



第19回 日本加速器学会年会  
10月19日@オンライン

# 大口径・薄板・耐圧を実現する金属積層造形による Ti-6Al-4V合金製ビーム窓の開発

1

牧村俊助、深尾祥紀、亀井直矢、栗下裕明（KEK, J-PARC）  
設楽弘之、長澤豊、尾ノ井正裕（金属技研）

# Motivation

## ▶ 粒子加速器におけるビーム窓：

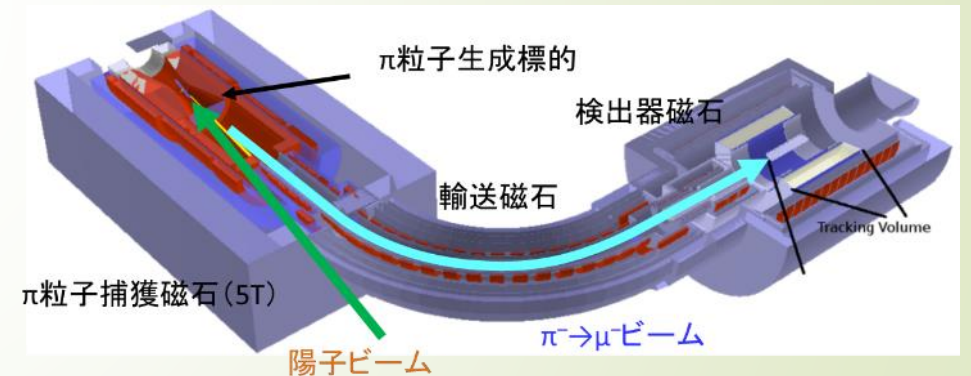
- 真空・大気・冷媒雰囲気・その他雰囲気との隔離
- ビーム窓上での粒子のロスを減らす

耐圧

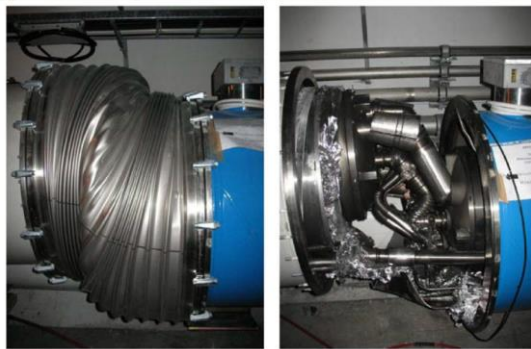
大口径、低密度 & 薄板

## ▶ 次世代超伝導加速器：液体ヘリウム漏えいによる圧力上昇

- CERN quench incident in 2008
- COMET experimental facility



超伝導ソレノイドによる大口径ビームライン



CERN quench incidentで破損したベローズ

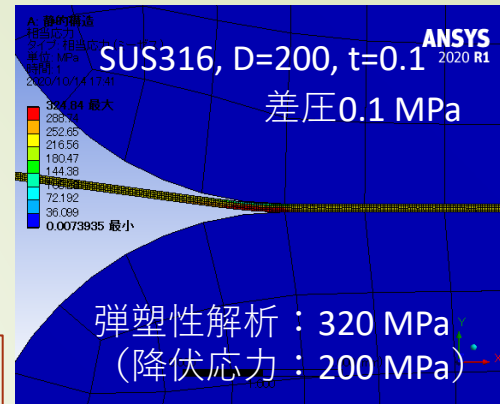
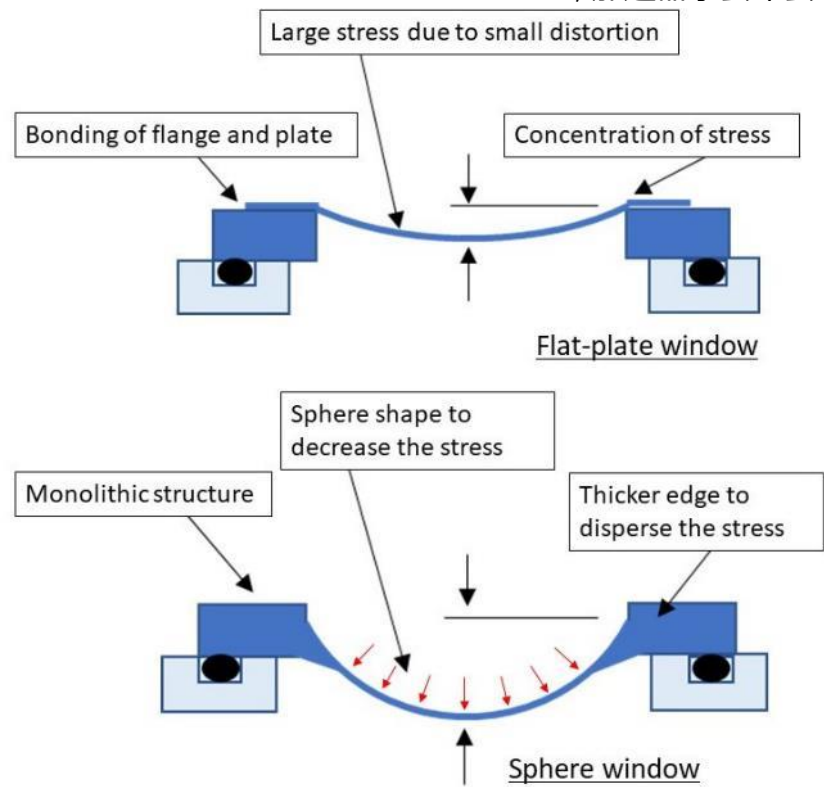
(e.g. [CERN quench incident](#), "THE INCIDENT OF 19 SEPTEMBER 2008 AT THE LHC")

[The maximum pressure reached](#) in the insulation vacuum enclosure was estimated (中略) from the mechanical damage to bellows and thin shells in the structure, (中略) : the pressure reached about [0.8 MPa \(8 bar\) absolute](#),

# Method

3

S. Makimura et al., 加速器学会年会2021



## ビーム窓実現の課題と解決法:

- たわみの制限
- 端部の応力集中
- フランジとの接合

- 球殻形状
- 端部を厚く
- フランジと一体化

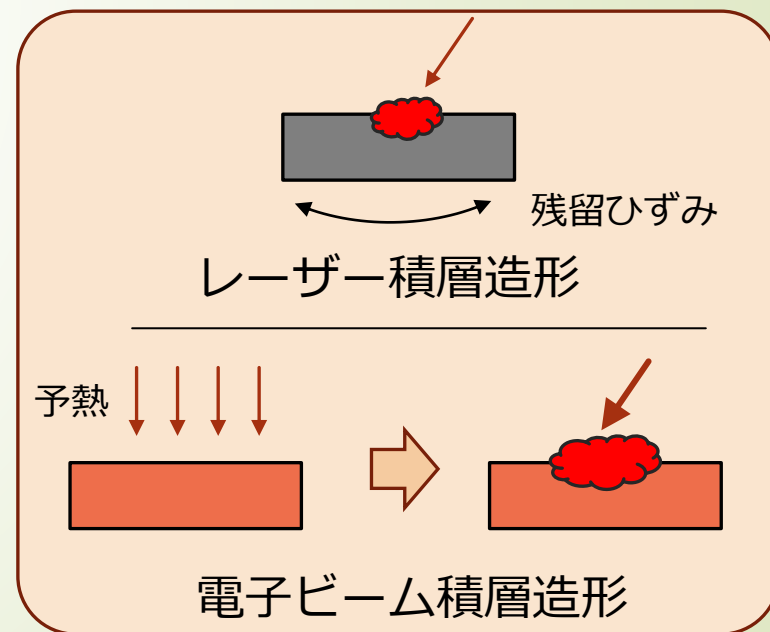
## 製造法

- 削り出し
- 積層造形法 (3D-printer)

Ti-6Al-4V合金は有望だが、加工性が悪い

## 積層造形法

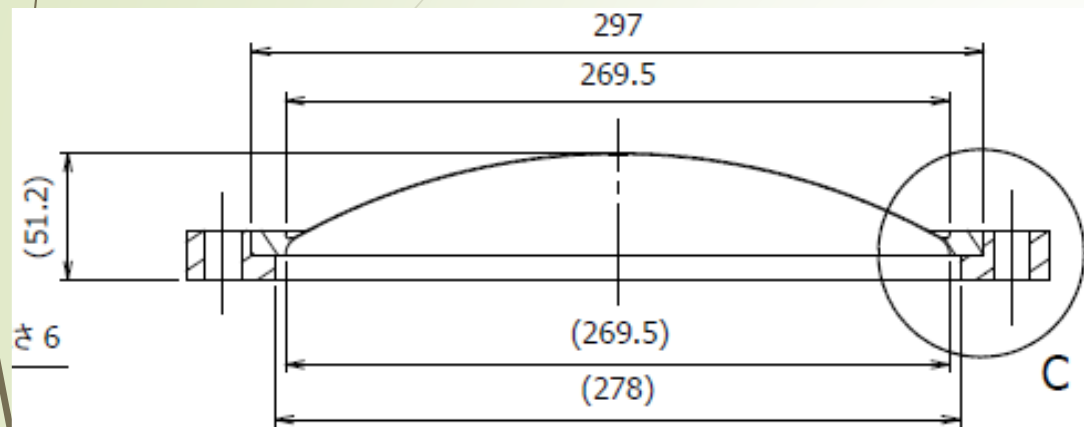
- レーザー積層造形
  - 局所的な溶融
  - 残留応力が大きい
- 電子ビーム積層造形
  - 溶融部が大きい
  - 残留応力は小さい



	SUS304	Ti-6Al-4V
密度(g/cc)	7.98	4.43
降伏応力(MPa)	205	825
破断強度(MPa)	480	895

# Specification

JIS VF250A (D=260の範囲が0.5 mm厚)



## ■ ビーム窓フランジ規格

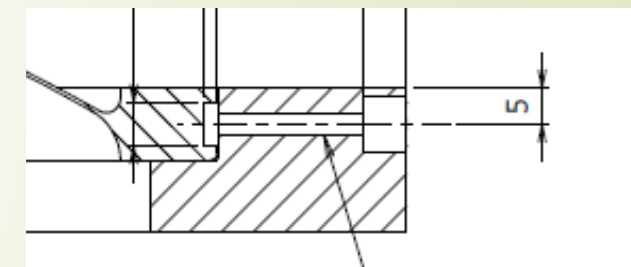
- JIS VF250A, JIS VF200A
- 金属リング用のボルト径・数
- 回転フランジ (凹凸の切替可能)
- 脱落防止構造

## ■ 窓材質・厚み

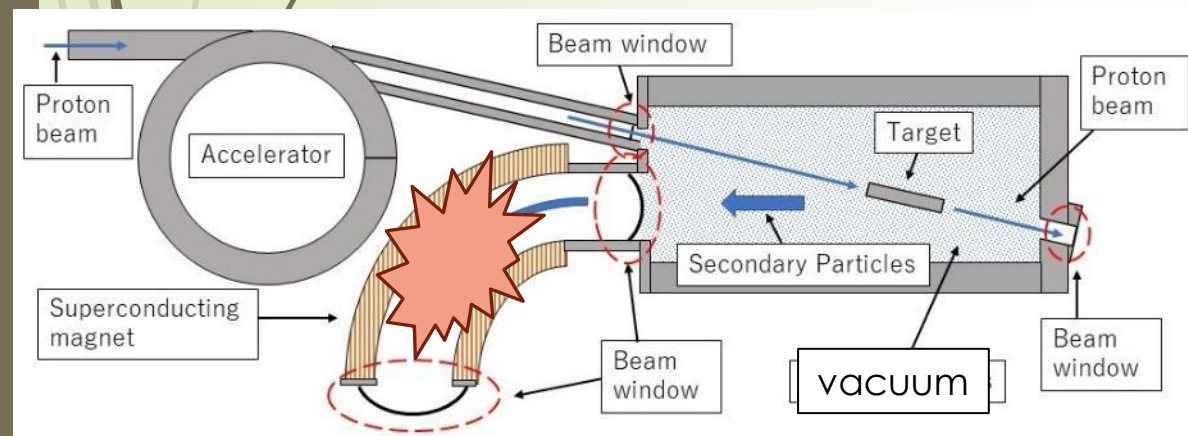
Ti-6Al-4V, 0.5 mm

## ■ 必要耐圧

- 0.9 MPa (凹面側加圧)
- 0.15 MPa (凸面側加圧)
- 解析上は、両方向で1.0 MPa以上の耐圧



脱落防止構造

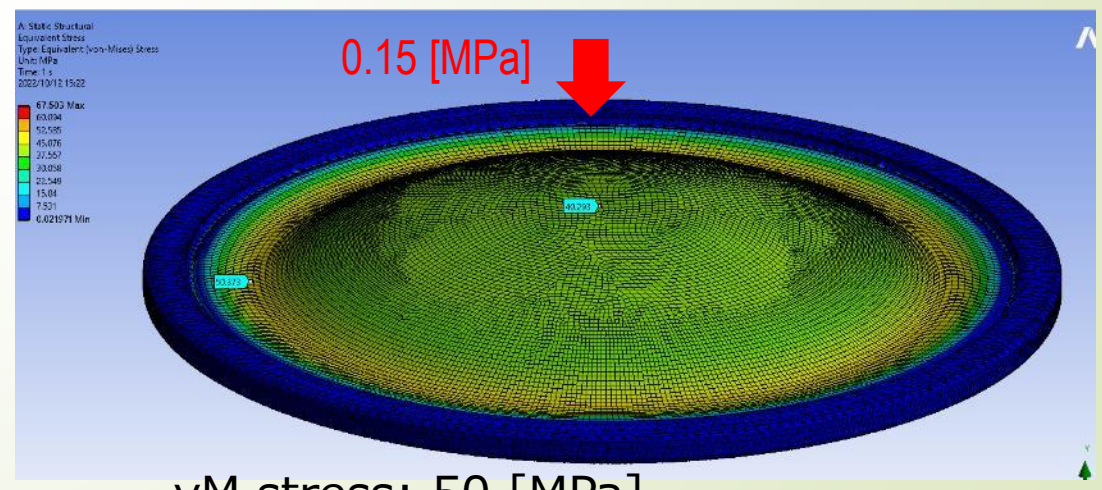
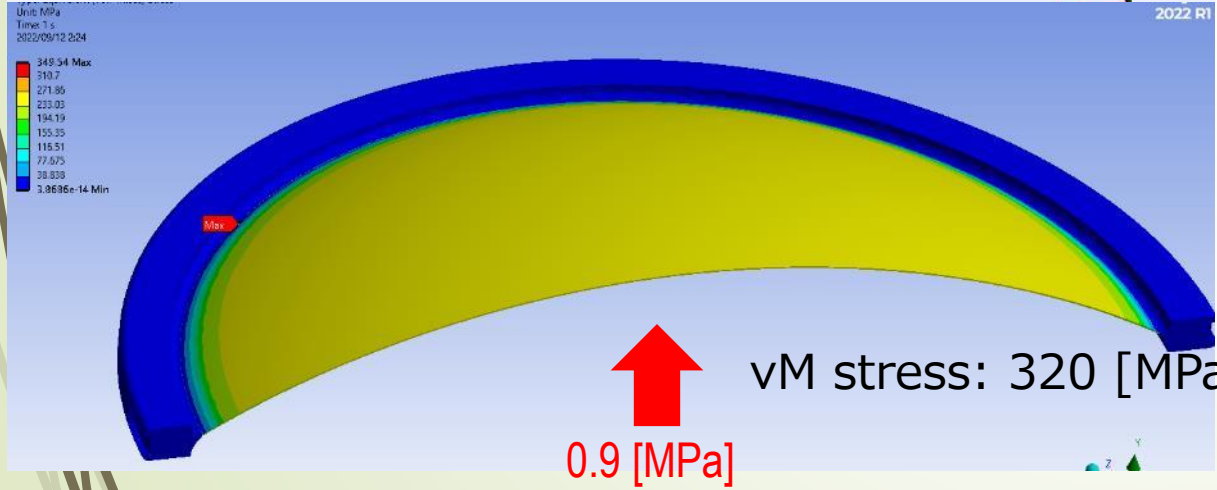
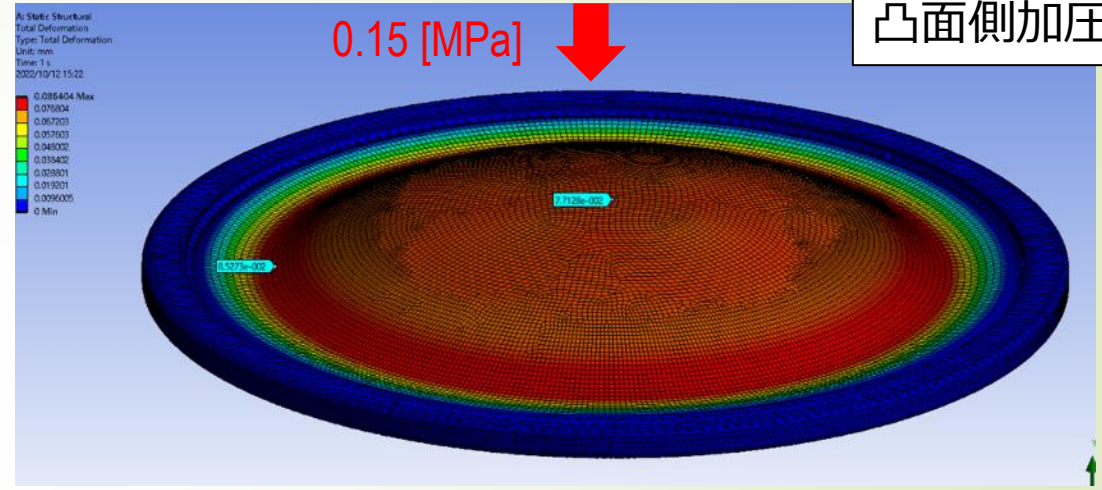
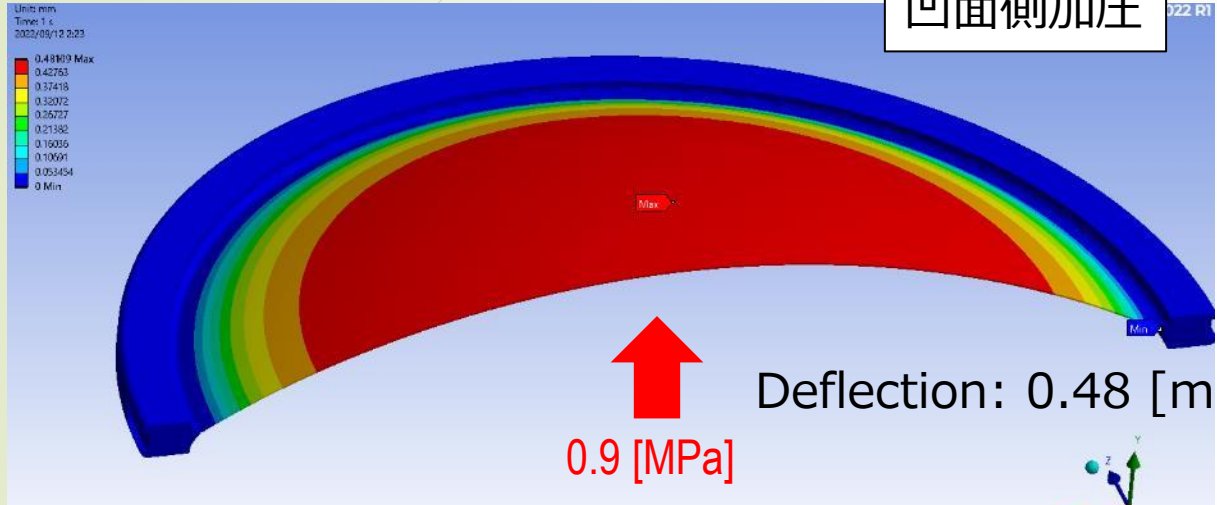


# Analysis (Convex and Concave)

Deflection: 0.085 [mm]

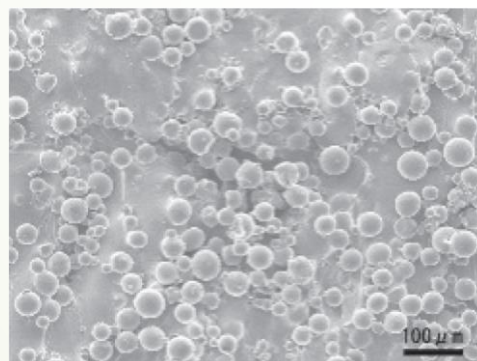
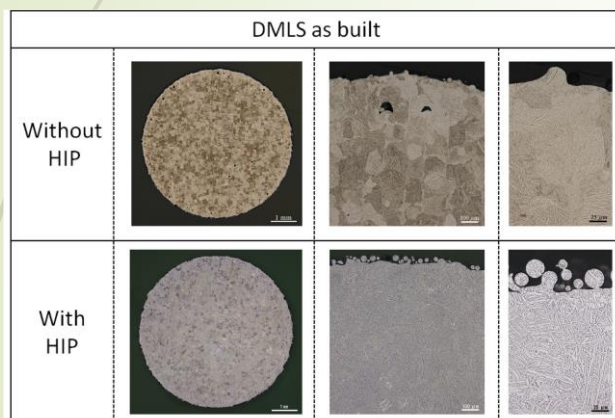
凹面側加圧

凸面側加圧



降伏応力 : 825 MPa

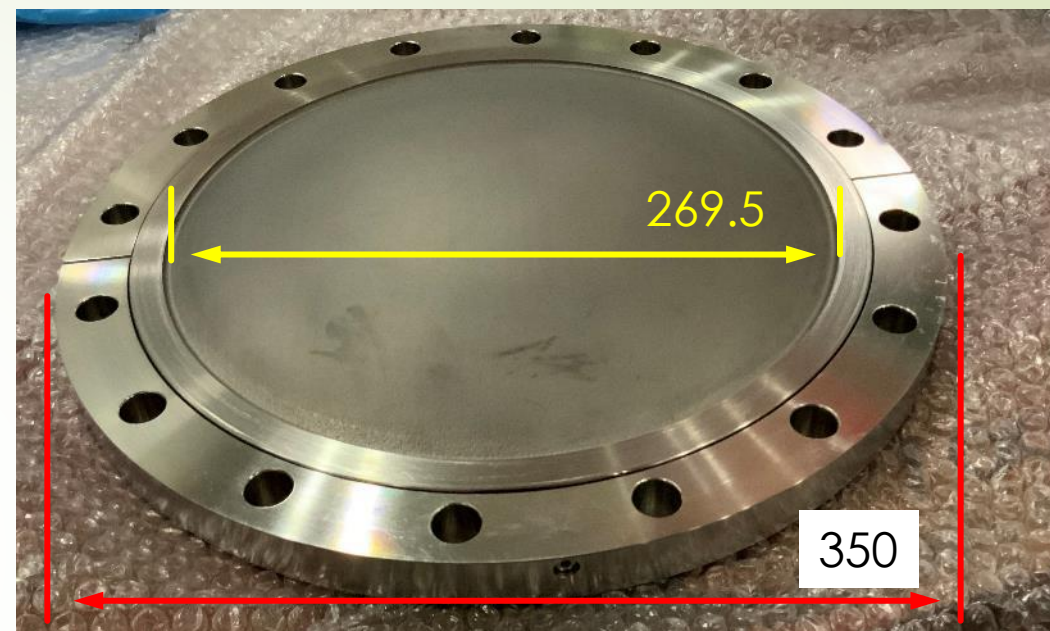
# Manufacturing



積層造形品は熱間等方圧加工法（Hot Isostatic Pressing: HIP）法によって空孔などを消失させ、その後、未熔融粉末を除去するために表面を研磨しないと強度が低下

H. Masuo et al., "Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing", International Journal of Fatigue 117 (2018) 163-179.

累々たる屍の上に立つ。。。。

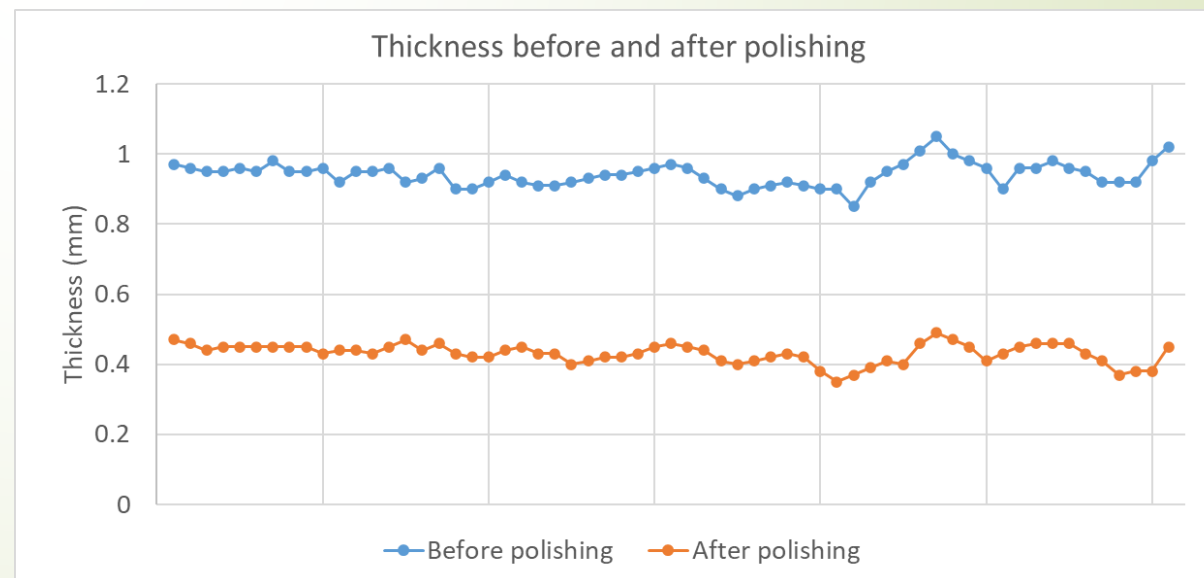
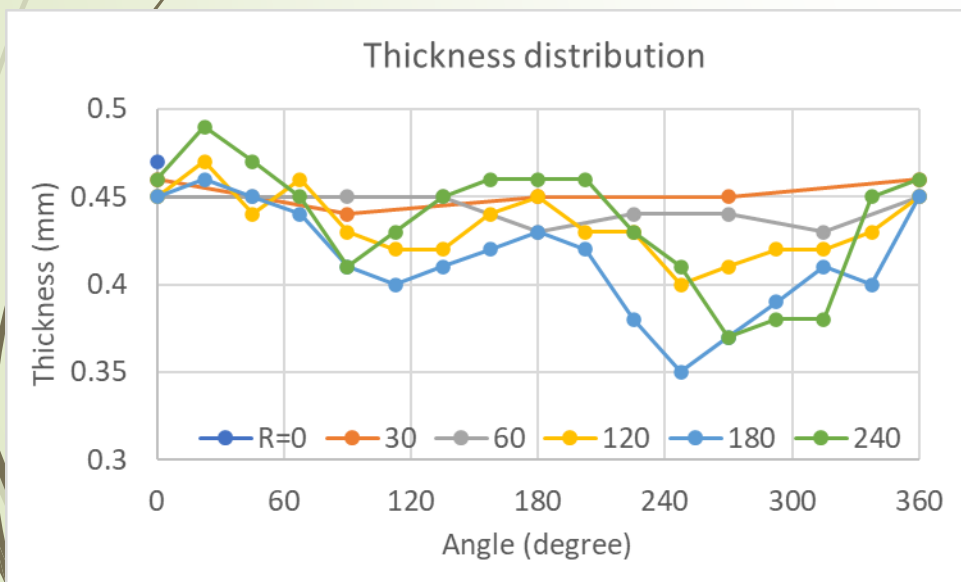
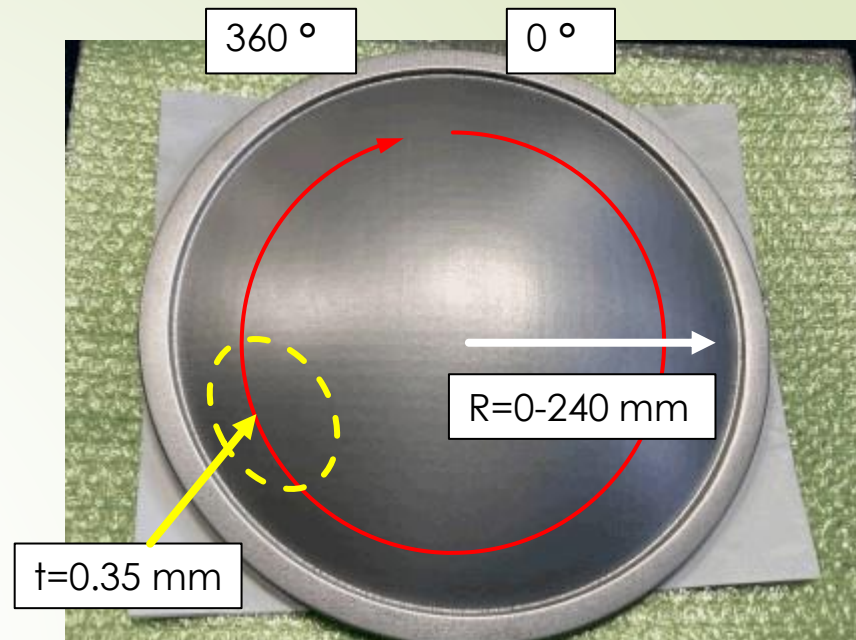
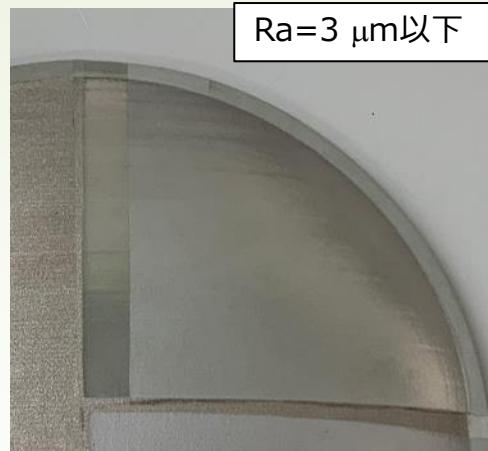


HIP・研磨後の完成品 JIS VF250A

凹凸の入れ替えが可能

# Polishing

- 流体研磨
  - 化学研磨
  - バレル研磨
  - ブラスト研磨～効率、コストから選定
- 一部、薄い箇所が存在する。  
元の積層造形時の厚み分布に支配される



# Proof pressure

- ▶ 凹面側加圧：

どのビーム窓も解析通り、差圧0.9 MPaは問題なく耐える

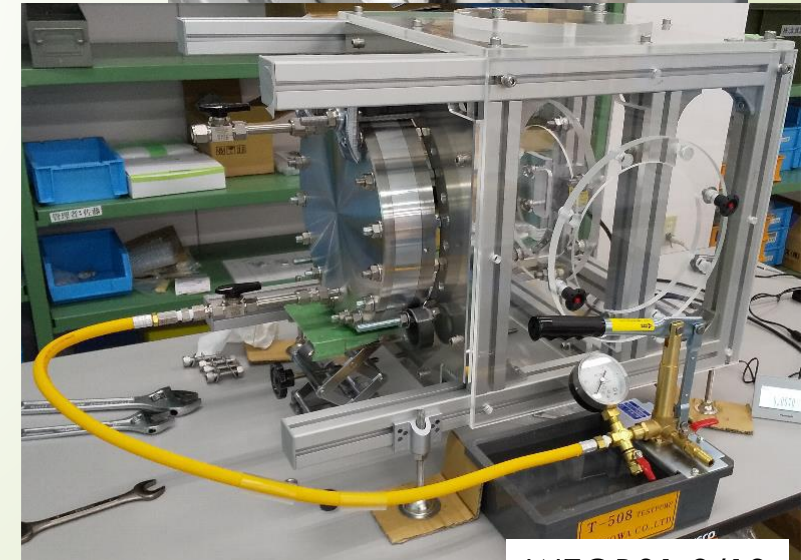
- ▶ 凸面側加圧

レーザー積層造形：0.075 MPaで局所的に変形

電子ビーム積層造形：0.17 MPa@250A. 0.2 MPa @200A  
で局所的に変形

差圧0.15 MPaでの発生応力 50 MPa。降伏応力820 MPa。

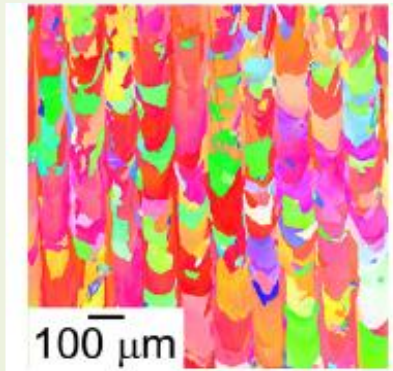
- ▶ 電子ビーム積層造形JIS 200Aでは塑性変形をして戻らなくなりました。それ以降は注意深く作業をしたので圧力を除荷すると元に戻る
- ▶ 厚み・曲率の不均一性が影響していると予測
- ▶ これらのビーム窓は実機と実機予備のため、これ以上の圧力負荷は行わなかった。



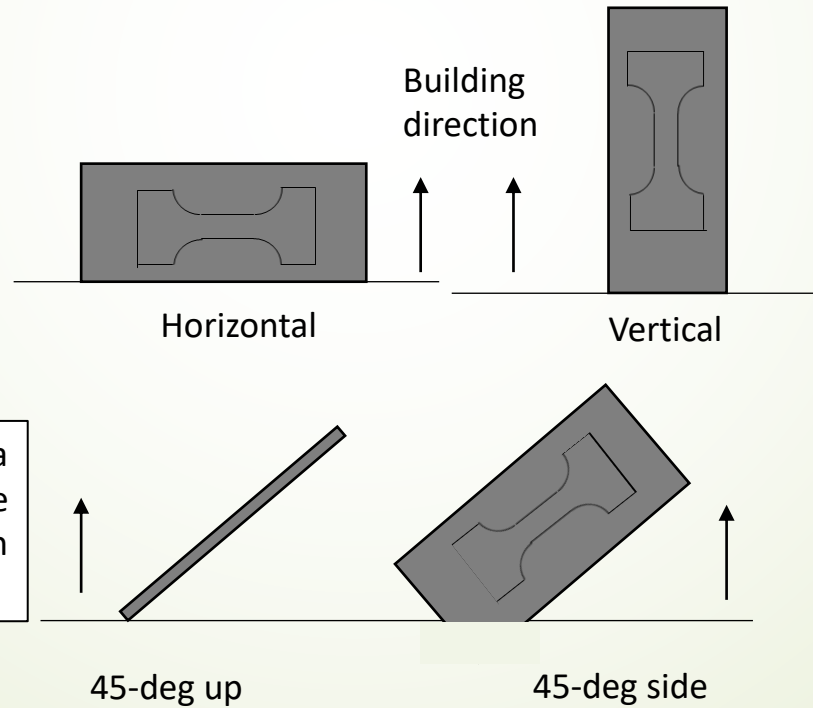


# Mechanical property 1

- ▶ 積層造形品の引張試験を進めている。
- ▶ HIP無し、研磨無し
- ▶ 積層造形品は積層方向依存性があると予想される

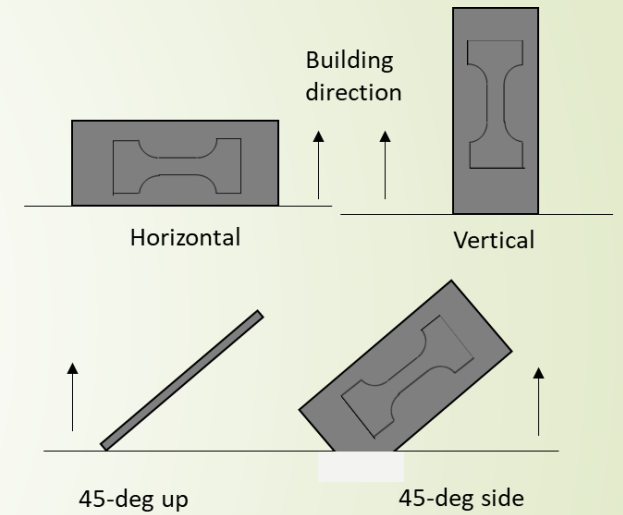


3D-printed material has a columnar structure. T. Nagase et al., Materials and Design 173 (2019)107771



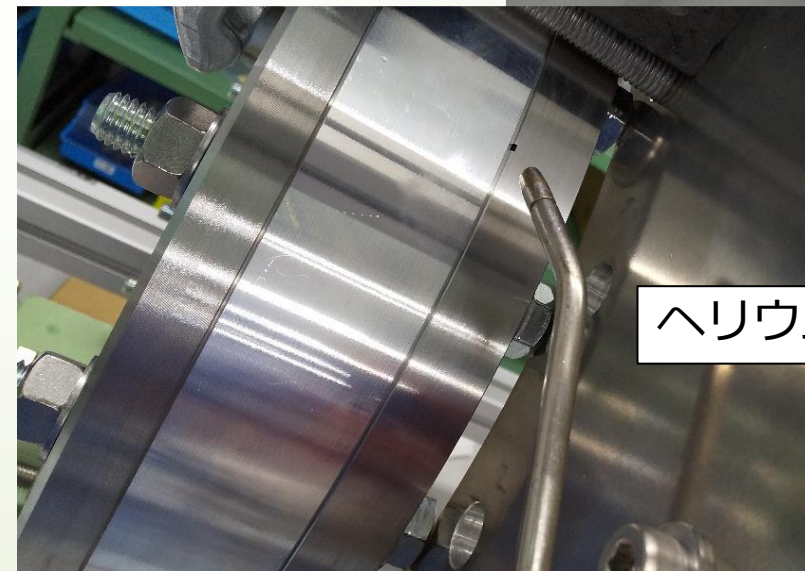
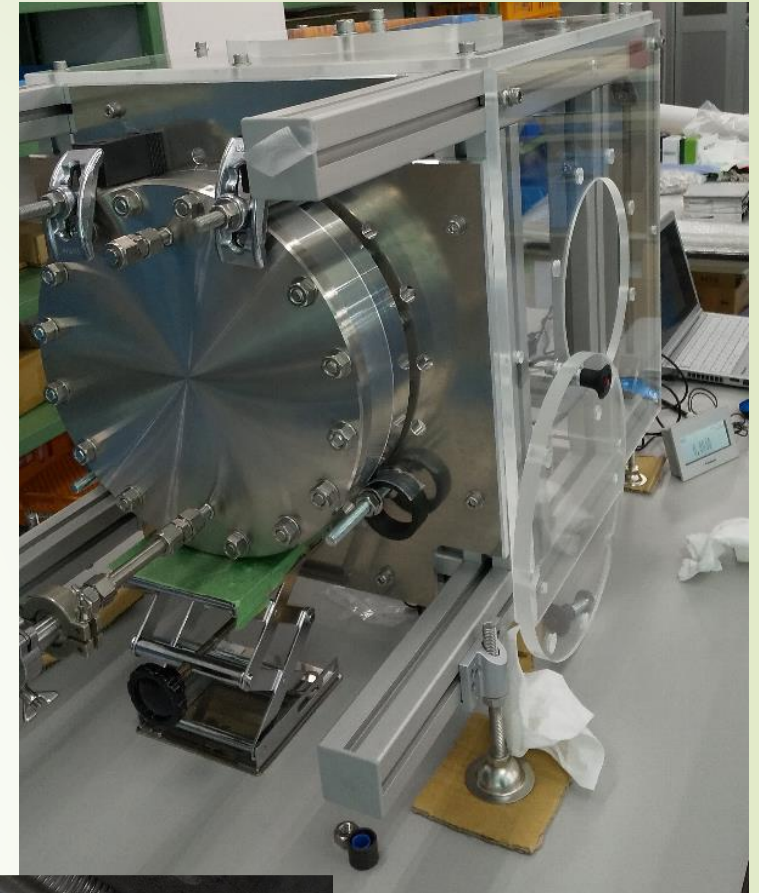
# Mechanical property 2

- ▶ HIP無し、研磨無しでは、厚み0.6 mm以上で積層しないと十分な強度を得られない。
- ▶ HIPあり、研磨ありの条件でも試験を進めている。



# Helium leak test

- ▶ レーザー積層造形は、凹面側から真空排気を行うと差圧0.1 MPaを超えてしまうので試験は不可
- ▶ その他は、全て $1 \times 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/sec.以下であることを確認した。



ヘリウムリーク試験用溝

# Installation into beamline

- ▶ COMET実験では、0.1 MPa以上の高い圧力の負荷が想定されるのは一方向のみ
- ▶ その反対方向の耐圧は真空と大気の差圧0.1 MPaであるため、電子ビーム積層造形で製造した球殻ビーム窓をそのまま使用できると判断
- ▶ ビームライン上に設置。2023年1月のビーム運転に使用される。



パイオンビームライン入口  
JIS VF250A  
通常時：両側真空  
異常時は左から右に圧力が負荷

ダンプ前陽子ビームライン  
JIS VF200A  
大気と真空を隔離

# Summary

- ▶ 大口径、低密度 & 薄板、耐圧の高い窓の開発が望まれている。
- ▶ Ti-6AL-4Vの球殻ビーム窓を積層造形で製造した。
- ▶ JIS VF250A, JIS VF200Aの回転フランジ式のビーム窓を製造した。
- ▶ HIP、表面研磨を行った。
- ▶ 凹面側加圧では、0.9 MPaの耐圧性能を確認した。
- ▶ 凸面側加圧では、0.075 MPa（レーザー積層造形）、0.17 MPa（電子ビーム積層造形）で局所的に変形。
- ▶ レーザー積層造形では凸面側排気、電子ビーム積層造形では両面ともヘリウムリーク試験で $1 \times 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/sec.以下であることを確認した。
- ▶ 電子ビーム積層造形で製造したビーム窓をCOMET実験のビームラインに導入した。
- ▶ 今後、新たな形状を探る。