

ILC計画実現に向けたKEKにおける 超伝導加速空洞の製造研究

SRF cavity fabrication study for ILC at KEK

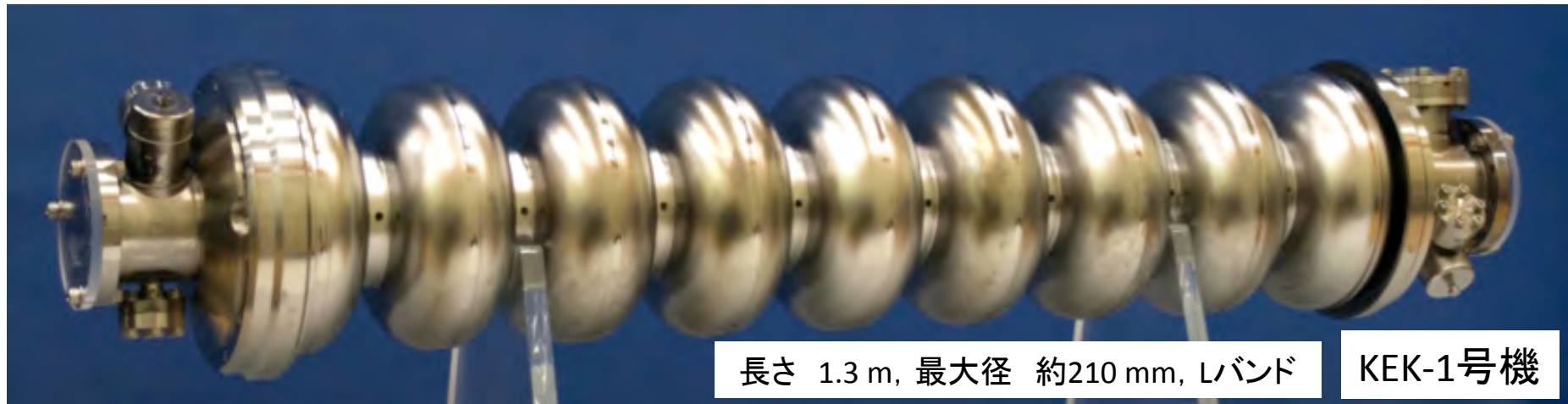


高エネルギー加速器研究機構

機械工学センター
加速器研究施設

○山中 将, 井上 均, 渡辺勇一, 道前 武
佐伯学行, 梅森健成, 清水洋孝,
加古永治, 早野仁司, 道園真一郎, 山口誠哉

ILC用1.3GHz 9セル超伝導加速空洞



長さ 1.3 m, 最大径 約210 mm, Lバンド

KEK-1号機

空洞本体の材質はニオブ(Nb)

Nb 41

ニオブ

マイナス264℃で電気抵抗がゼロになり、強力な超伝導磁石の素材になる。リニアモーターカーなどに使われるのもニオブの合金。

Nb 41

ニオブ

リニアモーターカー、画像診断MRI装置で 사용되는超伝導磁石の材料。車のボディや石油のパイプライン、戦闘機の超合金としても使われている。

東京エレクトロンのWEBサイトより
<http://www.tel.co.jp/genso/periodic/index.html>

ニオブの特徴

材料	Mg	Al	Ti	Fe	Nb	Cu	W	Au
密度 (g/cm ³)	1.74	2.69	4.54	7.86	8.56	8.93	19.1	19.3
融点 (°C)	651	660	1675	1535	2470	1085	3387	1064
ヤング率 (GPa)	65	73	103	200	103	123	345	80
線膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	25.4	23	8.4	12.1	7.1	16.8	4.3	14.3
熱伝導率 (W/m K)	159	204	17	67	58	386	198	295

- 超伝導加速空洞で使用するのは、純ニオブ
- 純度と残留抵抗比 (RRR: Residual Resistance Ratio) が高い必要がある。
- 東京電解 (日本)、アルバック (日本) と Heraeus (ドイツ) から材料を購入している。
- PLANSEE社のWEBに、ニオブについての詳しい説明あり。
<http://www.plansee.com/jp/Materials-Niobium-405.htm>



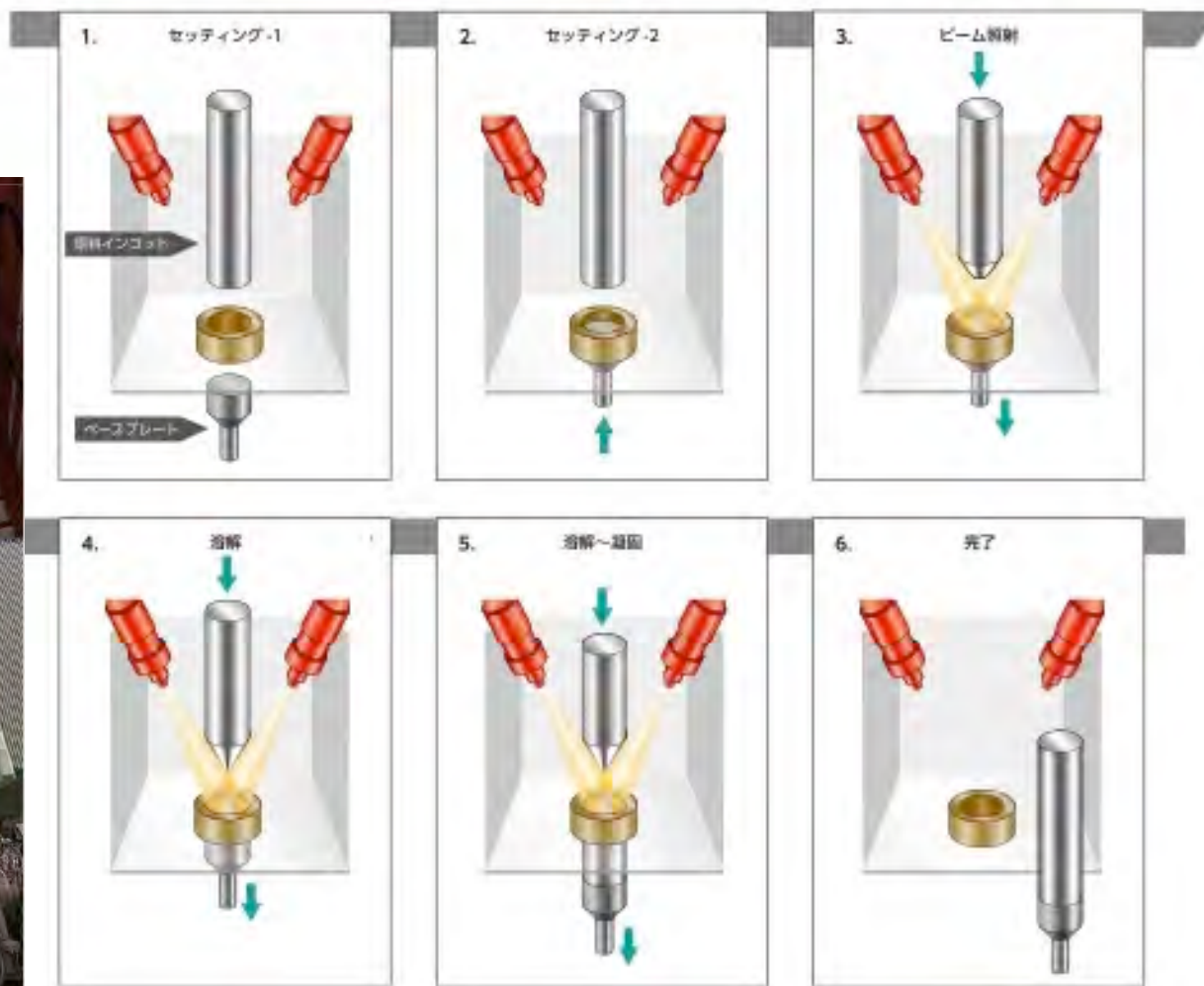
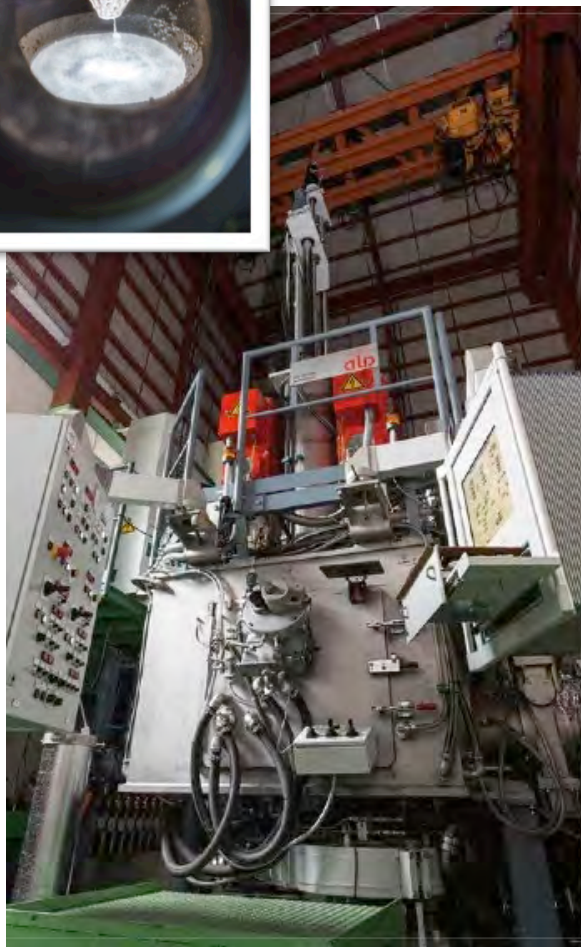
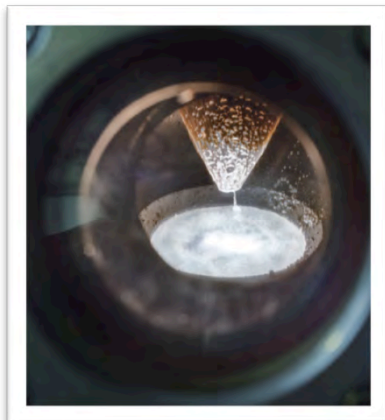
ニオブ鉱山



CBMM's Araxá niobium mine in Brazil, which has reserves sufficient for some 500 years at current production rates.

CBMM社のWEBサイトより
<http://www.cbmm.com>

電子ビーム(EB)溶解の様子

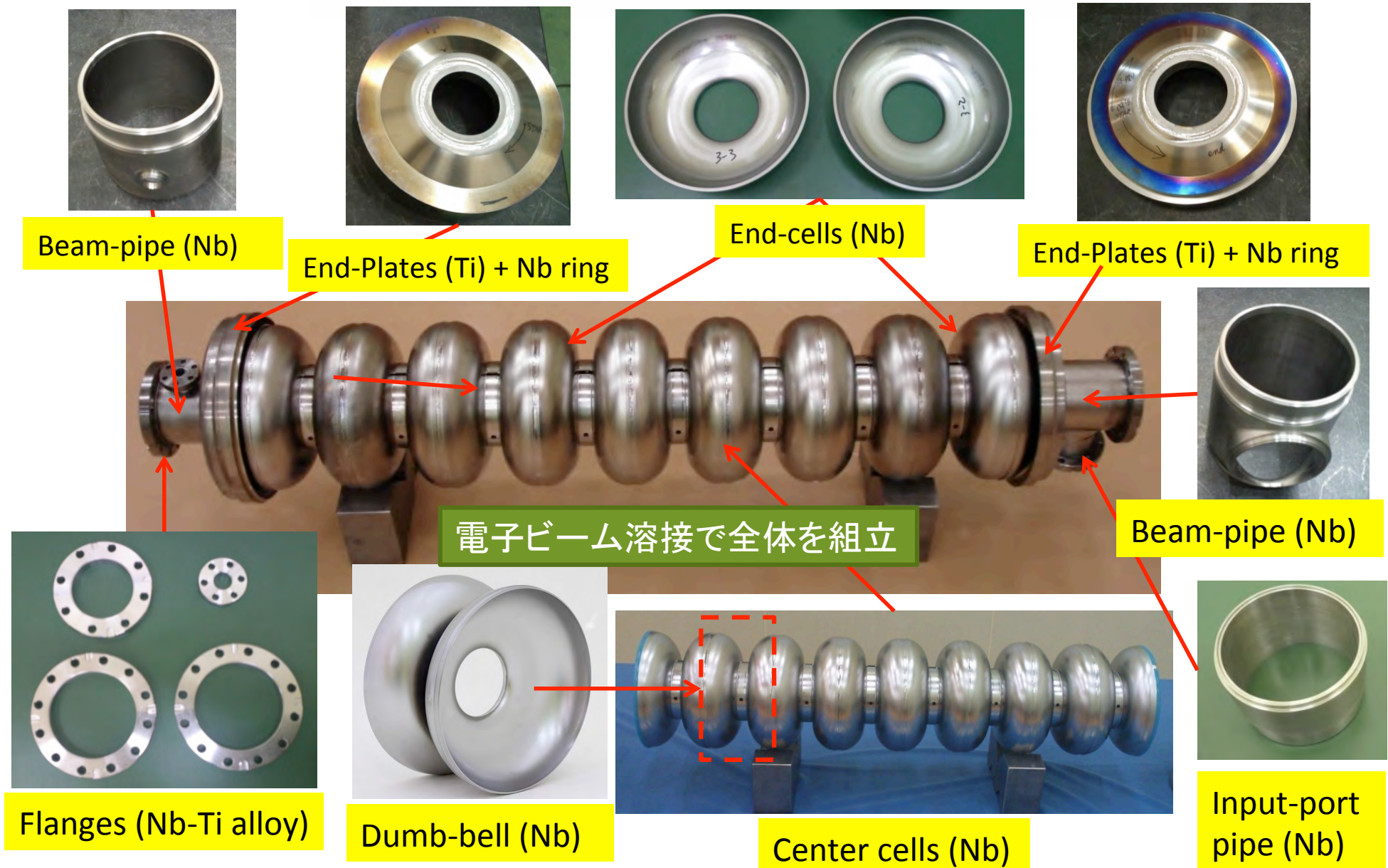


ニオブインゴットの製造工程

ALD社製600kW電子ビーム溶解炉

東京電解のパフレットより転載

空洞を構成する機械部品



プレス工程



プレス機(加圧能力:150 t)



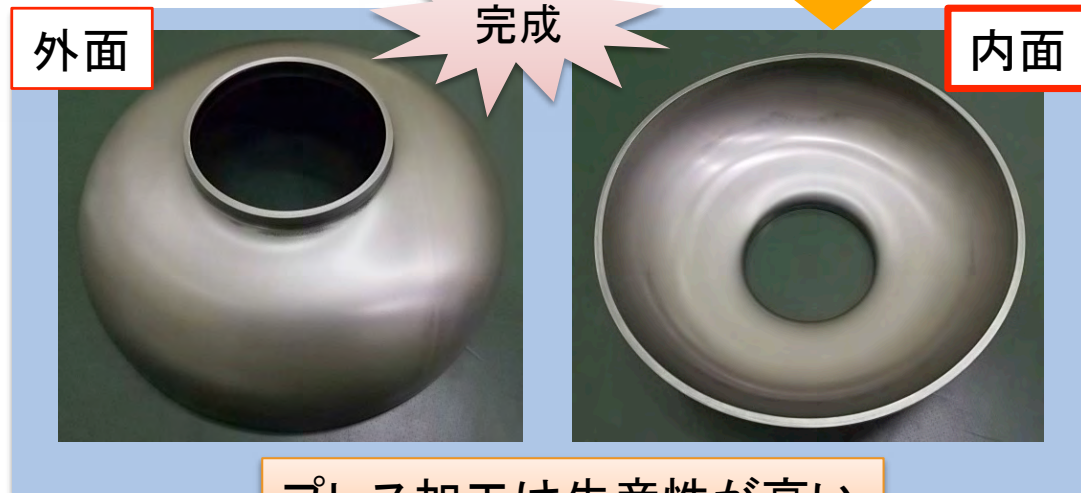
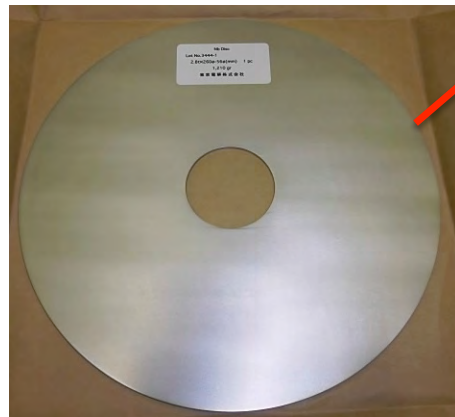
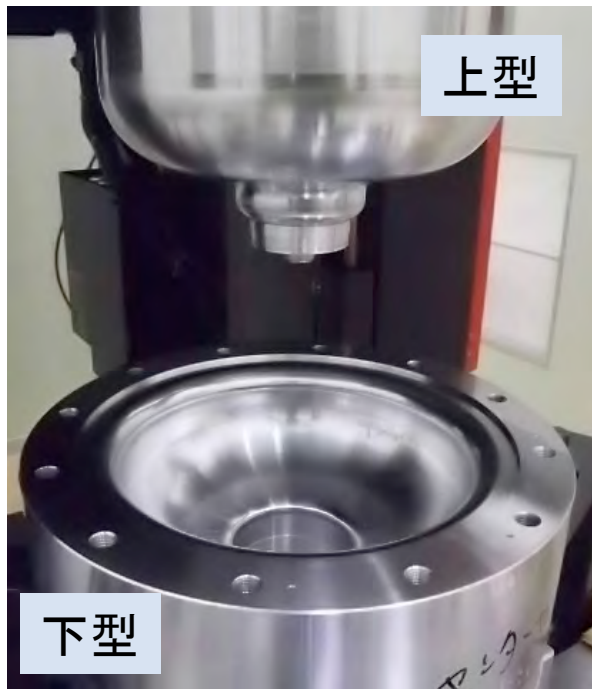
上下に動く

ここに材料を置く

金型

一般的に金型は固い材料で製作されるが、ニオブは柔らかいので、この金型はジュラルミン(アルミ合金)できている。

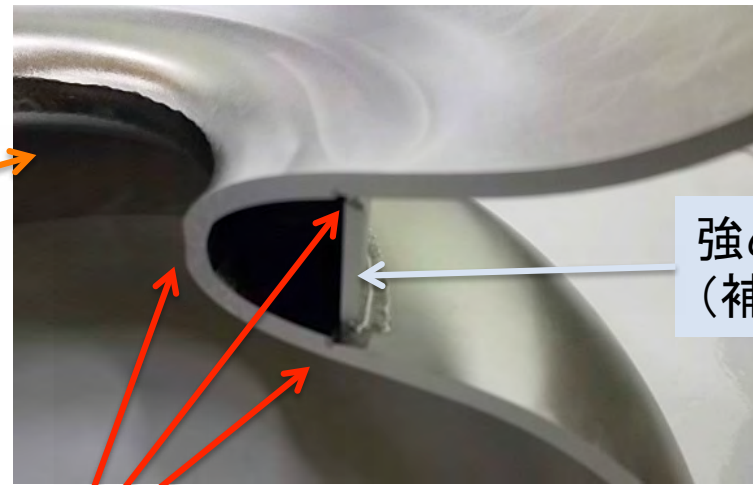
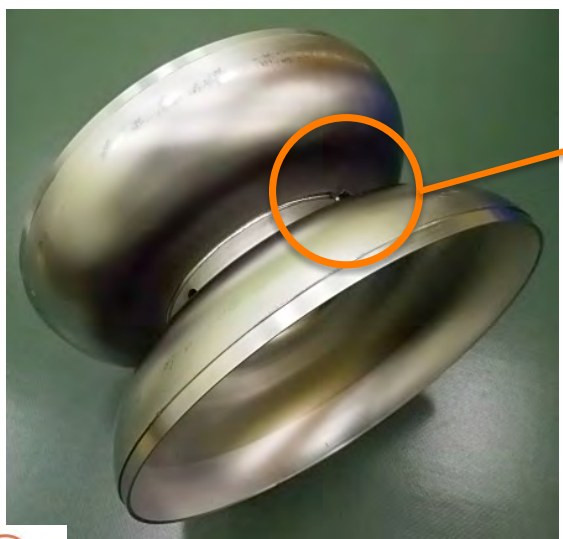
プレス工程2



プレス加工は生産性が高い

センターセルの作り方

ハーフセル 2個を結合



強め輪
(補強材)

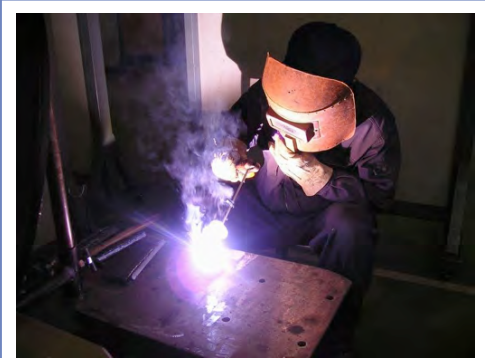
カットモデル

溶接で結合する

溶接: 紀元前3000年(新石器時代)ころから~古く知られた技術



ダンベルと呼んでいる



アーク溶接



ガス溶接(船舶)



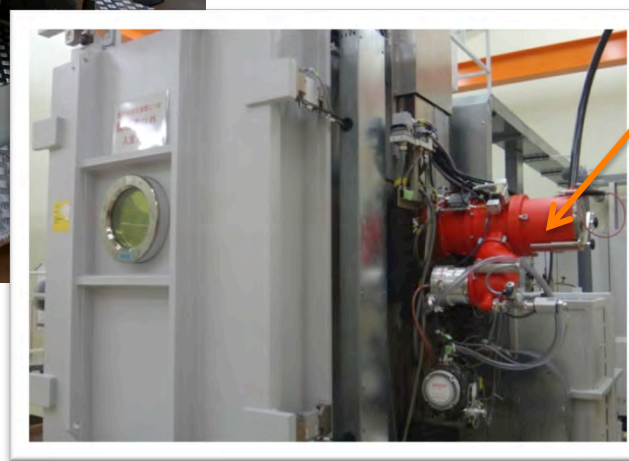
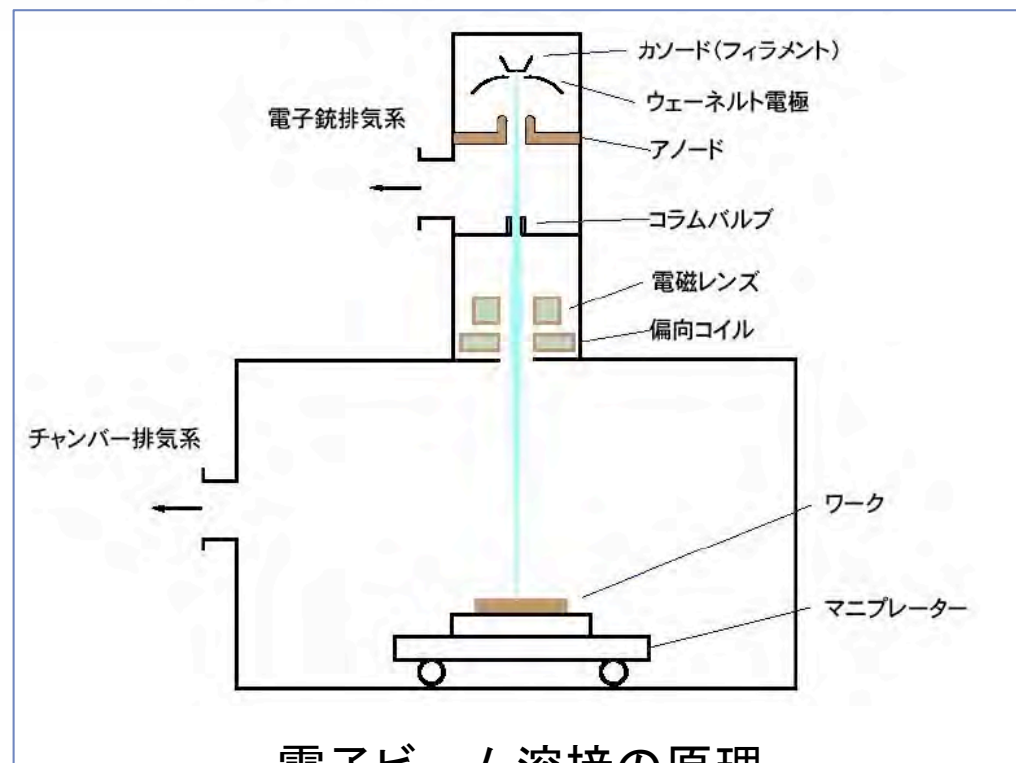
スポット溶接(自動車)

代表的な溶接法

電子ビーム溶接機

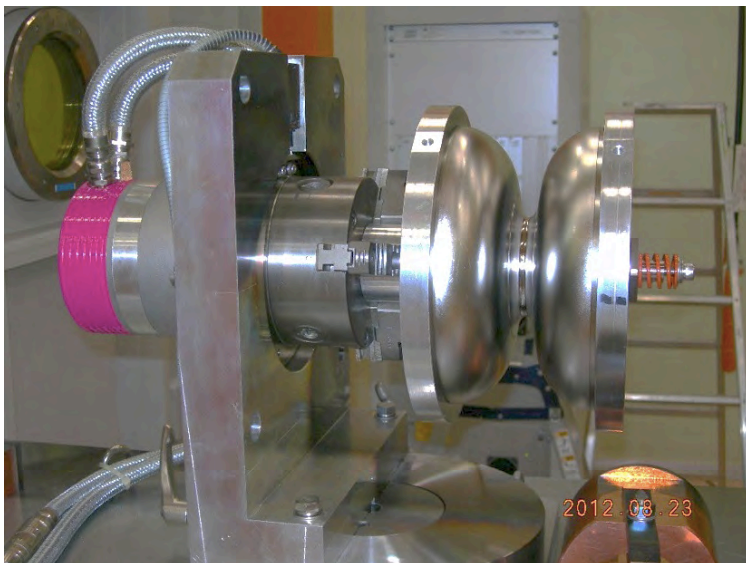


KEKで使用している電子ビーム溶接機(ドイツ SST社製)

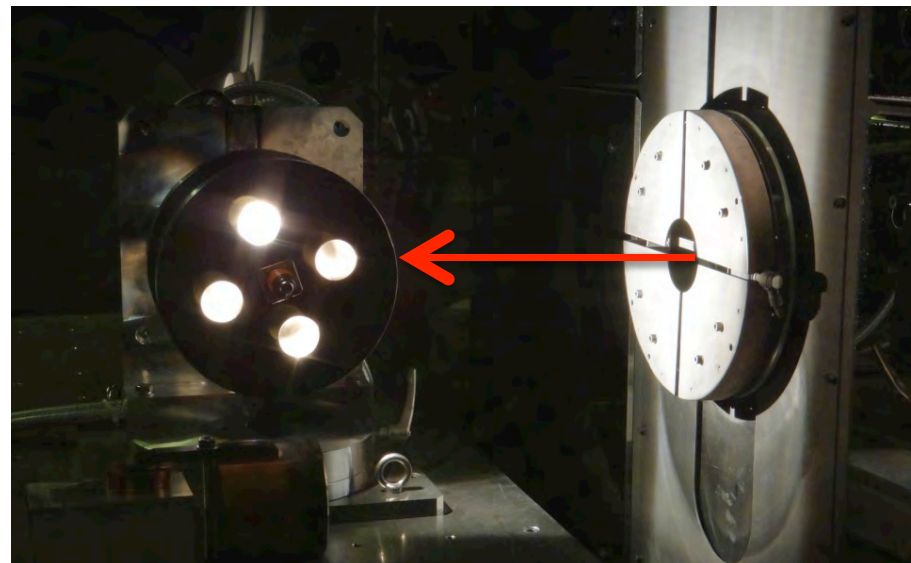


電子銃(定格出力 15 kW)
 電圧 60~150 kV
 電流 0~100 mA
 チャンバーの寸法:
 3200×1500×2200 mm

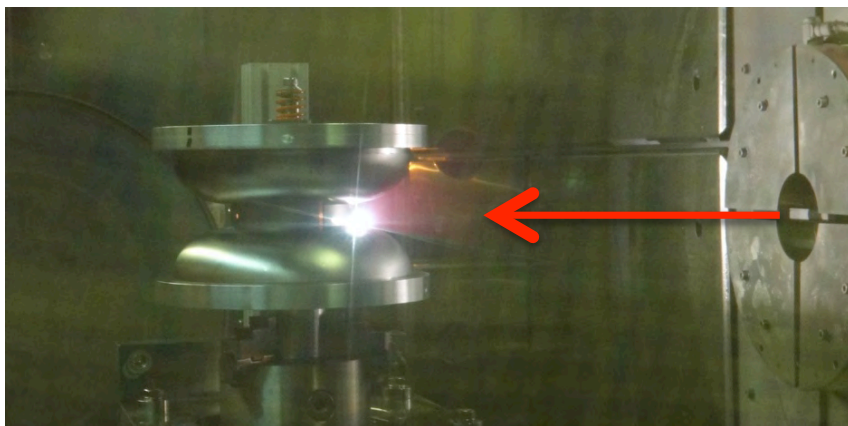
ダンベルの溶接の様子



回転治具に装着



アイリス部溶接中



強め輪の溶接の様子

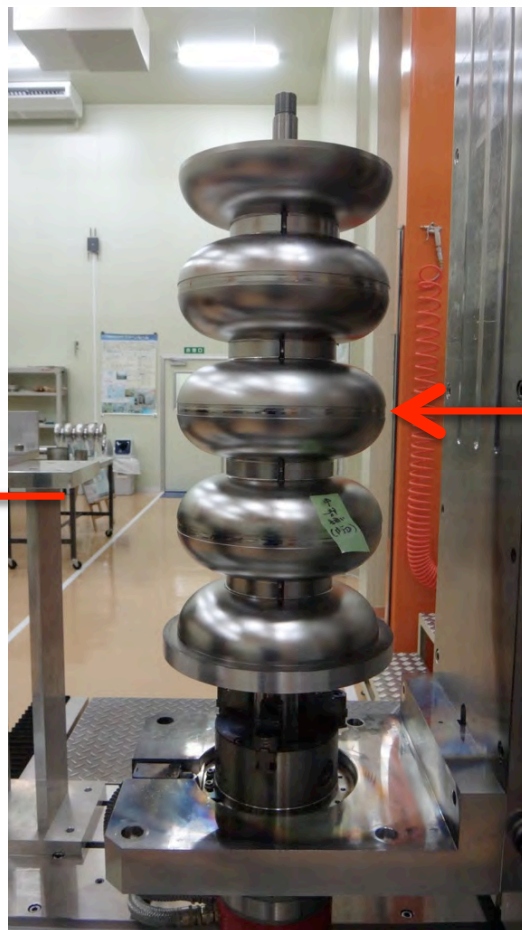


切断したダンベル

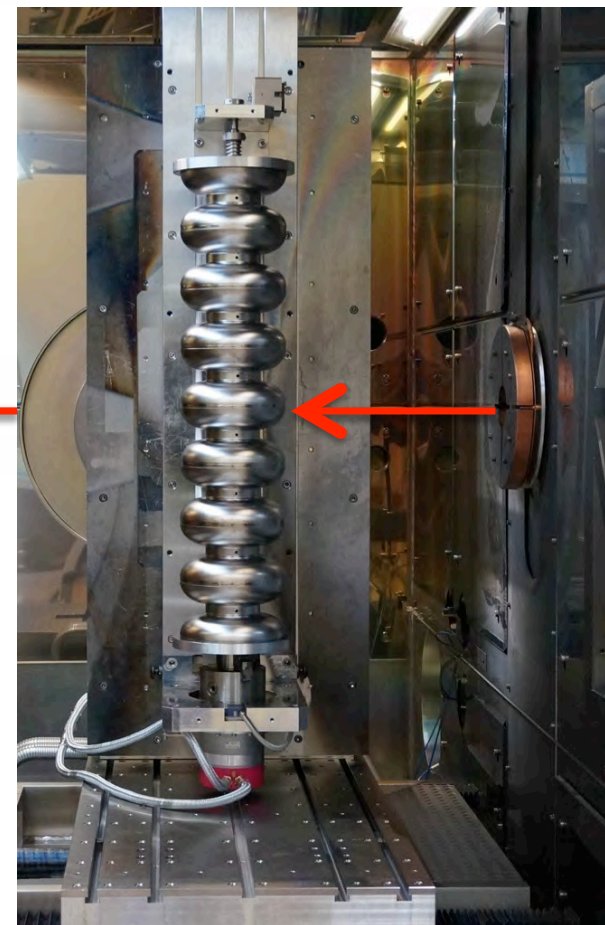
多ダンベル化



2ダンベル



4ダンベル



8ダンベル

ダンベルを縦に重ねて、赤道部を溶接する

ニオブ材の電子ビーム溶接は難しい

化学研磨

フッ酸、リン酸、硝酸の混合液

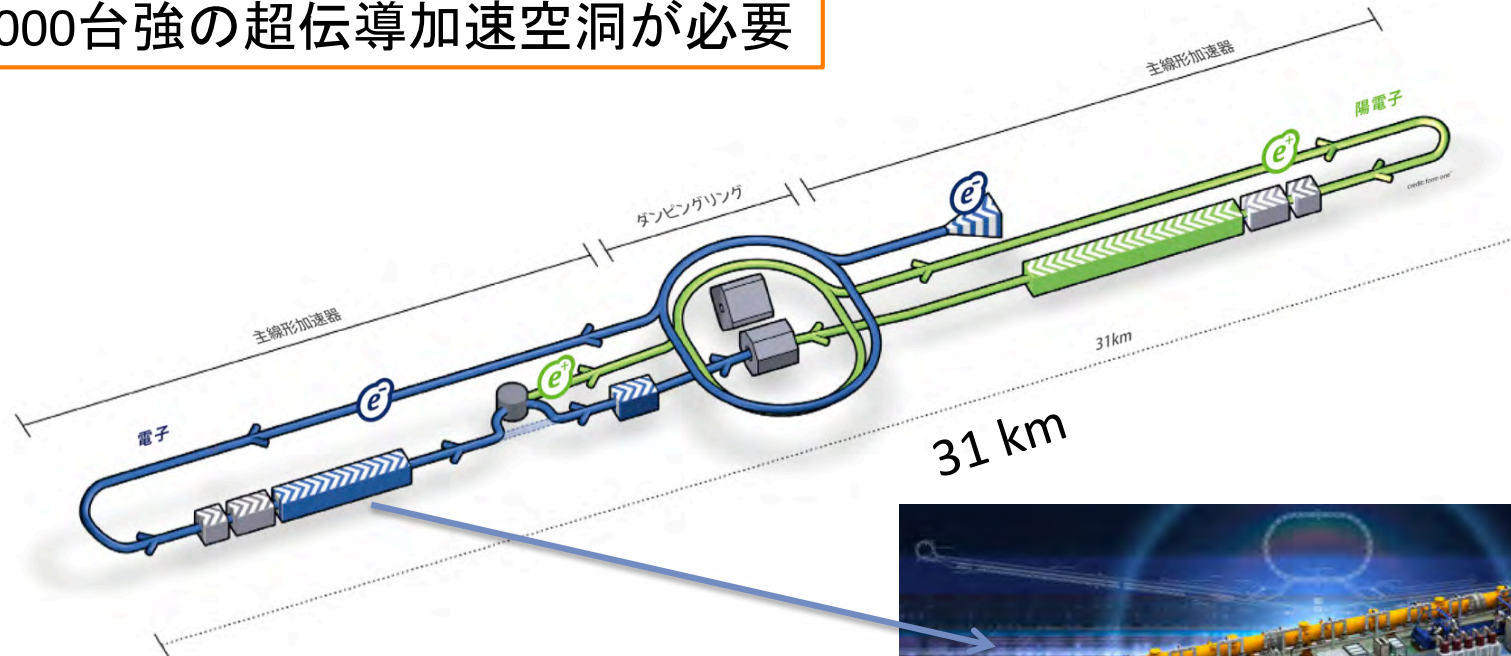


溶接を行う前に、開先(溶接する部分)をきれいにして、不純物を除去するため

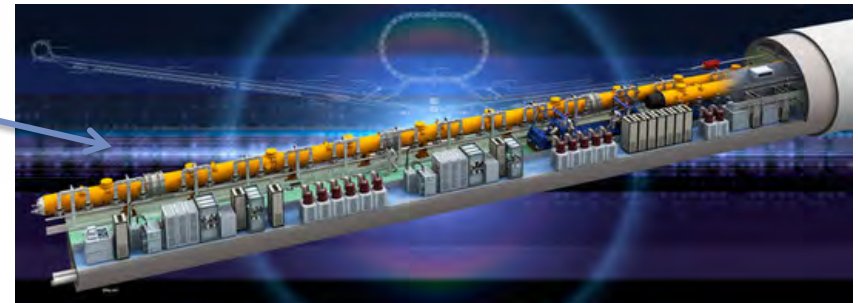
今後、自動化を図る必要がある工程

ILC計画

17,000台強の超伝導加速空洞が必要



クライオモジュール(黄色)の中に
超伝導加速空洞を入れる



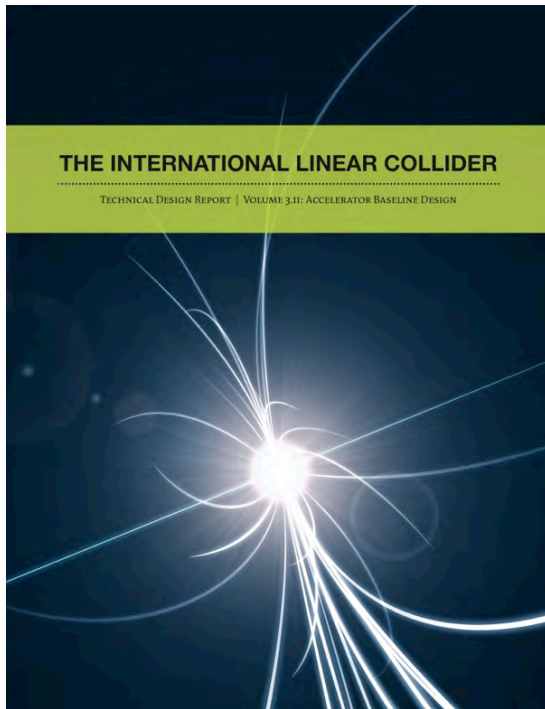
ILC(国際リニアコライダー; International Linear Collider)計画は、全長約30kmの直線状の加速器をつくり、現在達成しうる最高エネルギーで電子と陽電子の衝突実験を行う計画です。宇宙初期に迫る高エネルギーの反応を作り出すことによって、宇宙創成の謎、時間と空間の謎、質量の謎に迫ります。

ILC計画は、現在欧州CERN研究所で稼動しているLHCの次に実現すべき有力な大型基幹計画として、世界中の素粒子物理学者の意見が一致している計画です。ILC計画を進めるために、アジア・欧州・米国の3極の素粒子物理学者による国際共同研究チームが作られ、私たち日本の研究者も世界中の研究者と密接に協力しながら研究を進めています。

<https://aaa-sentan.org/ILC/>

ILCの実現に向けて (From Design to Reality)

Technical Design Report (技術設計報告書) の完成



ILCは建設可能！

Volume 3-II: Accelerator Baseline Design,
3.2.2 “Cavity fabrication and surface processing”
に製造方法の基本設計が示されている。

Table 3.6. Summary of steps required to fabricate a nine-cell cavity. (p 31)

Steps	Reference parameters	Notes:
<i>9-cell cavity fabrication:</i>		
- Raw material preparation	Nb sheet: $t = 2.8 \text{ mm}$, $RRR \geq 300$	Acceptance with sheet inspection including visual and non-destructive defect inspection.
- Component fabrication		Using press, machining, and electron-beam welding (EBW).
- Assembly of 9-cell cavity		Using EBW
- Inner-surface inspection		Using optical inspection method†.
<i>Inner-surface treatment:</i>		
- Light etching with BCP	5–20 μm	(Optional: EP, 5–20 μm)
- Heavy EP	100–120 μm	$\sim 24 \mu\text{m}/\text{hour}$ at $30^\circ\text{C} \leq T \leq 35^\circ\text{C}$
- Post-heavy-EP cleaning		
- Out-gassing	800 $^\circ\text{C}$, ≥ 2 hours	
- RF tuning		Using tuning machine and non-contacting bead-pull method*.
- Light EP	20–30 μm	$\sim 12 \mu\text{m}/\text{hour}$ at $20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$.
- Ethanol or detergent rinsing	~ 1 hour	
- First HPR rinsing	6 hours, 3 passes	Purity level of water: Resistivity 18 M Ω cm.
- First clean-room assembly		
- Final HPR rinsing	6 hours, 3 passes	
- Final assembly		In class 10 clean-room.
- Leak check		Sensitivity: $\leq 2 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- In-situ baking	~ 48 hours at $\sim 120^\circ\text{C}$	
<i>Assembly of LHe tank:</i>		
- Pre-assembly & check-out		Check-out of tank components. Validation of hermeticity and mechanical sturdiness under over-pressurised conditions from safety standpoint.
- Assembly of LHe tank		Assembly with 9-cell cavity part, using EB or TIG welding
- HPC inspection	1.5 (or 1.25) $\times 2$ bar	Differential. Depending on HPC in region.
- Leak-check		Sensitivity: $\leq 1 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- General inspection		Dimensions etc.
<i>Cavity RF performance test:</i>		
- Cool-down		Cool-down time: several hours
- Q_0 vs. gradient		π and pass-band mode, including radiation monitoring.
<i>Post-performance test assembly and check:</i>		
- coupler and HOM assembly		Including leak-check.
- tuner assembly		Including functioning test.
- General inspection		As an acceptance test for cavity-string assembly.
Terms:		
RRR: residual resistance ratio		
EBW: electron-beam welding		
BCP: buffered chemical polishing		
EP: electro-polishing		
HPR: high-pressure (pure water) rinsing		
TIG: tungsten inert-gas welding		

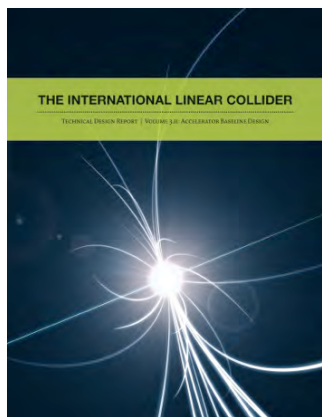
† Dedicated tooling/facility provided by laboratories.

Published on 12 June 2013

<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>

更なる高みを目指して

まだまだ、やれること、やらなければいけないことはたくさんある！



Updateのための
研究開発の継続

1. 歩留まりの向上 = 品質の安定
2. 性能向上
3. 製造コストの低減
4. 量産技術の開発

- 材料費
- 加工費



- 設計の見直し
- 工法の見直し
- 材料の見直し
- 調達の見直し



- 加速空洞といえども、特別ことは無く、教科書にのっているコストカットを粛々と！
- 企業様に教えていただくことは、たくさんある



共同研究の推進

KEK内で空洞製造を行う目的

17,000台強の空洞製造を実現する生産技術の開発

(16,024 × 1.1 = 17,626)

- 歩留まりの向上 = 品質の安定
- 性能向上
- 製造コストの低減
- 量産技術の開発



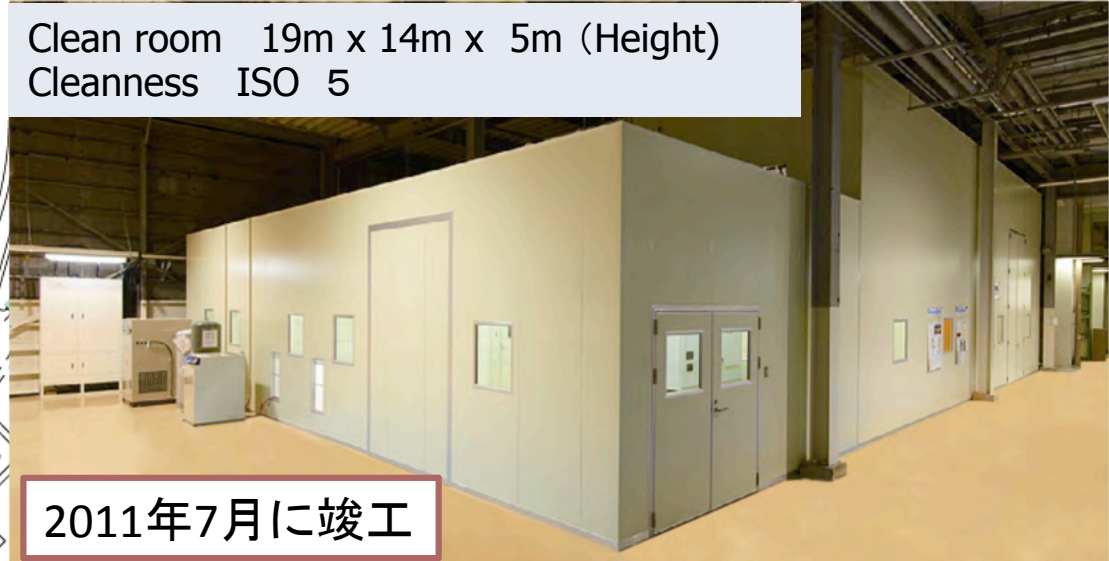
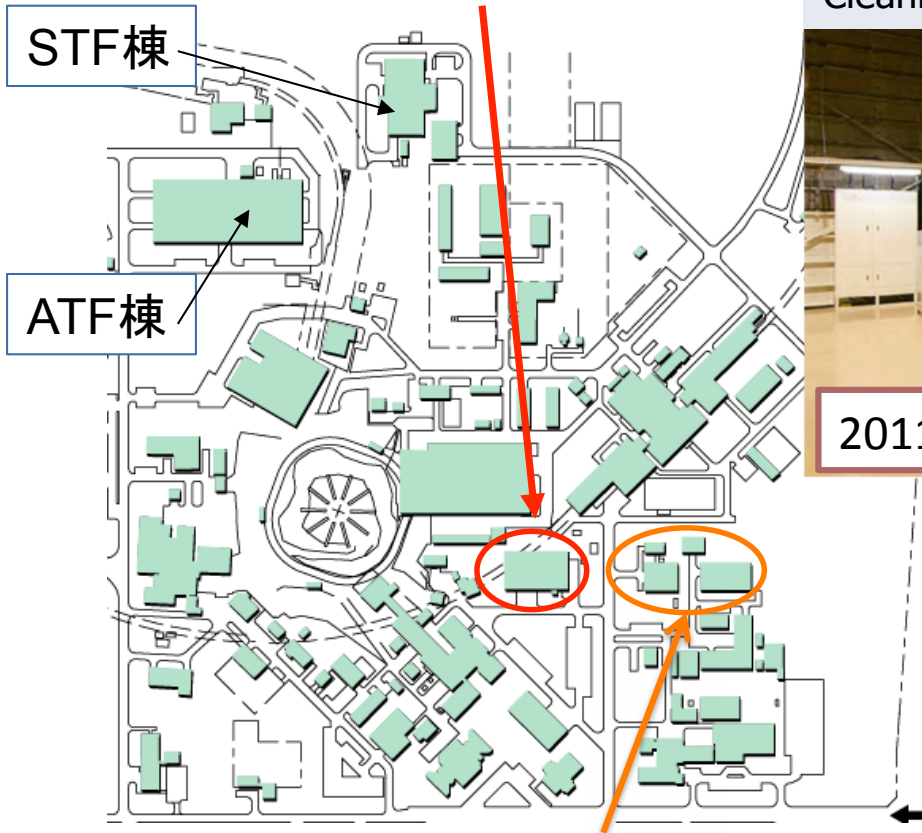
2011.7 竣工



空洞製造技術開発施設の紹介

Cavity Fabrication Facility (CFF)

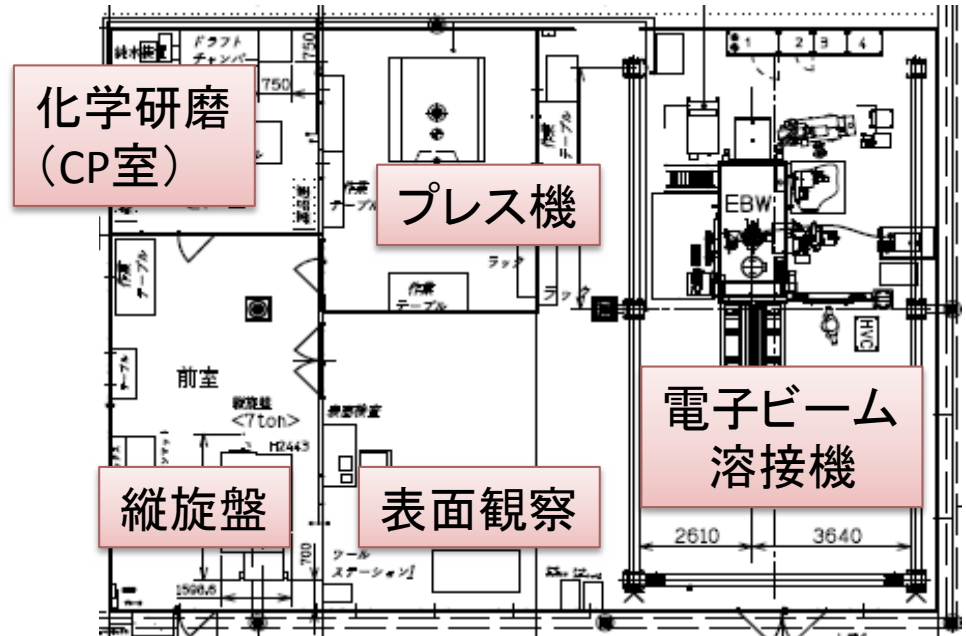
Clean room 19m x 14m x 5m (Height)
Cleanness ISO 5



2011年7月に竣工

機械工学センター

機械工学センターの既存の工作機械とCFFの設備により、超伝導加速空洞の内製が可能



CFFの主な設備



電子ビーム溶接機(ドイツSST社製)
最大ビーム電圧150 kV



マイクروسコープ
(表面観察用)



サーボプレス機
(アマダ製)

空洞製造に必要な設備
が一通り揃っている



化学研磨(CP)室



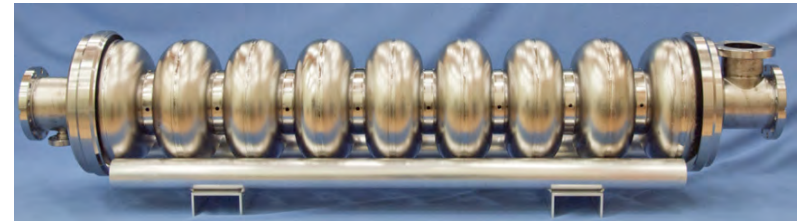
CNC縦旋盤(森精機製)

CFFの活動状況

- 2011. 7 空洞製造技術開発施設(CFF) 竣工
- 2012. 2 最初の空洞(KEK-0号機)が完成、加速勾配は29 MV/m.
- 2012. 4 2台目の空洞(KEK-1号機)の製造に着手
- 2014. 3 KEK-1号機が完成、加速勾配は36 MV/m
- 2014. 4 R&D用空洞(1セル、3セル)5台を製造
～2015.6
- 2016. 2 KEK-2号機が完成
- 2016. 4 KEK-3号機, R7/7b号機の製造に
着手



CFFの完成お披露目



KEK-0号機



KEK-1号機



KEK-2号機

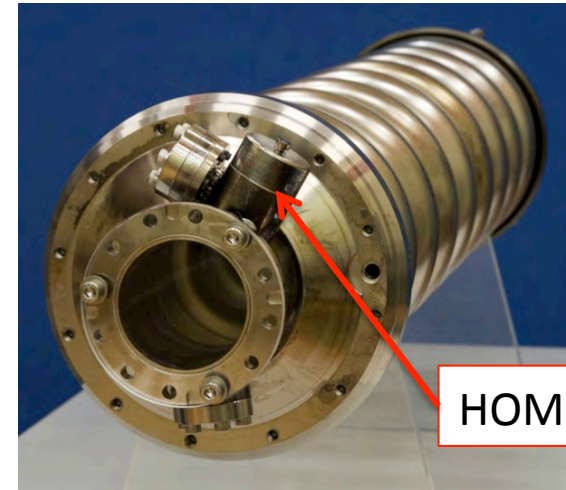
これまでに製造した空洞

9セル空洞:3台・各種治具を製作, 空洞製造の経験を積む
3セル空洞:1台, 1セル空洞:5台・研究用途

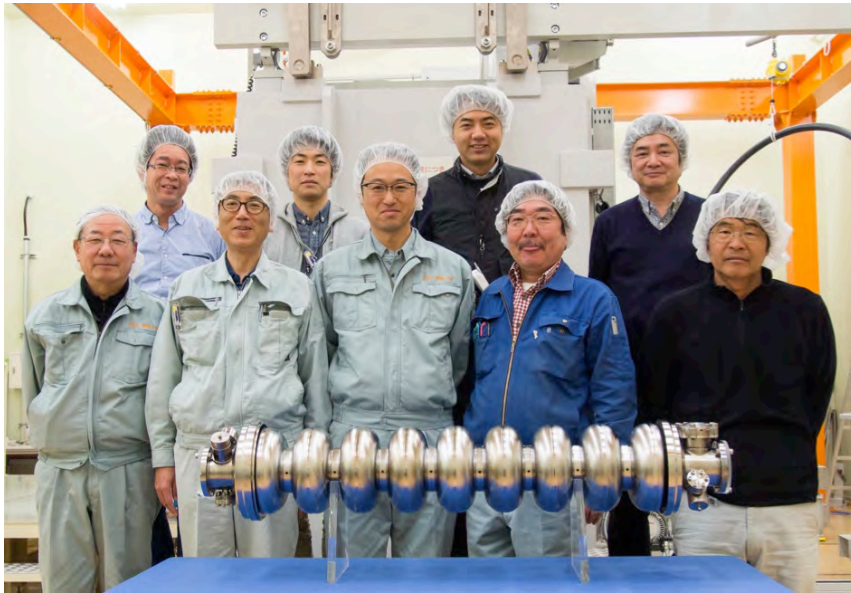
号機	セル数	目的	加速勾配 (MV/m)	備考
0	9	初めての9セル空洞製造	29	センターセルの溶接は外部のJobshop
1	9	完全にCFFでの内製 ILC仕様を満たす	36	
2	9	LG材空洞の試作	23	
R1	1	LG材空洞の試作	43	エンドセル形状
R2	1	標準的なFG材を使った空洞の製造	37	R1と同形状
R3	3	新しい製造技術のトライ 電子ビーム条件の改善	36	センターセル形状
R4	1	新しい材料メーカーのニオブによる試作	41	センターセル形状
R5	1	LG/低RRRの廉価なニオブ材の評価	31	R1と同形状
R6	1	企業による製造トレーニング	—	R1と同形状

空洞形状は全て、TESLA-like

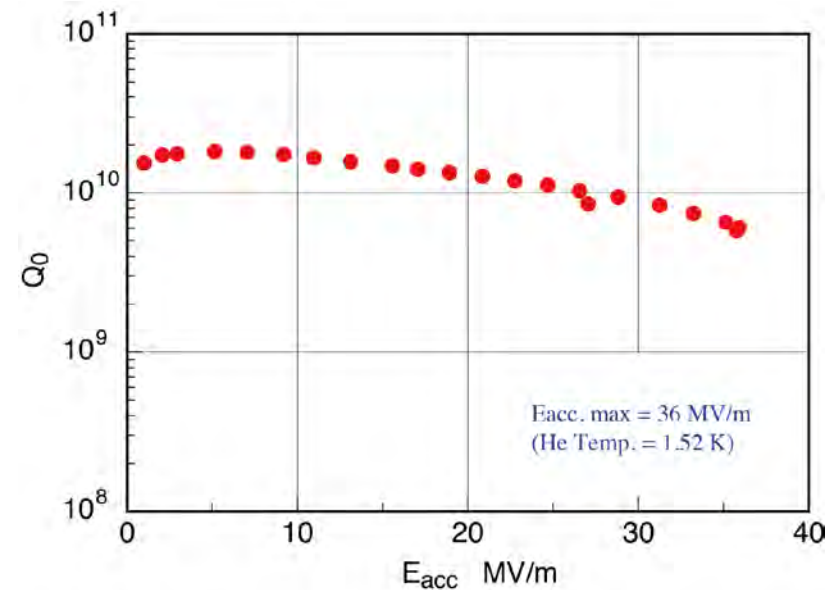
9セル空洞の例 (KEK-1号機)



HOM coupler



製造を担当したメンバー(一部)



電解性能試験(たて測定)の結果
⇒ ILC仕様(35 MV/m)を満たす

高性能が得られた要因

1. 高電圧電子ビーム溶接機の使用

高電圧型の電子ビーム溶接は、低電圧型に比べてビームのエネルギー密度が高く、同じ溶け込み深さを得るための出力が小さいために、熱歪が小さい特徴があります。CFFでは、SST社(ドイツ)の電子ビーム溶接機(最大加速電圧150 kV)を使用しています。

2. 専用電子ビーム溶接機

本電子ビーム溶接機は、空洞製造専用としています。空洞材料以外の銅、ステンレス等の溶接は行いません。これらに起因するベーパーの付着による品質低下のリスクを回避しています。

3. クリーンルームでの製造

CFFはクラス100000のクリーンルームです。実測ではクラス1000程度です。溶接前に行う化学処理の部屋もクリーンルームでつながっています。洗浄後に埃の付着がない状態で電子ビーム溶接ができるように、作業環境を管理しています。

4. 高品質なニオブ材の使用

ニオブ材の残留抵抗比(RRR)は超伝導特性に大きく影響します。本空洞では $RRR > 300$ の高純度ニオブ材を使用しています。空洞両端のビームパイプはヘレウス社(ドイツ)、その他の材料は東京電解(日本)より調達しています。

研究用空洞の例

Motivation

Reduce the niobium material cost

Approach

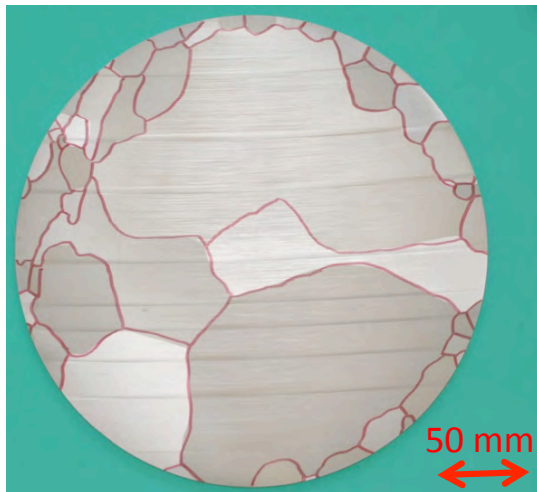
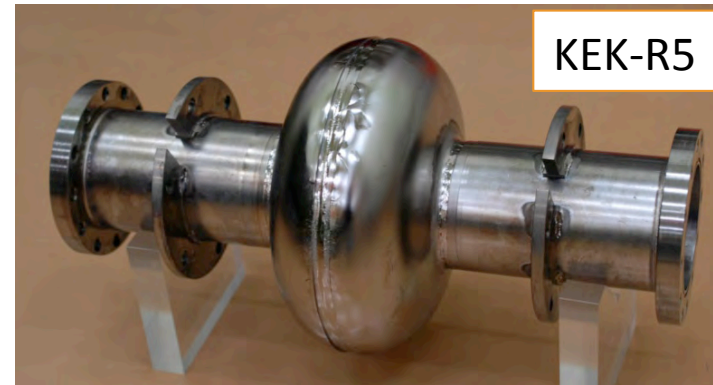
- Use low RRR cheap niobium
- Use sliced ingot sheet

Objectives

- Manufacture a single cell cavity
- Evaluate the performance

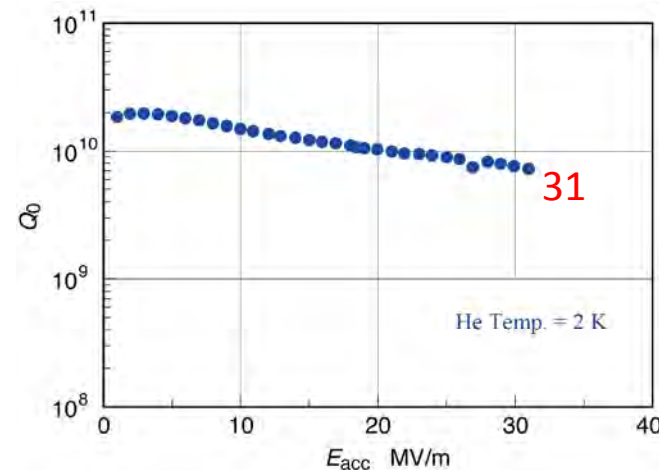
Chemical compositions (unit: ppm) and RRR

H	C	O	N	Fe	Si	Ta	RRR
< 10	< 30	< 30	10	3	20	1034	100



Sliced ingot niobium (φ260)
Boundary was traced by felt pen
Material was manufactured by CBMM

1.3 GHz single cell cavity manufacture by CFF at KEK
Cell shape: TESLA-like (end cell)

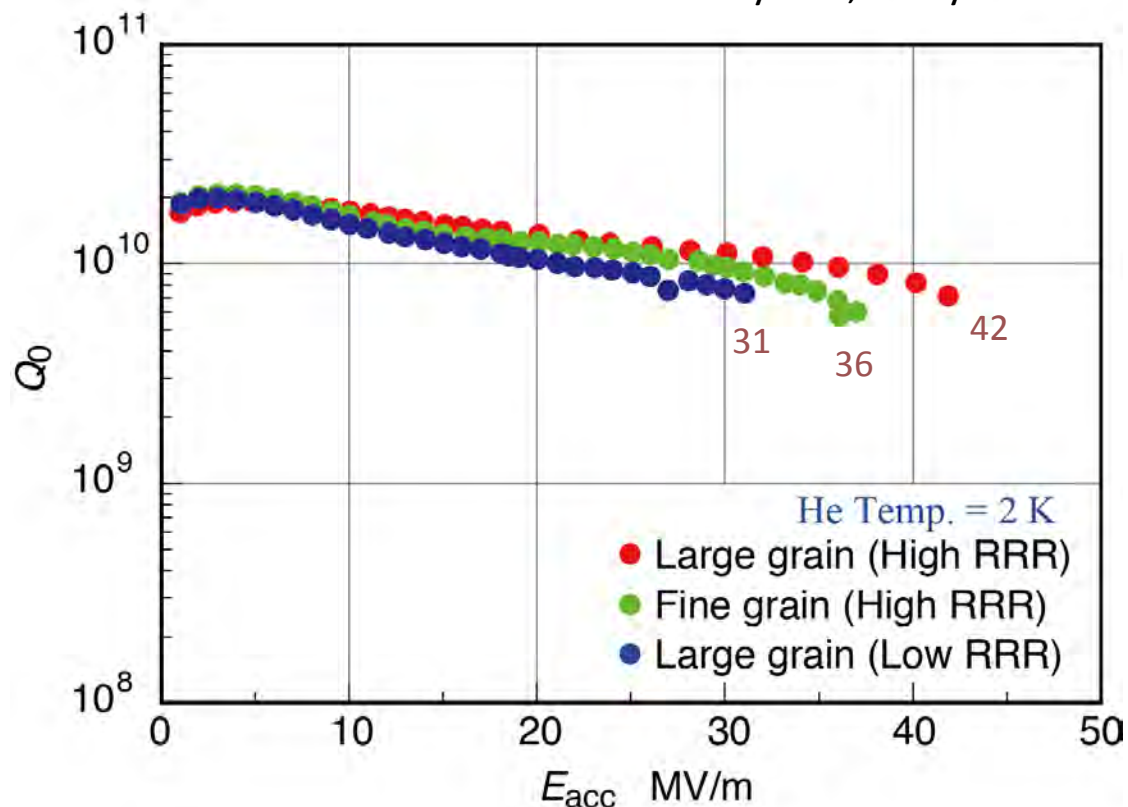
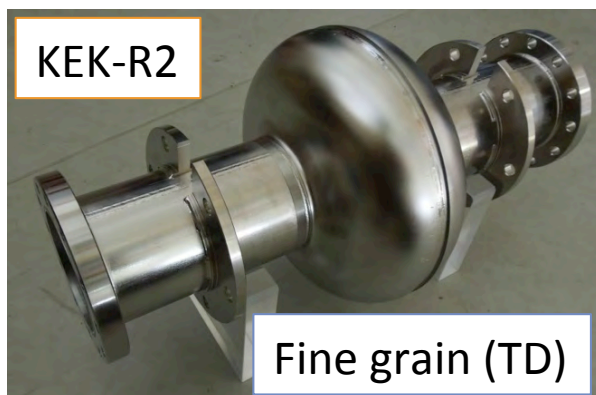
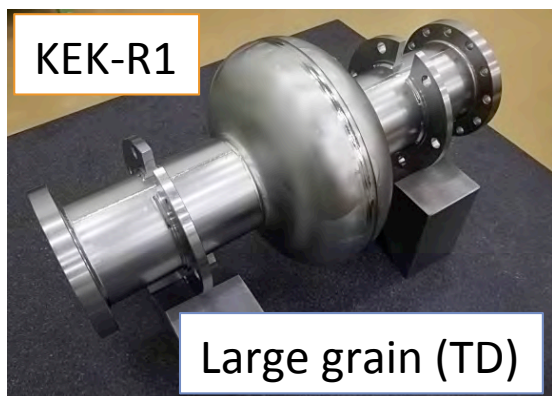


Result of vertical test

研究用空洞の例2

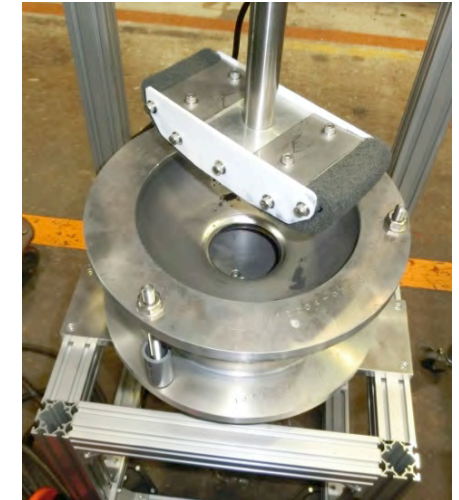
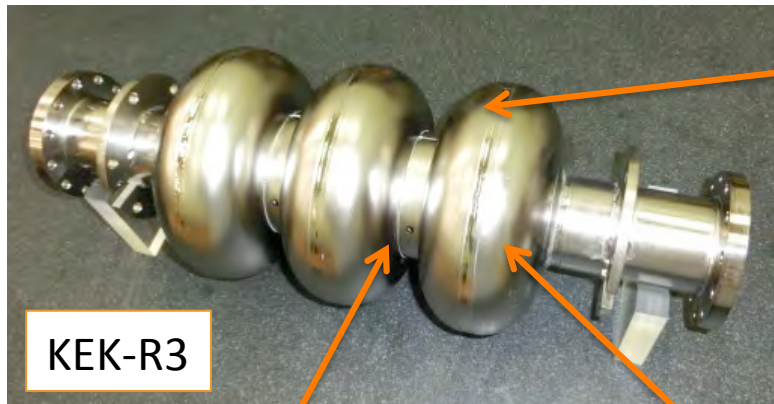
	H	C	O	N	Fe	Si	Ta	RRR
LG (TD)	< 5	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	80	390*
FG (TD)	< 10	40	100	40	20	20	700	258**
LG (CBMM)	< 10	< 30	< 30	10	3	20	1034	100*

Measurement RRR: * by KEK, ** by TD



The effect of low RRR and high Ta is not separated here.

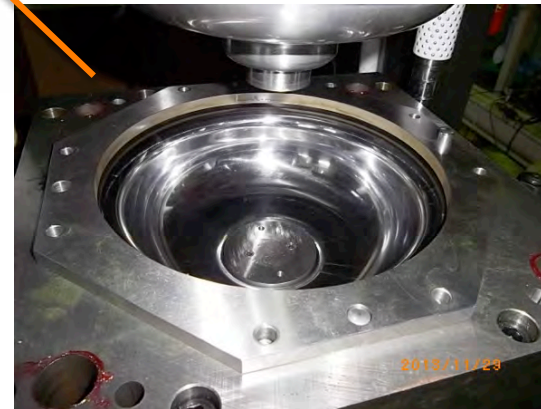
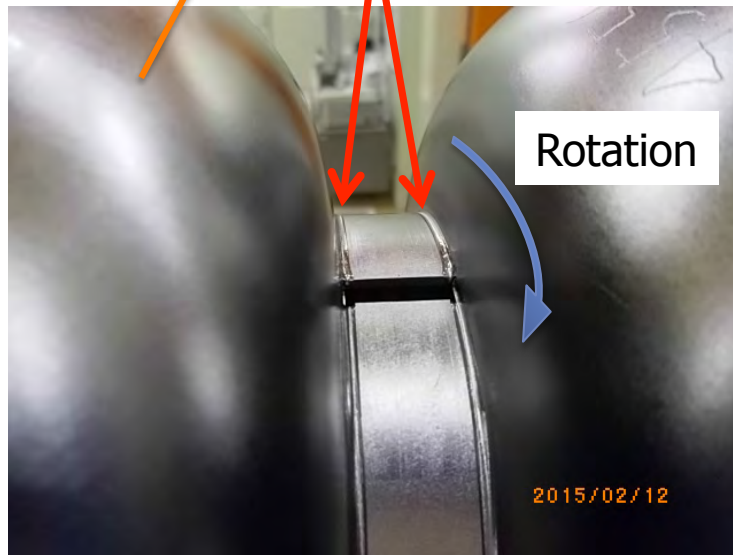
製造技術の開発



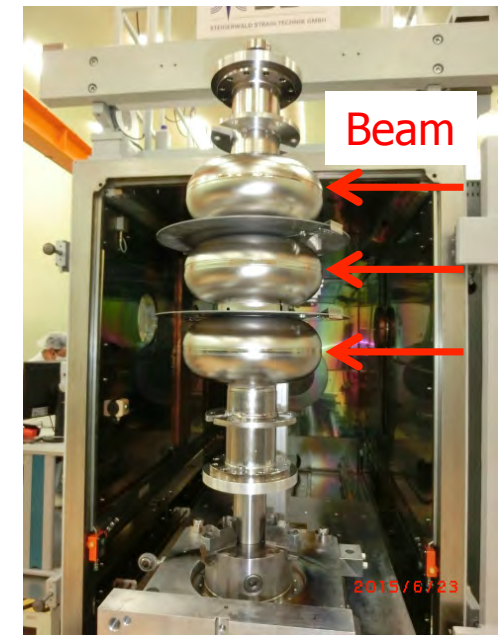
Beam (deflection)

ダンベルの矯正不要
(強め輪の幅の最適化)

ダンベルの内面磨きの
自動化



セルのプレスと機械加工
は企業で実施(技術移転)



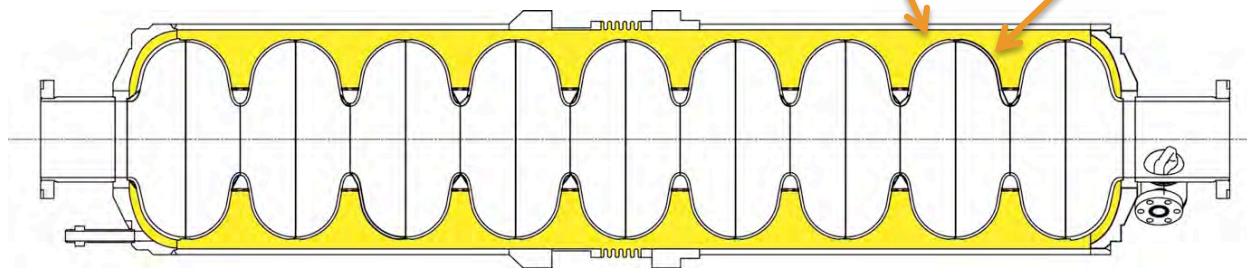
2-ビームで強め輪の
左右を同時に溶接

赤道部の連続溶接

ジャケットの製造とTIG溶接

空洞は、チタン製のジャケットに入れる。

LHeを満たす



リークチェックの様子



ジャケットと空洞のTIG溶接



完成品