

超伝導空洞の製造

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
道前 武

高エネルギー加速器セミナー OHO'21
2021/9/9

はじめに



本講義では超伝導加速空洞の製造について説明する

ILCでは

- およそ9000台もの超伝導加速空洞が必要になる
- 非常に高い空洞性能が求められている

空洞製造に関して

- 空洞材料のニオブはレアメタルであり、加工したことがある業者は少ない
- 高い技術力とノウハウが必要となる
- 製造出来る会社は世界でも数少ない（数社しかない）
- 製造技術のノウハウは外には出てこないことも多い
- KEKの空洞製造技術開発施設（CFF）では空洞製造技術の開発を行っている
→今回は我々が持っている知識を発表する

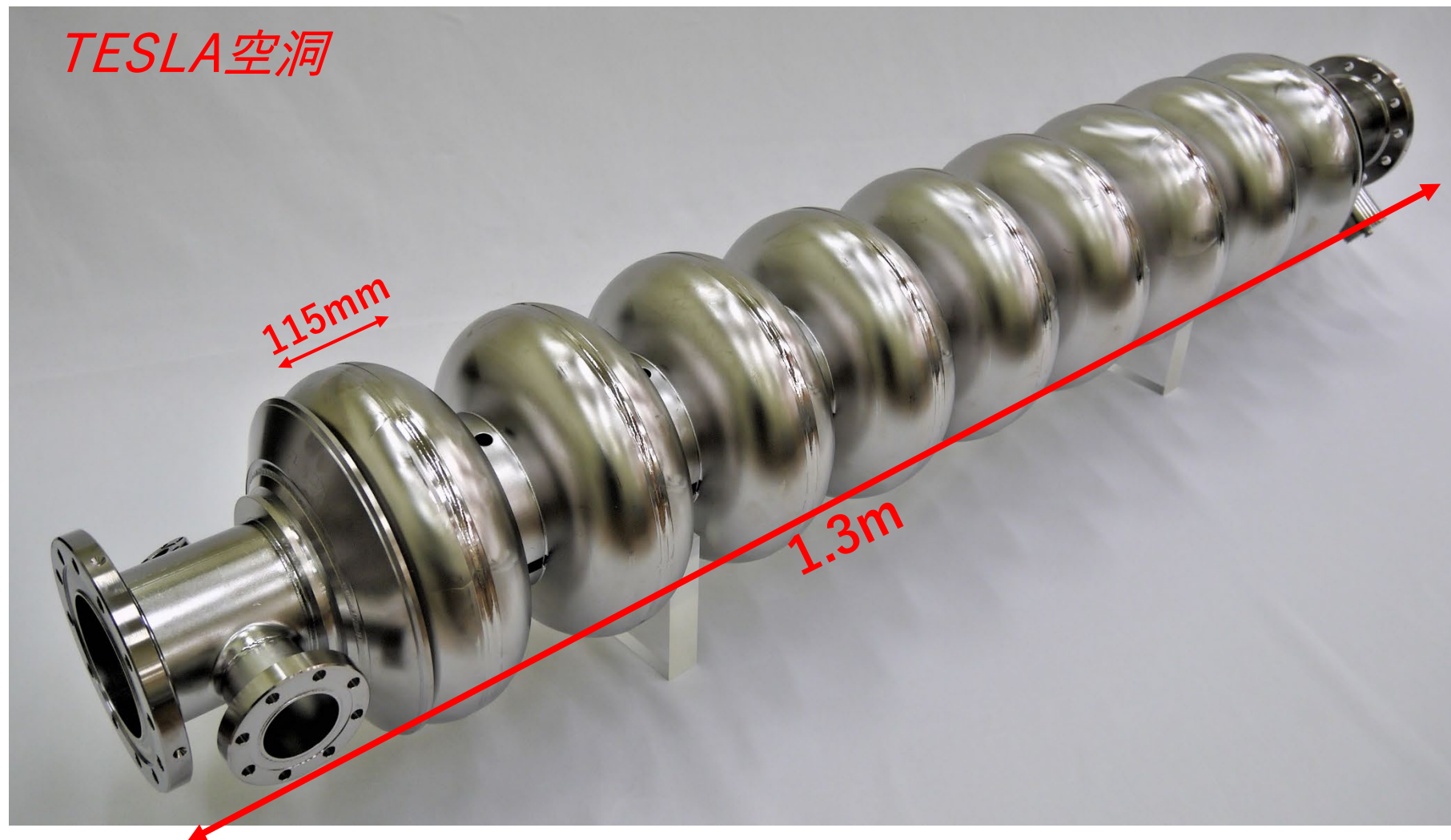
空洞製造の歩留まり



DESYでEuropean XFEL用に空洞を製造した際の
空洞の性能分布と歩留まり。(2016)
800台以上の空洞が製造された。

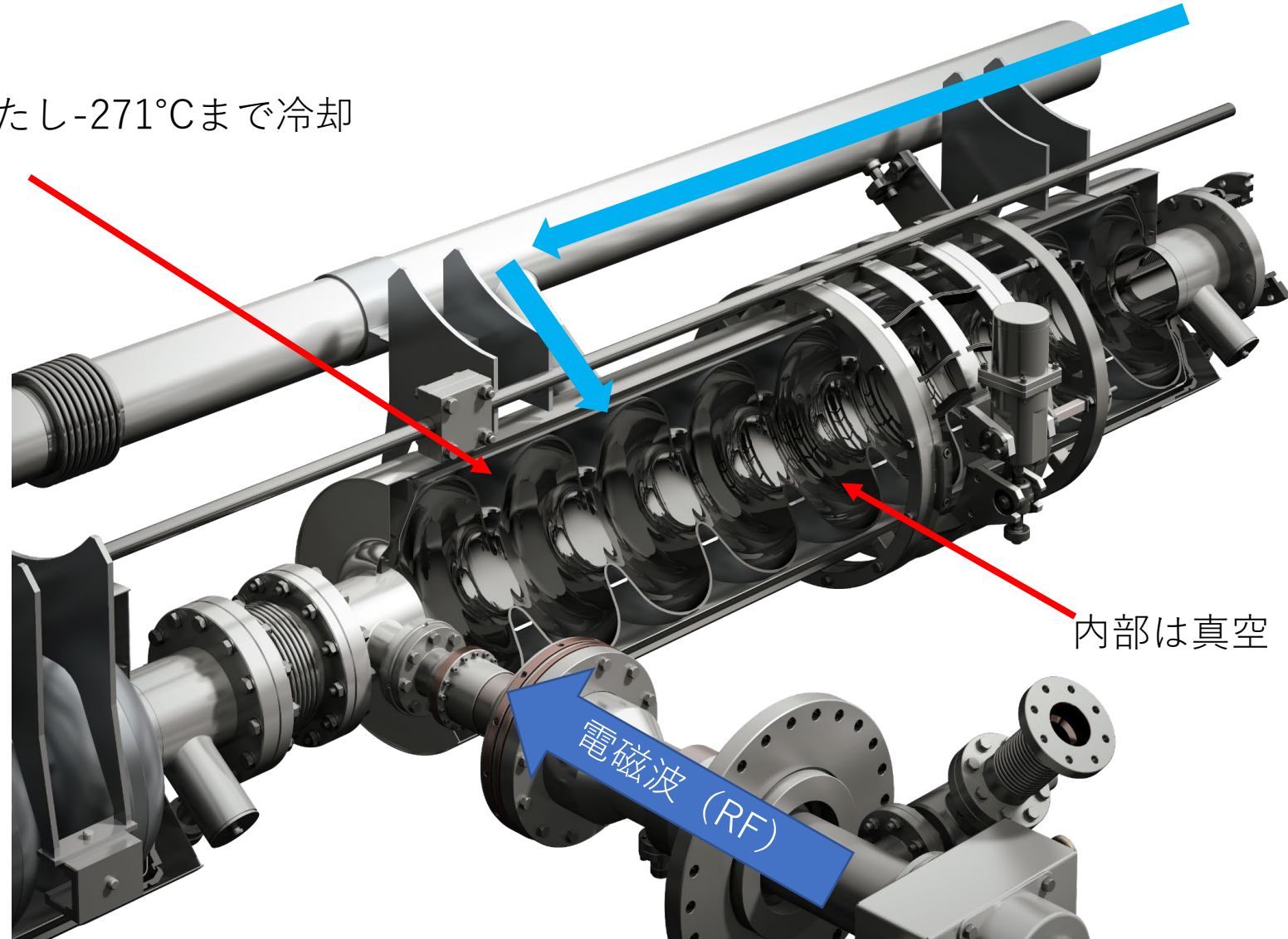
空洞紹介

ILCに於ける超伝導加速空洞

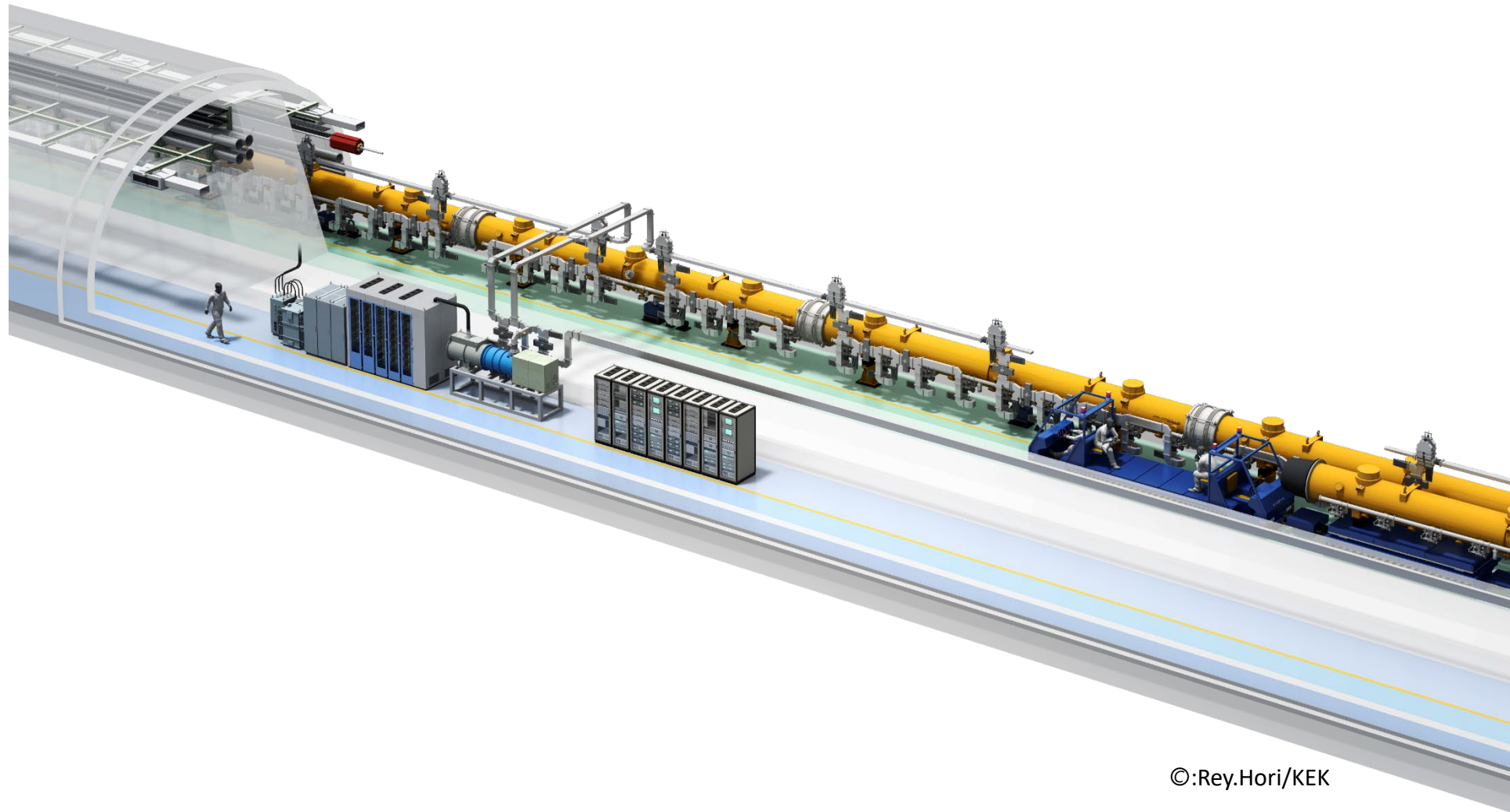


超伝導空洞の運転

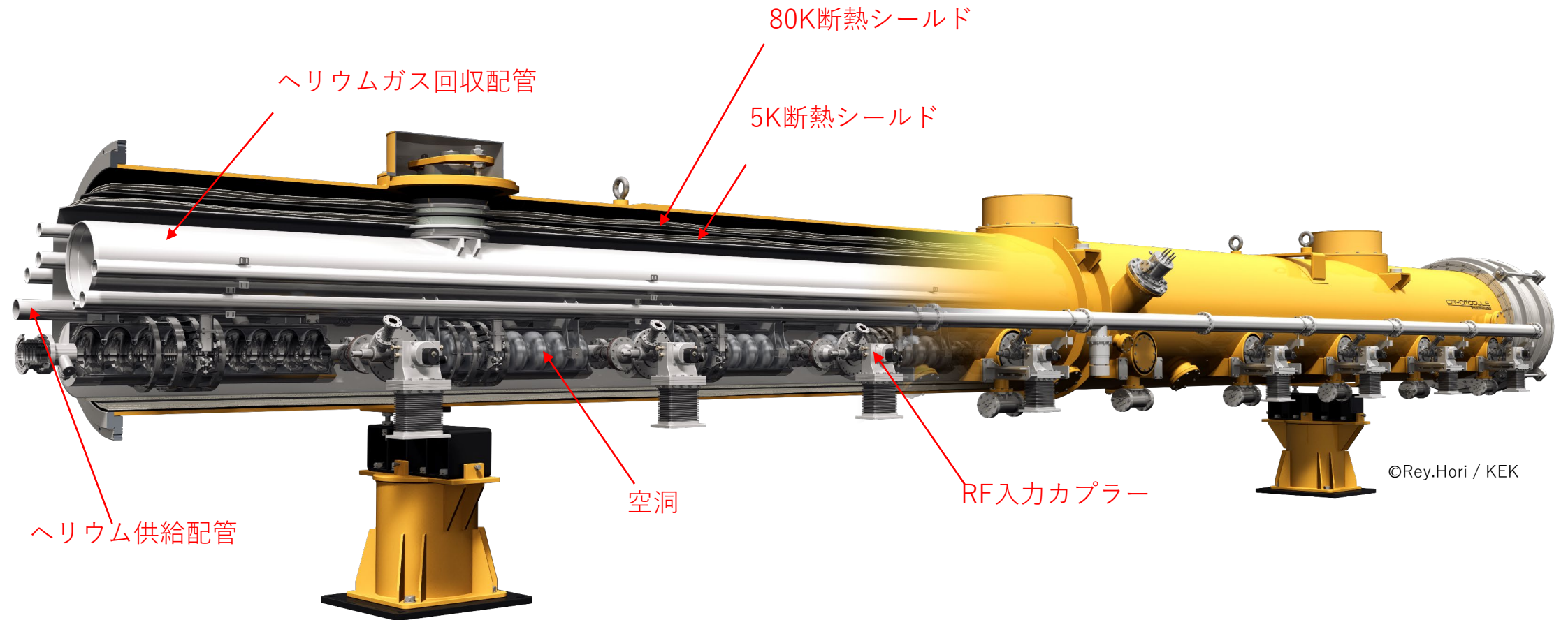
液体ヘリウムで満たし-271°Cまで冷却
超伝導状態へ



ILCに於ける超伝導加速空洞



ILCに於ける超伝導加速空洞



©Rey.Hori / KEK

実際の写真 (DESYにて)

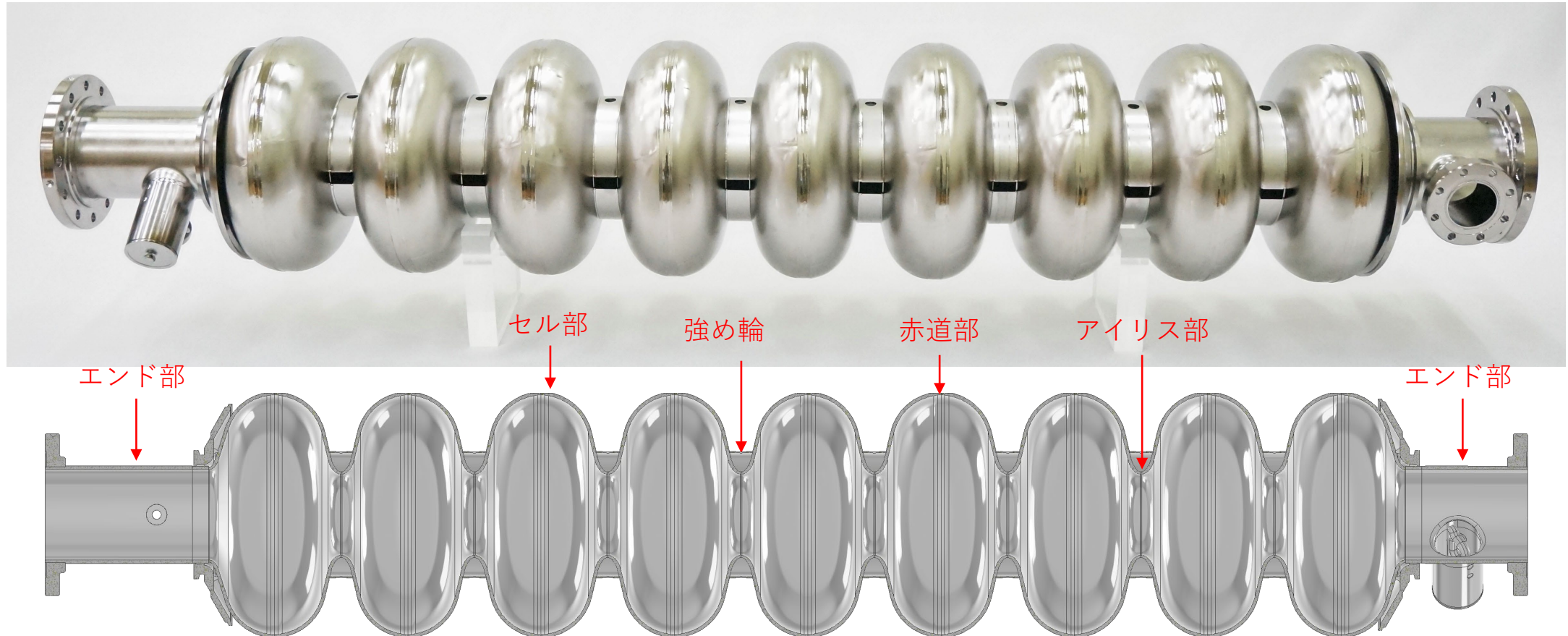


超伝導加速空洞のILC仕様

Type of cavity	Standing wave
Accelerating mode	TM010, π -mode
Frequency	1.3 GHz
Number of cells	9
Iris diameter	70 mm
Beam tube diameter	78 mm
Operational temperature	2 K
Operation	
Gradient	31.5 MV/m
Quality factor @ 31.5MV/m	$\geq 1 \times 10^{10}$
Qualification	
Gradient	35 MV/m
Quality factor @ 35MV/m	$\geq 0.8 \times 10^{10}$



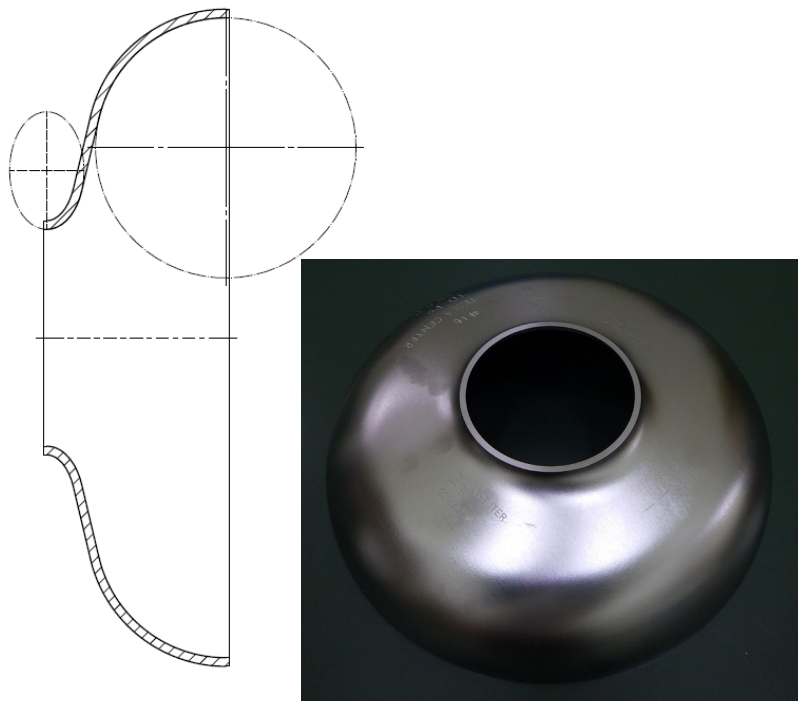
空洞各部の名称



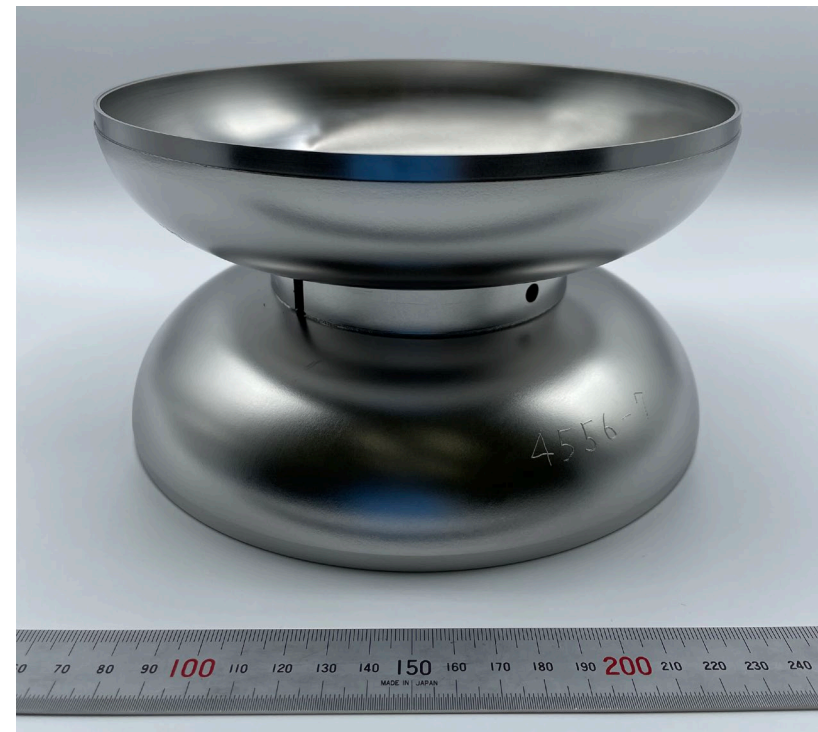
それぞれのパーツはねじなどは使わず溶接で接続されている

空洞各部の名称 (セル部)

ハーフセル

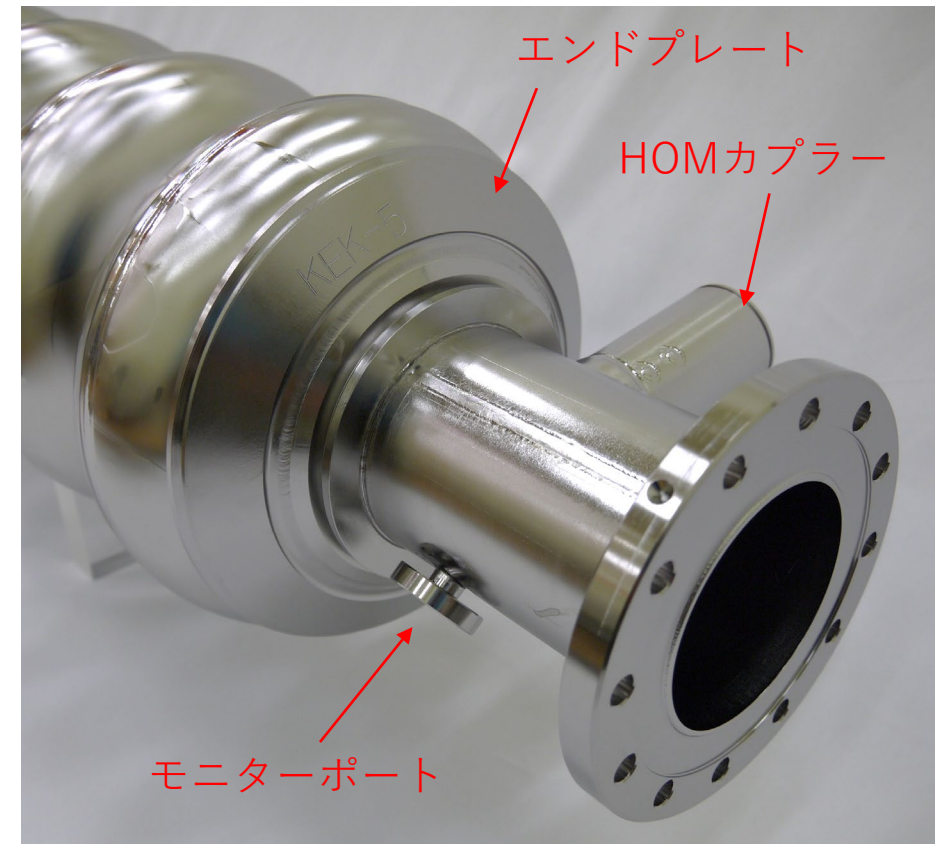
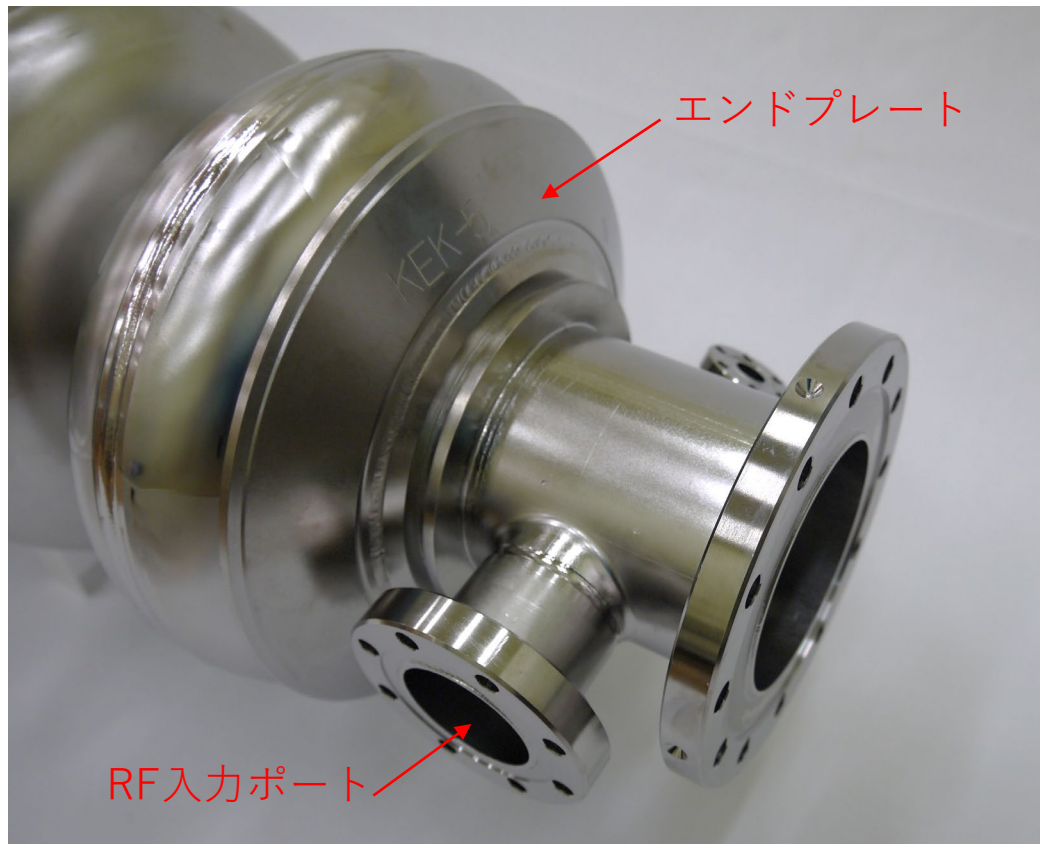


ダンベル



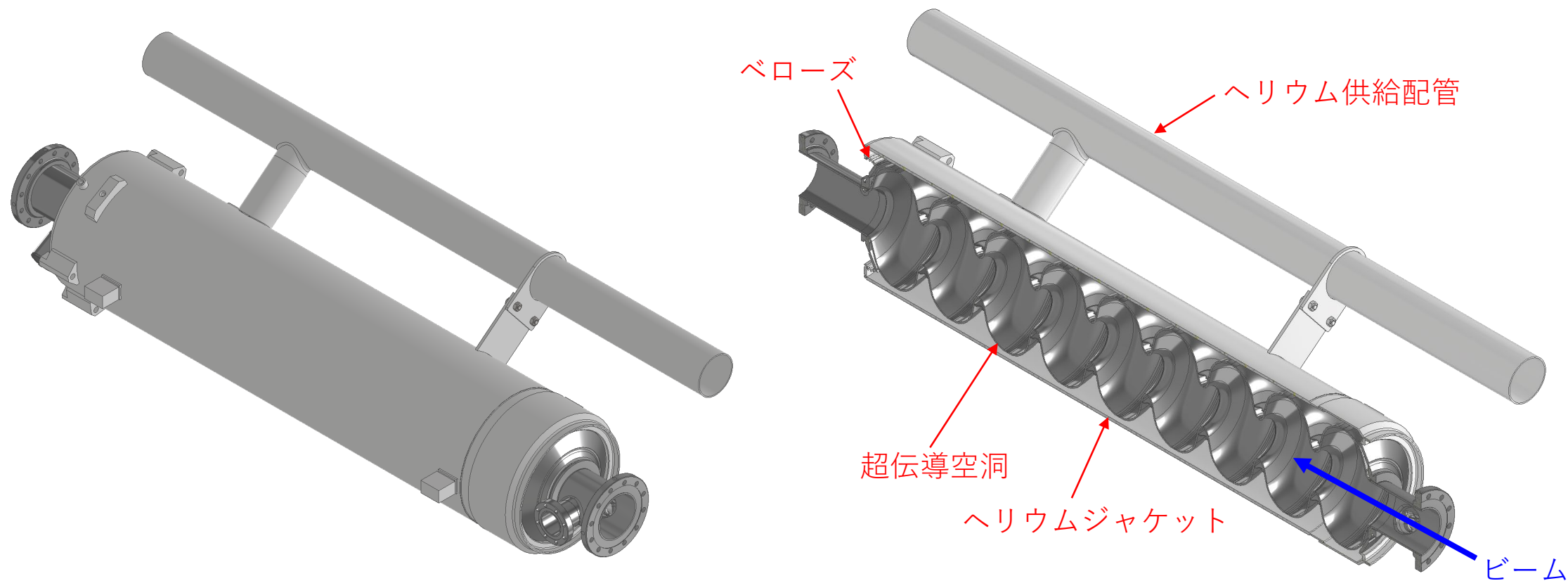
セル内面は特に傷などがつかない様、気を付けて扱わなければならない

空洞各部の名称 (エンド部)



エンド部は細かいパーツも多く、公差も厳しい場所もあるので実は製造が面倒

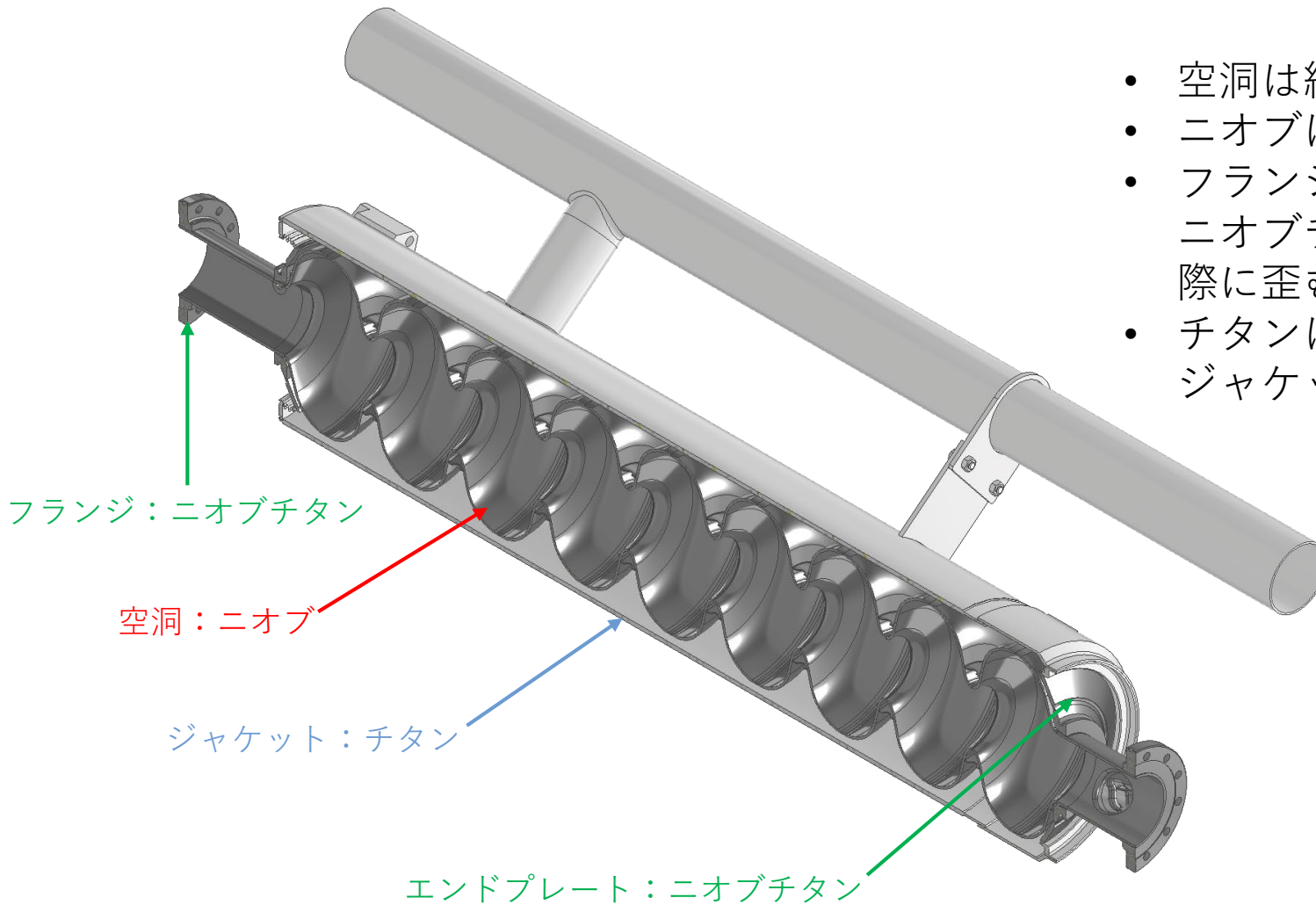
空洞各部の名称 (ヘリウムジャケット)



- 冷却に使用される液体ヘリウムは高圧ガスに分類される
→空洞（セル部分）とヘリウムジャケットは高圧ガス容器に分類される
→高圧ガス保安法の規格を満たす必要がある
- エンド部は液体ヘリウムに触れないので高圧ガス容器ではない

空洞材料

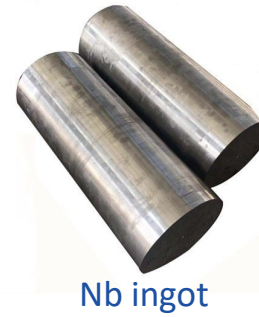
空洞材料



- 空洞は純ニオブ
- ニオブは成形性もよく、安定している
- フランジやエンドプレートなどは強度が必要なためニオブチタン（チタンでも良いが空洞を熱処理した際に歪むことがある）
- チタンはニオブと熱膨張係数が近く強度も高いためジャケットに使用されている

ニオブの生産

溶解

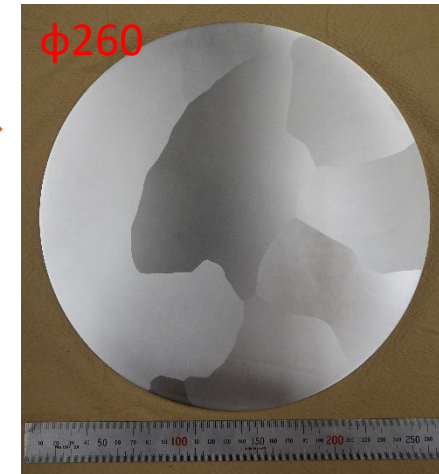


Nb ingot

Slice



Large Grain (LG) Nb



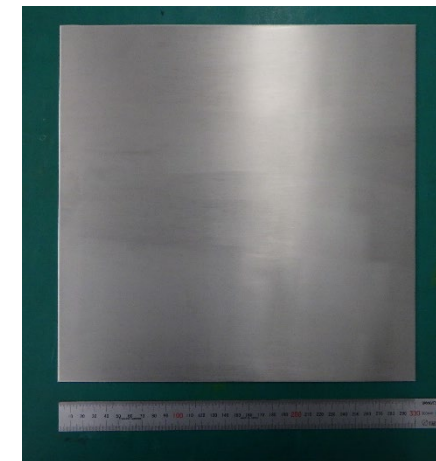
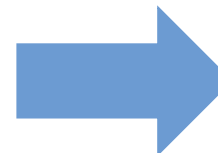
鍛造



圧延

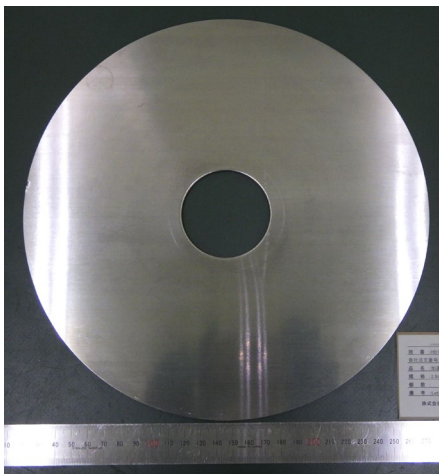
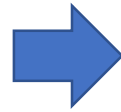
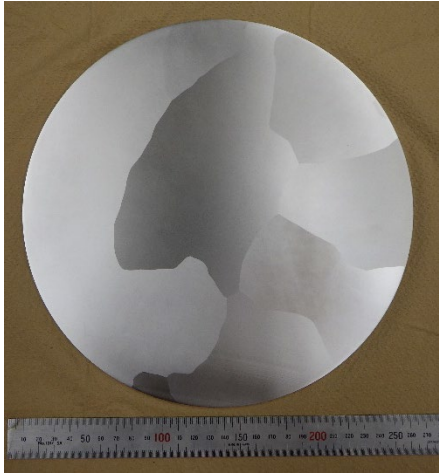


Fine Grain (FG) Nb



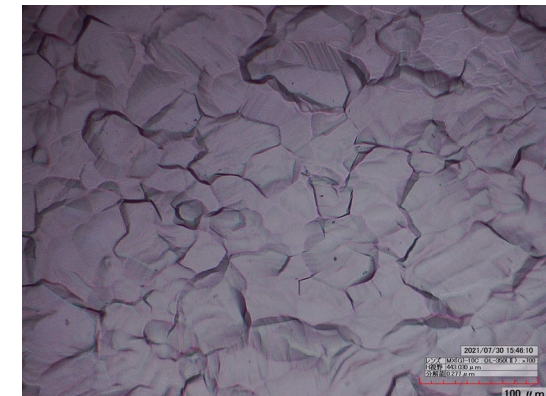
ニオブ材の粒径

結晶粒径が大きいと成型した際に歪んだり割れが生じることがある
→結晶はなるべく均一で小さい方が良い



50 μm 以下の結晶粒径が求められる場合もある

FG材の表面拡大写真



高純度ニオブ

高純度のニオブ = 熱伝導率が良い



空洞内で発熱が起きた際にクエンチする前に冷却出来る
→セル材には高純度ニオブを用いる

純度の指標 「Residual Resistive Ratio: RRR」

JIS $RRR = \rho(293K)/\rho(T_c)$

DESY $RRR = \rho(295K)/\rho(4.2K)$

ASTM $RRR = \rho(273K)/\rho(4.2K)$

※いくつかの定義があるので注意

純度を高めるには→真空炉で溶解を繰り返す

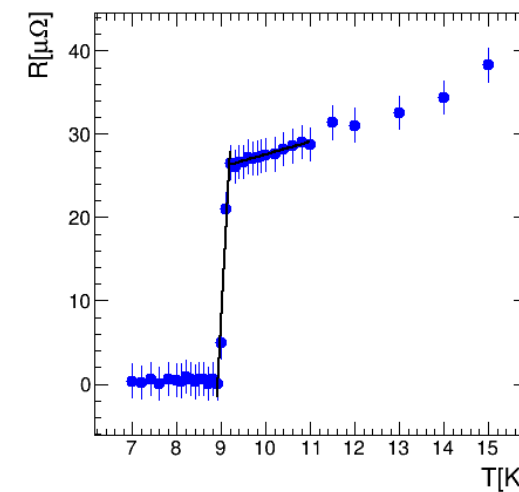


高純度ニオブ = 値段が高い (ILC要求はRRR>300)

高純度ニオブ = 柔らかい (強度に問題ないか注意)



低温での抵抗値測定



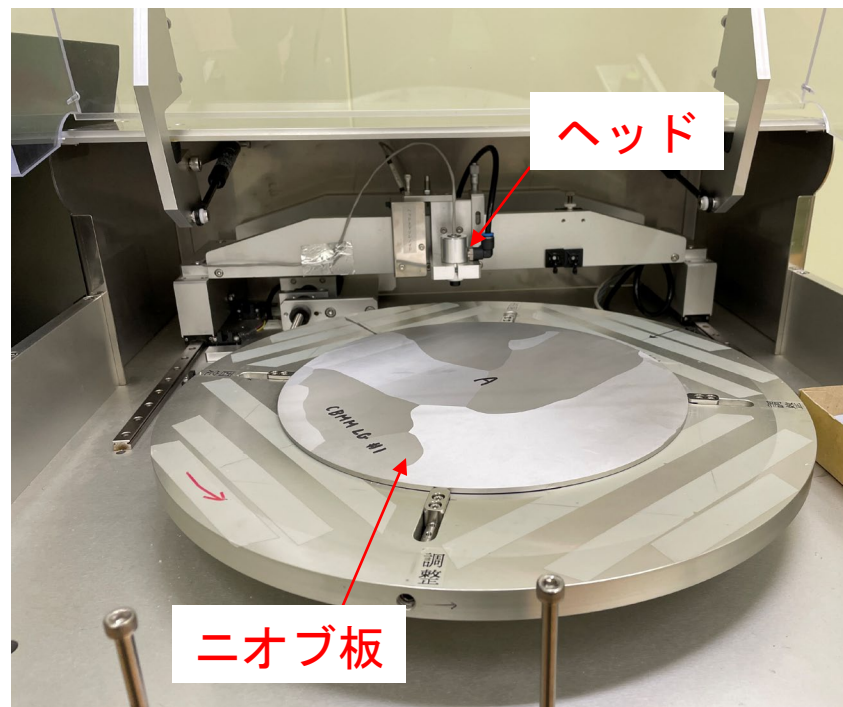
ニオブ板の検査

ニオブ内に潜む不純物や表面の傷を検査するために渦電流探傷試験機を使うこともある
DESYでは空洞に使用するセル材を全数検査した



歩留まりの向上

KEKで開発中の検査機（京大と共同開発）

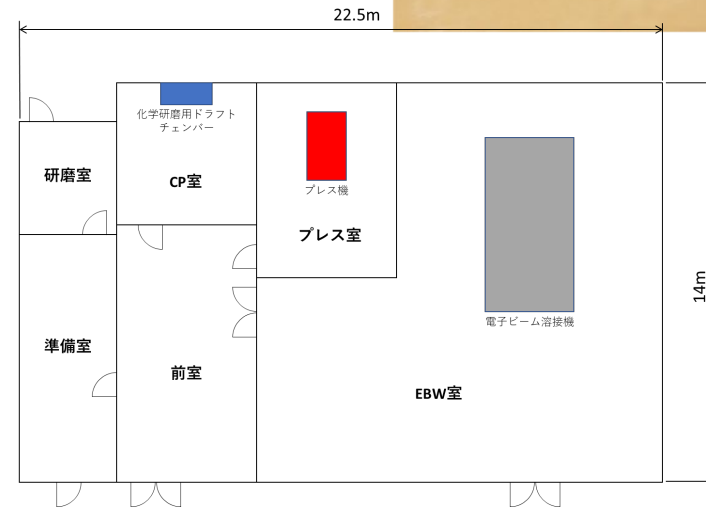


DESYの試験機



CFF

CFF紹介



- 2011年に建設された
- ILCに向けた空洞製造技術の開発を行っている
- 応用超伝導加速器センターと機械工学センターとの共同運営

CFFの設備

プレス機



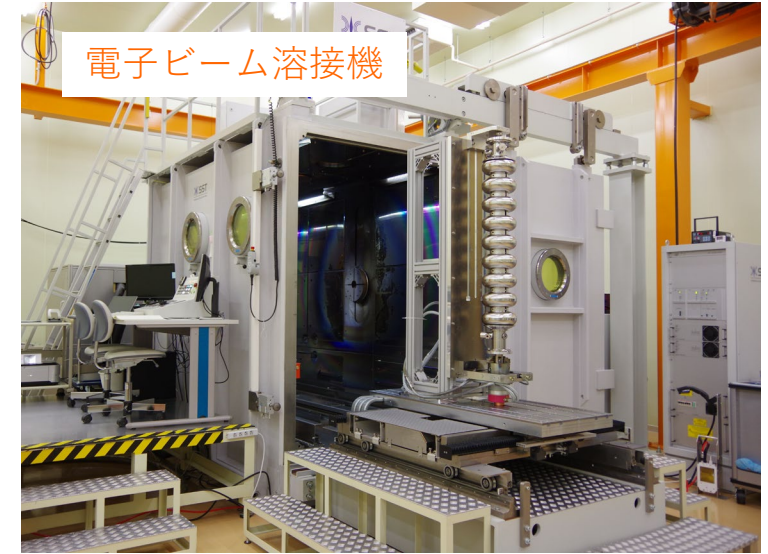
旋盤



化学研磨設備

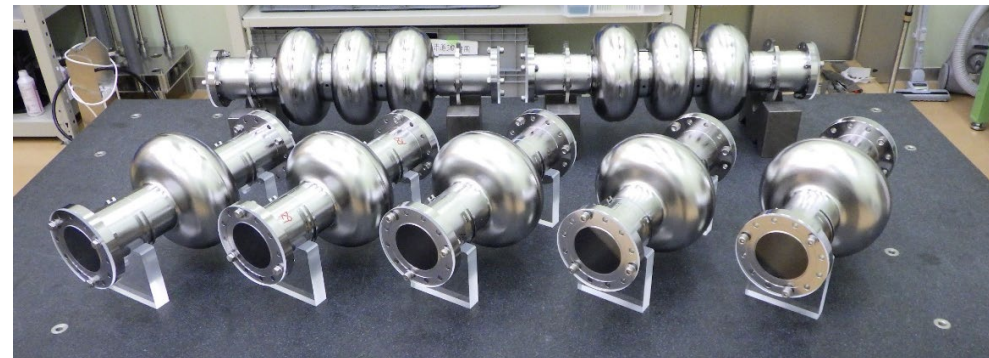
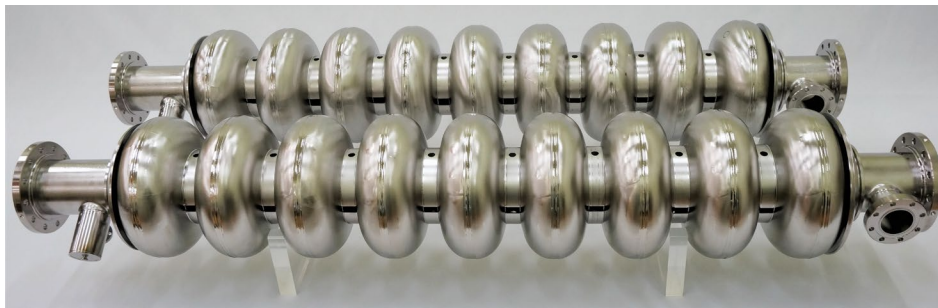
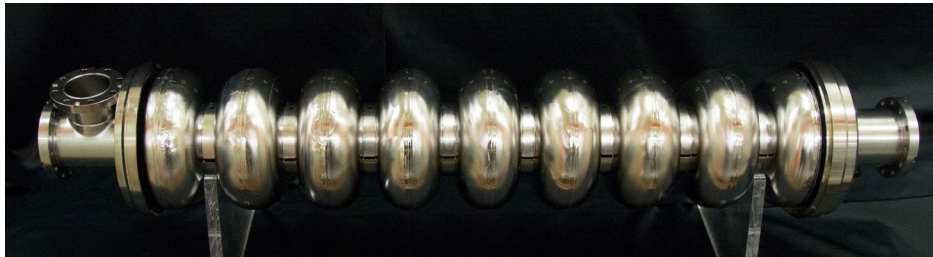


電子ビーム溶接機



空洞製造に必要な主な機器は揃っている
→機械工学センターの機器も併せればKEKで空洞製造が出来る

CFFの成果物



これまでに
9セル空洞：5台 3セル空洞：9台 1セル空洞：12台
製造してきた

空洞製造の極意

空洞製造の敵 (その1)



傷

表面に傷をつけない

RF面に傷があるとそこに磁場が集中し臨界
磁場に達する事でクエンチを起こす
→空洞運転が出来ない

空洞製造の敵 (その2)



不純物

不純物の混入を避ける

- 空洞のニオブ内に不純物が混入するとそこで発熱し、クエンチを起こす
→空洞運転が出来ない
- 溶接の際に表面が汚れていると溶接を失敗する恐れがある
→空洞が出来ない

ニオブの加工

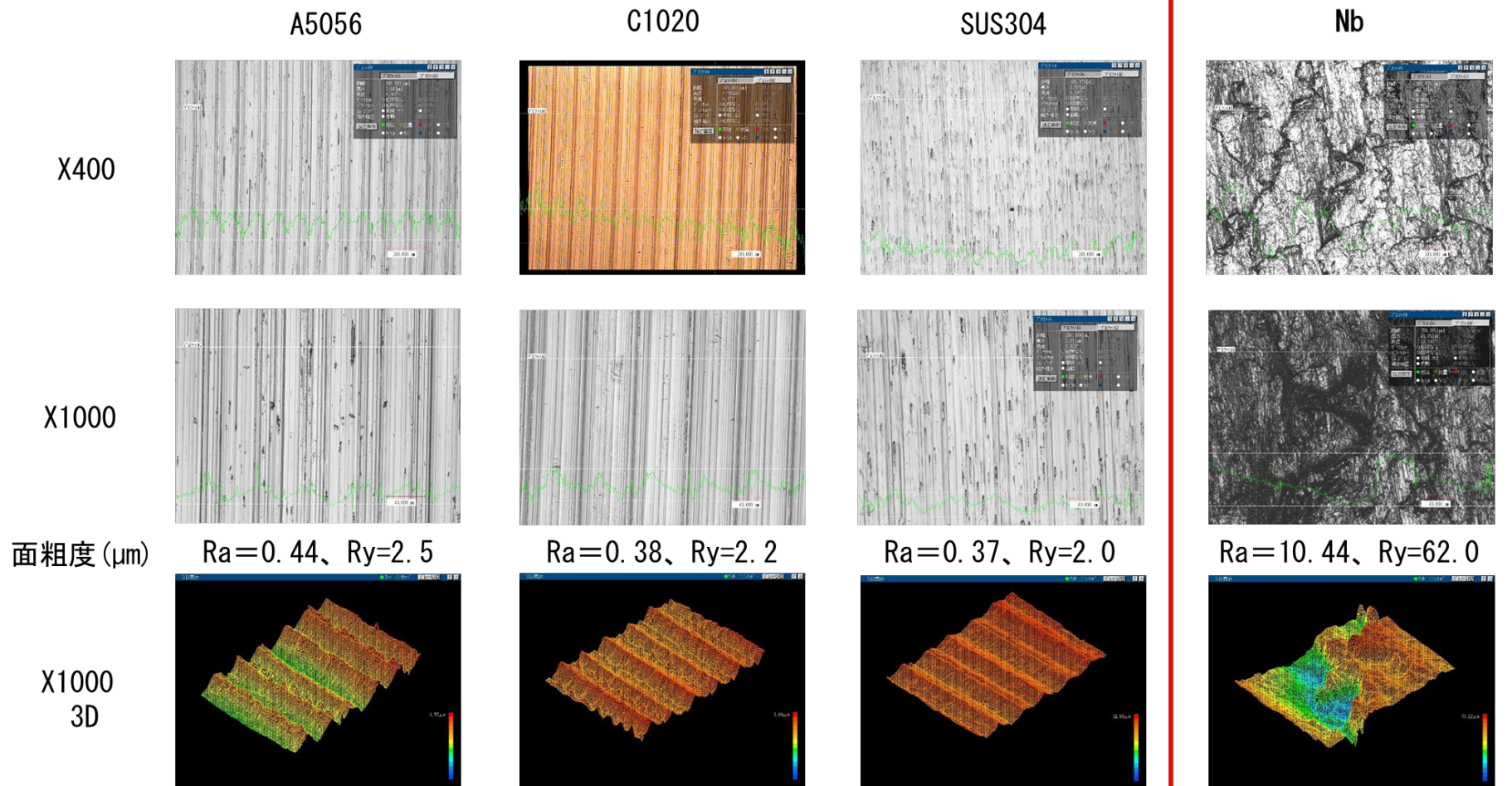
ニオブの加工

空洞製造の際に使われる加工方法は主に以下の通りである

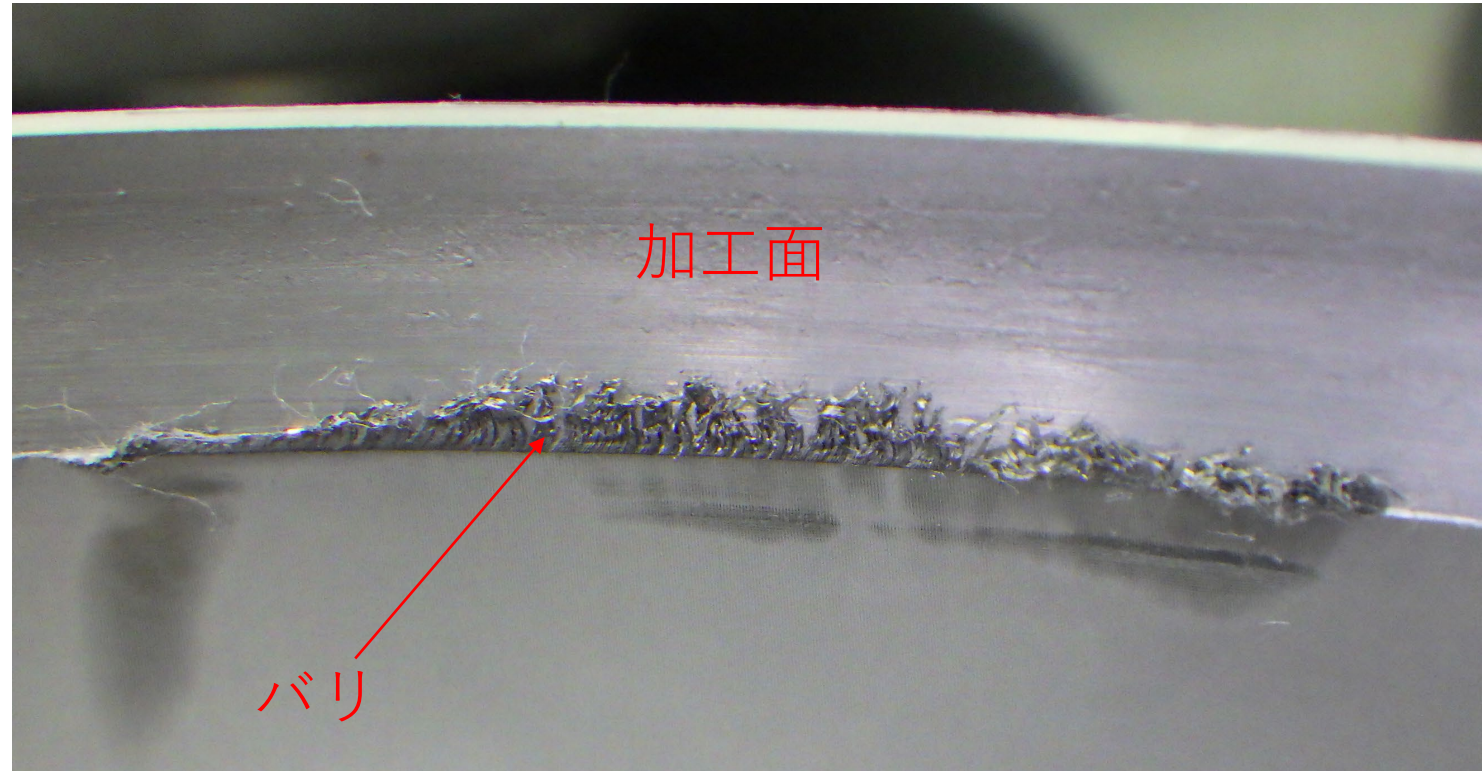
- 切削加工
 - ✓ 旋盤
 - ✓ フライス盤
 - ✓ ボール盤
- プレス加工
 - ✓ プレス成型
 - ✓ パンチ
- 研磨
 - ✓ 化学研磨
 - ✓ 機械研磨
- 溶接
 - ✓ TIG溶接
 - ✓ 電子ビーム溶接
 - ✓ レーザービーム溶接
- その他の加工
 - ✓ バーリング
 - ✓ 焼鈍
 - ✓ 放電加工

ニオブの切削加工

ニオブは靱性が強く（ねばっこい）切削後にきれいな表面が出にくい

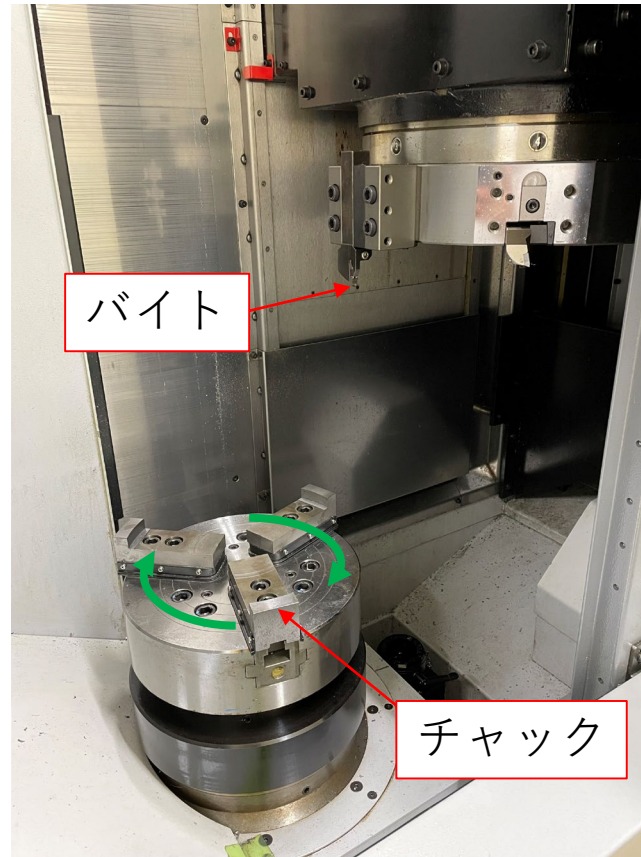


ニオブの切削加工の失敗例

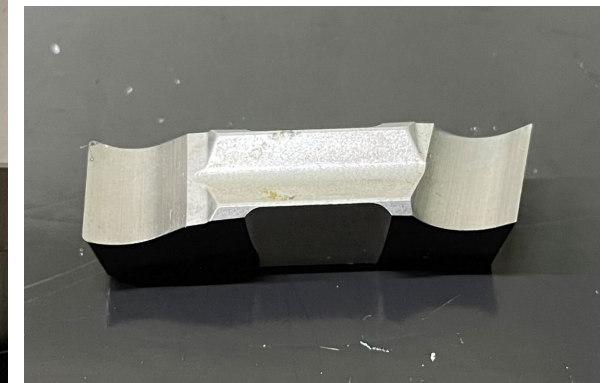


- 刃先にこびりつきやすい→刃の切れ味が悪くなる
- 鋭い刃を使用すると良い→鋭くしすぎると刃が欠ける恐れがあるので注意

ニオブの切削加工 (旋盤)



使用する刃

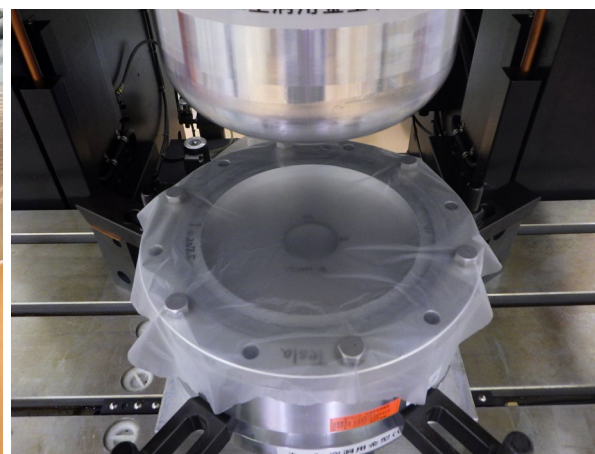
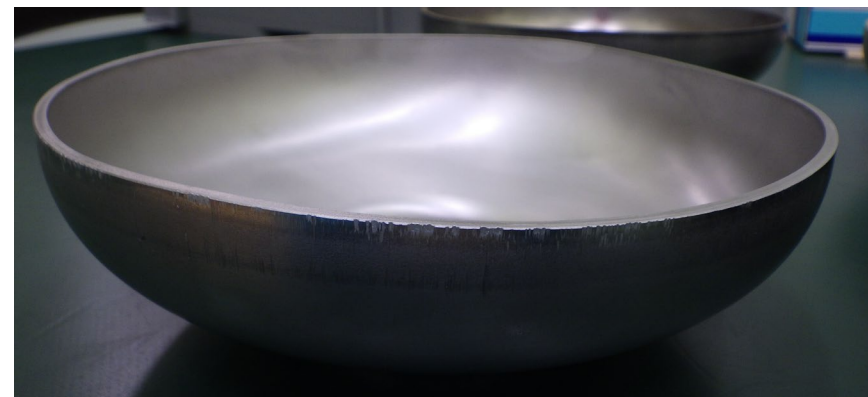
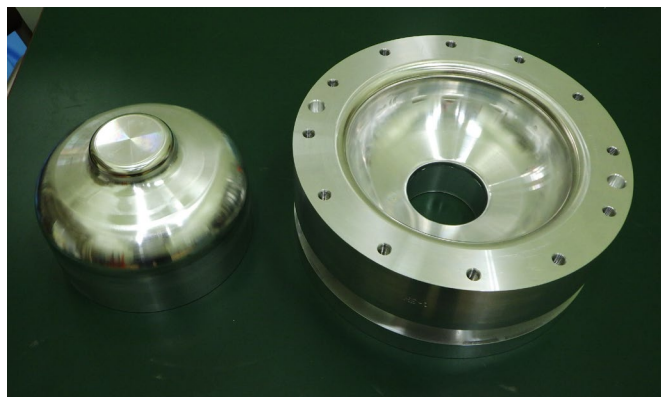


ニオブのプレス加工

プレス加工の際はニオブ板を傷つける可能性が非常に大きいいため充分注意する



金型



最近は保護シートを使用している

ニオブの研磨（化学研磨）

異物の混入を防ぐため、それぞれのパーツは溶接前に必ず化学研磨を行う
フッ酸：リン酸：硝酸 = 1 : 1 : 1（体積比）の混合液に浸して研磨する
電界研磨は行っていない

研磨前



研磨後



研磨時の様子



ニオブの研磨（機械研磨）

大きな傷がある場合は機械研磨でとり除く
深い傷は粗い研磨材を用いるがその際に他の箇所に傷をつけない様注意する

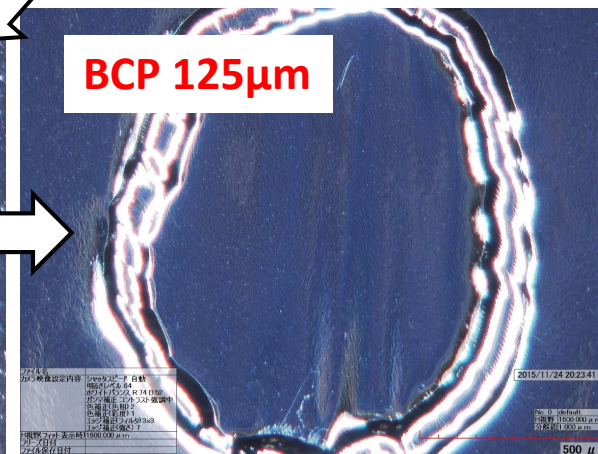
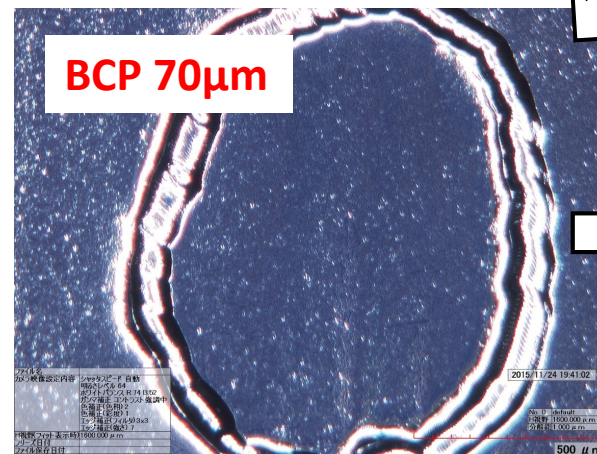
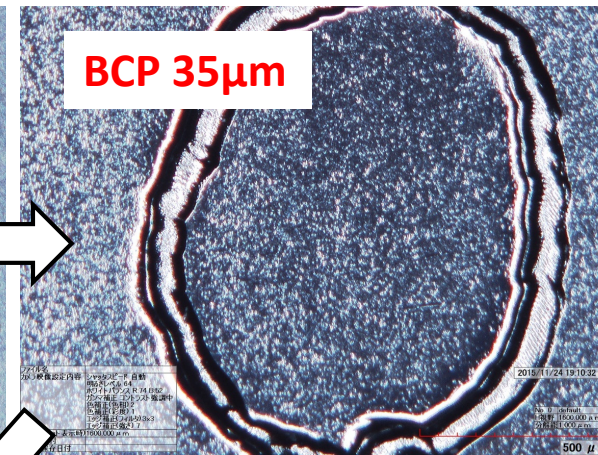
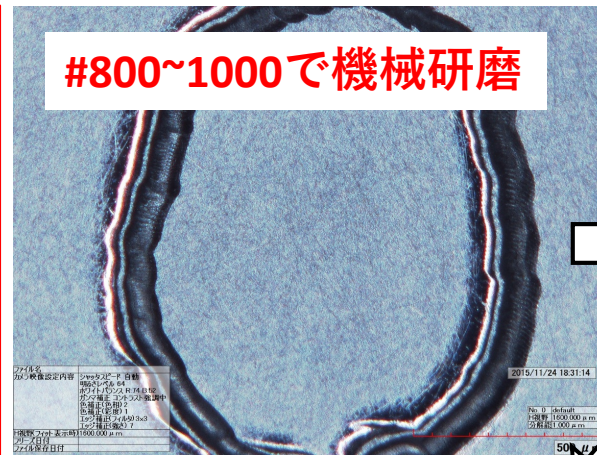
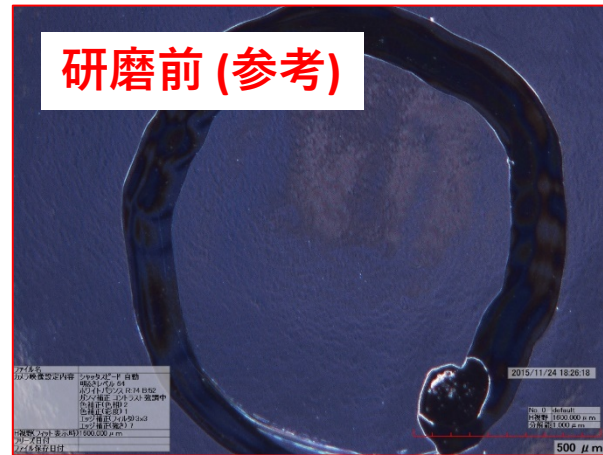


研磨痕の調査

研磨した跡が消せないと逆に傷になってしまう
どれくらいの粗さで仕上げればよいか調査した

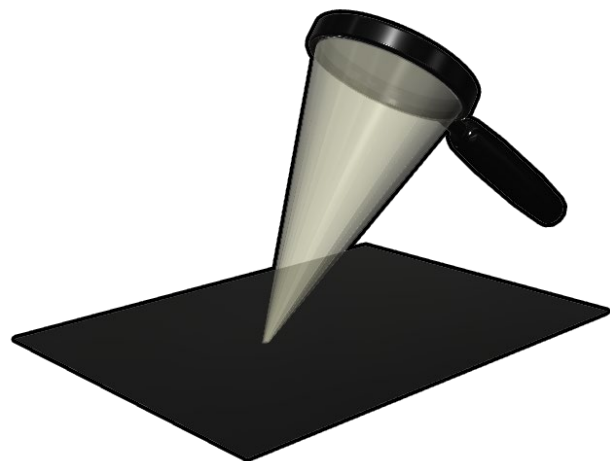


基本的に空洞が完成した後は120 μm 程度の電解研磨を行うので、その工程で研磨痕を消せばよい

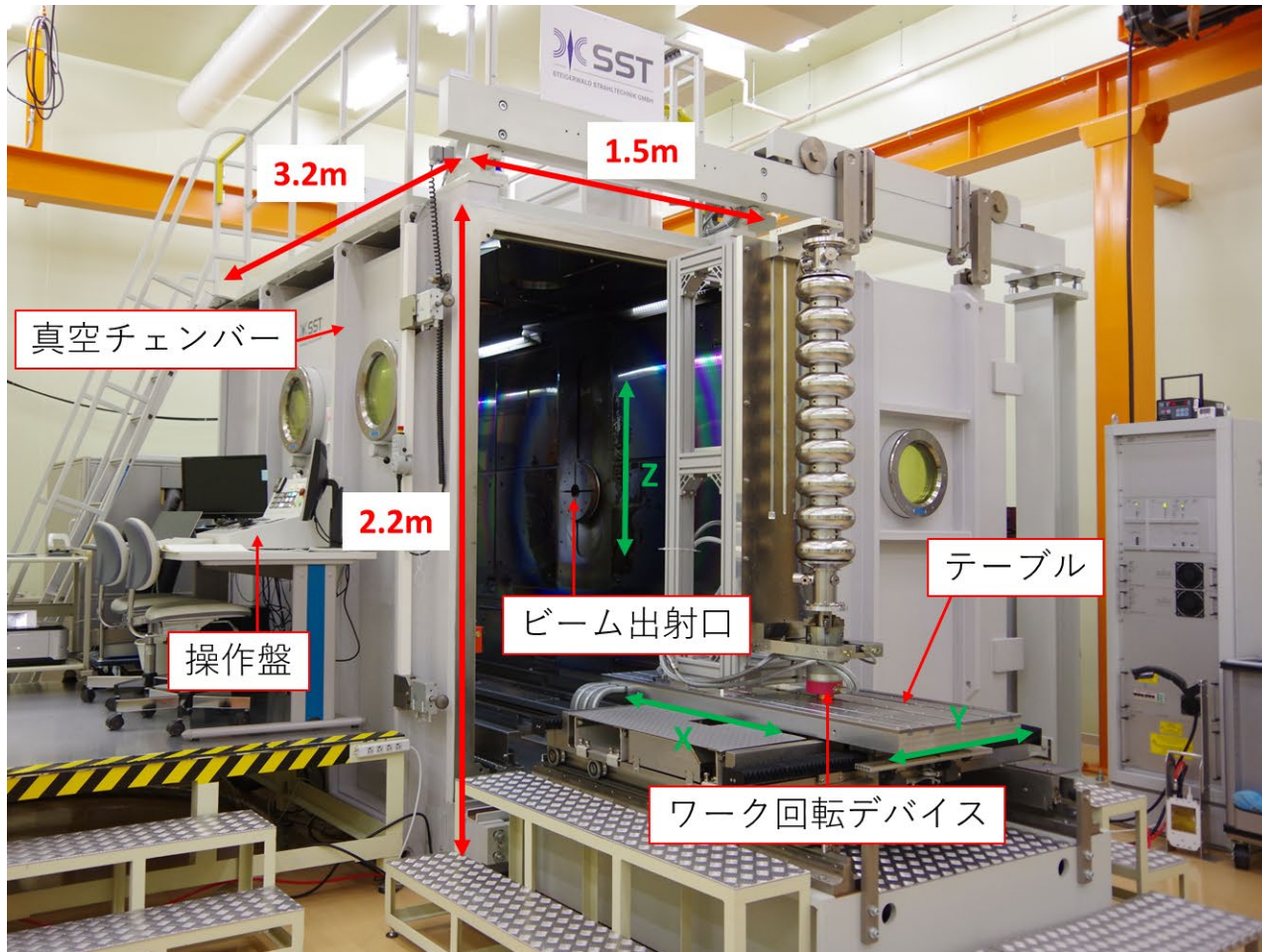


ニオブの溶接

- ニオブの融点は 2477°C と高いので出力の高い電子ビーム溶接を用いる
- 電子ビーム溶接は真空中で行うため、ニオブ中への不純物の混入やニオブの酸化を防ぐことができる
- 電子源で電子を発生させ、高電界で加速させた後、電磁石でフォーカスしてエネルギーを集中させる

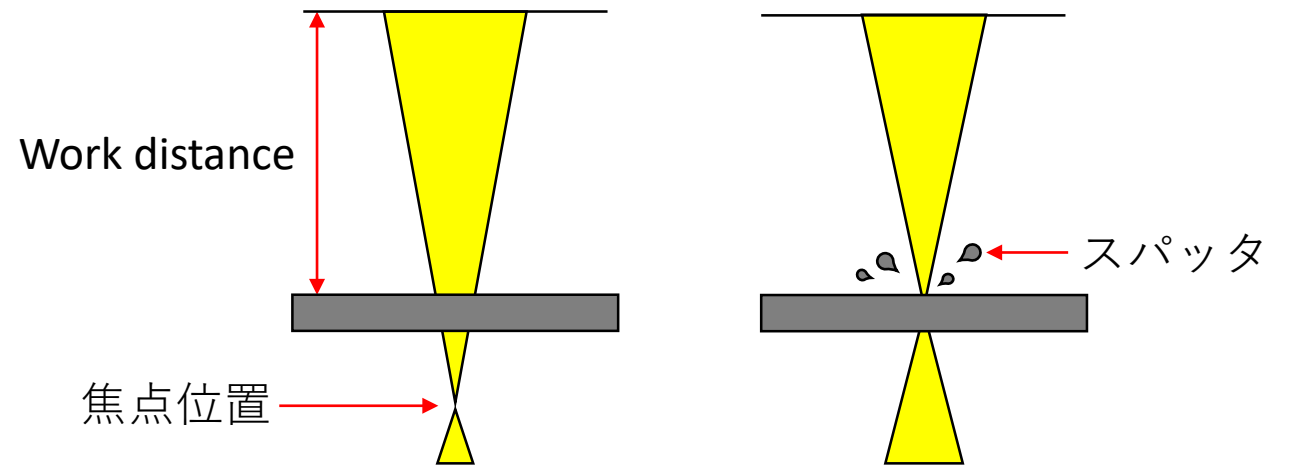


KEKの電子ビーム溶接機

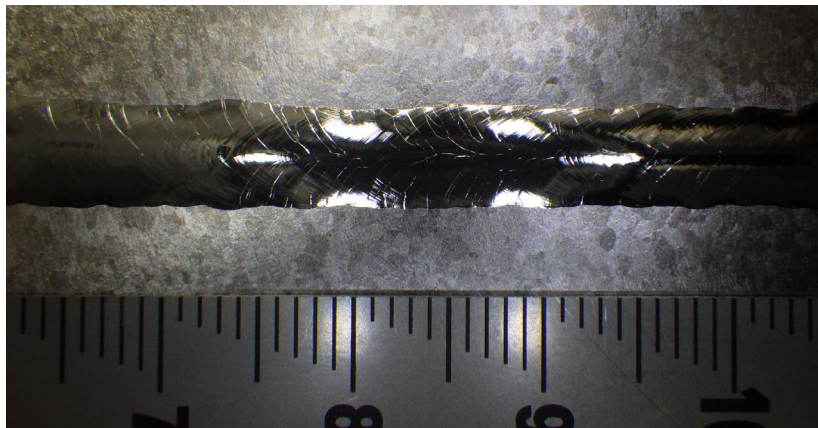


ニオブの溶接

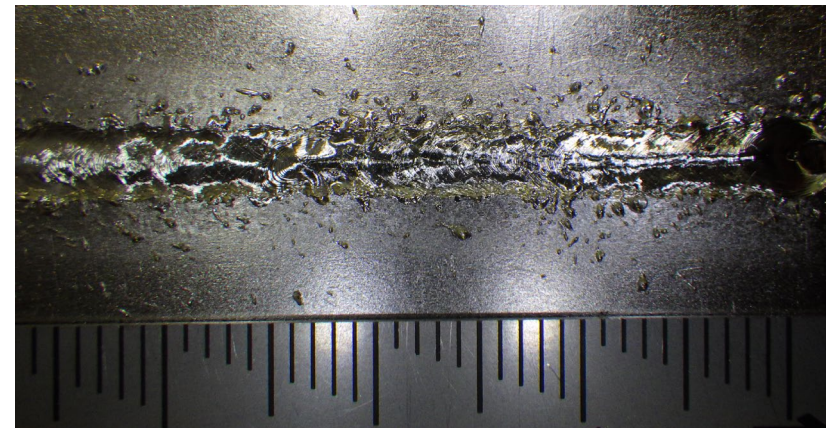
- 空洞の溶接の場合、溶接痕（溶接ビード）は滑らかでなければならない
- 滑らかな溶接ビードを得るには、少しぼかした点で溶接すると良い
- KEKの場合はワークの距離は一定にして電磁磁石の電流値を変えて焦点位置を調整する



良い溶接ビード



最悪な良い溶接ビード



空洞溶接で大事なこと

空洞（高圧ガス容器）を溶接する場合は溶接部が十分な強度を保っていなければならない



しっかりと溶け込んでいなければならない



片側からの貫通溶接が求められる

赤道溶接の場合は外から照射して中まで貫通させなければならない

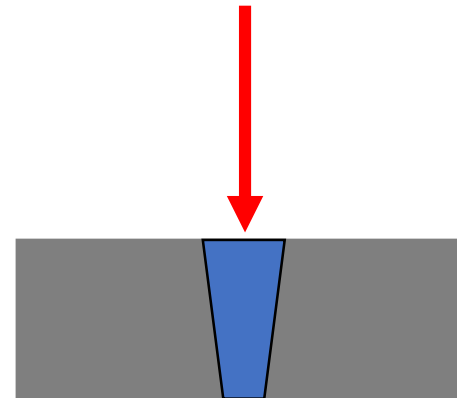
+

内面の溶接ビードは滑らかでなければならない

✓ 難しい溶接

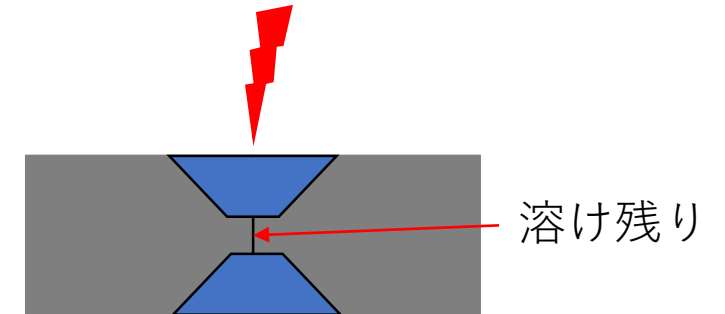
✓ パラメーター調整が大事

電子ビーム

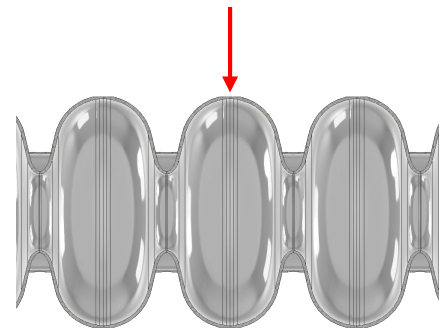


EBWによる貫通溶接

他の溶接

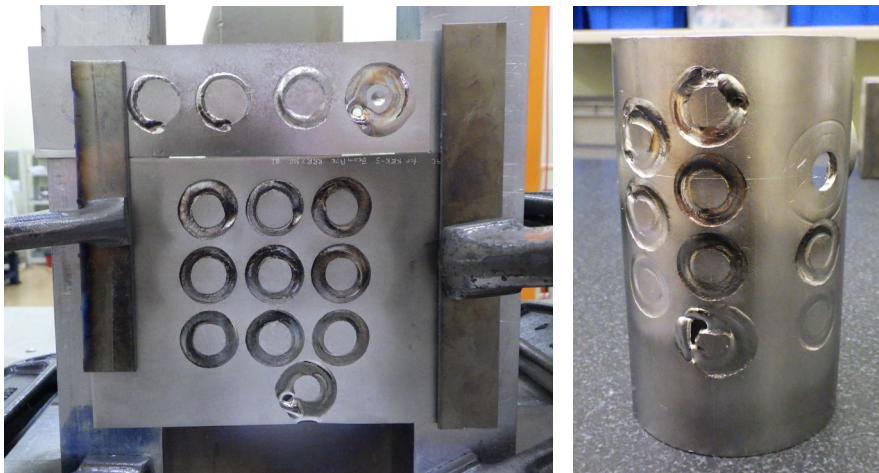


(例) 出力不足による非貫通溶接の例



ニオブの溶接

パラメーター調整の跡



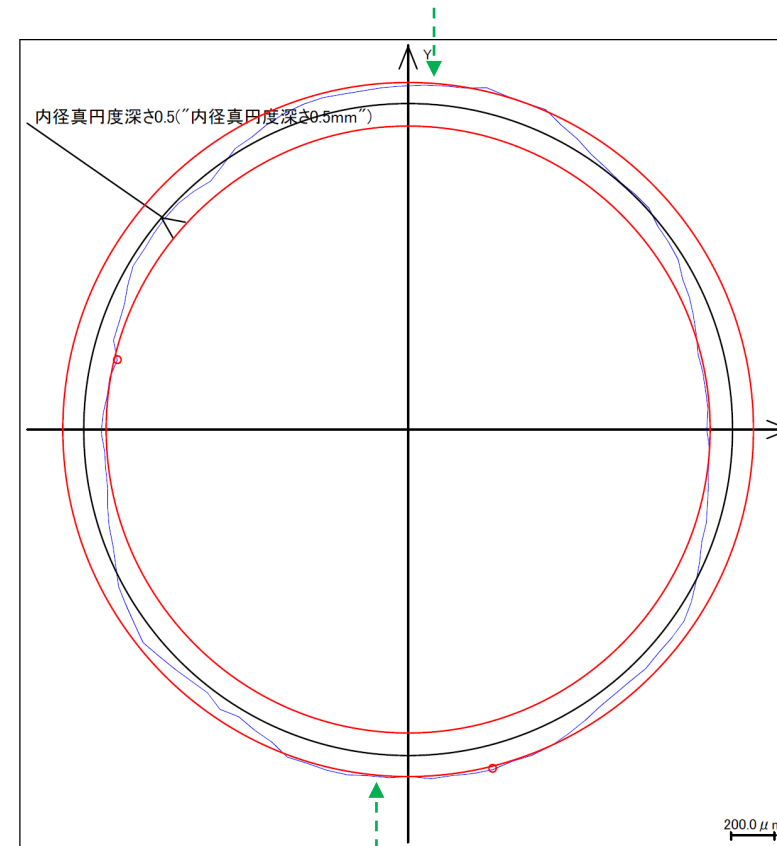
溶接失敗例



出力が高すぎると穴が開く
出力が低すぎると貫通しない
厚みにばらつきがあると穴があく

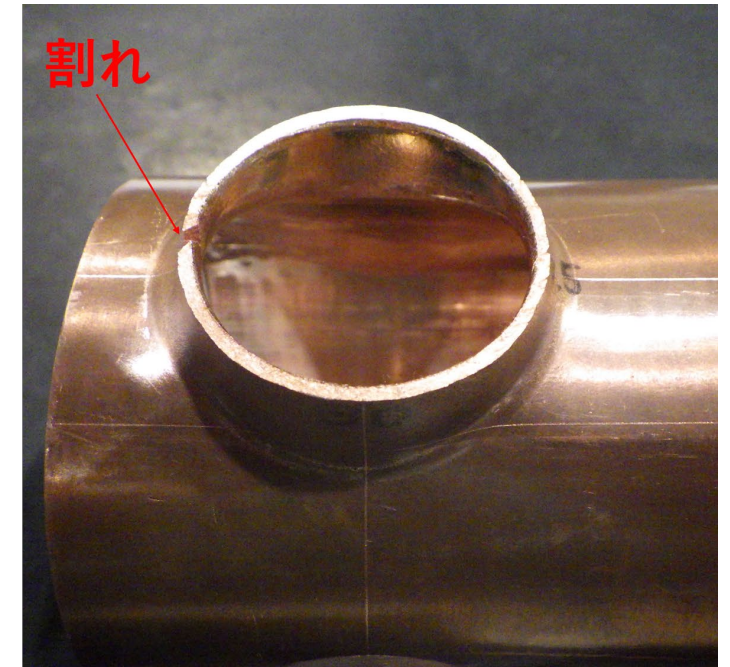
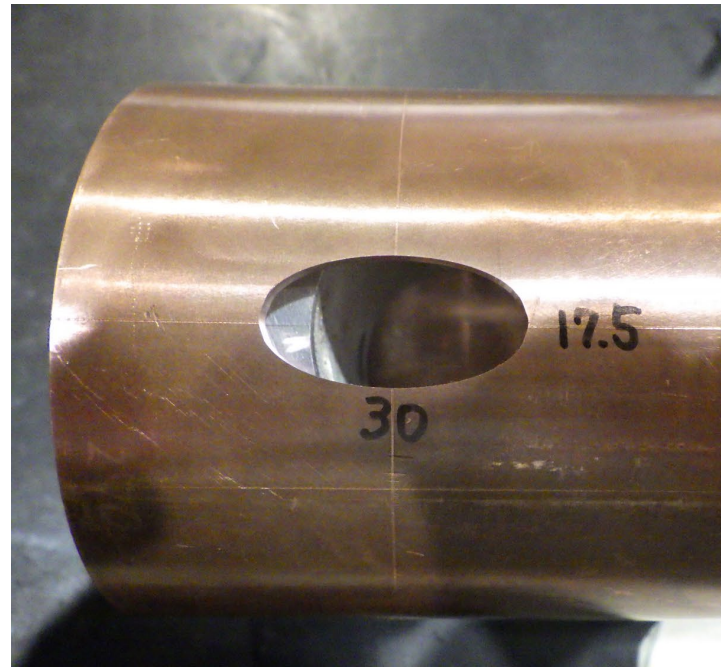
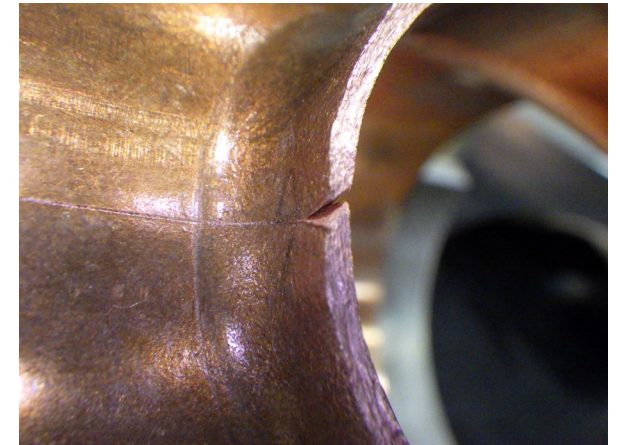
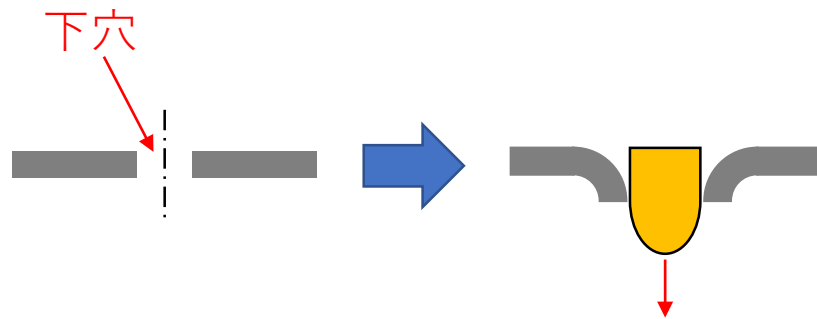
ニオブの溶接

熱を加えすぎると歪んでしまうので注意！



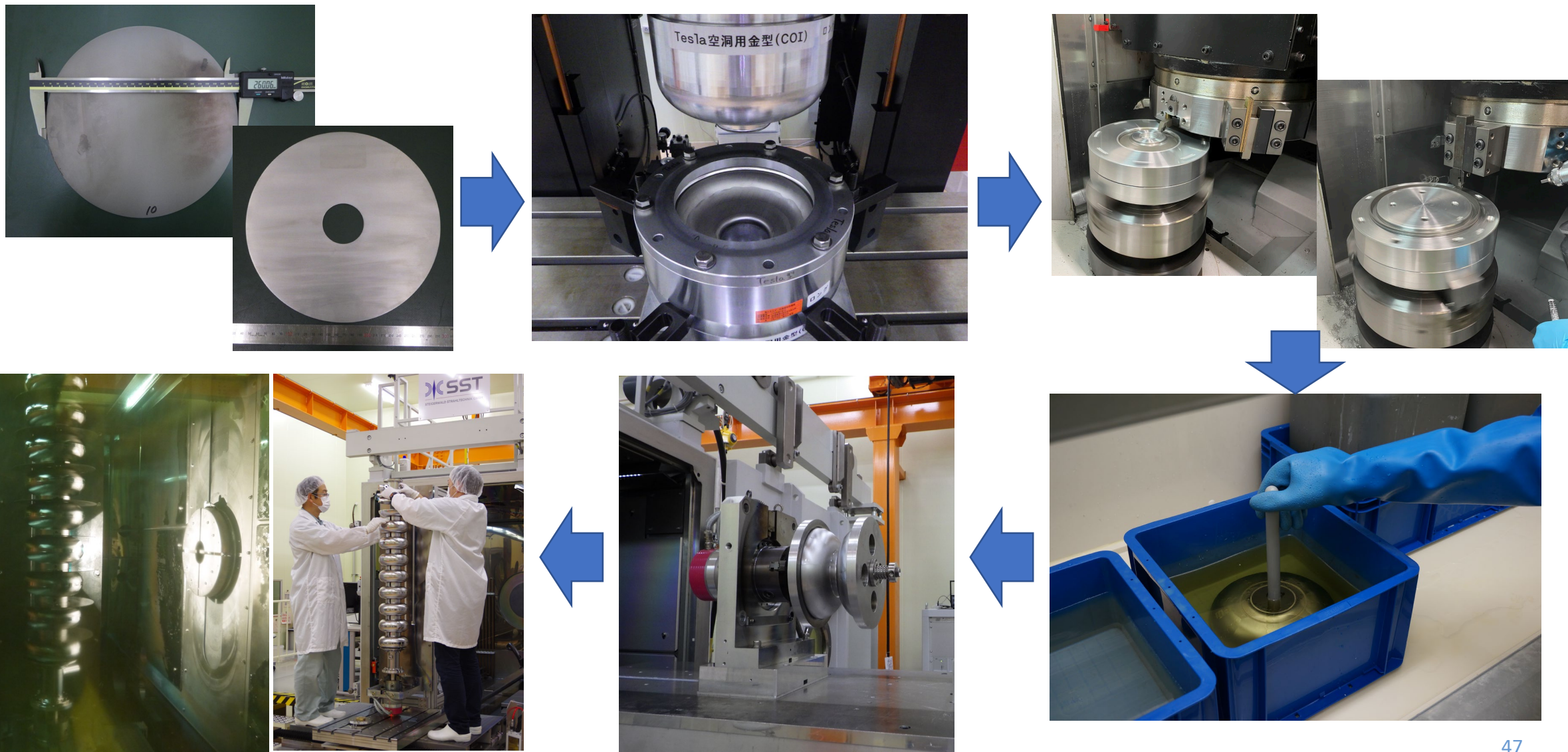
その他の加工 (バーリング)

枝管を作る際に用いられる工法



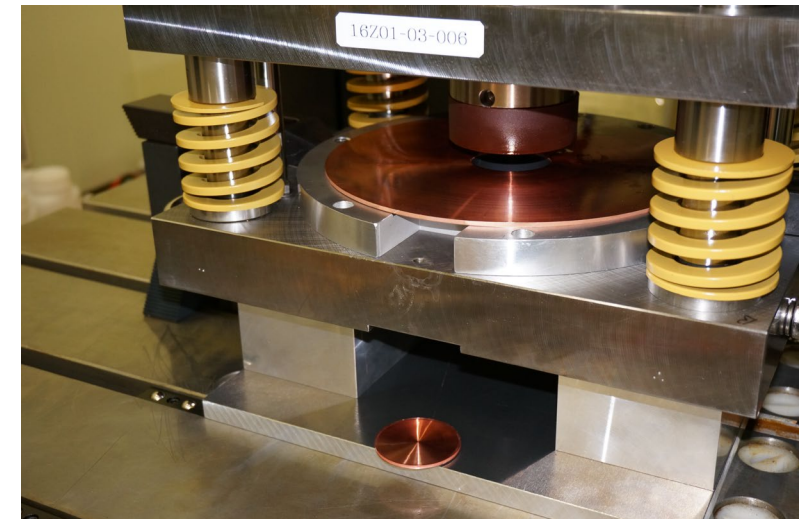
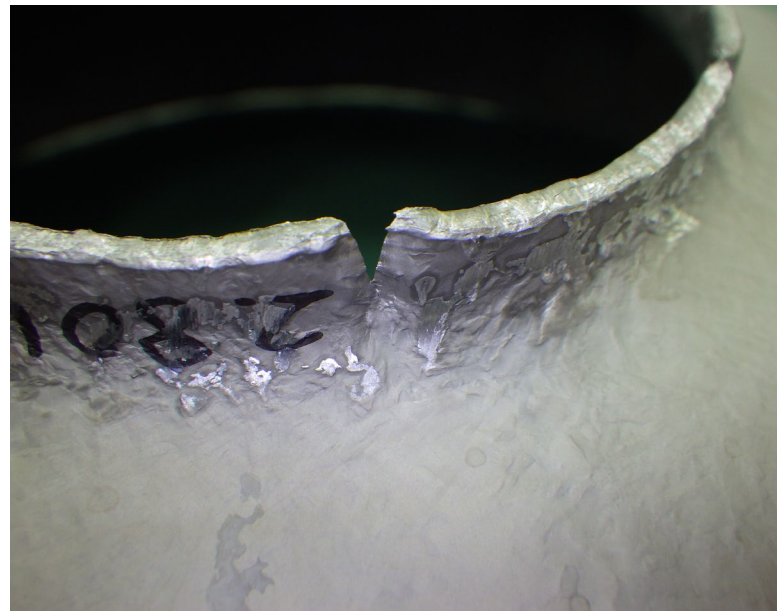
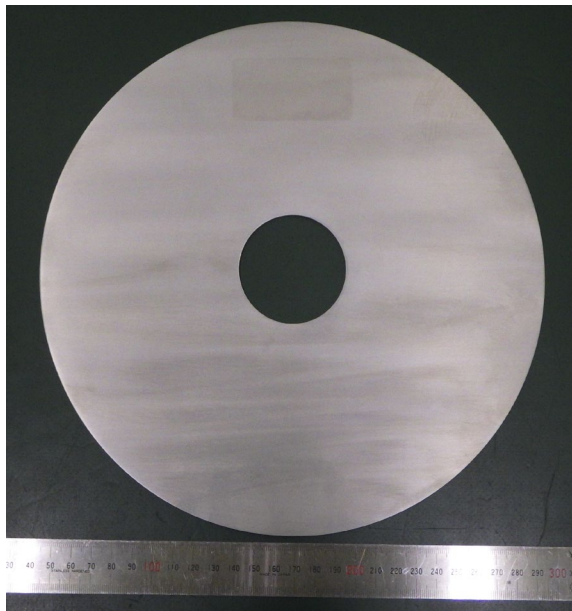
空洞製造

空洞の作り方



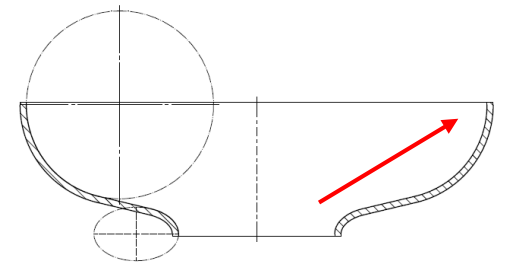
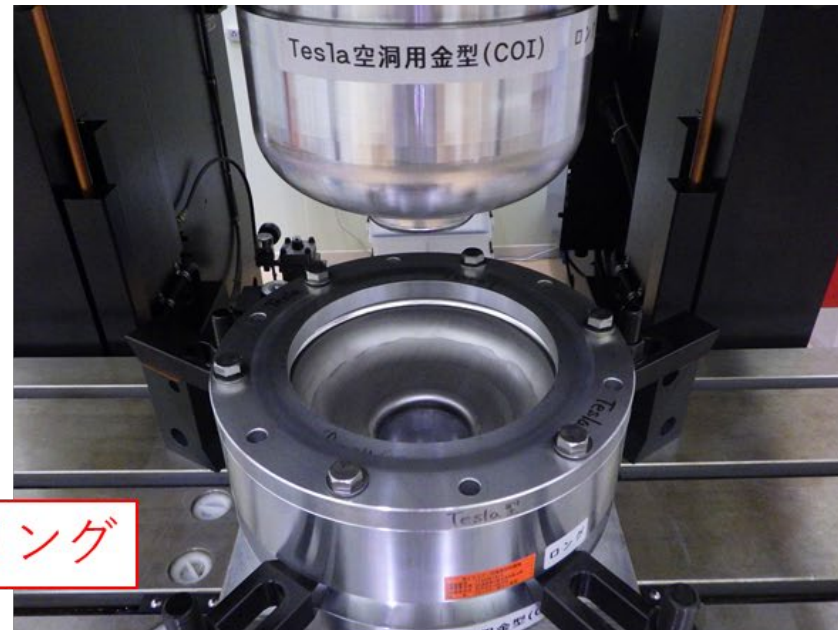
空洞製造 1 : 穴あけ

- 円板の中央にアイリス用の穴を開ける
- 穴径が小さすぎるとプレスした際に割れてしまうことがある
- 最近パンチで穴を開けて大幅な時間短縮に成功した（今まではワイヤーカットなどで時間がかかっていた）



空洞製造2：プレス

- オスとメスの金型で挟んで成型する
- **一番傷をつけやすい工程なので注意する（金型に傷がないか？異物がついていないか？）**
- ニオブはアイリスから赤道に流れる（肉厚がアイリスで-0.3mm、赤道で+0.3mm程度変わる）
→これを考慮した金型設計が必要

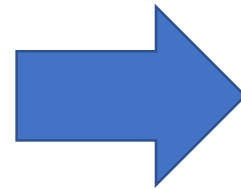


空洞製造 2 : プレス



動画

空洞製造3：トリム



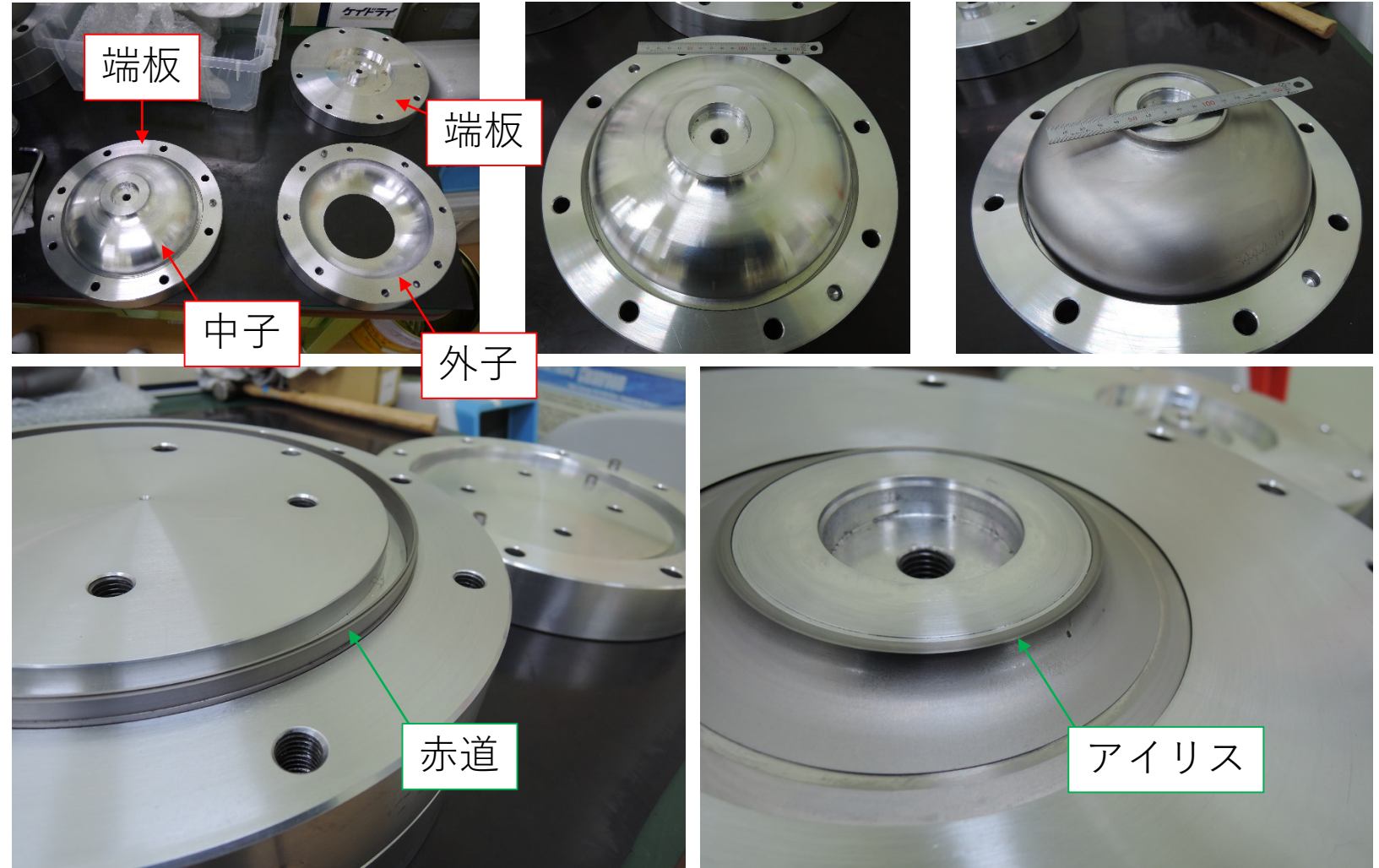
空洞製造3：トリム

トリムは旋盤で行う

ハーフセルをそのままチャックすると潰れてしまう



強固な治具で固定して加工する
傷をつけない様に注意



空洞製造3：トリム



動画

空洞製造4：研磨

内部に傷がある場合は機械研磨で取り除く
→研磨粉で傷が埋まって消えたように見えることがあるので注意する
溶接前は化学研磨を行い、表面を清浄にする
化学研磨後は純水で洗浄→溶接部分には絶対触れないように注意する



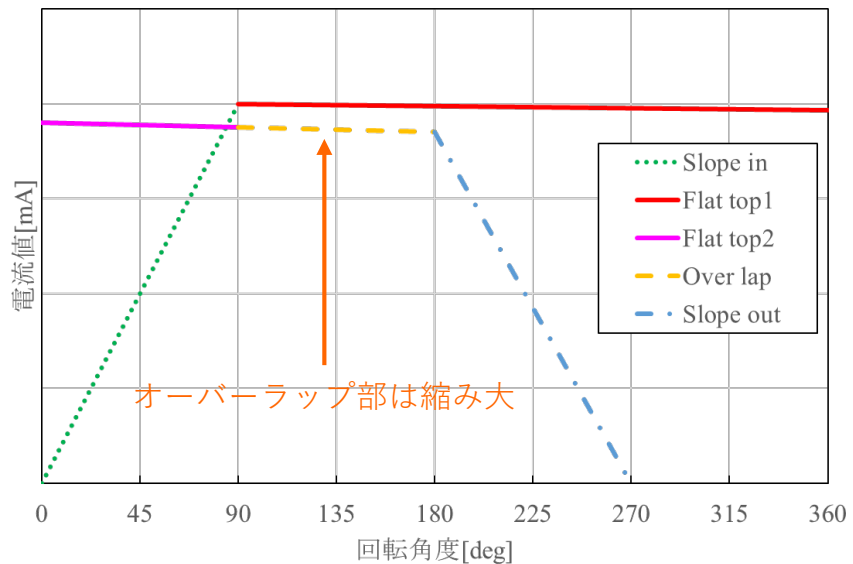
空洞製造6：アイリス溶接

ワークを回転させて溶接していく

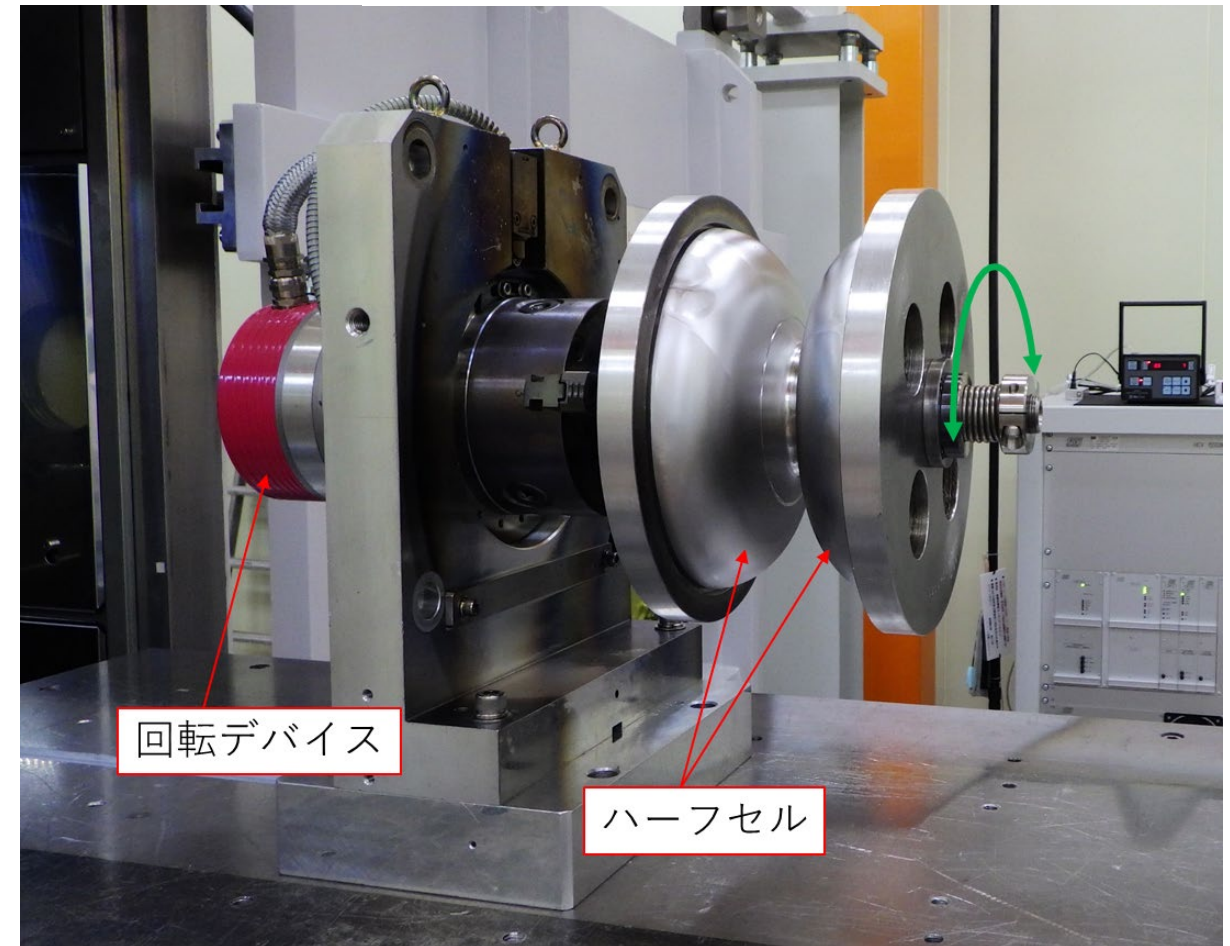
【溶接手順】

1. 仮付け
2. 表面溶接（半貫通）
3. 本溶接（貫通）

溶接時のパラメーター

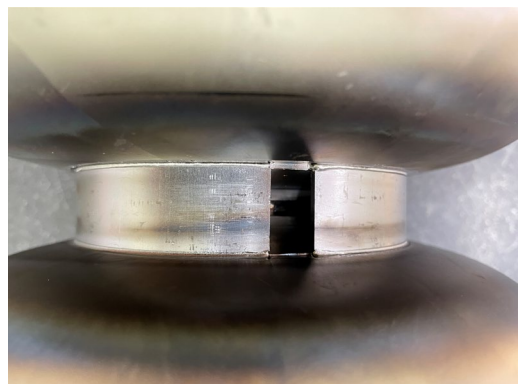
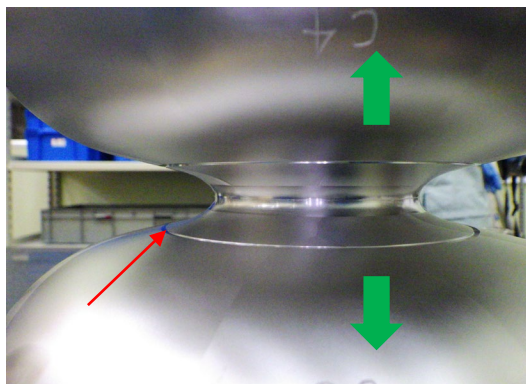


溶接のセットアップ

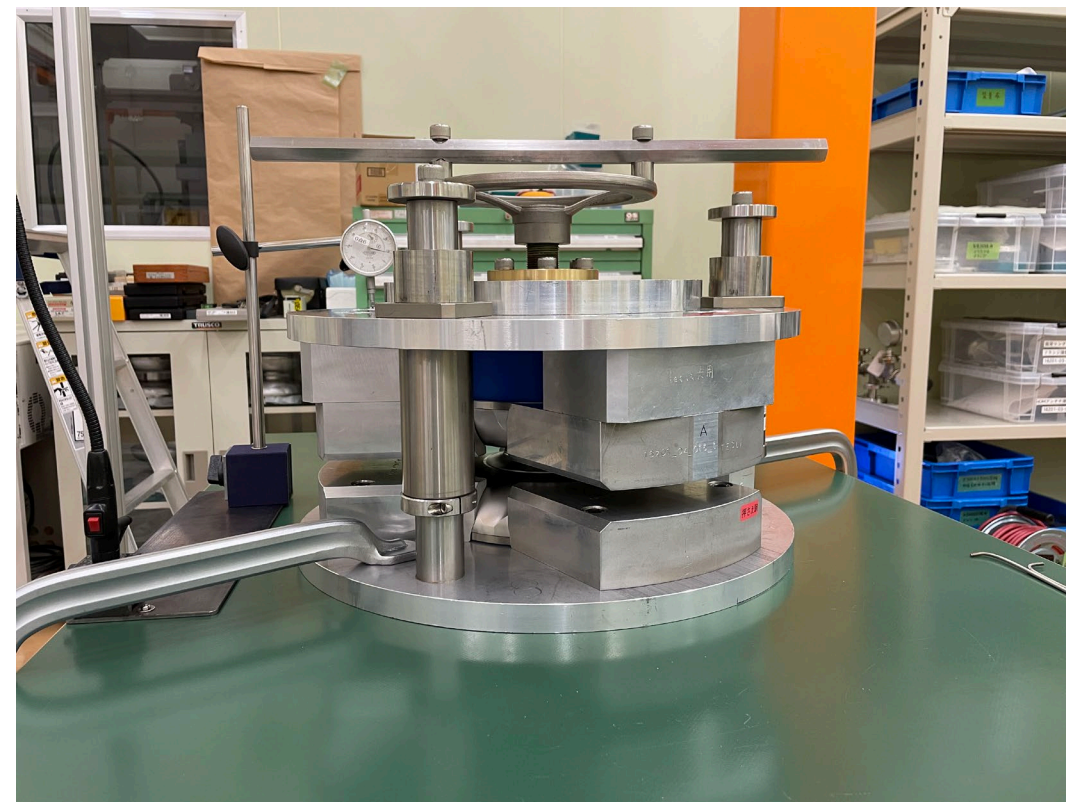


空洞製造 7 : 強め輪装着

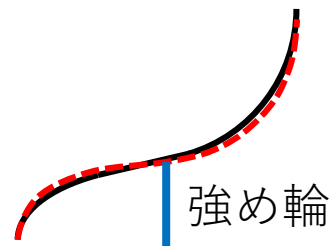
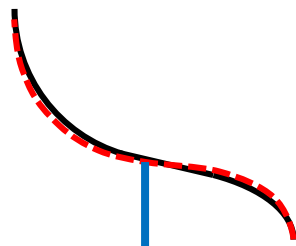
アイリス溶接後は強め輪を嵌めて溶接する
嵌める際はダンベルを伸ばしてはめ込む



強め輪はめ込み機



強め輪溶接後は下記のように歪むのでダンベル引き延ばしを行うこともある



おまけ：ダンベルの周波数検査

海外では、ダンベルの時点で周波数を測定して両端の加工代を決める



出来上がりの周波数が設計値に近くなる

DESYの周波数測定装置

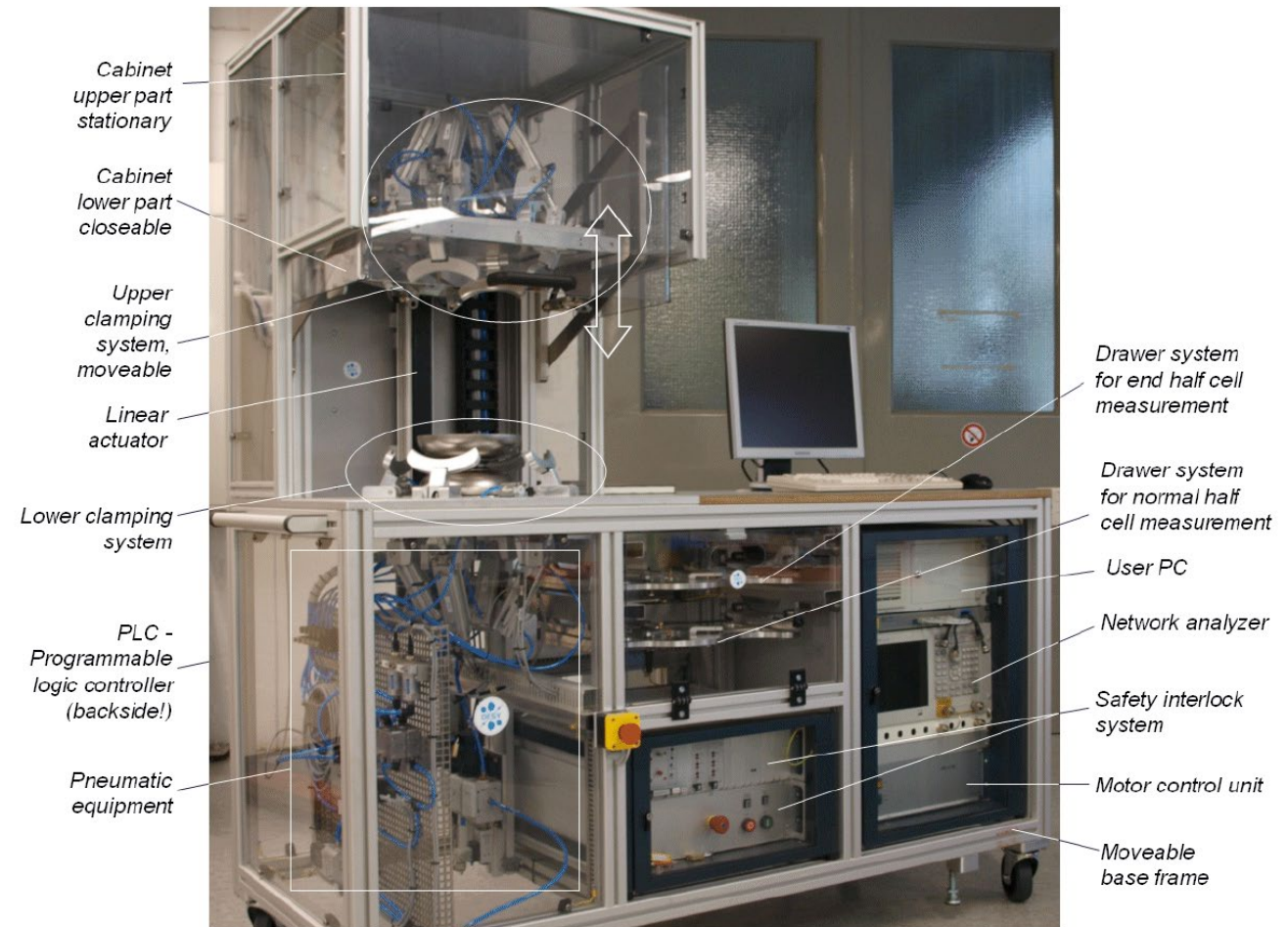
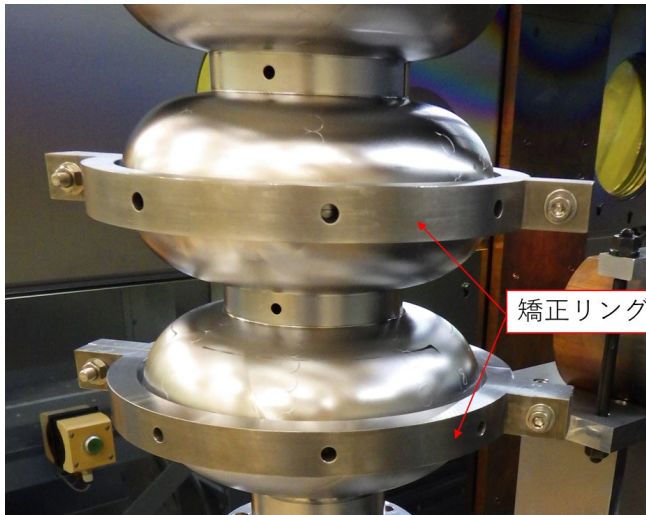


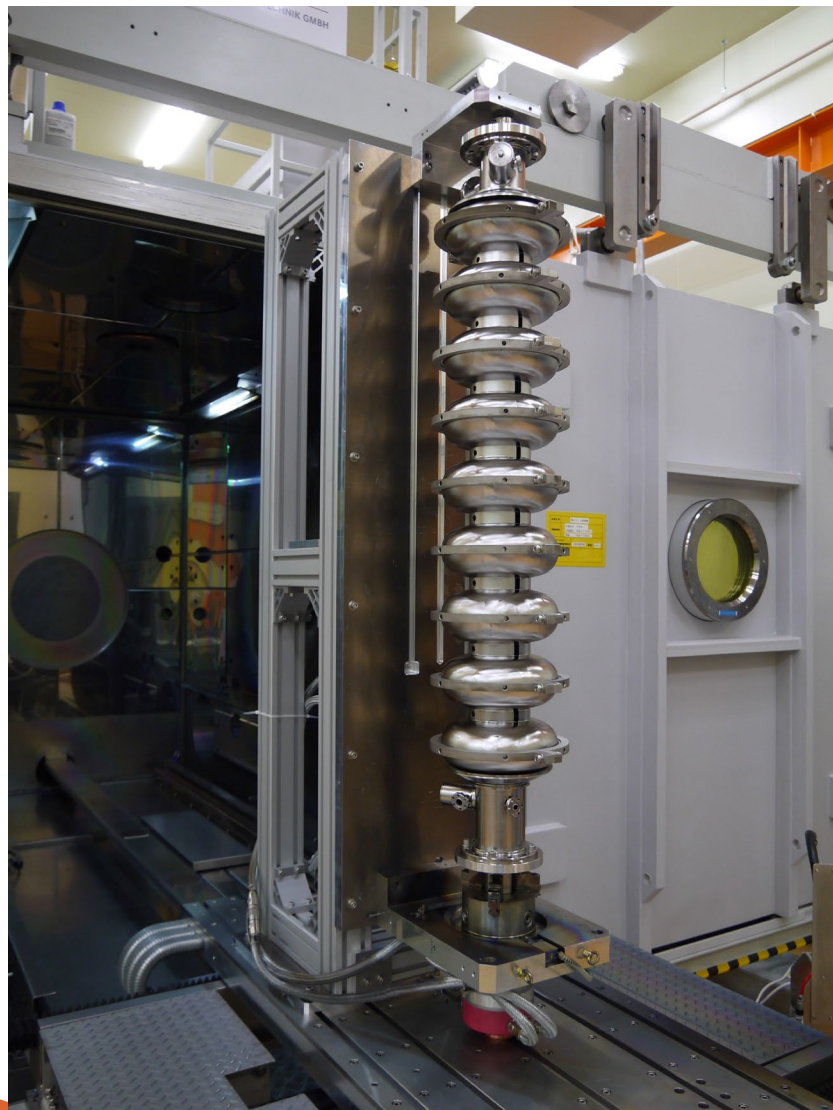
Figure 6: Prototype RF-measurement machine (called HAZEMEMA)

空洞製造 8 : 赤道溶接

ダンベルを積んで組み立てていく
赤道部は嵌め合い構造になっている
嵌らない場合は下図の様な治具を用いること
もある

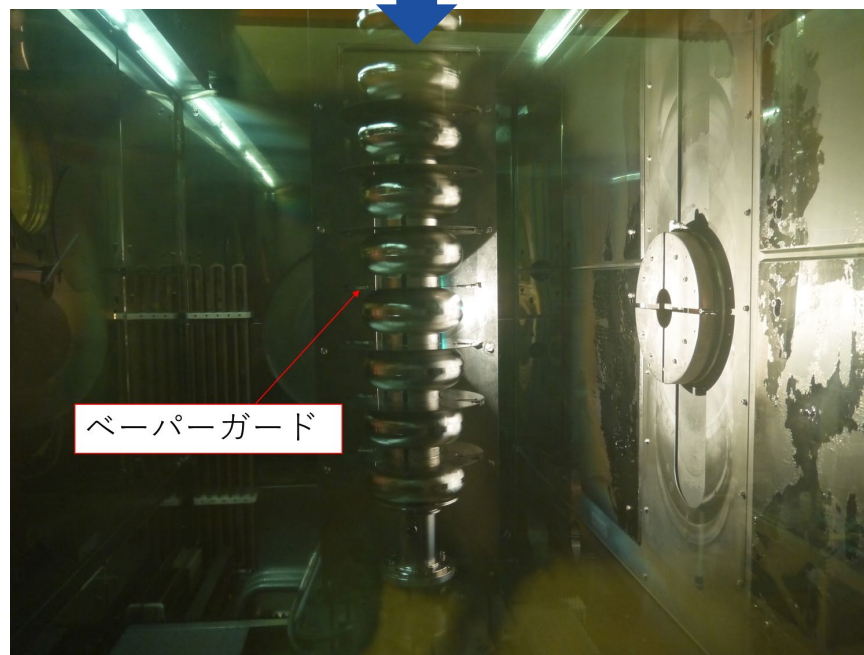


空洞製造 8 : 赤道溶接



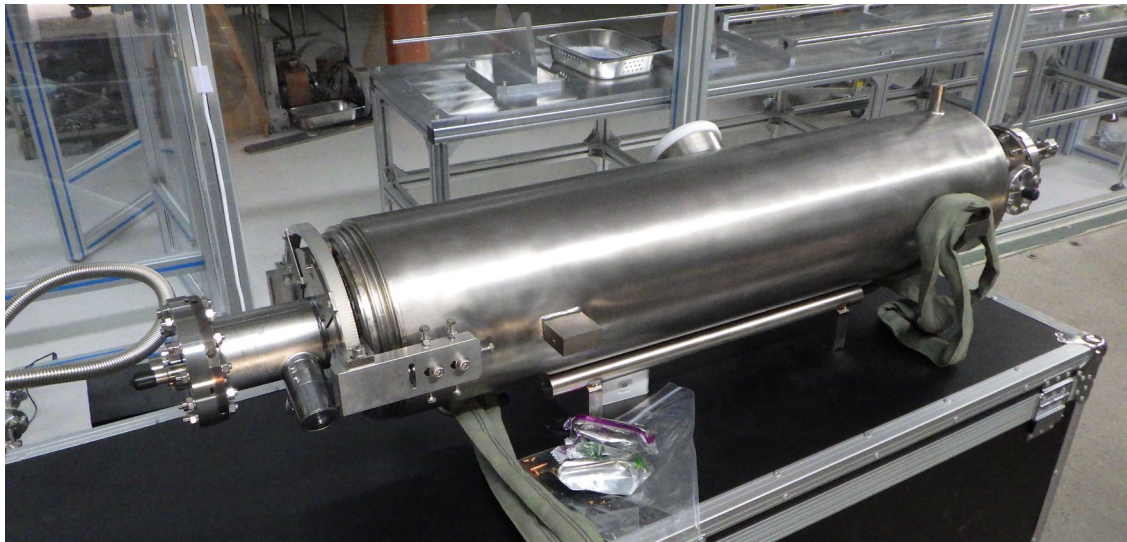
各セルでオーバーラップさせる領域の場所を変えないと最終的に空洞が曲がって出来てしまう

溶接時に気化したニオブが飛んで他のセルに付着するのを防ぐためにガードをつける



空洞製造9：ジャケット取付

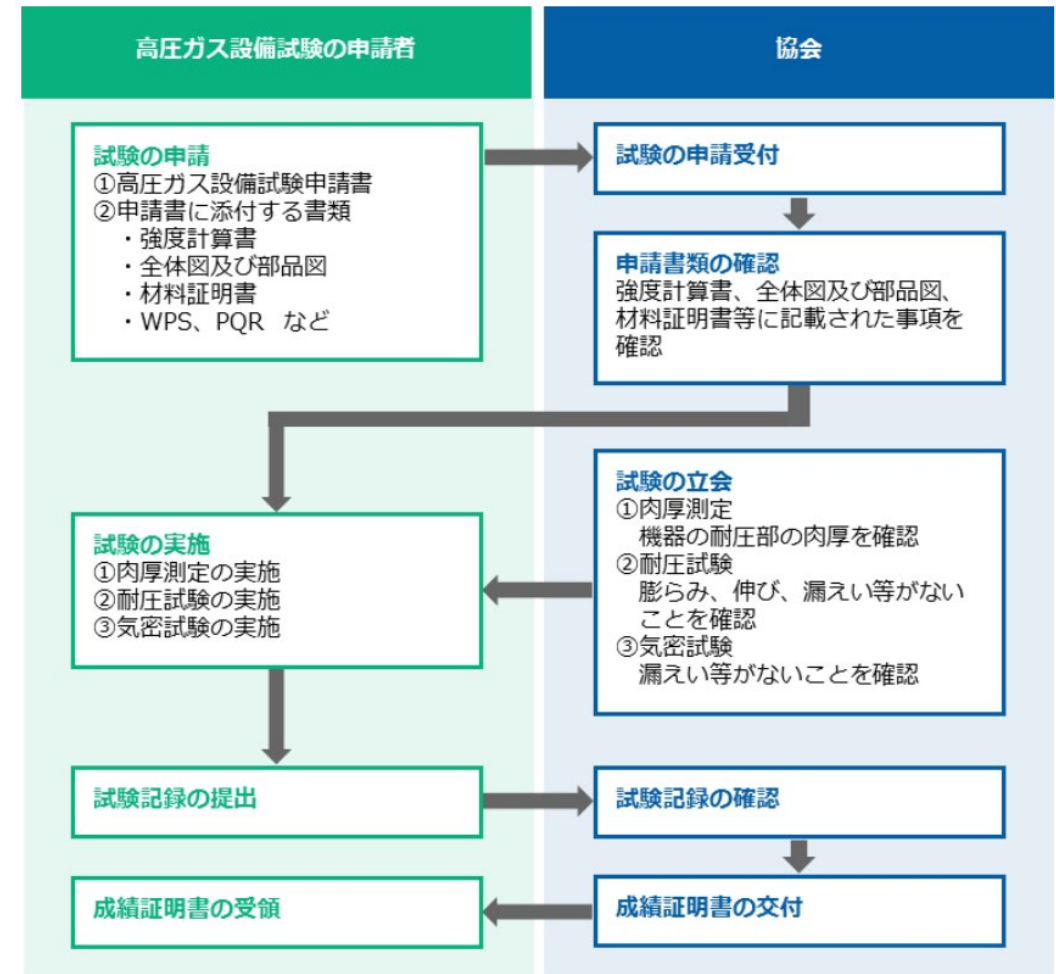
- 空洞が完成した後は表面処理を行って、性能測定を行う
- 性能が基準を満たした場合は空洞の耐圧試験を行った後、ジャケットの取り付けを行う
- 溶接の際は熱を入れすぎて空洞内の表面状態を変えない様注意する
→Arガスを封止して溶接を行うこともある
- 溶接縮みが大きすぎると中の空洞を変形させて周波数も変わってしまうので注意する
- ジャケット取り付け後は気密・耐圧試験を行う



高压ガス保安法

- 液体ヘリウムは高压ガスに分類され、それを溜める空洞とジャケットは高压ガス容器になる
(エンド部は高压ガス容器ではないので注意)
- 高压ガス容器は高压ガス保安法に則った方法で製造しなければならない
- 以下の理由から空洞の場合例示基準がない
 - ✓ 使用する材料が特殊 (ニオブ)
 - ✓ 形状が特殊
 - ✓ 使用状況が特殊 など
- 自分たちで安全性を示す基準を作る必要がある
- そのため以下を行う必要がある
 - ✓ 材料の安全性の確認
 - ✓ 応力解析、座屈解析による安全性の確認 など
- 圧力容器の溶接は承認を受けた事業所でなければ実施出来ない
- KEKも様々な溶接試験を行い承認を受けている最中

標準的な流れ (KHKホームページより)



最近の動向

コストダウン検討

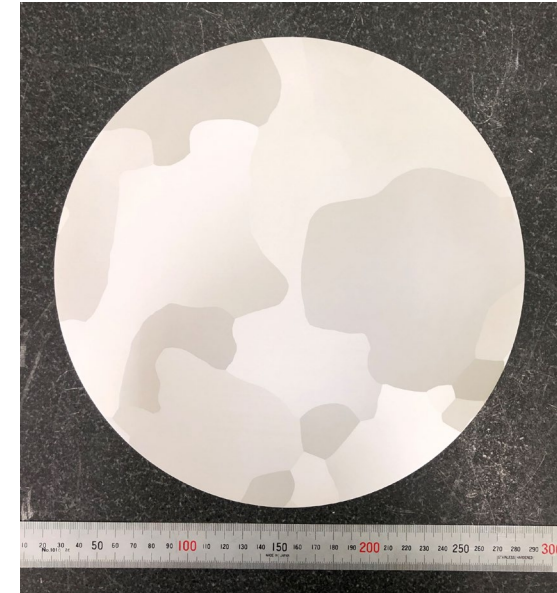
現在ILCの建設費用の削減が求められている
空洞製造の面からコストダウンを考える
その一環として空洞材料のコストダウンを検討している

材料1：LG材

- CFFではいくつかのLG材空洞（1セル、3セル、9セル）を作ってきた
- ILC仕様を満たすものもある

【問題点】

- 異方性が強く成型した際に歪む
- 機械強度が材料によってバラつく



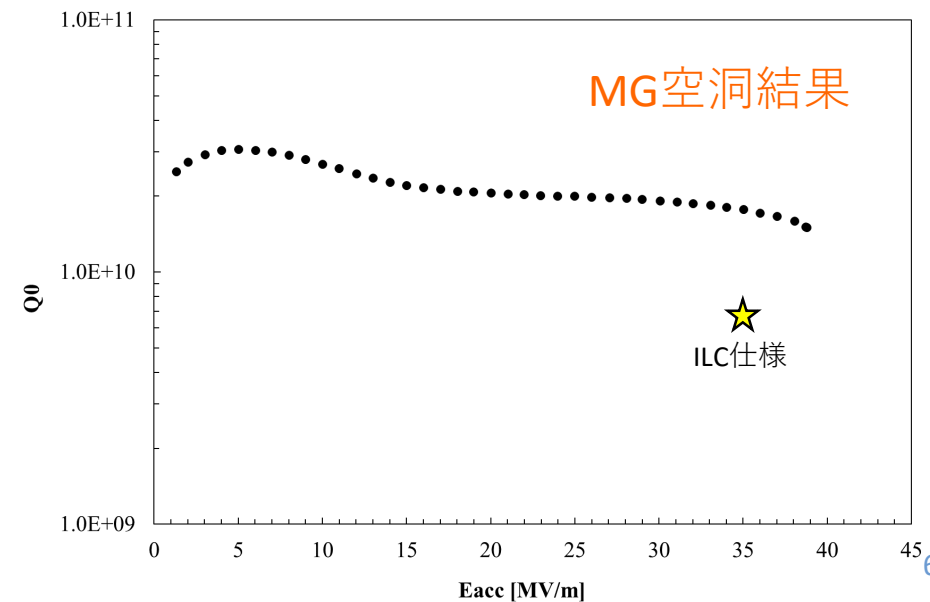
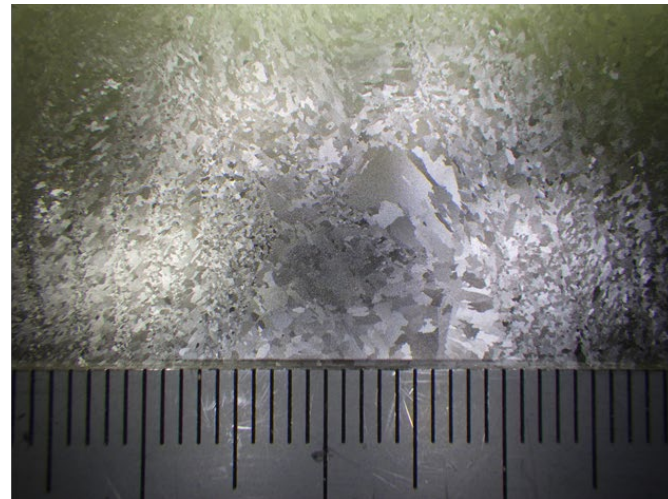
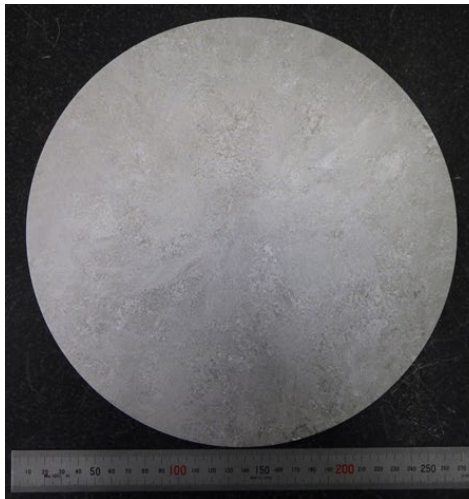
コストダウン検討

材料2：Medium Grain (MG) 材

- インゴットを鍛造したもの（ビレット）をスライスして使用する
- 今まさに研究が始まったところ
- 単セル2台を測定し、1台は測定終了（ILC仕様を満たした）

【問題点】

- 成型後に表面が荒れる



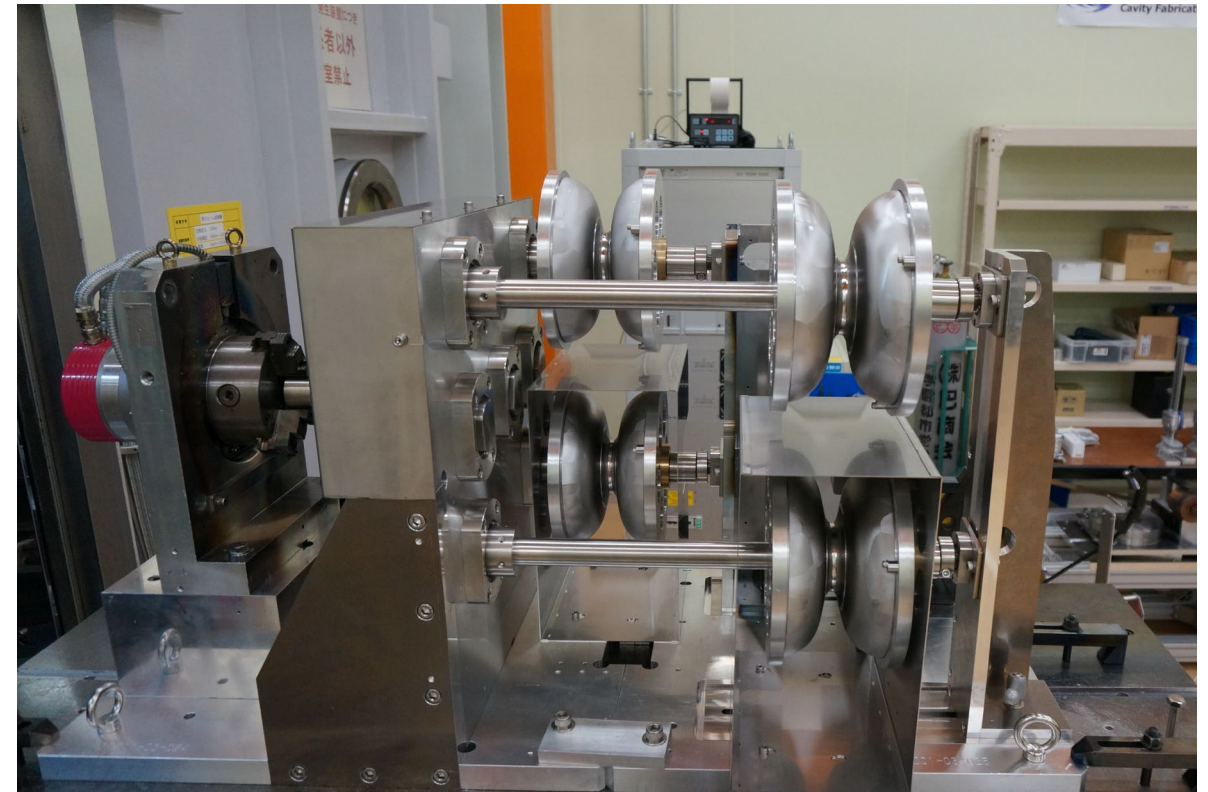
量産に向けた取り組み

ILCでの空洞製造に向けて作業の効率化が必要

- 同時溶接治具の開発
- 作業の自動化
傷発見など
- パーツ加工の簡略化

また、歩留まりの向上も重要な課題

→クリーン度を上げて欠陥をなくす など



まとめ

- ILCで使用する空洞には高い性能が求められる
- 空洞製造ではニオブの加工や溶接など高い技術が求められる
- 空洞製造の際は傷と異物混入に充分気を付け十分に管理された環境で行う必要がある
- KEKのCFFでは空洞製造技術の開発を行っており、ILCに向けた量産やコストダウンに取り組んでいる