

KEKにおけるILC用超伝導加速空洞の量産化に向けた研究 R&D toward the mass-production of ILC SRF cavity at KEK

講演番号: FROL04

T. Saeki ^{#A)}, V. Chouhan ^{F)}, F. Furuta ^{D)}, H. Hayano ^{A)}, Y. Ida ^{F)}, K. Ishimi ^{F)}, Y. Iwashita ^{B)},
S. Kato ^{A)}, N. Kawabata ^{E)}, K. Miyajima ^{E)}, H. Monjushiro ^{A)}, K. Nii ^{F)}, K. Nohara ^{E)},
M. Sawabe ^{A)}, M. Shinohara ^{E)}, J. Taguchi ^{G)}, T. Yamaguchi ^{F)}, M. Yamanaka ^{A)},
and F. Yasuda ^{C)}

A) KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

B) Kyoto ICR, The university of Kyoto, Uji, Kyoto, Japan

C) Department of Physics, Faculty of Science & Graduate School of Science,
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo, Japan

D) Cornell University, Ithaca, New York, USA

E) Shinohara Press Service Co. Ltd., Funabashi, Chiba, Japan

F) Marui Galvanizing Co. Ltd., Himeji, Hyogo / Kashiwa, Chiba, Japan

G) Nomura Plating Co. Ltd. Nishi-Yodogawa, Osaka, Japan

第12回 日本加速器学会

5 - 7 August 2015 , Tsuruga, JAPAN

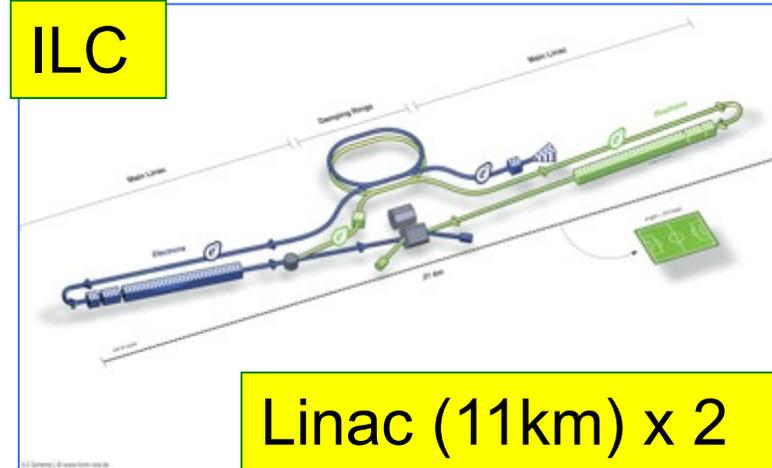
Contents

- ILCにおける空洞の量産について.
- 電子ビーム溶接機におけるダンベルローダー、9セル空洞ローダーの開発.
- 9-セル空洞ニオブ部品の製造: 先進深絞り、鍛造、ファイブランキング複合等.
- 9セル空洞の内面処理: 縦型電解研磨の研究(単セル空洞、9セル空洞、クーポン用の単セル空洞)、コーネル大学との共同研究、佛酸を使わない電解研磨処理の研究.
- ILCのための空洞量産工場のシミュレーション研究.
- まとめ

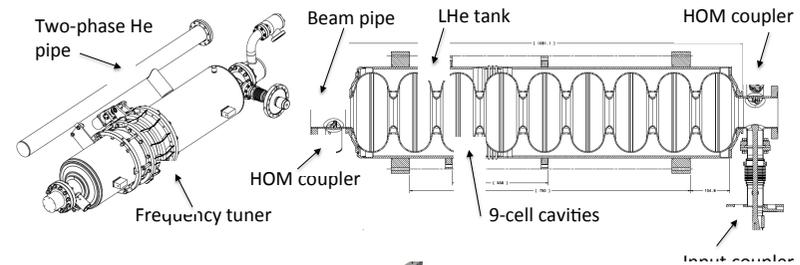
ILCに要求される超伝導空洞の量産

Parameters	Value
C.M. Energy	500 GeV
Peak luminosity	$1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Beam Rep. rate	5 Hz
Pulse duration	0.73 ms
Average current	5.8 mA (in pulse)
Av. field gradient	31.5 MV/m +/-20% $Q_0 = 1E10$
# 9-cell cavity	16,024 (x 1.1)
# cryomodule	1,855
# Klystron	~400

ILC



Linac (11km) x 2



High quality



16024 x 1.1(歩留まり = 90%を仮定)
~ 17600 本の空洞生産が必要

KEKにおける空洞製造施設(Cavity Fabrication Facility / CFF)

FY2011にILCの超伝導空洞の量産製造の研究のためにCFFを建設

全ての機器が class-100,000 クリーンルーム内に集約されていることがQAに重要.

電子ビーム溶接(EBW)機



クリーンルーム 19m x 14m x 5m (Height)
Class-100,000 / ISO 8 (仕様)



プレス機



化学研磨

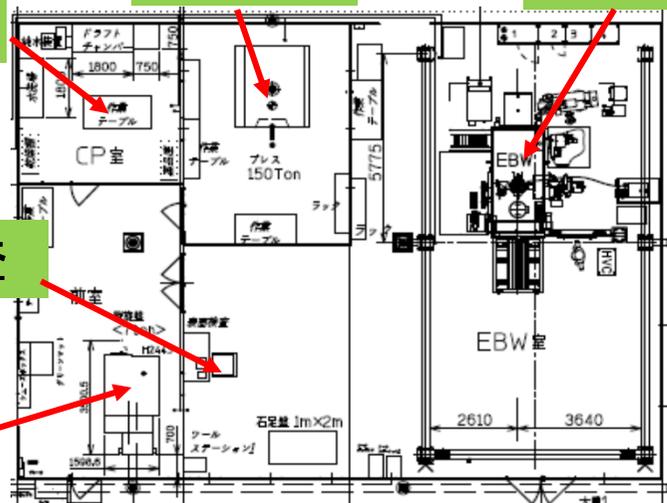


縦型旋盤

表面検査

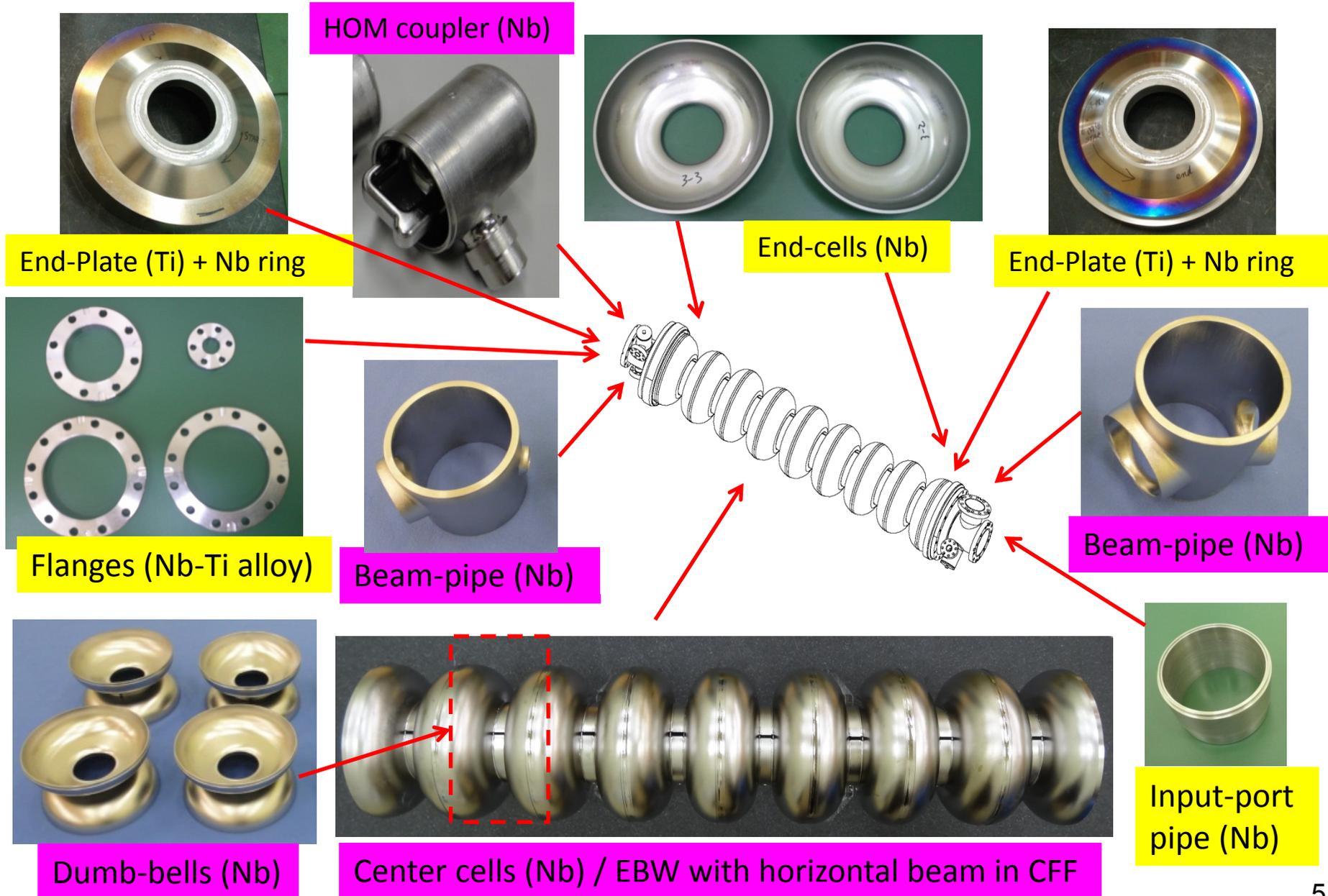
プレス機

EBW 機

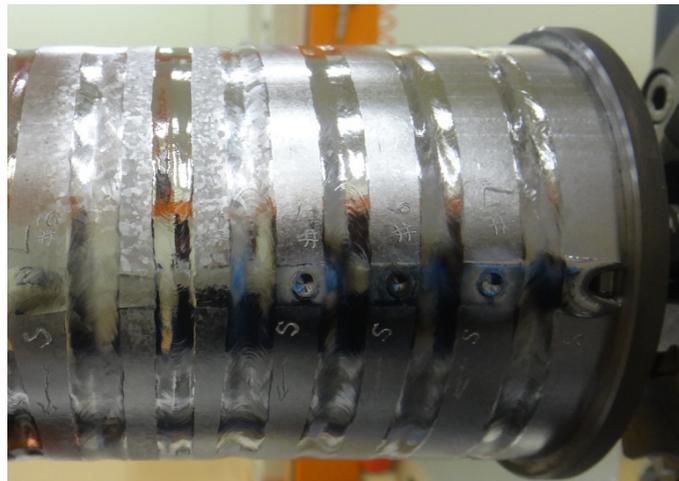


Clean room floor layout of CFF

ILC超伝導空洞の製造



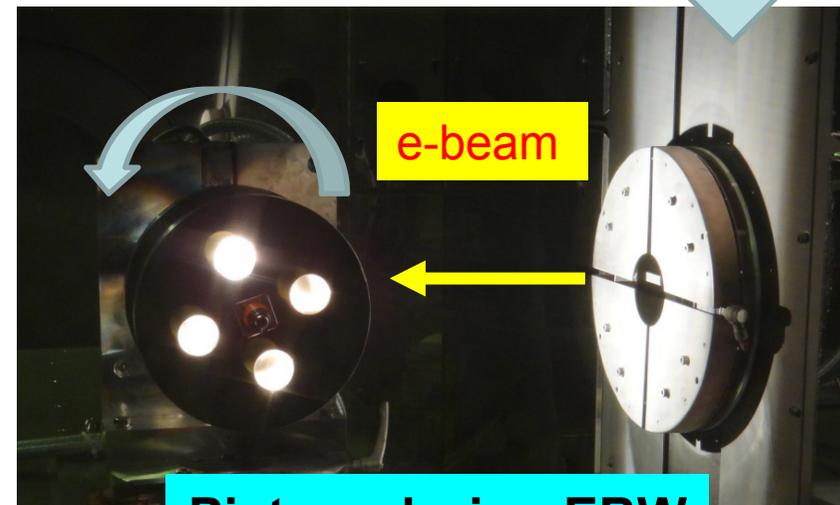
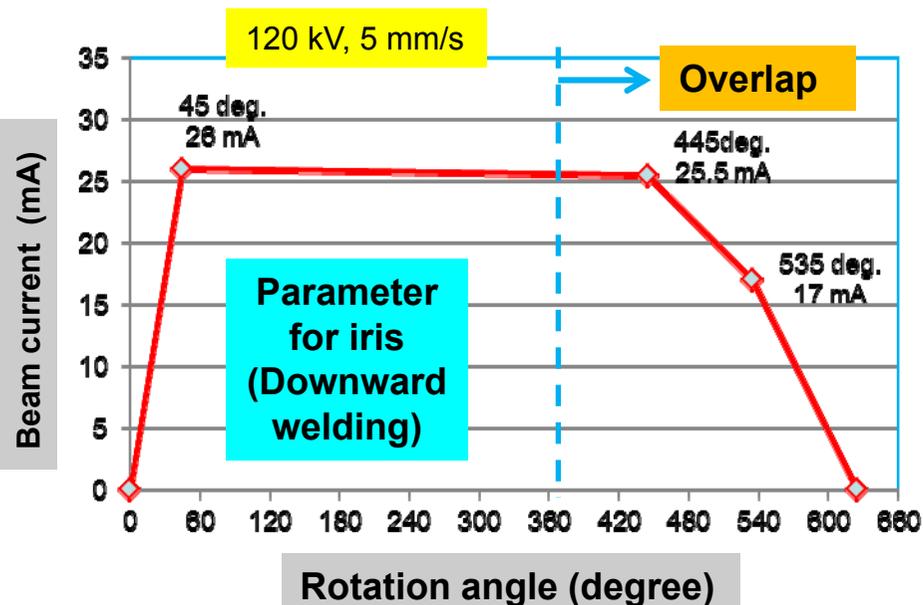
ダンベル・アイリス部の溶接 (ILC超伝導空洞)



EBW test by a dummy Nb-pipe



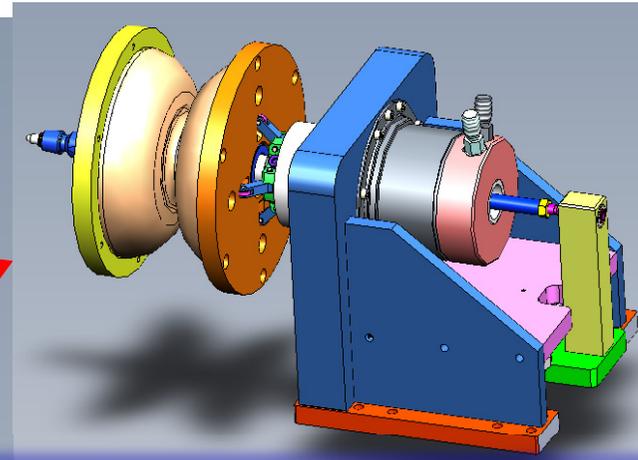
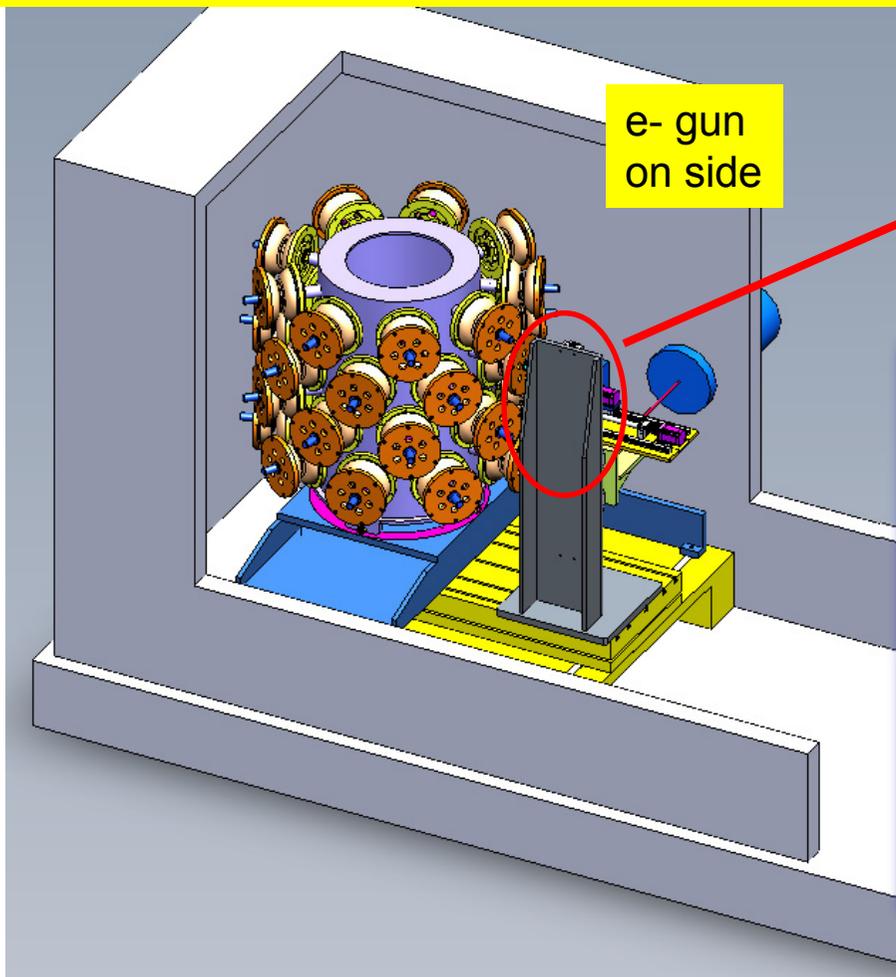
Setup of dumbbell EBW for side-gun



Picture during EBW

複数のダンベルを自動溶接するダンベルローダー

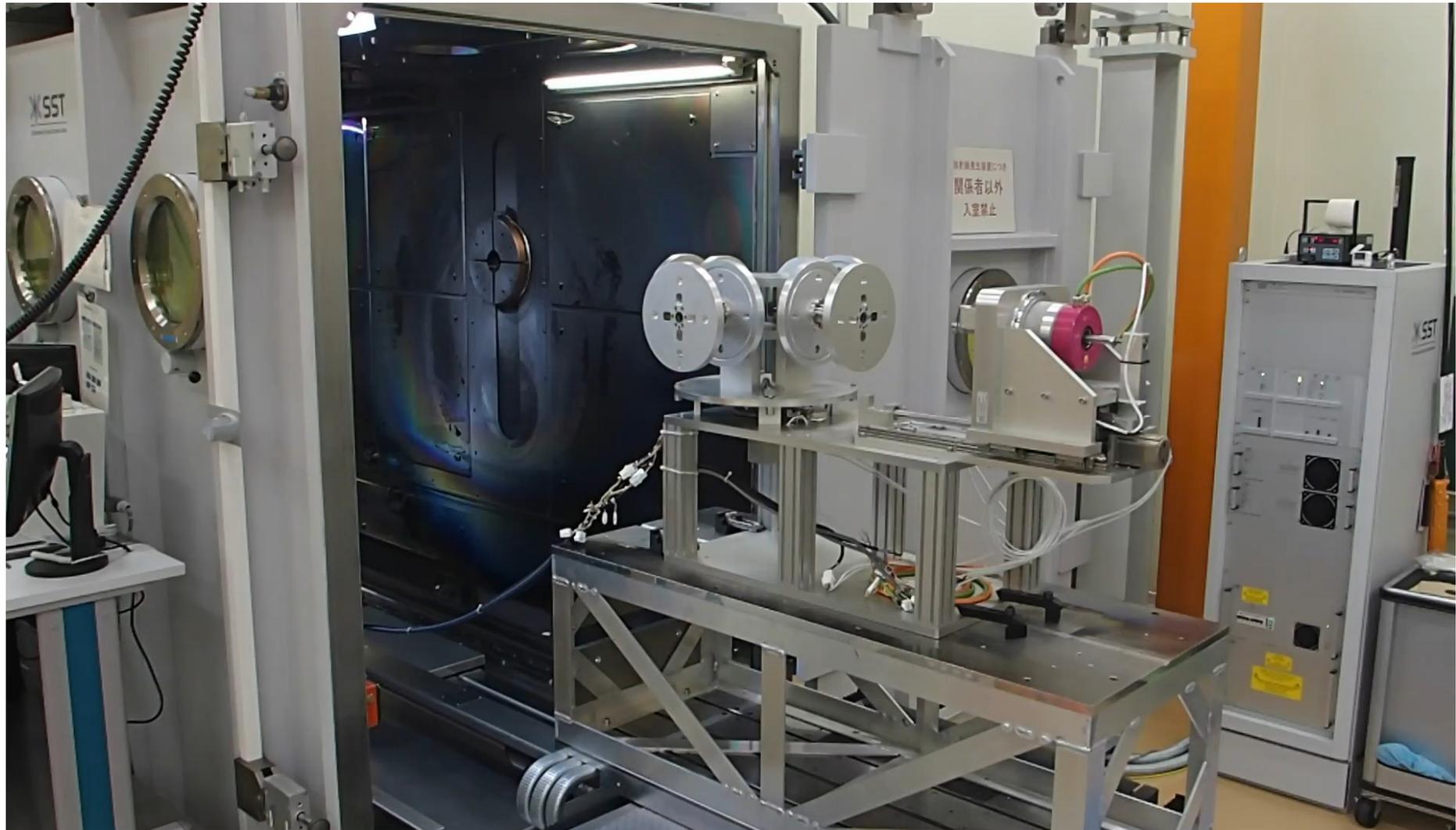
Pumping time (~30 min.) and cooling time (~30 min.) are duplicated in EBW processes.



Proto-type of four-dumbbell loader

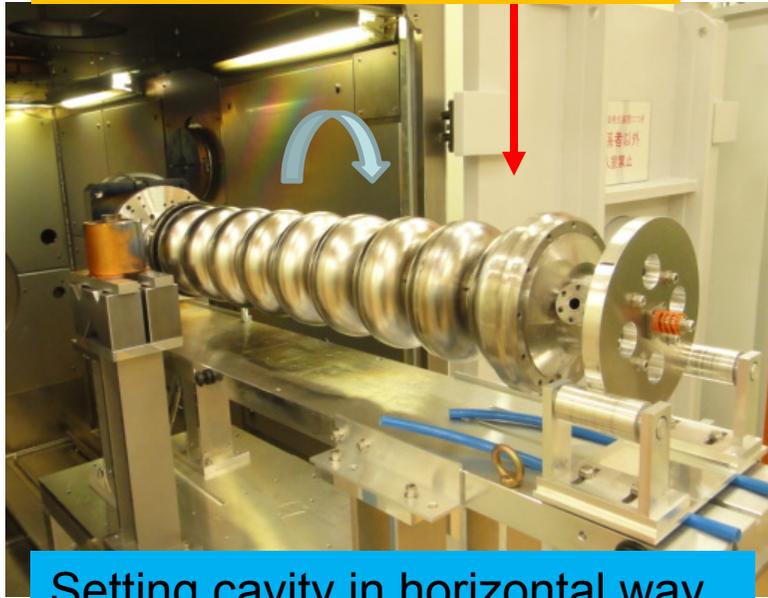
Multiple dumbbells are loaded inside the EBW chamber at once and the EBW of dumbbells will be done continuously after pumping down.

複数のダンベルを自動溶接するダンベルローダー



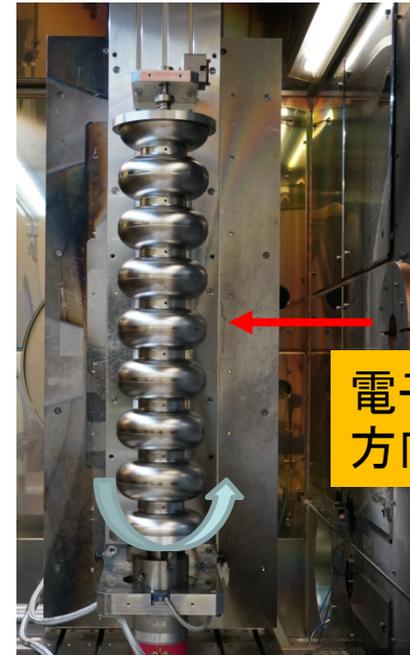
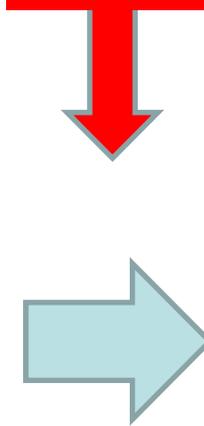
セル溶接における空洞と電子銃の配置の考察

電子ビームの方向 = 縦



Setting cavity in horizontal way is rather complicated (KEK-00).

重力の方向.



電子ビームの方向 = 横

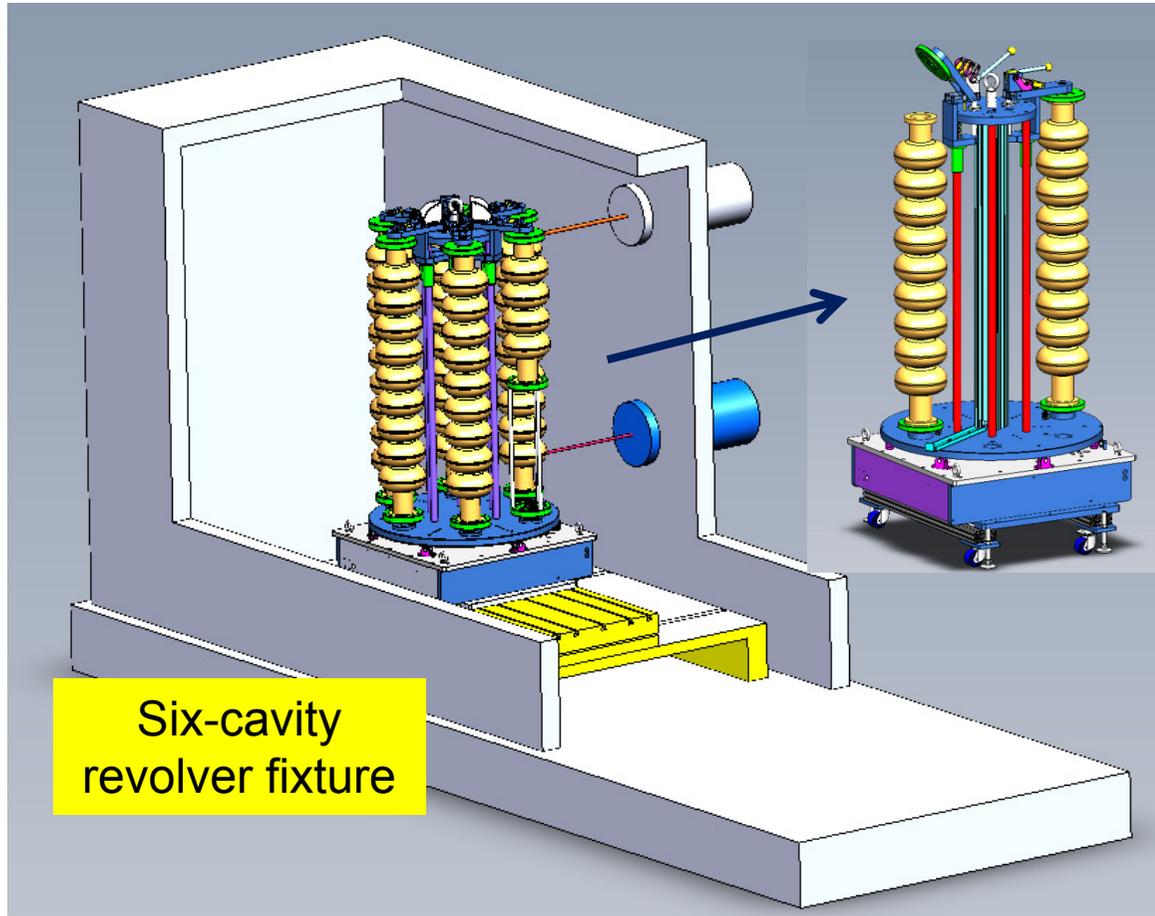
Setting cavity in vertical way is simple (KEK-01).

重力の方向を考えると、ダンベルを縦に積んでいく方が作業効率が良い。



製造工程を量産化するには、空洞は縦に設置する方が良いと考察。

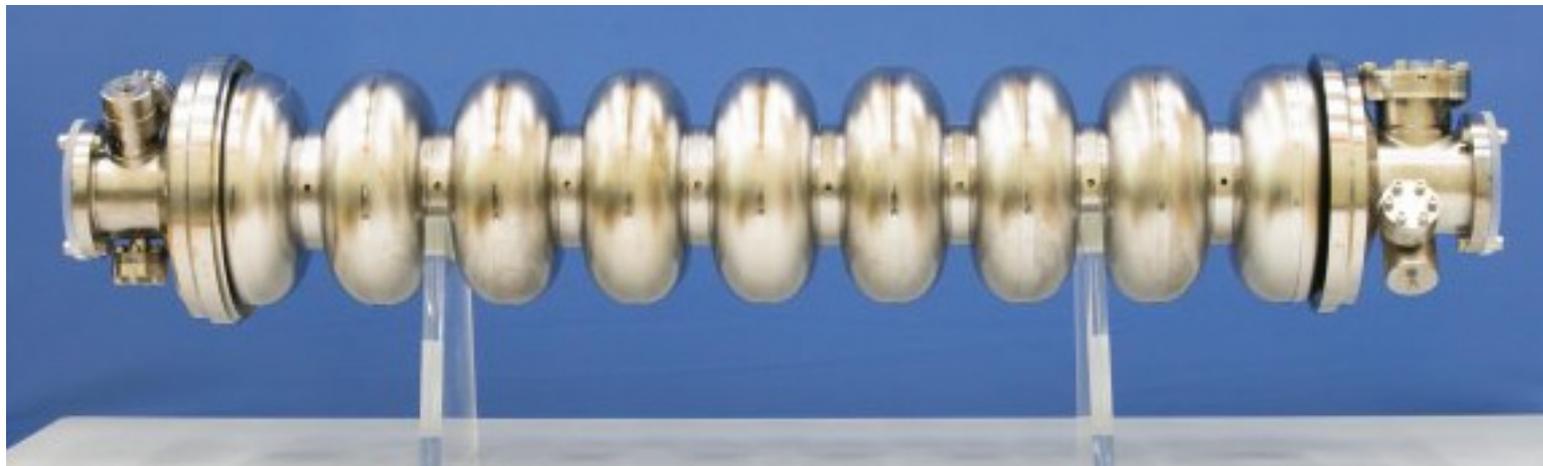
複数の9セル空洞を自動溶接する空洞ローダー



Pumping time (~30 min.) and cooling time (~30 min.) are duplicated in EBW process. The time is reduced if multiple-seams are welded in one pumping cycle.



ILC超伝導空洞 エンド部の製作方法



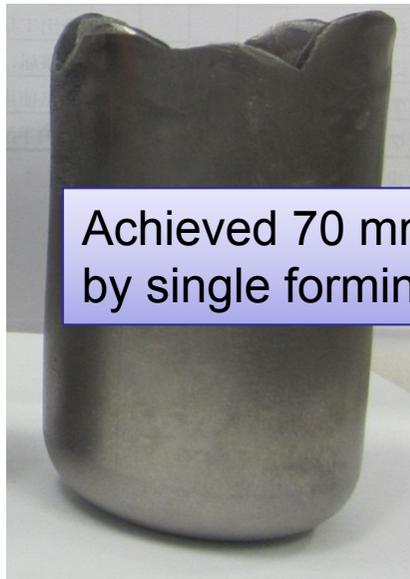
HOMカップの先進深絞り製造法

エンドグループの部品は形状が複雑であるため、製造法の工夫によるコスト削減の効果が大きい。

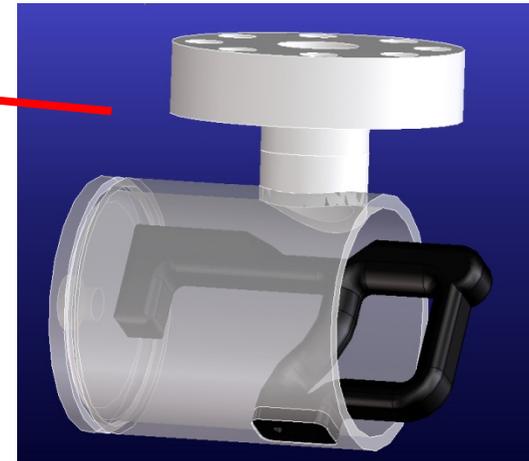
従来法: 複数回の深絞り加工とアニーリング

先進法: 1回の深絞り加工(アニール無し)

Nb sheet thickness: 2.8 mm



Achieved 70 mm
by single forming



HOM cup (φ48 × 64)



Trial to fabricate the freq.
tuning tab by press-forming.
(Under study)

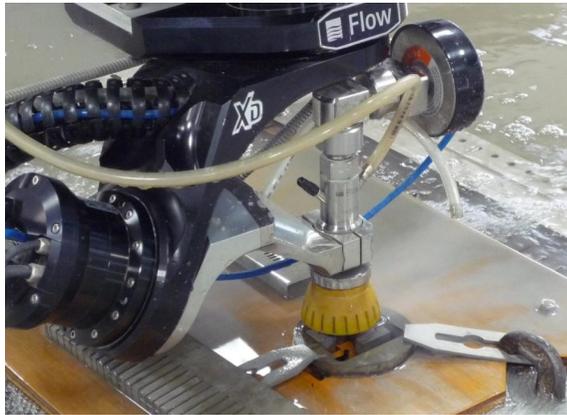
しのはらプレスサービス社との共同研究



HOMアンテナの鍛造による製造

従来法: Machining

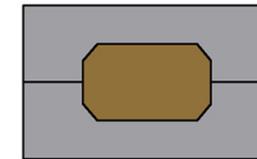
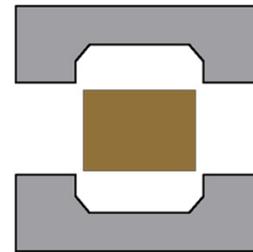
先進法: Water-jet cutting
+ Press-forming



Water-jet cutting in a job shop



Collaboration with 

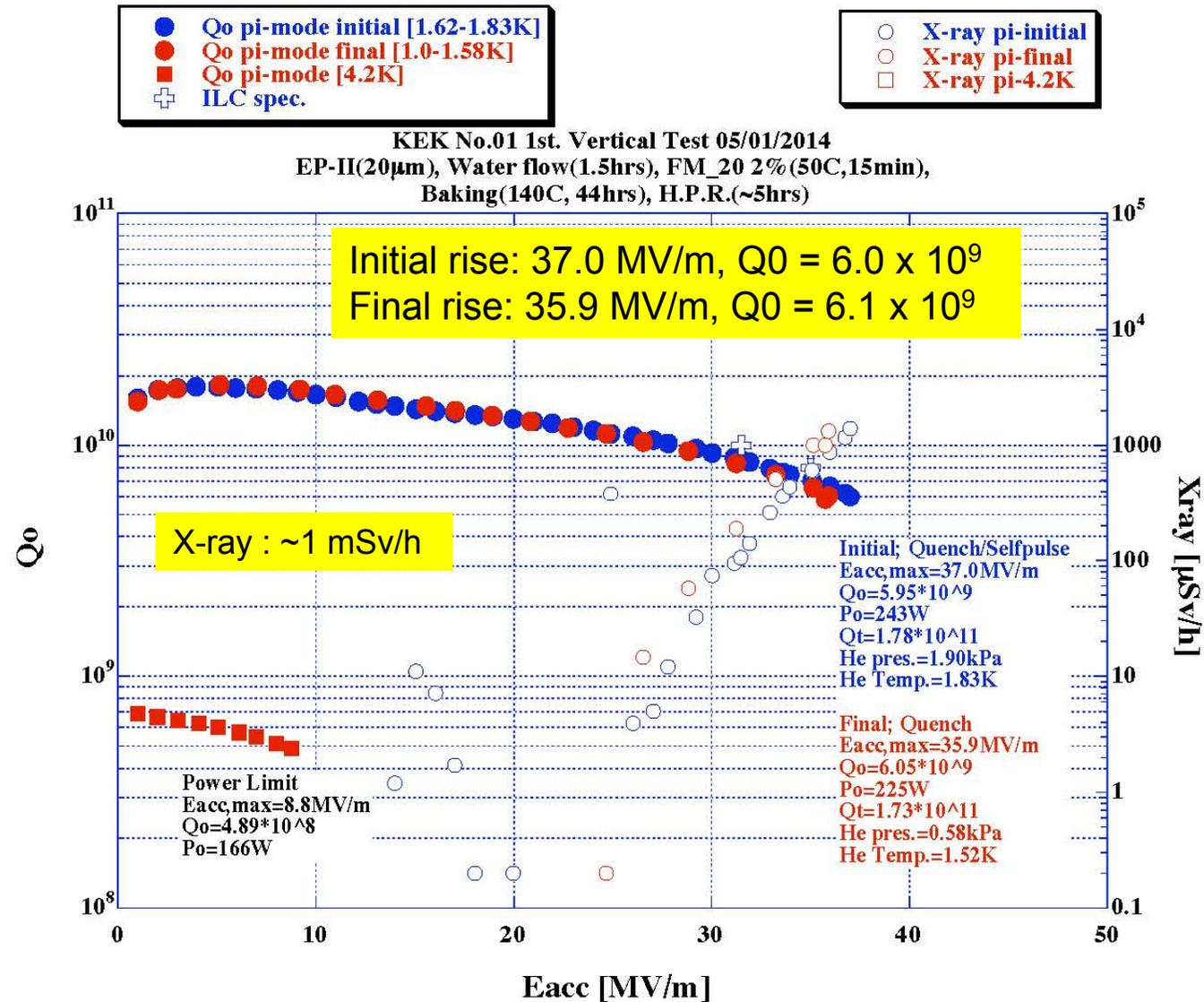


Press-forming

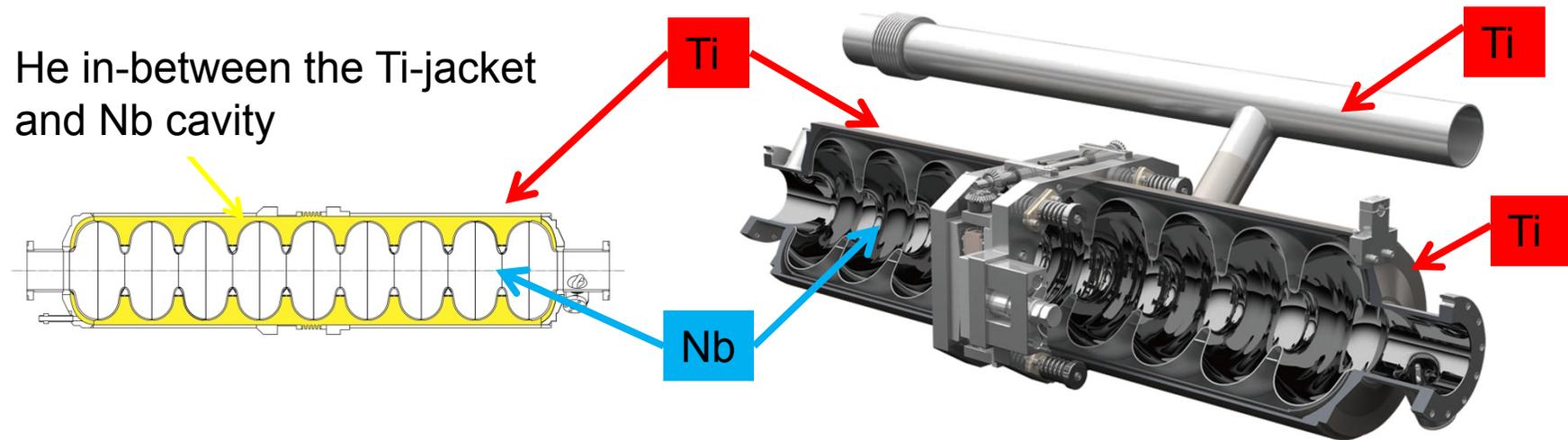
Result of low power test is OK.
(Master thesis by F. Yasuda, Jan. 2013, the university of Tokyo, JAPAN)



先進深絞りと鍛造で製作したHOMカプラーを 溶接した9セル空洞の性能



日本の高圧ガス法に準拠した空洞の製造

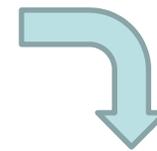


日本で超伝導加速器を建設する場合、全ての超伝導空洞は日本の高圧ガス法に準拠して製造する必要がある。

For cavities by vendors,
Manufacturer: KEK
Applicant: vendors



For cavity KEK-03 in CFF,
Manufacturer: KEK
Applicant: KEK/CFF



ILCを日本に建設する場合、相当数の空洞が外国から輸入される。KEK/CFFは、これらの外国の空洞製造メーカーに対して、日本の高圧ガス法に準拠した空洞製造方法をガイドする役割を担う。

その他のNb空洞製造に関する発表

- 「異なる材質と工法で製造された超伝導加速空洞の性能評価」 清水 洋孝 (KEK) 他、WEOM04、8月4日 (火)のセッション。

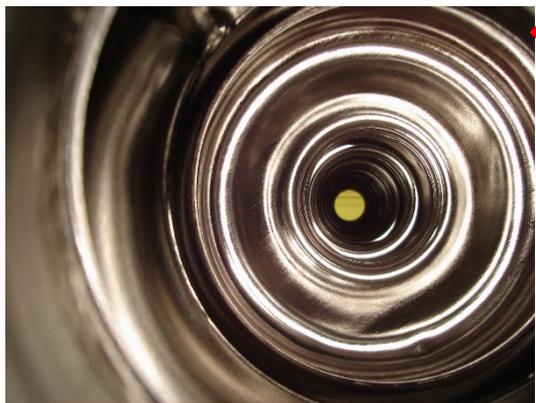
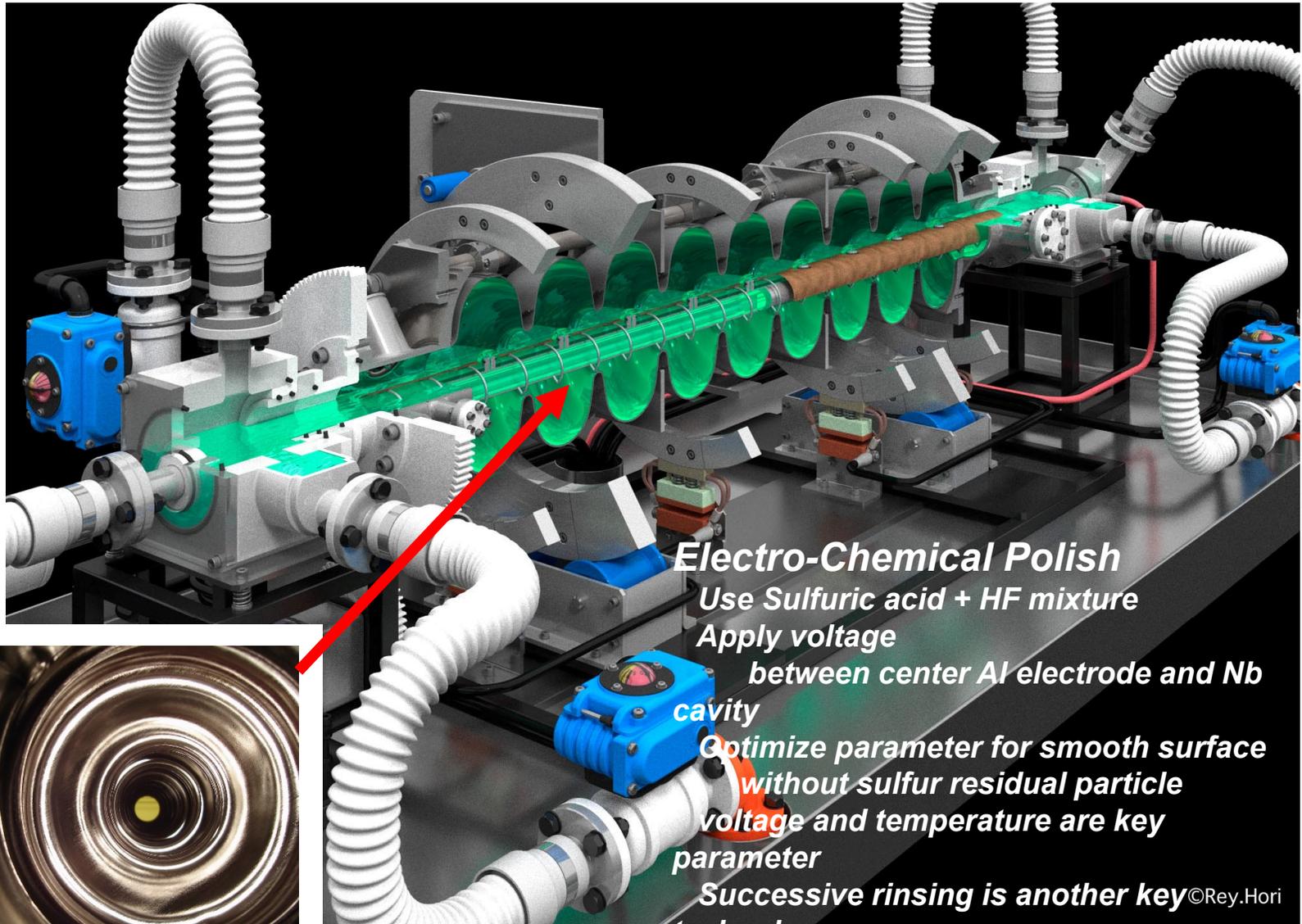
Cavity Name	Grain Size	RRR	Fabrication Method	View Point, Object
R-1	Large	High	Press Forming & EBW	Large Grain Nb
R-2	Fine	High	Press Forming & EBW	Baseline (Reference Cavity)
W-1	Fine	High	Hydroforming	Hydroforming
R-4	Fine	High	Press Forming & EBW	Different Nb supplier
R-5	Large	Low	Press Forming & EBW	Low RRR and Large Grain Nb, Different Nb supplier

KEKでは、Nb材料や製造方法を様々に工夫して、Nb空洞の製造コストを削減するための研究を行っている。これらの研究のために、5個の単セル空洞をCFFにおいて内作製造し、性能測定を続けている。

電解研磨(Electro-polishing / EP) 処理について

- **電解研磨(EP)処理**は、9セル空洞の最終内面処理として、ILCに要求される高い加速電界を実現するために最良の方法と考えられている。
- **電解研磨(EP)処理**は、ILCにおける9セル空洞の量産内面処理工程の中で最も複雑で高価な工程となっている。
- 現在の標準的な電解研磨処理法は“**横型電解研磨(HEP)法**”，と呼ばれており、9セル空洞を水平に設置して、処理中に空洞を1rpmで回転させ、最後に電解液を排出するために空洞を倒立させる必要がある(複雑かつ高価な装置)。
- ILCにおける9セル空洞の量産化には、さらに単純で安価な電解研磨法が必要。このため、処理中に空洞を倒立して固定し、一切回転などが**必要ない”縦型電解研磨(VEP)法”**が世界中で研究されている。

最終内面処理：電解研磨 (Electro-Polishing/EP)



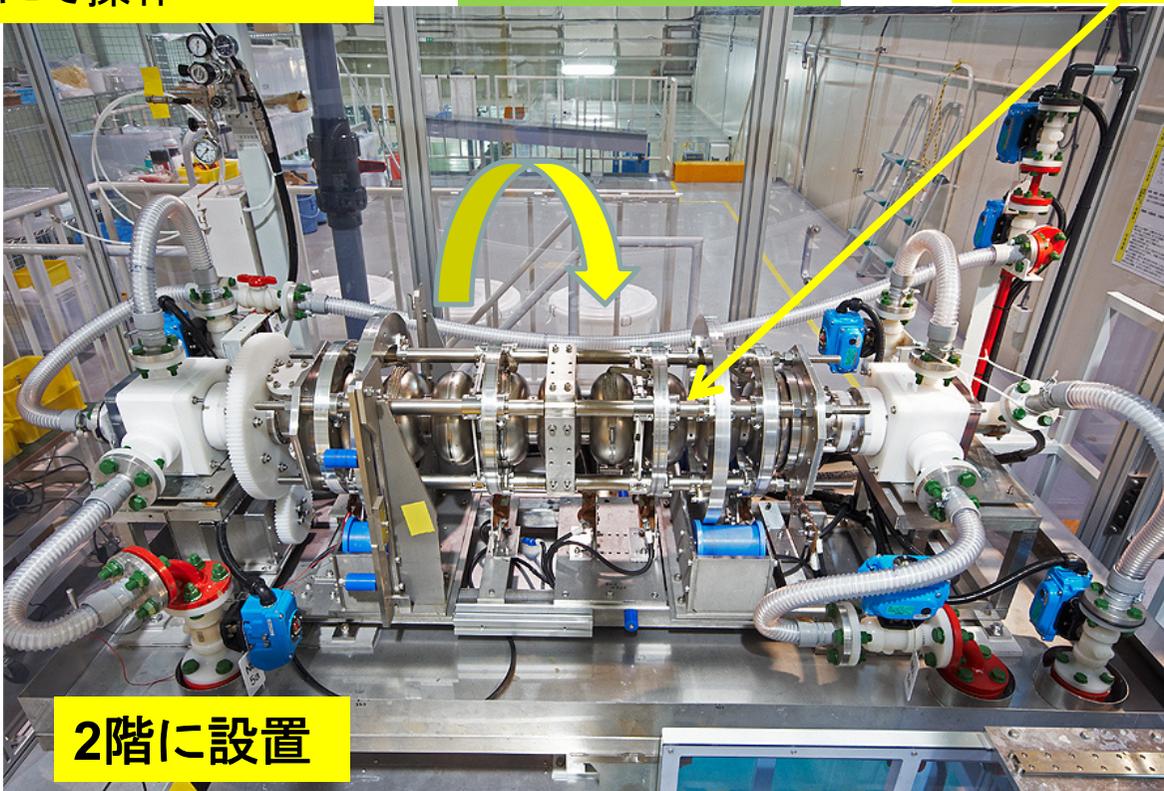
STF/KEKの電解研磨(EP)施設

自動制御パネル
にて操作

EPベッド

9セル空洞

1階に設置



2階に設置



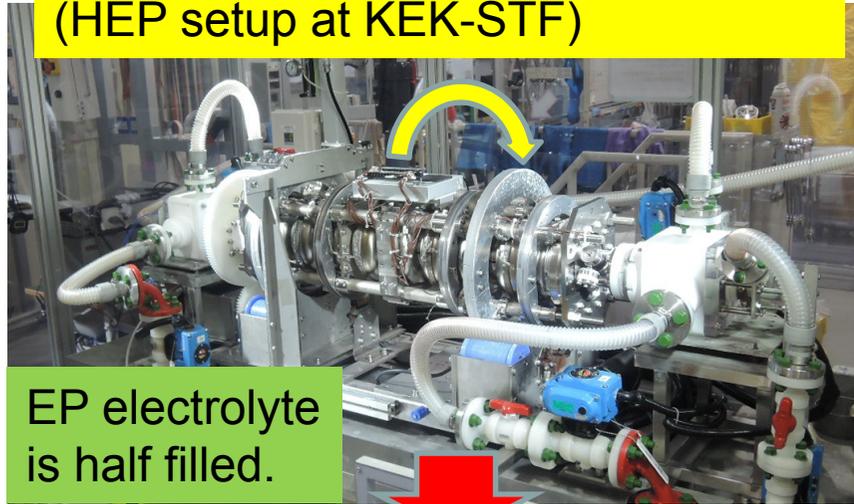
電解研磨液のタンク

KEKの電解研磨(EP)施設

EP acid: HF + H₂SO₄, アルミニウム陰極,
研磨スピード: 20 μ m/hour, V ~18V, I ~270A, T ~30degC (for 9-cell空洞),
空洞回転速度: 1 rpm.

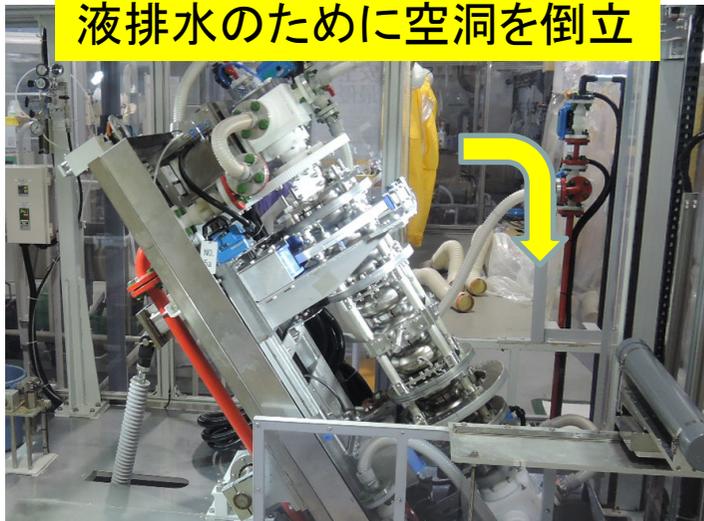
横型 EP (HEP)

横型電解研磨 (HEP) では空洞が回転
(HEP setup at KEK-STF)



EP electrolyte
is half filled.

液排水のために空洞を倒立



縦型 EP (VEP)



EP electrolyte
is fully filled.

縦型電解研磨 (VEP) では空洞は固定、
つまり回転無し。(VEP setup at Saclay)

横型電解研磨(HEP) / 縦型電解研磨(VEP)

- 横型電解研磨(Horizontal EP / HEP)

Asia: KEK, Nomura Plating Co. Ltd.

Europe: DESY, Saclay, RI, Zanon

US: FNAL, ANL, Jlab, AES

- 縦型電解研磨(Vertical EP / VEP)

Asia: KEK, Marui Galvanizing Co. Ltd.

Europe: Saclay

US: Cornell, JLab

Vertical electro-polishing (VEP)

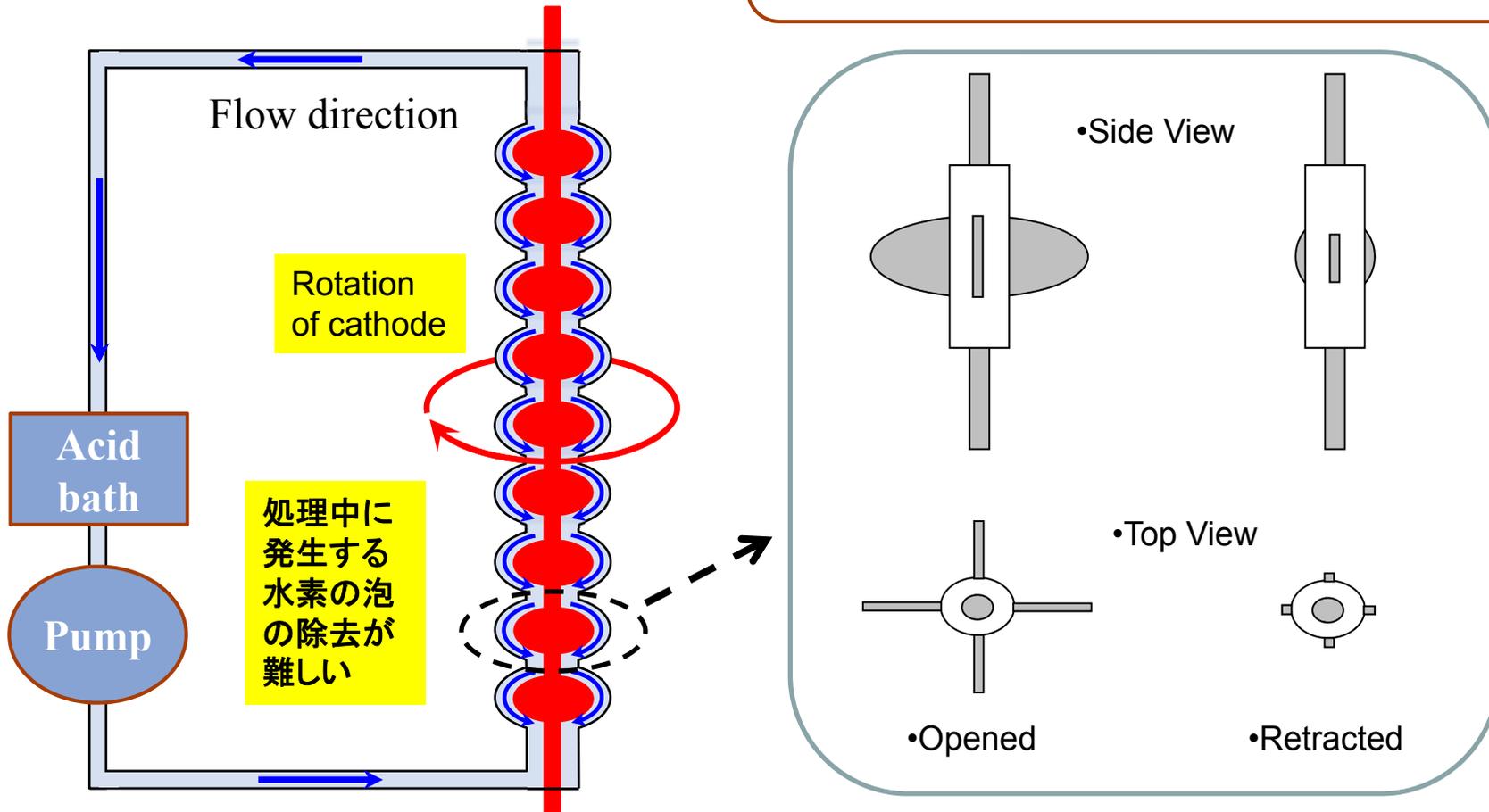
- No need of large space
- No need of cavity rotation
- No need of horizontal-vertical conversion system

} More suitable for mass production

マルイ鍍金社が開発した折り畳み式翼をもつカソード(陰極)

EP electrolyte is circulated to remove hydrogen gas and for low temperature.

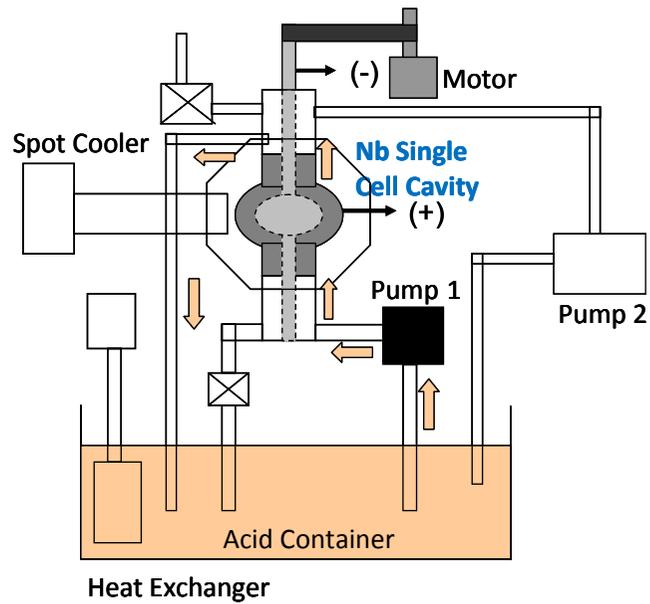
The retractable-wing cathode to realize uniform flow of electrolyte and uniform distribution of electric current.



マルイ鍍金社は、この特殊な形状の陰極を「**ニンジャ陰極 / Ninja cathode**」と命名

マルイ鍍金社による単セル空洞と9セル空洞のためのVEPセットアップ

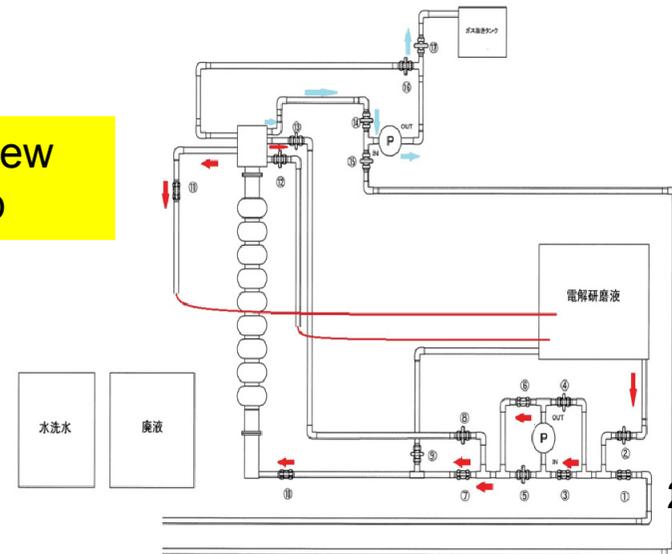
VEP Setup for 1 Cell



VEP Setup for 9 Cell



Schematic view of VEP setup



Nbクーポン・サンプル用の単セル空洞による試験

- The coupon cavity contains 6 Nb disk type coupon at beam pipes, irises and equator.
- The coupons were set to be electrically isolated from the cavity.
- The isolation allowed us to measure coupon current from individual coupon.
- The cavity is having 4 view ports also on the top iris, bottom iris and equator for light introduction and in-situ observation of wings and H₂ bubbles.

EP solution: H₂SO₄(98%):HF(55%)=9:1

Voltage: 9V

Flow rate: 5L/min

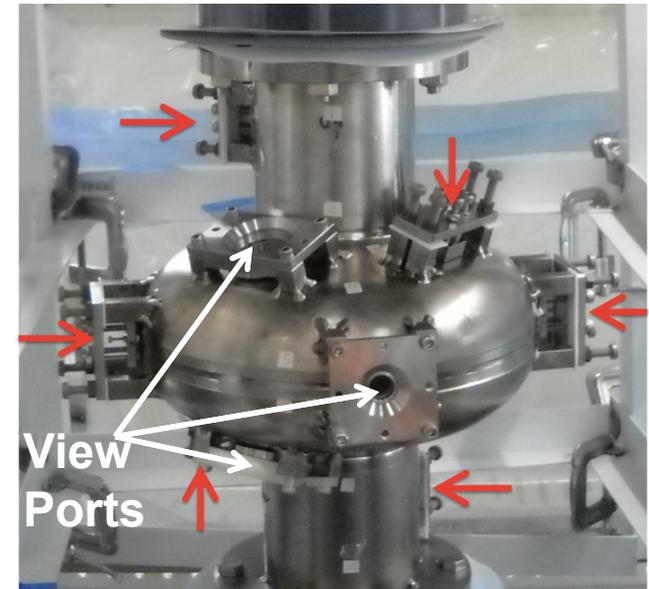
Cathode rotation speed: 5rpm

EP duration: 90min

Flow direction: Bottom to top

VEP condition (an example)

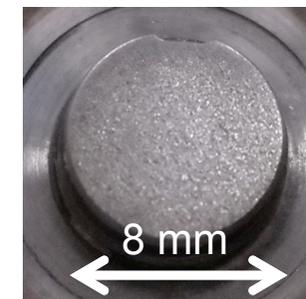
クーポン用の単セル空洞



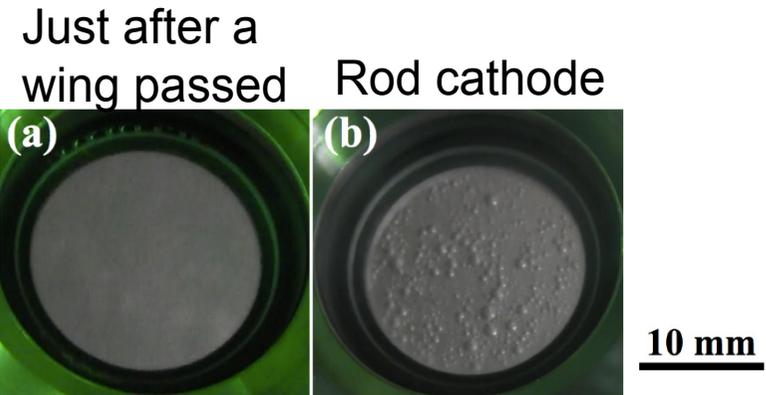
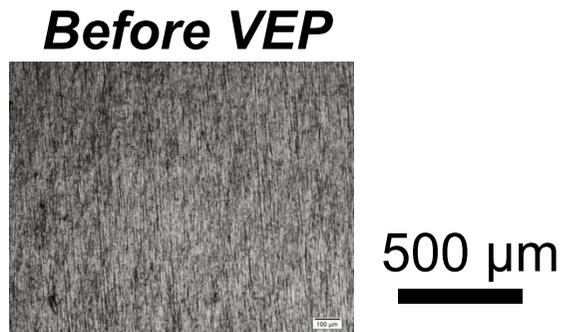
Coupon position by red arrow

空洞の各位置での
研磨状況を確認
することができる。

Nbクーポン サンプル



実験後のNbクーポン・サンプルの顕微鏡写真



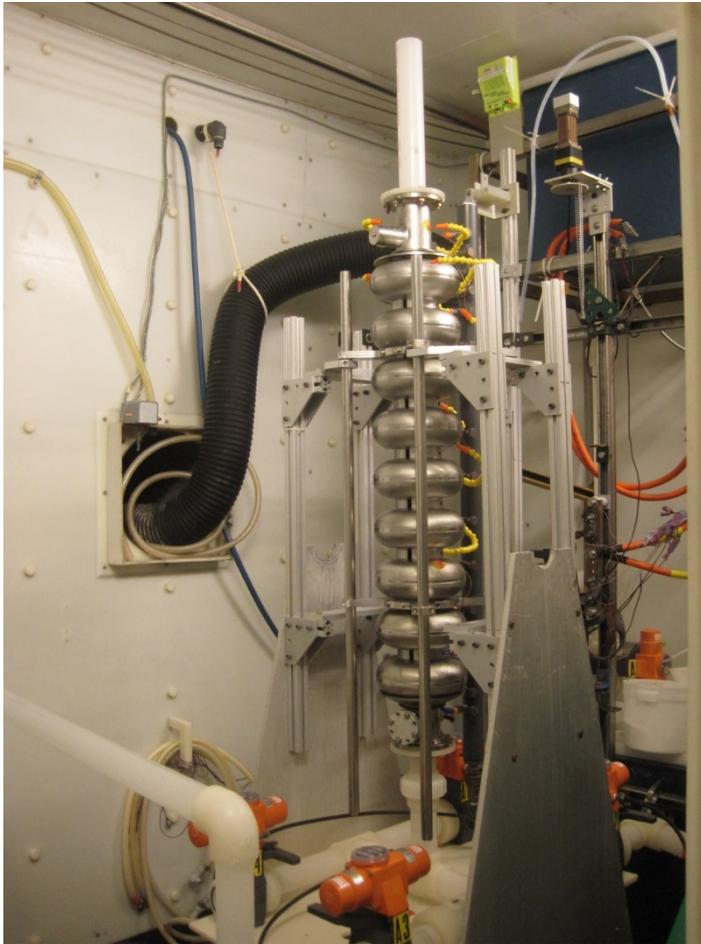
	Top Beam Pipe	Top Iris	Equator	Bottom Iris	Bottom Beam Pipe
NINJA					
ROD					

- The top iris surface always found rougher than other positions of the cavity.
- The rod cathode enhanced surface roughness at the top iris and equator.
- The bubbles attack the surface microscopically and make rough surface.

VEP研究の詳細に関するポスター発表

- 「ニオブ製1セル加速空洞縦型電解研磨の研磨内面均一化」 仁井啓介(マルイ鍍金)他、WEP048、8月5日(水)ポスターセッション。
- 「ILC用ニオブ製9セル加速空洞の縦型電解研磨設備の作製と研磨実施」 仁井啓介(マルイ鍍金)他、WEP049、8月5日(水)ポスターセッション。
- “Vertical Electropolishing of Nb Coupon Cavity and Surface Study of the Coupon Samples”, V. Chouhan (Marui Galvanizing Co. Ltd.) et al., THPP098, Linear Accelerator Conference 2014 (LINAC14) at Geneva, Switzerland.

マルイ鍍金社＋コーネル大学＋KEKで Vertical EP (VEP) の共同研究を推進



BCP (100 um) at Cornell university

2014年末に、1本のTESLA型9セル空洞がKEKからコーネル大学(F. Furuta and G. Hoffstaetter)へVEP実験のために送られた。VEP実験の下準備を行っている。

Bulk BCP (total 100 um, flipped cavity after 50 um etch) was done at Cornell university for the surface preparation before VEP experiments.

- BCP acid solution;
HNO₃:HF:H₃PO₄=1:1:2.
- Removal rate ~1um/min.
- DIW cooling shower for outside surface.
- Kept temp. 15degC during process.

Degassing/annealing at 800 °C for 2 hours followed.

現在、9セル空洞はVEP実験の待機状態にある。

弗酸を使わない電解研磨法の開発 / 野村鍍金社 + KEK

パルス電圧のパラメーター

AC 200V rectangular wave

Normal : ~+40 A

10 ms - 99.9 ms

Reverse : ~-100 A

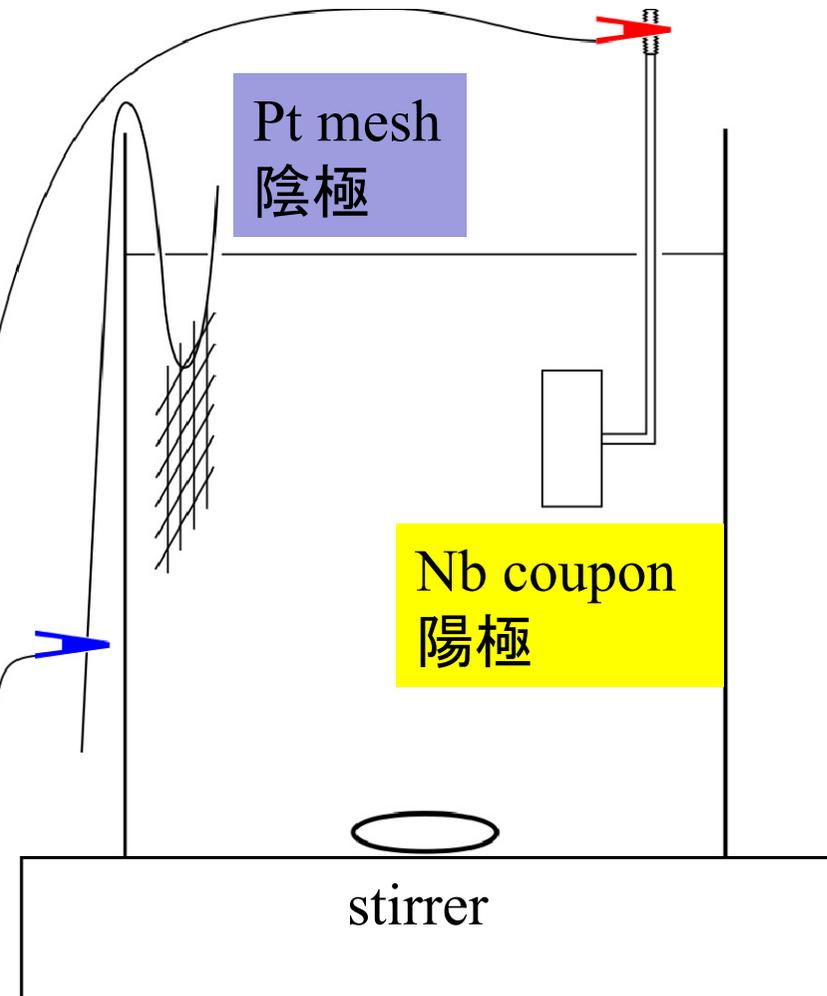
0.1 ms - 2.0 ms

電解研磨液の候補:

H_2SO_4 、 HCl 、 HNO_3 、 H_3PO_4 、 $NaOH$

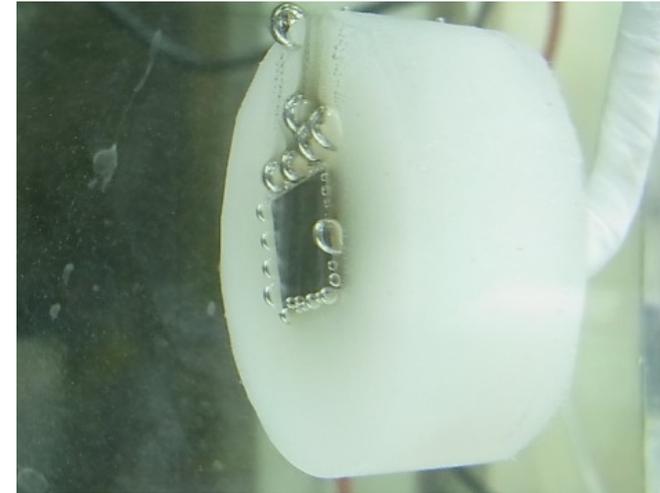
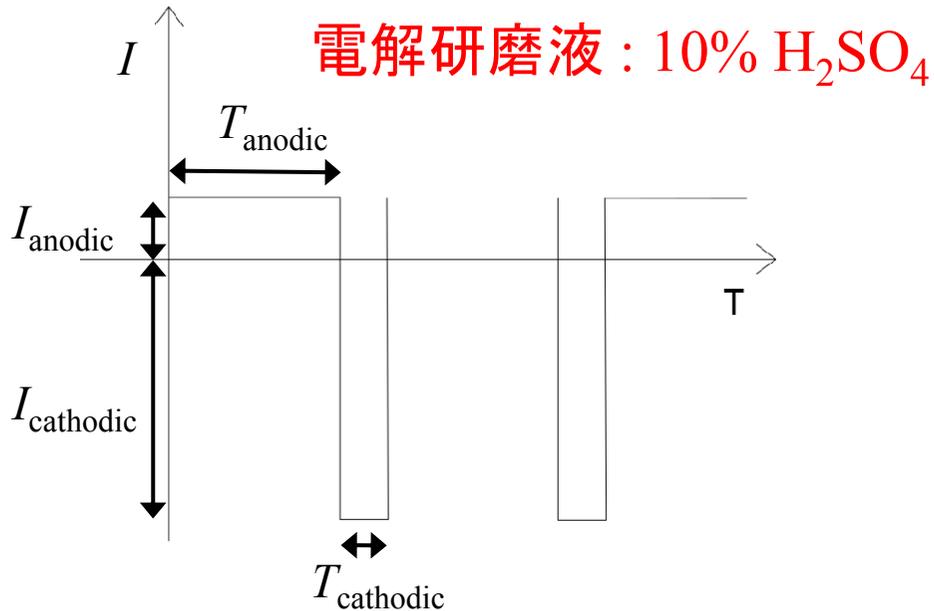
Electric current
supplier

実験セットアップ



弗酸を使わない電解研磨法では、配管として普通のプラスチック部品が使えるため大幅なコストダウンが期待できる。

希硫酸によるニオブのパルス法電解研磨 / 野村鍍金社+KEK



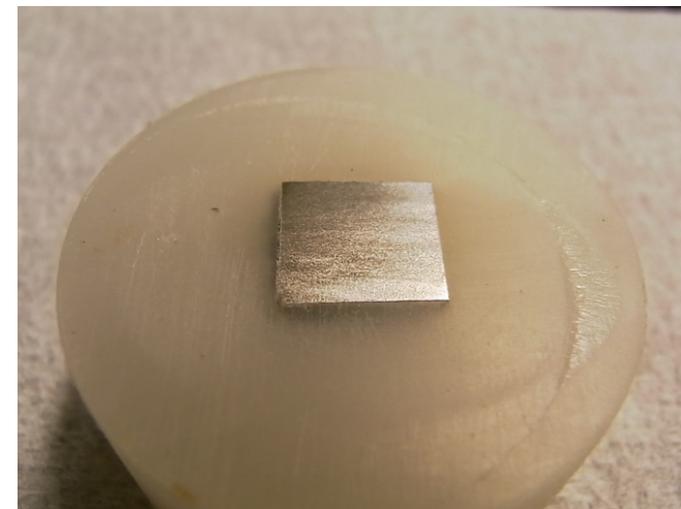
パルス電圧のパラメーター

T_{anodic}	10 ms	I_{anodic}	+0.6 A
T_{cathodic}	2 ms	I_{cathodic}	-2.4 A

Reference

E.J.Taylor et al., Proceedings of SRF2011, Chicago, IL USA, p377-381.

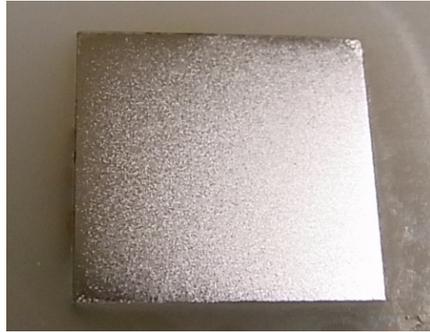
E.J.Taylor et al., *Journal of The Electrochemical Society*, **160** (9) E94-E98 (2013).



希硫酸によるパルス法電解研磨を行ったニオブサンプル

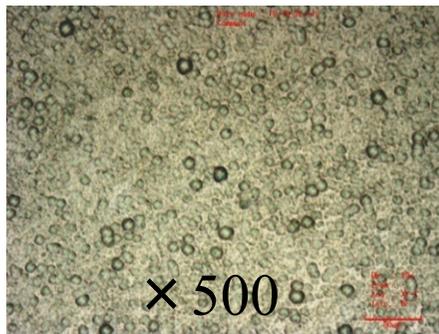
電解研磨実験の結果 / 野村鍍金社 + KEK

H₂SO₄



Surface roughness

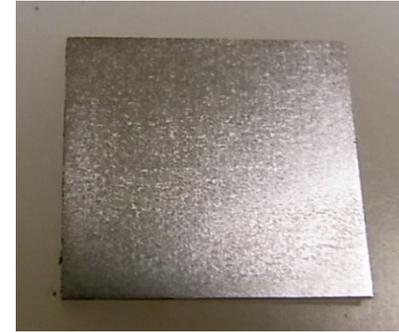
Ry=2.1 μm



T= 20
Conc.
10%

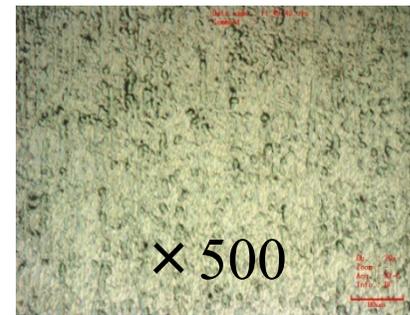
× 500

NaOH



Surface roughness

Ry=1.5 μm



T= 50
Conc.
10%

× 500

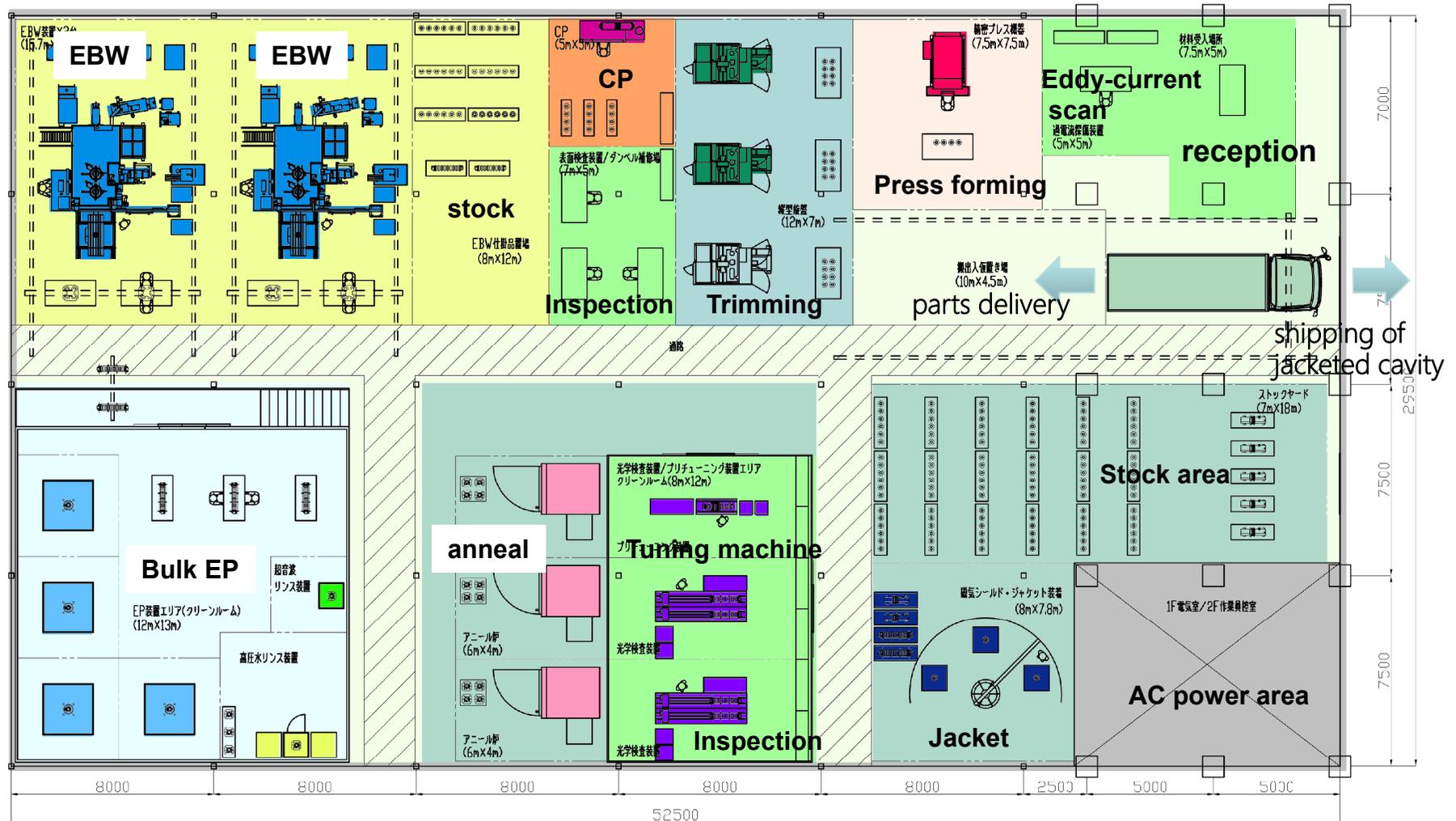
特許を取得

T_{anodic}	10 ms	I_{anodic}	+0.6 A
T_{cathodic}	2 ms	I_{cathodic}	-2.4 A

T_{anodic}	10 ms	I_{anodic}	+0.6 A
T_{cathodic}	2 ms	I_{cathodic}	-2.4 A

M. Umehara (Nomura Plating Co. Ltd.) et al., THPP107,
Proc. of LINAC14, September 2014, Geneva, Switzerland.

Simulation study assuming CFF housing area (53m x 30m)



Assuming Nb plates for cell, fabricated end-group parts are input, 200 working days/year, 2 shifts/day with 30 people times 2 shifts



Max. production rate will be ~530 cavities/year, ~2650 cavities for 5years.

Assuming that final treatment and vertical test will be done in other place.

まとめ

- ILCの建設では、~17,600 台の空洞の量産製造が必要である。KEKでは、その研究のために空洞製造施設Cavity Fabrication Facility (CFF) を建設した。
- KEK/CFFでは、電子ビーム溶接におけるダンベルローダー、9セル空洞ローダー、空洞のニオブ部品の先進製造法（先進深絞り、鍛造、ファインブランキング等）といった様々な量産化技術の研究を行っている。
- KEKは、高圧ガス法に準拠した空洞の製造手順に習熟し、国外の空洞製造メーカーをガイドする役割を担う。
- ILCでは、空洞の最終内面処理として電解研磨を行うが、これは最も複雑でコストがかかる工程である。このため、縦型電解研磨 (VEP) 法や弗酸を使わない電解研磨法の研究を進め、工程の単純化とコスト削減の努力を続けている。
- 空洞の量産における工場のシミュレーションでは、こういった量産化技術を取り入れた場合も含めて研究を行っている。