



金属3DプリンタによるJ-PARC/COMET Phase-1用アルミ合金ビーム窓の開発

栗原 謙太 (金属技研(株))

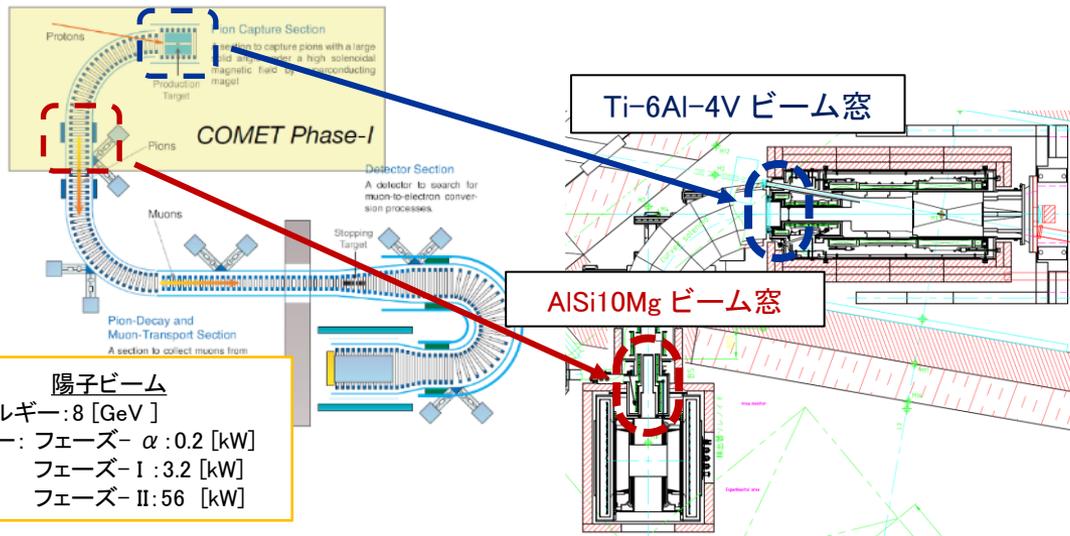
高橋 正和、長澤 豊、尾ノ井 正裕 (金属技研(株))
牧村 俊助、深尾 祥紀、吉田 誠 (KEK, J-PARC)
井上 薫 (KEK)

はじめに

J-PARCのハドロン実験施設において、ミューオン電子転換過程の探索を目的とするJ-PARC/COMET (COherent Muon to Electron Transition) 実験を進めている。

- ・第一期として既の実施されたPhase- α 向けに3Dプリンタ(Additive manufacturing: AM)によるTi-6Al-4V製ビーム窓を開発し、ビームラインに実装した。
- ・ビーム窓は従来の平らな形状ではなく、半径方向に曲率を持ち、周辺部を厚くする事によって強度を増した構造とした。

現在、Phase-1への導入に向けAMによるアルミ合金(AISi10Mg)製ビーム窓の開発を進めている。



Ti-6Al-4V製のビーム窓

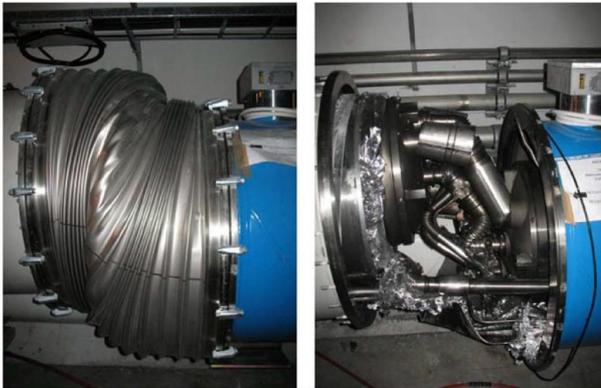
ビーム窓(隔壁)の開発条件

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 ⇒ **耐圧性能**
- ビーム窓上での粒子のロスが減らす ⇒ **大口径、低密度 & 薄板**

次世代超伝導加速器: 液体ヘリウム(LHe)漏えいによる急激な圧力上昇の危険

液体ヘリウムで冷却された超伝導電磁石を輸送ソレノイドに用いているが、液体ヘリウムシステムの破損時、ビーム輸送領域内へ漏洩した液体ヘリウムの気化による**急激な圧力上昇**の懸念がある(2008年のCERN incident)



CERN quench incidentで破損したベローズ



異常時にラプチャーディスクが作動するまでの間、
負圧から0.3MPaまでの圧力上昇に耐える必要がある

(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,

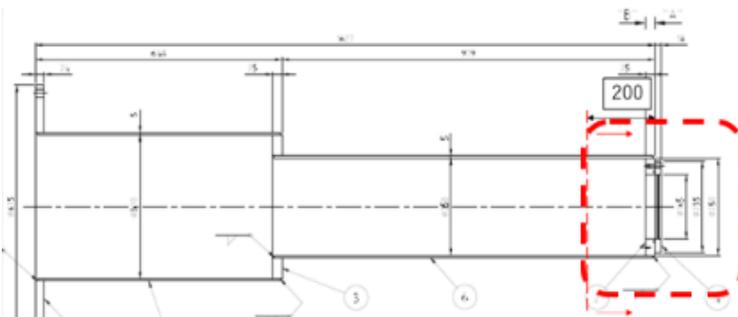
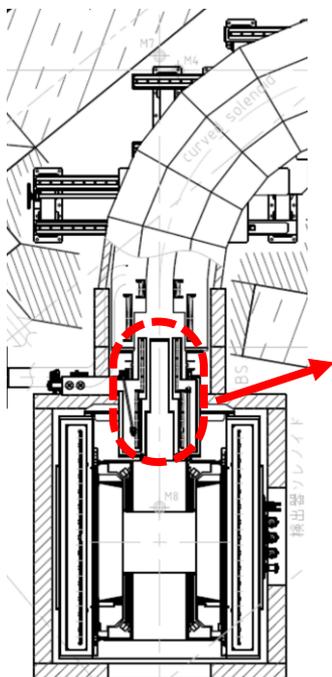
はじめに

- ・ビーム窓はソレノイド内筒部のアルミ合金真空ダクトに取付ける
- ・従来のJISフランジ固定のビーム窓では、輸送すべきパイオンがフランジ部で停止してしまう

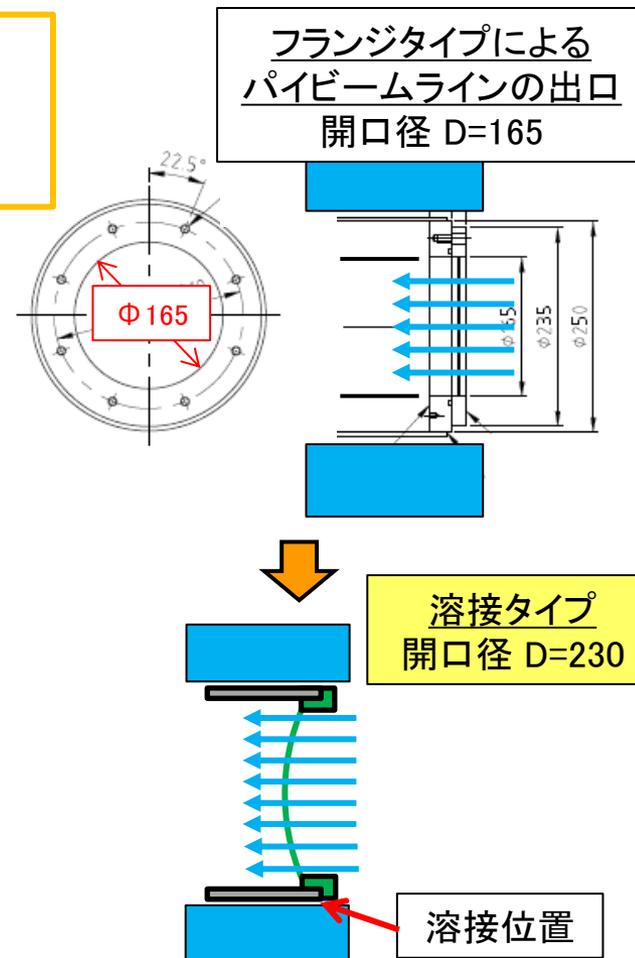
結合部を最小化・ビーム透過部を可能な限り最大化



ダクトに直接溶接が可能なAISI10Mg製ビーム窓を開発する



真空ダクト(A5052製)



1.ビーム窓の試作

2.溶接試験

2-1. 溶接性確認

2-2. 引張試験

2-3. 溶接時の変化量

3.まとめ

1. ビーム窓の試作

ビーム窓製造工程

(1) CAD, Analyses



(2) Additive manufacturing (AM-SLM)



(3) HIP
(Hot Isostatic Pressing)
380 °C / 180MPa × 4h



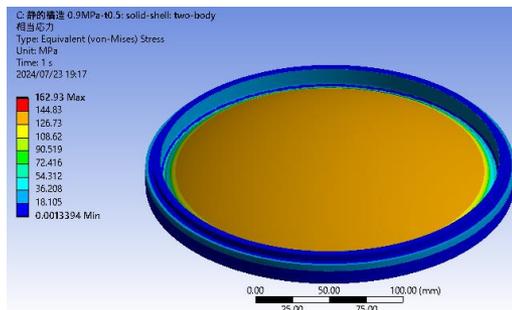
(4) T6
530 °C × 6h + quenching
aging 160 °C × 3h



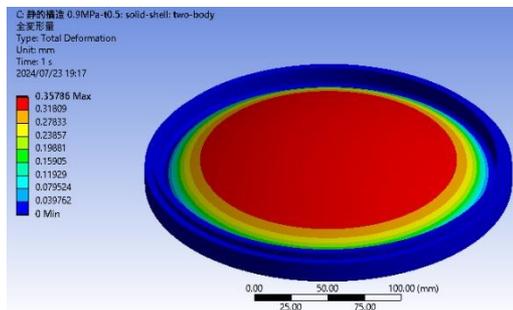
(5) Thickness tailoring
+ polishing

He漏洩時: 凹面側から0.3MPa
目標: 0.6MPaの耐圧(安全率: 2)
(引張応力: 162MPa)

定常時: 凸面側から0.1MPa
座屈の検証が必要
計算では0.2 MPaまで座屈しない

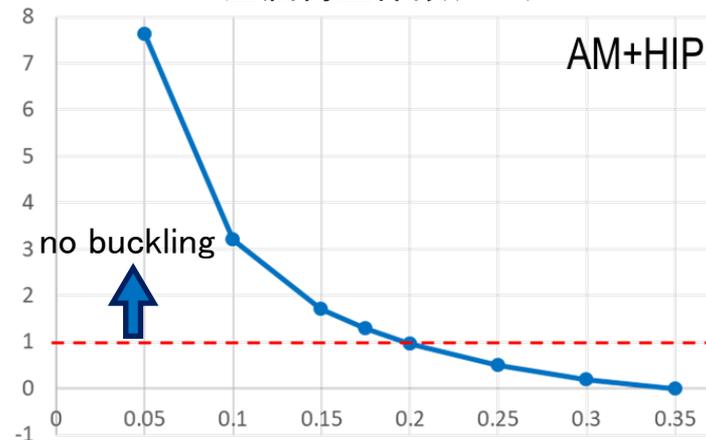


t0.5-Φ250 Al窓解析
ミーゼス応力



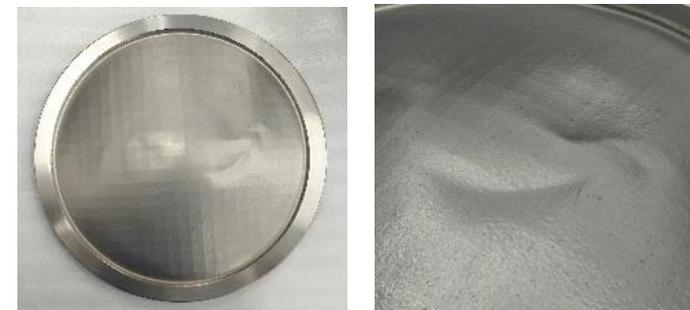
変位量: 0.36mm

座屈荷重係数(BLF)



⇒実験で耐圧性能を確認予定

座屈: 細長いものを圧縮すると過大な変形が発生



Ti-6Al-4V ビーム窓の座屈例

1.ビーム窓の試作

ビーム窓製造工程

(1) CAD, Analyses



(2) Additive manufacturing(AM-SLM)



(3) HIP
(Hot Isostatic Pressing)
380 °C /180MPa × 4h



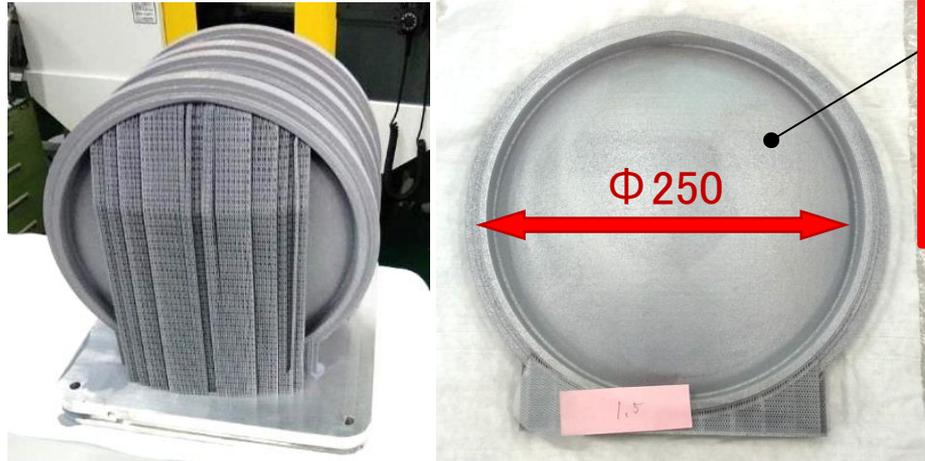
(4) T6
530 °C × 6h+quenching
aging 160 °C × 3h



(5) Thickness tailoring
+ polishing

材 質: AISi10Mg
粉末粒径: 60 μ m
使用設備: SLM280 (Nikon SLM Solutions)

ビーム窓形状の造形に成功



AM後の球殻部の厚さ
1.0mm & 1.5mm
↓ 厚さ調整
目標0.5mmを目指す

積層造形後のビーム窓



引張試験片



溶接試験片

1.ビーム窓の試作

ビーム窓製造工程

(1) CAD, Analyses



(2) Additive manufacturing(AM-SLM)



(3) HIP
(Hot Isostatic Pressing)
380 °C /180MPa × 4h



(4) T6
530 °C × 6h+quenching
aging 160 °C × 3h



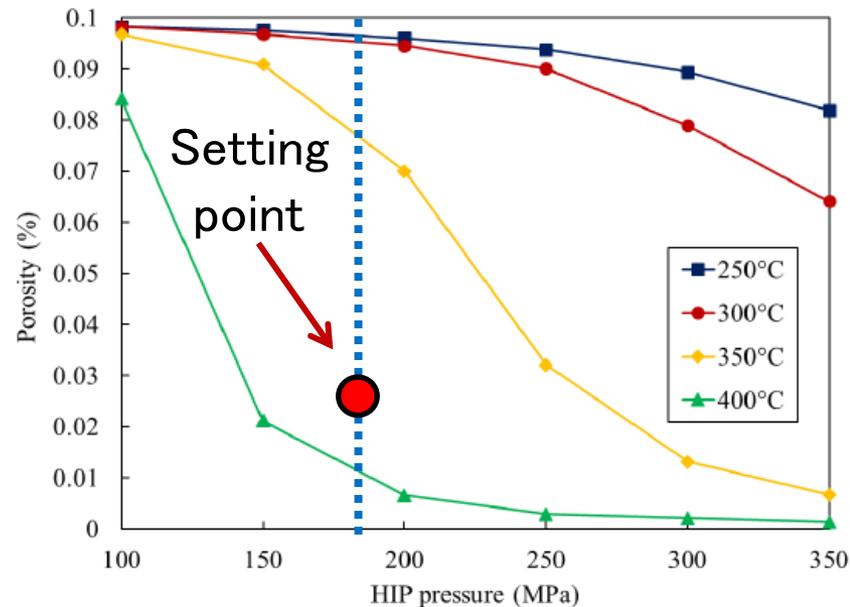
(5) Thickness tailoring
+ polishing

AM材の内部空孔を低減するため、HIP処理をおこなう

温度条件: 高温HIP (500°C) → 母材強度の低下

⇒空孔率低減と母材強度のバランスを考慮し380°Cへ設定

圧力条件: 設備の仕様を鑑みて180MPaとした



Hot isostatic pressing of laser powder bed fusion AlSi10Mg: parameter identification and mechanical properties, J. Macías, 2022 Journal of Materials Science 57(12)

1.ビーム窓の試作

ビーム窓製造工程

(1) CAD, Analyses



(2) Additive manufacturing(AM-SLM)



(3) HIP
(Hot Isostatic Pressing)
380 °C /180MPa × 4h



(4) T6
530 °C × 6h+quenching
aging 160 °C × 3h



(5) Thickness tailoring
+ polishing

一般的にHIP処理をしたAlSi10Mgは、T6処理によって強度を向上させる。(T6:溶体化処理+時効処理)

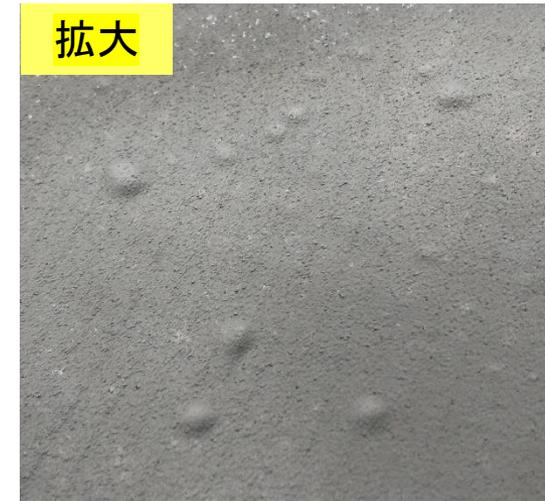
しかし、表面にブリストアが発生した

ONO Yushi, “金属AMにおける雰囲気ガスの影響” 太陽日酸技報 No.39, 2020.

推定要因

- ・内在大きくおよび雰囲気から吸収された水素の内圧より発生
- ・熱処理によって固溶した水素がガス化

よって、HIP処理のみで設計強度を満足できるか引張試験で確認する必要がある



2-1.溶接の健全性確認

ビーム窓と真空ダクトの溶接性を確認

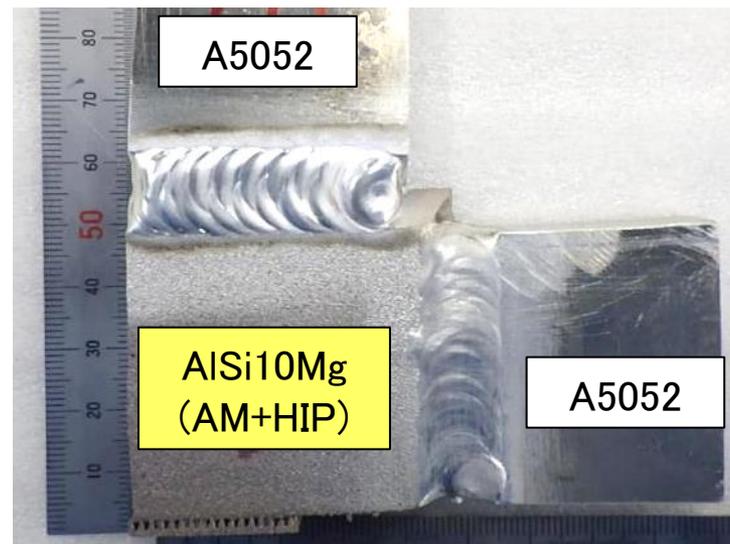
AlSi10MgとA5052との溶接試験を実施

試験サイズ: □50 × 10t

溶接方法: TIG

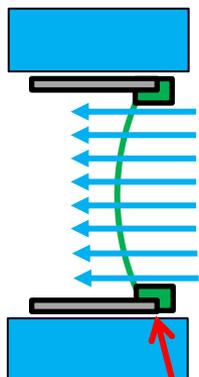
開先: V型, 60°

溶加材: A4043

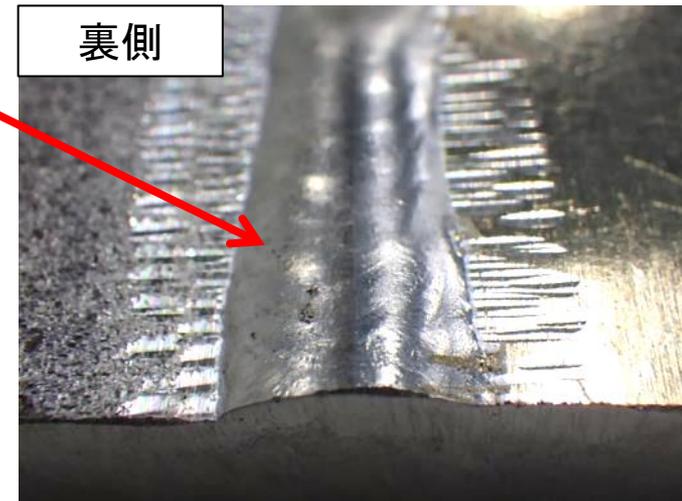
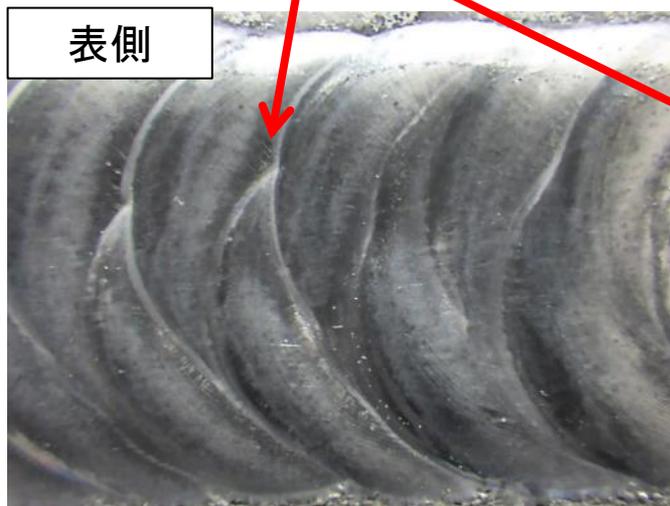


無欠陥での溶接が可能

溶接タイプ
開口径 D=230



溶接位置



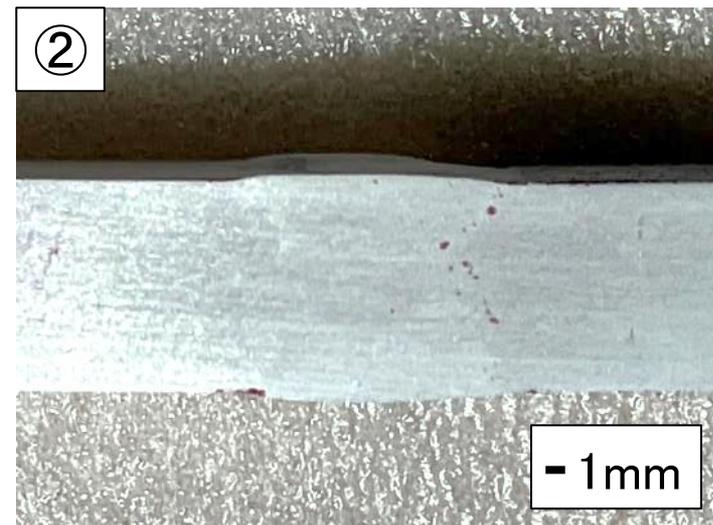
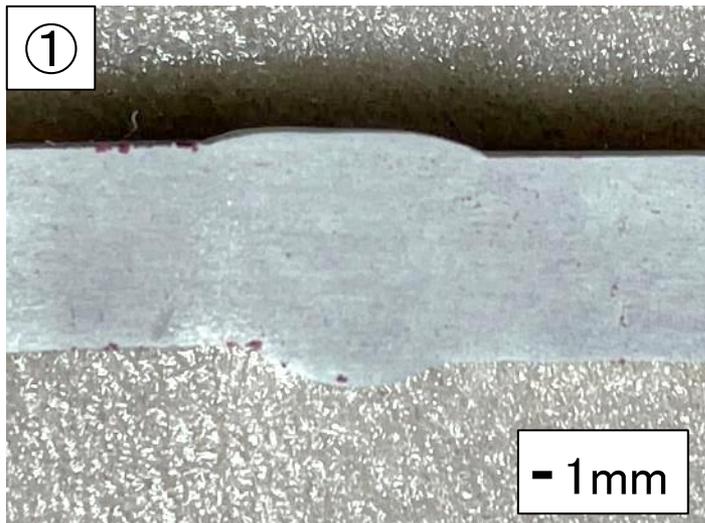
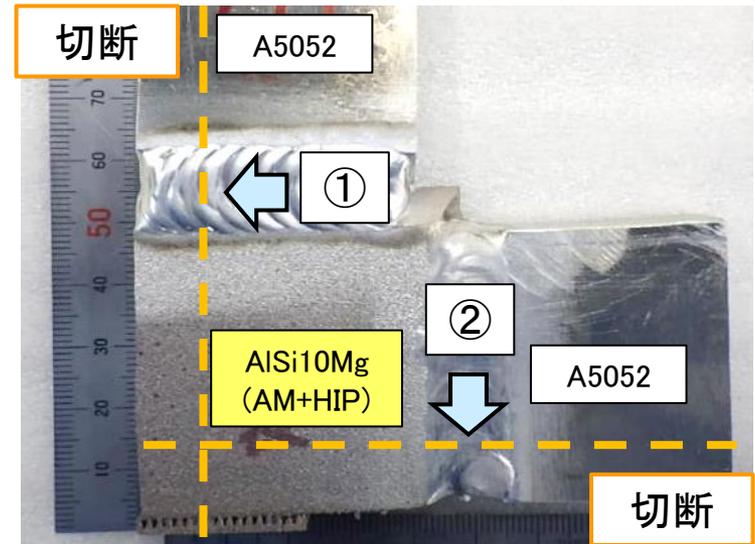
2-1.溶接の健全性確認

浸透探傷試験(PT)による断面の確認

内部に僅かなブローホールが発生
しかし、致命的な欠陥は確認されなかった



AlSi10MgとA5052との溶接後の欠陥・不具合なし



2-2.引張試験

引張試験結果の比較

試験検体:

1. 溶接部
2. A5052母材
3. AM+HIP
造形粉末の粒径: $30\mu\text{m}$ & $60\mu\text{m}$
4. AM+HIP+T6

-試験結果-

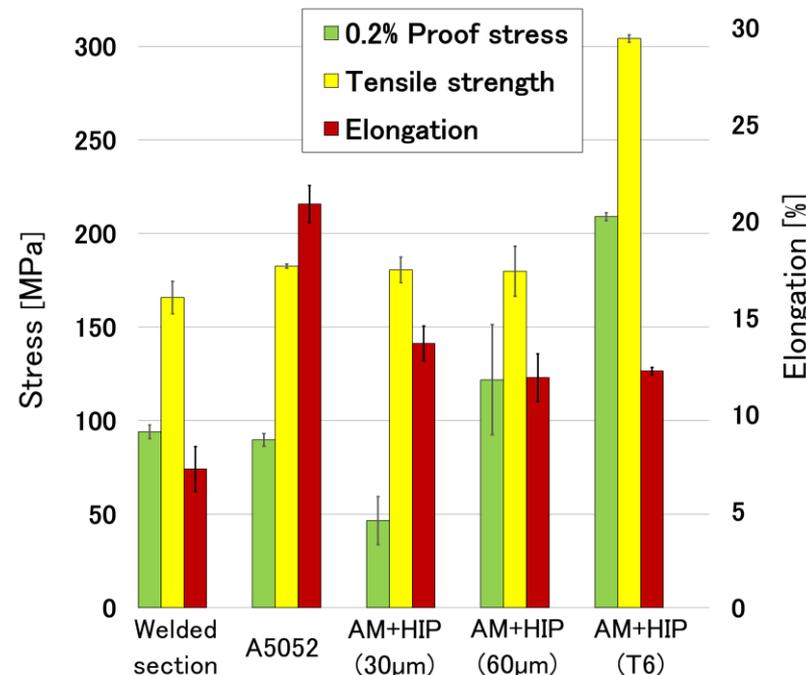
溶接部の引張強度と一様伸びは、他と比べやや劣る結果となったが、**著しい強度低下**は確認されなかった。

AM材は粉末粒径のサイズにより、0.2%耐力に大きな差が確認された。

⇒実機は $60\mu\text{m}$ で作製

T6処理により引張強度は向上するが、ブリストアが発生してしまう。

⇒HIP処理のみでもLHe漏洩時(0.3MPa)の耐圧性能は達成できる。



引張試験結果

	溶接部	A5052	AM+HIP (30µm)	AM+HIP (60µm)	AM+HIP (T6)
0.2%耐力 [MPa]	94	90	47	122	209
引張強度 [MPa]	166	183	181	180	304
一様伸び [%]	7.2	20.9	13.7	11.9	12.2

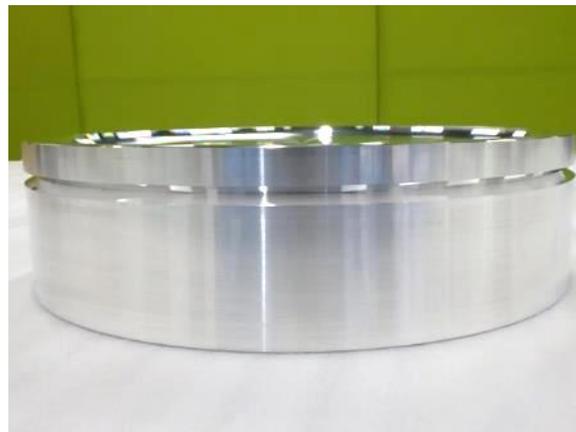
2-3.溶接時の変化量

ビーム窓をアルミ合金製真空ダクトに溶接する際に、大きな溶接ひずみが発生
⇒ビーム窓の球殻が破損されることが危惧される

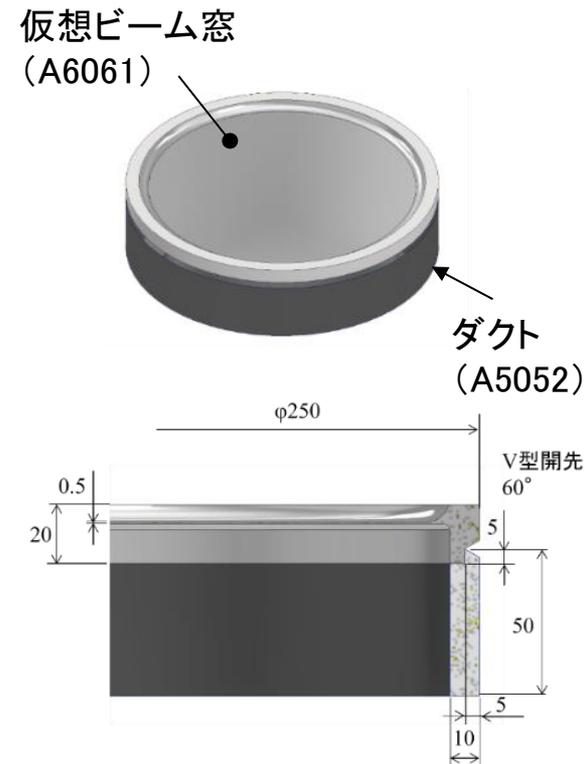
TIG溶接および電子ビーム溶接(EBW)にて接合し、窓部の変形を測定、比較する

試験用にビーム窓の模擬体を製作

- ・窓部は容易に製作が可能な平らな形状とした
- ・材質:窓部 A6061 (AlSi10Mgと熱膨張係数が類似)
- 真空ダクト A5052 (実機と同一)



ビーム窓模擬体



2-3.溶接時の変化量

下表の測定項目について計測をおこなった。

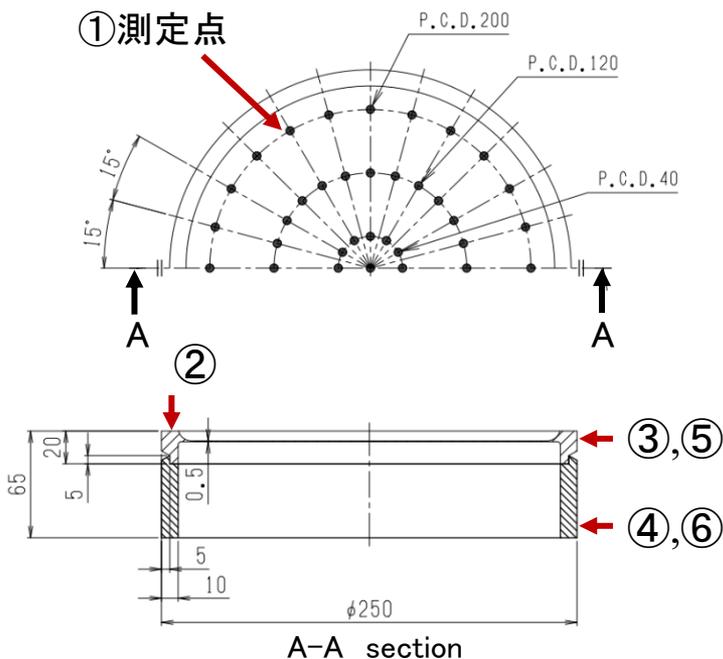
-試験結果-

TIG溶接後

平面度に大きな変化があった。直径は0.3mm程度の収縮が確認された。

EBW後

全ての測定箇所において、目立った変形はなかった。



溶接による変形結果

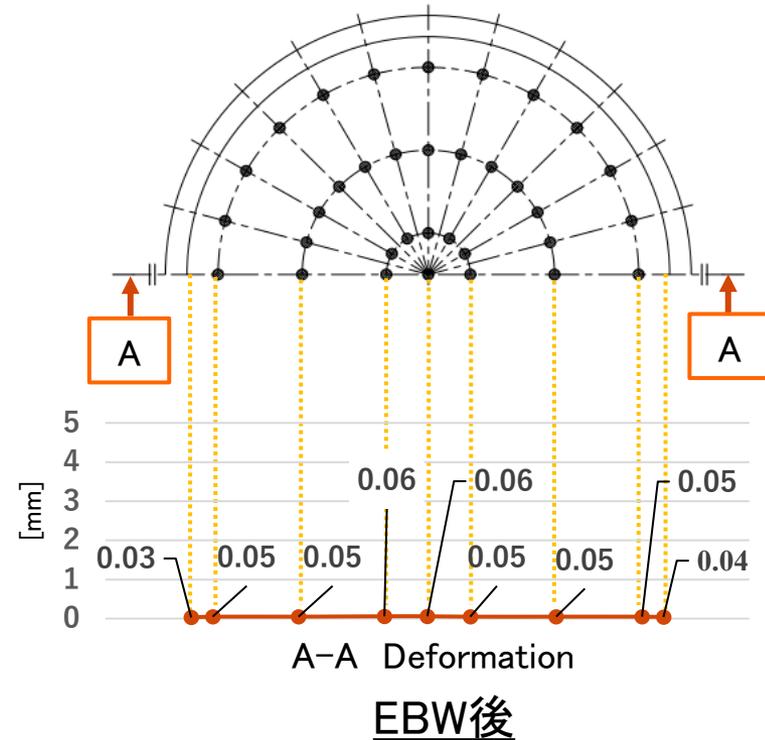
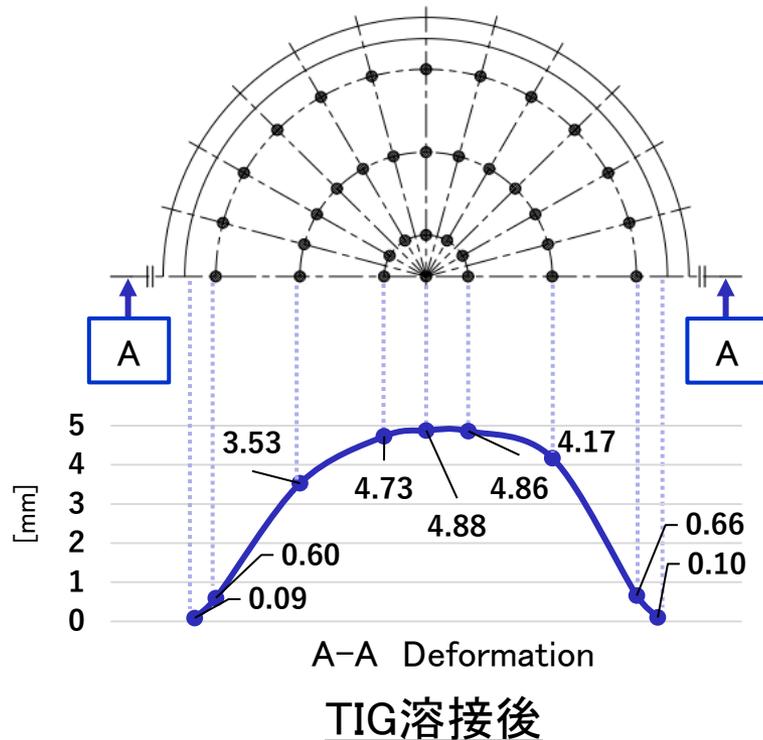
	TIG溶接			EBW		
	溶接前	溶接後	変位	溶接前	溶接後	変位
① 窓_平面度	0.115	4.558	4.443	0.071	0.147	0.076
② 窓の縁_平面度	0.027	0.116	0.089	0.011	0.035	0.024
③ 窓_真円度	0.003	0.020	0.017	0.003	0.007	0.004
④ ダクト_真円度	0.005	0.150	0.145	0.006	0.025	0.019
⑤ 窓_直径	249.98	249.69	-0.29	249.99	250.04	0.05
⑥ ダクト_直径	249.97	250.22	0.25	249.95	250.01	0.06

2-3.溶接時の変化量

-窓部の試験結果-

TIG溶接後では、凸形状へ最大4.88mm変形したが、窓部の破損はなかった。
窓の外周から中心に向けて変形が大きくなり、最大変形部は中心であった。
一方で、EBW後では、ほぼ変形はなかった。

変化量を比較した結果、ビーム窓と真空ダクトとの接合はEBWの方が優位性がある



-まとめ-

- ・引張試験

A5052母材およびAM+HIP材と比較し、**TIG溶接部**において著しい**強度低下は見られなかった。**

- ・溶接による変形量

TIG溶接においては、窓部の変形が大きくなり、EBWではほぼ変形がなかった。
⇒現時点において、**ビーム窓と真空ダクトの接合はEBWの方に優位性がある。**

-今後の予定-

- ・EBW部の溶接健全性確認および強度試験をおこなう。

- ・球殻部の機械加工および研磨方法を検証/評価する。

- ・ビーム窓の耐圧試験をおこなう。

- ・2026年3月 完成