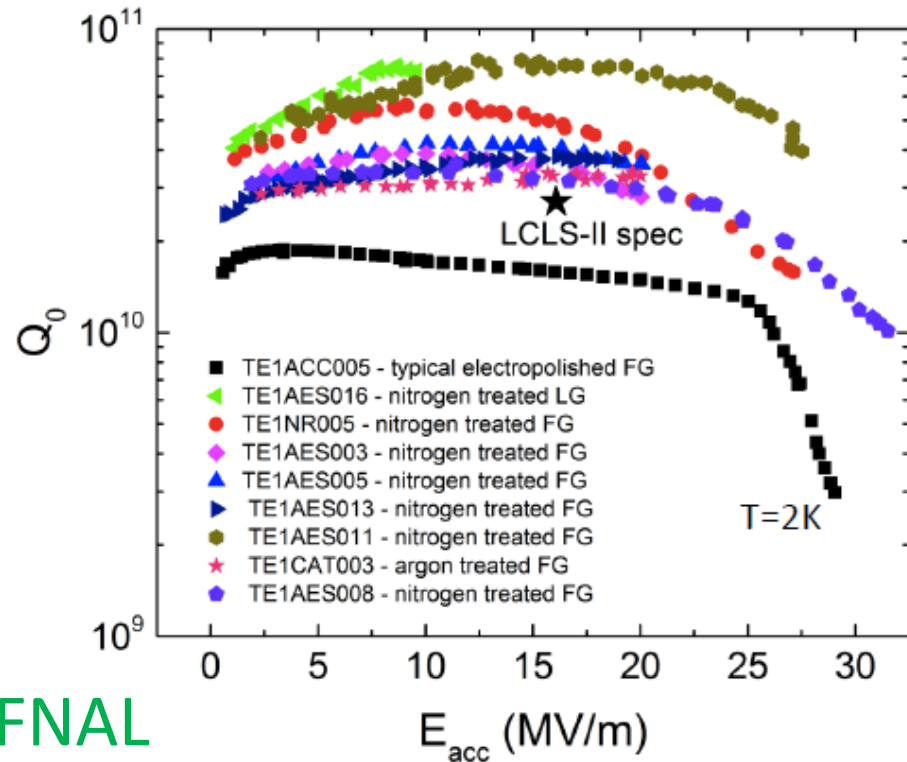


## Nitrogen doping



N2-dope parameter (FNAL)  
N2 2min. ~20mTorr / 6min. Vac.

FNAL



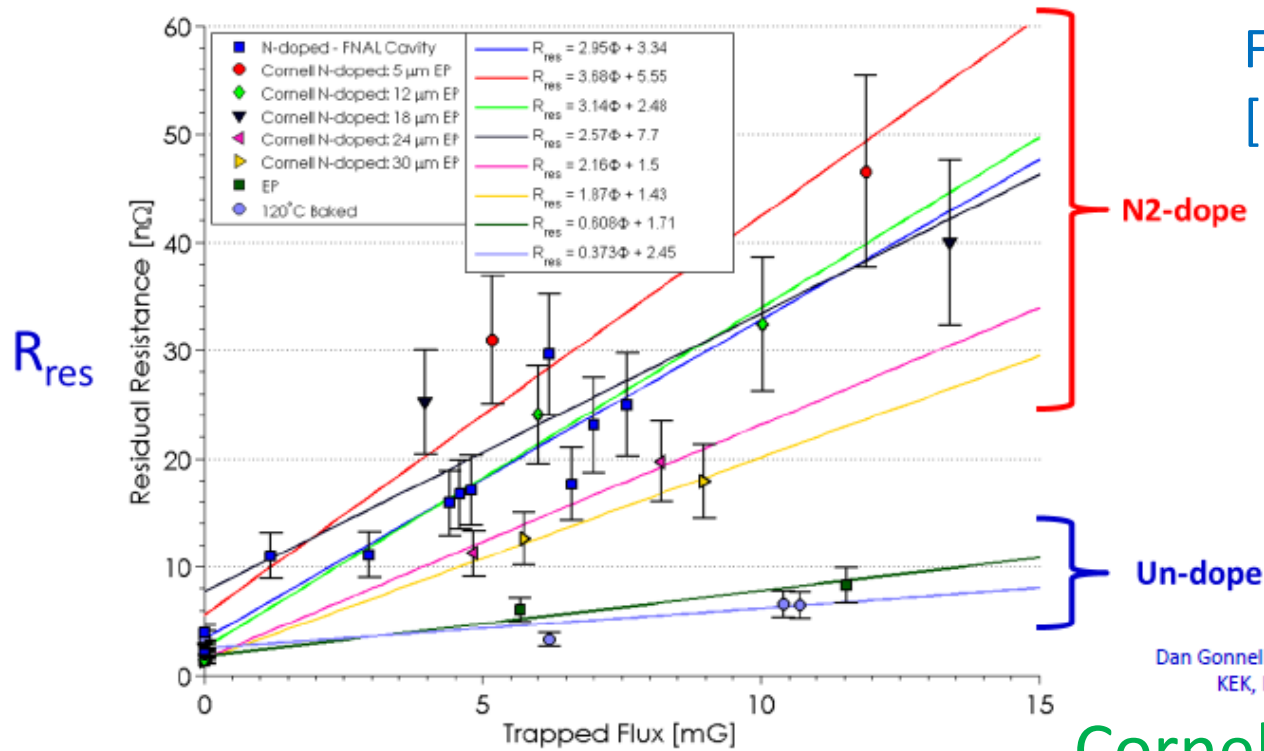
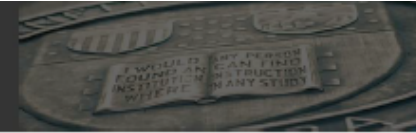
A. Grassellino et al, 2013 Supercond. Sci. Technol. **26**  
102001 (Rapid Communication) – selected for highlights of  
2013

F. Furuta (Cornell)  
[ERL2015 at BNL]

# 最近の話題から(6)



## Sensitivities of flux trapping



F. Furuta (Cornell)  
[ERL2015 at BNL]

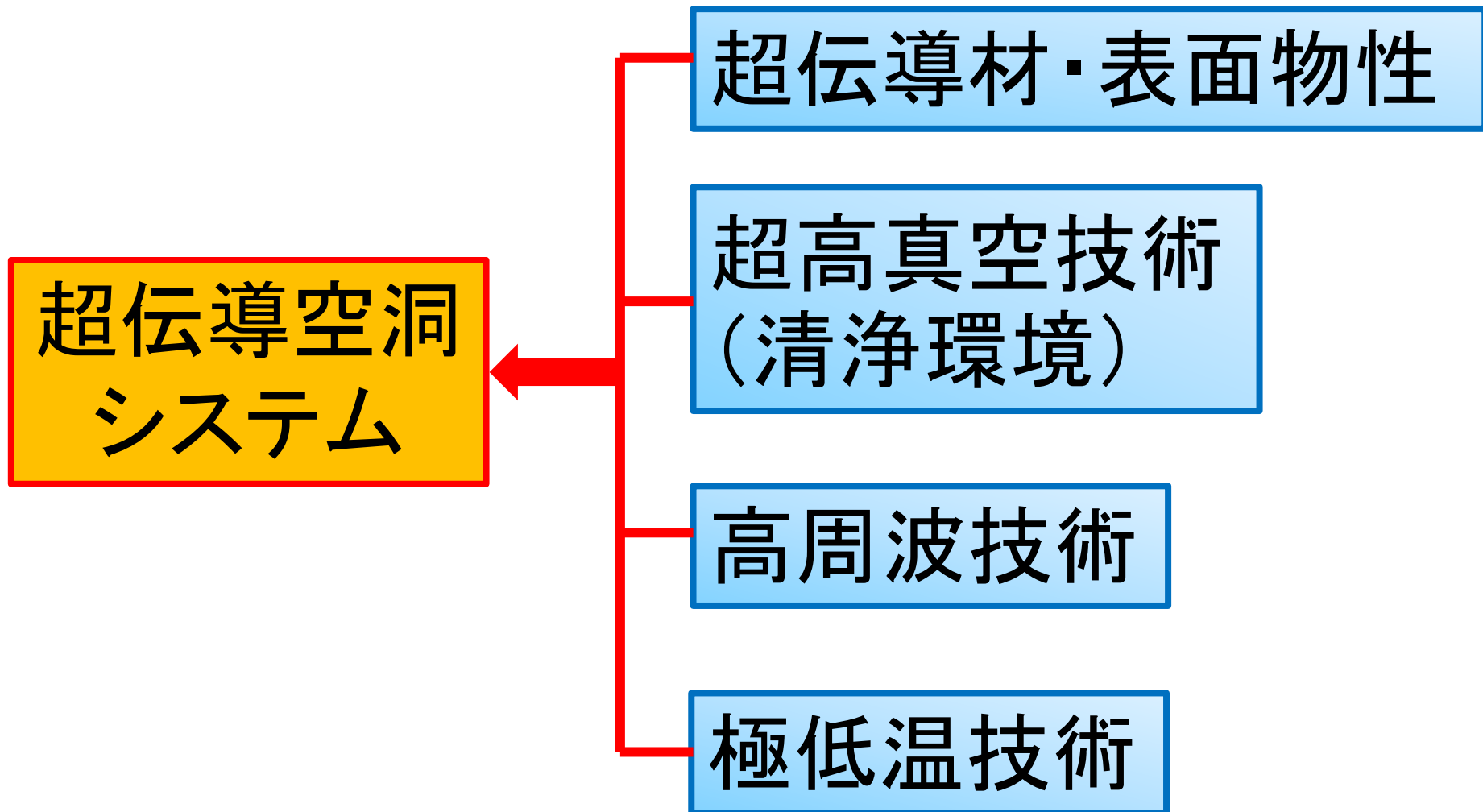
Dan Gonnella, TTC Meeting,  
KEK, December 2014

Trapped flux contributes stronger to  $R_{\text{res}}$  in N2-doped cavities than un-doped cavities.  $R_{\text{res}}$  in N-doped is sensitive on flux trapping.

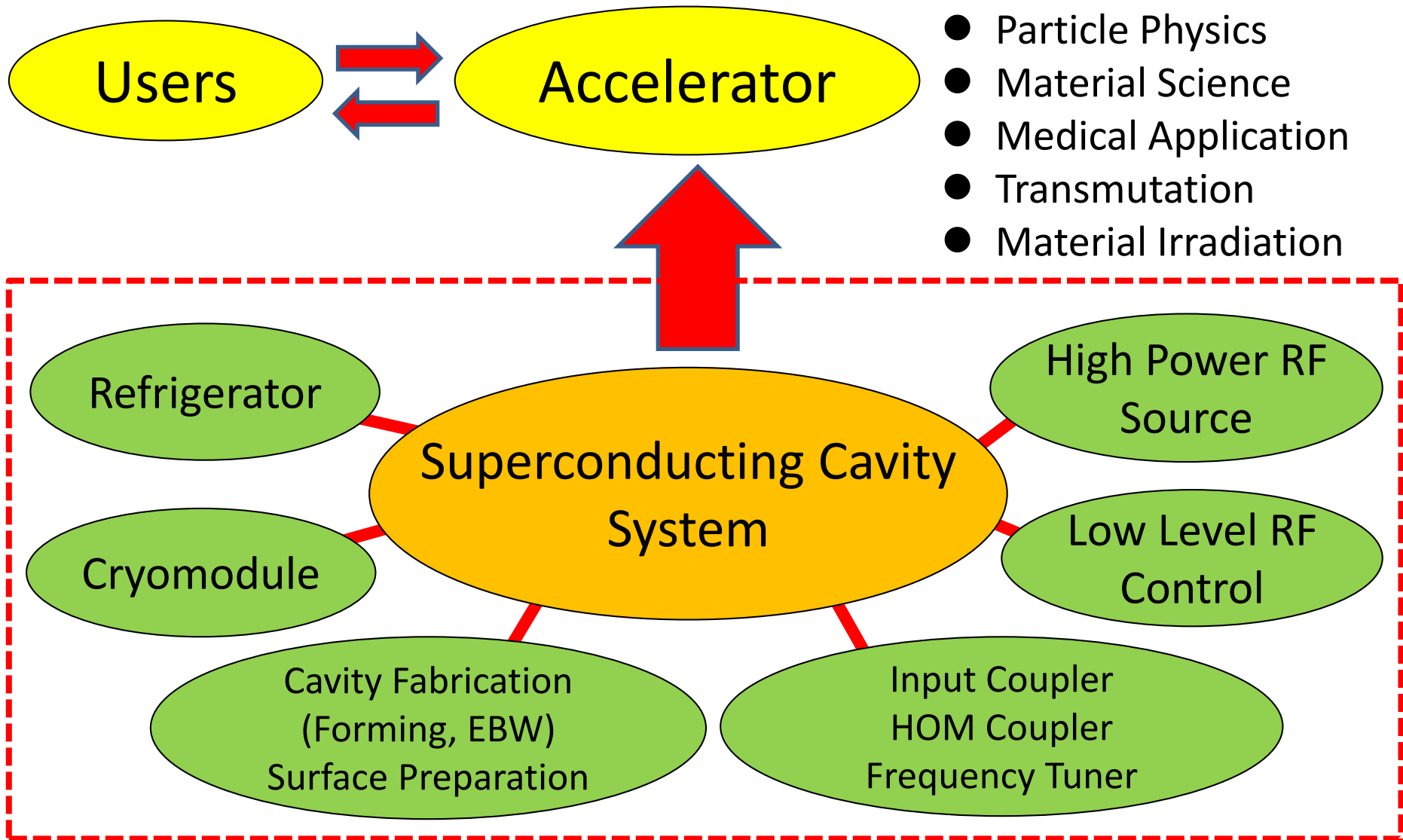
# 超伝導空洞技術－2

- はじめに
- まずは基本から
- ずっと昔のことから(後半)
- かなり前のことから
- 最近の話題から
- **まとめ**

# まとめ(1): 超伝導空洞技術について



# まとめ(2): 超伝導空洞技術について





## まとめ(3): 超伝導空洞技術について

- **超伝導加速器は、信頼性の高い機器の開発に重点を置いて展開し、その建設は段階的に進めることが重要である。**
- **超伝導空洞システムは、クライオモジュールを含めて、空洞本体と周辺機器がシステム全体として調和のとれた設計であることが本質的に重要である。**
- **超伝導空洞システムの開発は、長期間に渡って行われることを念頭に置いて、適切な研究開計画で行うべきである。**

# 最 後 に



超伝導空洞技術の発展を牽引し続けた  
野口 修一 氏 と 齊藤 健治 氏



今後の超伝導空洞技術のいっそうの発展を担う、  
超伝導空洞グループの若手メンバーに、

この場をお借りして、深く感謝の意を表します。

ULTRA HIGH PURITY RARE METAL  
**TOKYO DENKAI**

**MITSUBISHI**  
HEAVY INDUSTRIES, LTD.

Our Technologies, Your Tomorrow

**NOMURA PLATING**

株式会社野村鍍金

---

ご清聴、どうもありがとうございました。

終