

金属 3D プリントによる J-PARC/COMET Phase1 用アルミ合金製ビーム窓の開発

DEVELOPMENT OF 3D-PRINTED BEAM WINDOWS MADE OF AlSi10Mg FOR J-PARC/ COMET PHASE 1

栗原謙太^{#, A)}, 牧村俊助^{B, C)}, 高橋正和^{A)}, 長澤豊^{A)}, 井上薫^{B)},
尾ノ井正裕^{A)}, 深尾祥紀^{B, C)}, 吉田誠^{B, C)}

Kenta Kurihara^{#, A)}, Shunsuke Makimura^{B, C)}, Masakazu Takahashi^{A)}, Yutaka Nagasawa^{A)}, Kaoru Inoue^{B)},
Masahiro Onoi^{A)}, Yoshinori Fukao^{B, C)}, Makoto Yoshida^{B, C)}

^{A)} Metal Technology Co. Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} J-PARC Center

Abstract

In the J-PARC/ COMET (COherent Muon to Electron Transition) experiment, which aims to explore the muon-electron conversion process, Phase- α , an engineering run with a proton beam intensity of 0.3 kW, was completed in February 2023. Subsequently, development is underway for a Phase 1 experiment with a proton beam intensity of 3.2kW. In Phase- α , beam windows with a window thickness of ± 0.5 - $\Phi 270$ and $\Phi 220$ with a spherical beam transmitting part made of Ti-6Al-4V alloy were fabricated by a 3D-printer and mounted on the beamline. We are currently developing an aluminum alloy beam window by metal 3D-printer using AlSi10Mg as raw material for introduction into Phase 1. The beam window to be developed is attached to a $\Phi 260$ mm. vacuum duct made of A5052 aluminum alloy, which is inserted into the inner cylinder of the solenoid. The beam window with a conventional JIS flange shape stops transporting pions at the flange. To maximize the beam transmission area, we are developing a beam window made of AlSi10Mg, which can be welded directly to a cylindrical part made of A5052. This beam window requires a pressure resistance performance of 0.3 MPa and an ambient temperature range of -60°C to room temperature. Currently, the structure and fabrication methods are being studied (metal laminate fabrication, HIP, heat treatment, polishing/thickness adjustment), CAD modeling, structural analysis, and then fabrication of the beam window. To confirm the strength of the actual beam window, tensile tests were conducted on specimens fabricated by AM+HIP and on heat-treated specimens, respectively. To confirm weldability, weld tests, strength tests, and evaluation of the amount of strain due to welding are conducted between AM and A5052 melted material. In this presentation, we report on the development of an aluminum alloy beam window for J-PARC/COMET Phase 1 using a metal 3D-printer.

1. はじめに

J-PARC ハドロン施設では、ミューオン電子変換過程を探索するために COMET 実験施設の建設が進められている[1]。メインリングから供給される 8 GeV 陽子ビームは、超伝導捕獲ソレノイド電磁石内のターゲットに照射され、生成されたパイ中間子とミューオンは、液体ヘリウム (LHe) で冷却された超伝導マグネットによって実験エリアに輸送される。ビームラインを仕切るビーム窓は、クエンチに伴い、予期せぬトラブルでヘリウム配管が破損した際には、ラブチャーディスクが作動するまでの間 0.3 MPa を超える高い圧力上昇に耐えられるような強固なものが必要不可欠である。同時に、高いビーム透過効率を得るために、大口径でありながら、材料密度を低く、かつ、可能な限り厚さを薄くし、ビームエネルギーの損失を最小限に抑える必要がある。初めに、第一期計画として既に実施された Phase- α 向けに、3D プリント (Additive manufacturing: AM) による Ti-6Al-4V 製のビーム窓を開発した。このビーム窓は、従来の薄く平らな形状ではなく、半径方向に曲率を持ち、補強のために周辺部を厚くした構造となっている。現在、Phase-1 への導入に向けアルミ

合金(AlSi10Mg)を原材料とするビーム窓の開発を進めている。本開発対象であるビーム窓はソレノイド内筒部に挿入される $\Phi 260$ mm のアルミ合金 (A5052) 製真空ダクトに取り付けられる。従来の JIS フランジ形状のビーム窓では、輸送すべきパイオンがフランジ部で停止してしまうため、ビーム透過面積を最大化すべく A5052 製の円筒部に直接溶接が可能な AlSi10Mg 製ビーム窓の開発を進めている。その研究開発成果について報告する。

2. ビーム窓の試作

2.1 製造工程

SLM(Selective Laser Melting)により、4 枚のビーム窓および引張試験片、溶接試験片を製作した。製造装置として Nikon SLM Solutions 製の SLM280 を用いた。製造ステップは、Fig. 1 に示すように(1)設計と解析、(2)AM、(3)低温 HIP、(4)T6 処理、(5)厚さ調整/研磨である。AM によるビーム窓の製作では、内部の空孔率を低減すべく HIP(Hot Isostatic Pressing)処理をおこなう。

[#]kkurihara@kinzoku.co.jp

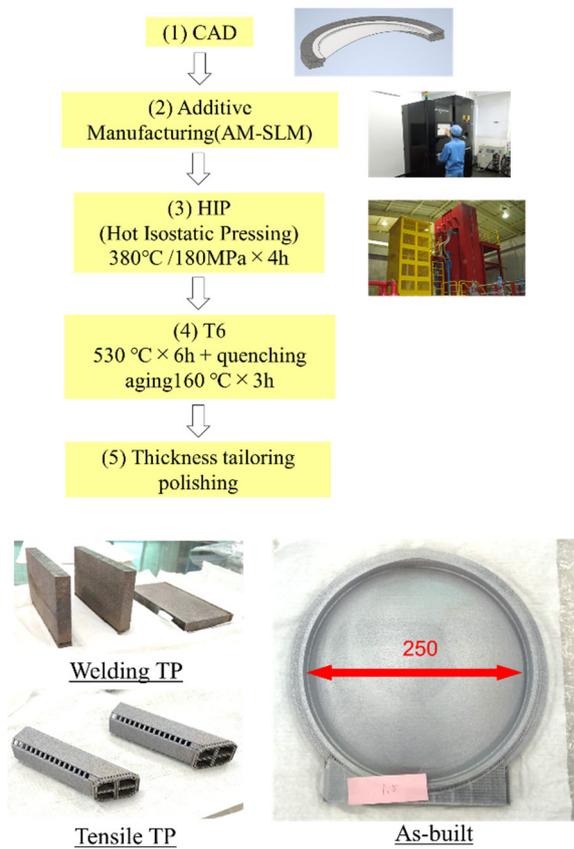


Figure 1: Manufacturing process of beam window.

2.2 HIP 処理

積層造形されたアルミニウム合金は、通常、内部の空孔率を低減するために 500°C で HIP 処理をおこなう。一方で、高温で HIP 処理をおこなうと母材強度が低下すると報告されている[2]。我々は、HIP 温度を低く抑制するために、J. Macias らの HIP 条件に関する文献[3]を参考にし、HIP 温度を 380°C とした。Figure 2 に圧力と温度に対する空孔率の依存性と本研究で採用した HIP 条件を示す。なお、圧力条件は空孔率と母材強度低下および設備の仕様を鑑みて 180MPa に設定した。

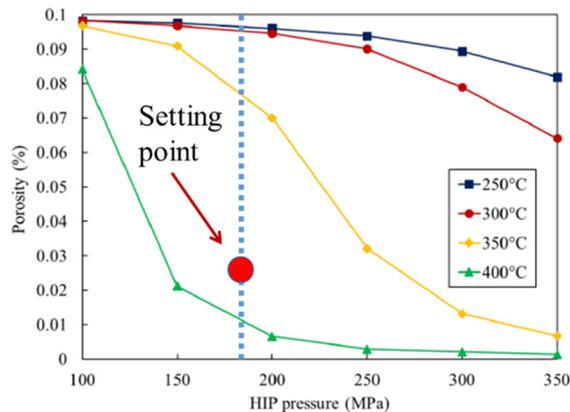


Figure 2: The simulation results by J. Macías et al and Set HIP conditions [3].

2.3 T6 処理

ステップ(4)では、アルミニウム合金の機械的特性を向上させるために、溶体化処理と時効処理を組み合わせた T6 処理をおこなった。しかし、処理後、ビーム窓の表面にブリストアが発生した(Fig. 3)。このブリストアは内在及び雰囲気から吸収された水素の内圧によって発生する表面欠陥と考えられる[4]。ブリストア発生は、熱処理によって固溶した水素がガス化したと考えられる。このことから、T6 処理をせず HIP 処理のみで設計強度を満足できるか検証をしていく必要がある。

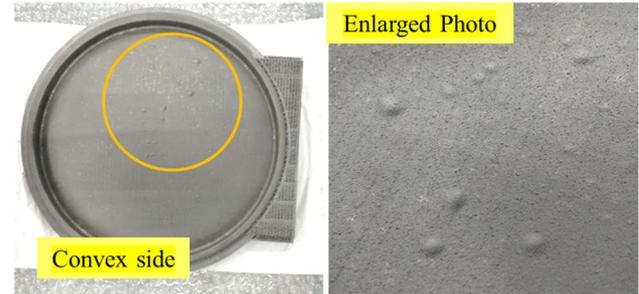


Figure 3: T6 treatment results.

2.4 AlSi10Mg 造形品の引張試験

積層造形品 (AM+HIP) および T6 処理を施した AM+HIP 材(T6)から試験片を切り出し、引張試験を実施した。AM+HIP の引張試験は造形粉末の粒径 30 μm および 60 μm の 2 種類でおこなった。また、試験片の寸法は、幅 4 mm × 長さ 16 mm × 厚さ 0.5 mm、平行部は幅 1.2 mm × 長さ 5mm とし、試験は、室温でひずみ速度 5 × 10⁻⁴ /sec でおこなった。それぞれの条件に対して、3 回の試験を実施しており、その結果を Fig. 4 に示す。なお、誤差範囲は標準偏差とした。AM+HIP(30 μm) の 0.2% 耐力、引張強さおよび一様伸びは、それぞれ 47 MPa、181 MPa および 13.7% であり、AM+HIP(60 μm) では、122 MPa、180 MPa および 11.9% であった。AM+HIP(T6) では、209 MPa、304 MPa および 12.2% であった。T6 処

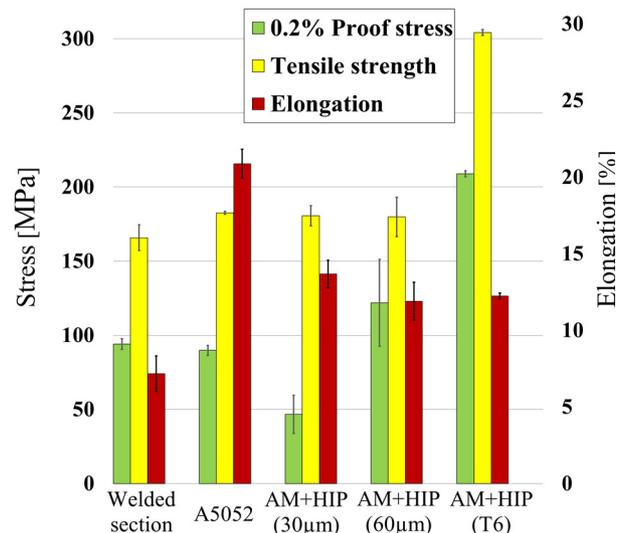


Figure 4: TIG welding test results.

理後では、引張強度が向上する結果となったが、表面にブリストアが発生してしまう。しかし、計算上では HIP 処理のみでも LHe 漏洩時の圧力(0.3 MPa)に対する耐圧性能を達成していることもあり、T6 処理は実施しなくても問題ないと考える。また、粉末粒径の違いにより 0.2%耐力に大きな差が確認された。なお、実機は粉末粒径 60 μm を用いて作製する。

3. 溶接試験

3.1 溶接の健全性確認

A5052 製のビームダクトに AlSi10Mg(AM+HIP)製ビーム窓を溶接する際の機械特性の劣化を確認するために、 $50 \times 10\text{t}$ の試験片に TIG 溶接をおこない、溶接部から引張試験片を切り出し、0.2%耐力および引張強度を確認した。Figure 5 に TIG 溶接後の外観を示す。表面に欠陥は全く見られなかった。しかし、浸透探傷試験をおこなったところ、内部に数個のブローホールが確認された。しかし、この内部のブローホールは、極めて小さく、AlSi10Mg と A5052 との溶接は問題ないと考える。

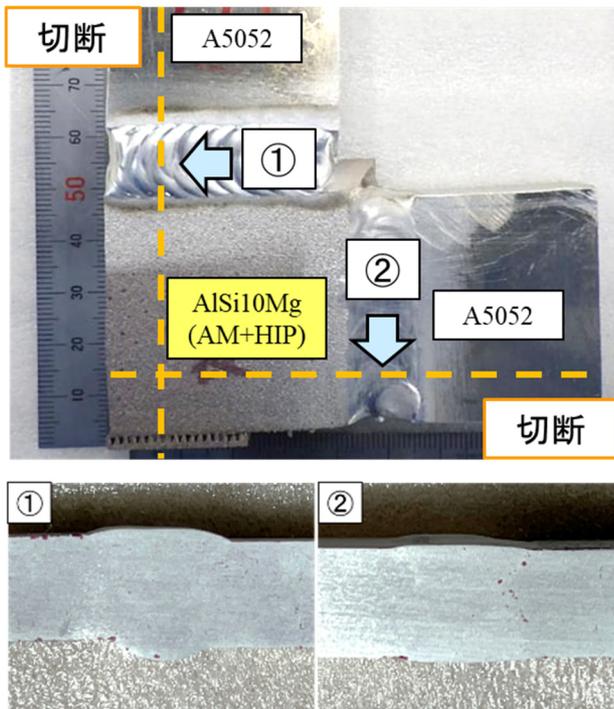


Figure 5: TIG welding test results.

3.2 溶接部の引張試験

溶接部との比較のために A5052 母材から試験片を切り出し、引張試験を実施した。溶接部および A5052 母材も AlSi10Mg 造形品の引張試験と同様に 3 回の試験を実施しており、その結果を Fig. 4 に示す。なお、誤差範囲は標準偏差とした。溶接部の 0.2%耐力、引張強さおよび一様伸びは、それぞれ 94 MPa、166 MPa および 7.2%であった。A5052 母材では、90 MPa、183 MPa および 20.9%である。それぞれの結果を比較したところ、溶接部の強度と一様伸びはやや劣る結果となったが、著しい強度低下はないと判断される。

3.3 ビーム窓を真空ダクトへ溶接する時の変形量

アルミ合金は熱伝導率が高いため、溶接時に熱影響を受ける範囲が広く、積層造形したビーム窓部をアルミ合金製真空ダクトに溶接する際には、大きな溶接ひずみが発生し、ビーム窓の薄い球殻が破損されることが危惧される。そのため、ビーム窓部と真空ダクトの模擬体を製作し、一般的に採用される TIG 溶接および、熱影響を局部的に抑制できる電子ビーム溶接(EBW)によって接合し、窓部の変形を測定、比較した。ビーム窓模擬体の形状は、最終形状の球殻ではなく、容易に製作が可能な平らな形状とした。なお、材質は AlSi10Mg の代替として熱膨張係数が類似した A6061 とし、外径は実際に使用するビーム窓と同一で、窓の厚さは 0.5 mm とした。また、真空ダクトと同一材質の A5052 製の真空ダクト模擬体を製作し、溶接した。

溶接前後の測定は、①窓部の平面度、②窓部縁の平面度、③窓部縁の真円度、④ダクト下部の真円度(筒真円度)、⑤窓部の直径、⑥ダクト下部の直径(筒直径)とした。なお、平面度と真円度の測定は三次元測定機を用いた。製作した模擬体と測定位置を Fig. 6 に示す。

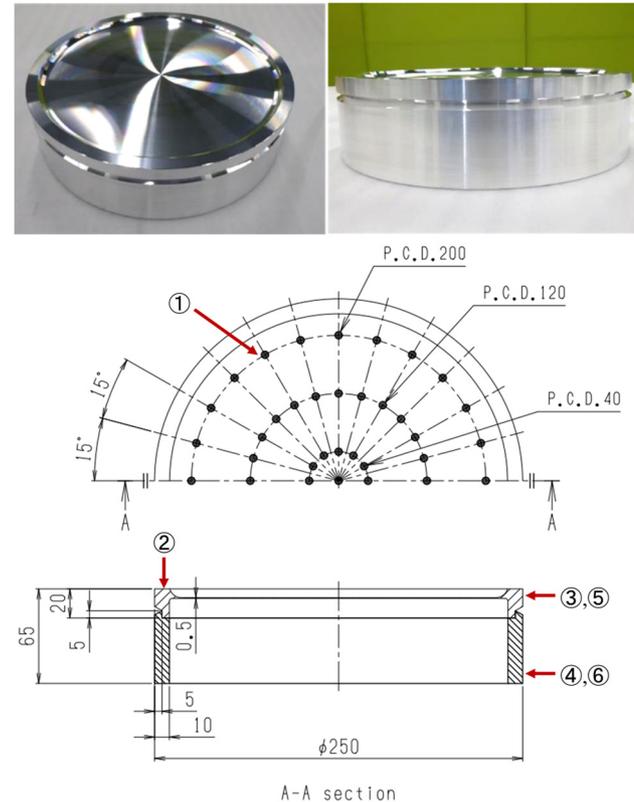


Figure 6: Mock-up of beam window and measurement position.

TIG 溶接前後の測定結果を Table 1 および Fig. 7 に示す。TIG 溶接後に 0.5t 窓部が凸形状へ最大 4.88 mm 変形したが、破損はしなかった。また、窓部の直径は 0.29 mm 収縮したが、同芯度に大きな差は見られなかった。この試験結果より、TIG 溶接での接合では窓部の変形が非常に大きく、実機への適用には課題が残る。

次に、EBW 前後の結果を Table 2 および Fig. 8 に示

す。EBW 後では、想定通り熱影響が抑制された事により、0.5t 窓部の破損もなく、変形量は 0.076 mm に留まった。また、直径の収縮も確認されず、全体的に目立った変形は発生しなかった。今後、TIG 溶接と同様に EBW による AlSi10Mg と A5052 との溶接部の機械特性を確認すべく、引張試験をおこなう。

Table 1: TIG Welding Deformation [mm]

	Before TIG welding	After TIG welding	Displacement
①窓平面度	0.115	4.558	4.443
②縁平面度	0.027	0.116	0.089
③窓真円度	0.003	0.020	0.017
④筒真円度	0.005	0.150	0.145
⑤窓直径	249.98	249.69	-0.29
⑥筒直径	249.97	250.22	0.25

Table 2: EBW Deformation [mm]

	Before EBW	After EBW	Displacement
①窓平面度	0.071	0.147	0.076
②縁平面度	0.011	0.035	0.024
③窓真円度	0.003	0.007	0.004
④筒真円度	0.006	0.025	0.019
⑤窓直径	249.99	250.04	0.05
⑥筒直径	249.95	250.01	0.06

4. まとめ

引張試験では、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。

溶接による変形量確認において、TIG 溶接では窓部の変形が大きくなり、EBW ではほとんど変形がなかった。また、双方に窓の破損は確認されなかった。この結果より、ビーム窓と真空ダクトの接合は EBW の方に優位性があると考えられる。

これまでの結果では、3D プリンタによるアルミ合金製大口径ビーム窓の実現は可能であると考えられる。

今後、EBW 部の溶接健全性の確認および強度試験をおこなう。また、球殻部の厚み調整をおこなうべく機械加工および研磨方法の検証をおこなう。さらに、ビーム窓の座屈、気密性および耐圧性能を確認するため、耐圧試験をおこなう。

AlSi10Mg ビーム窓の開発は、2026 年 3 月完成を目指している。

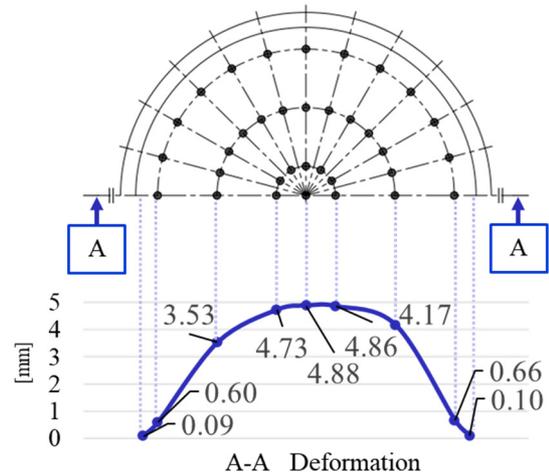


Figure 7: Window deformation caused by TIG welding.

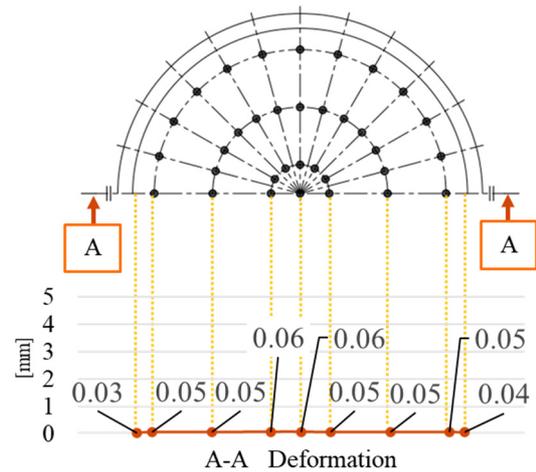


Figure 8: Window deformation caused by EBW.

謝辞

本研究は KEK 共同研究(金属技研)(2016 年度～)「次世代陽子加速器における標的・ビーム窓に関する共同研究」で実施しています。本研究は JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽)21K18632 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Makimura *et al.*, “J-PARC COMET 標的の現状”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan September 2 - 4, 2020, Online.
- [2] T. Hirata *et al.*, “Effect of Hot Isostatic Pressing on Al-10%Si-0.4%Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting”, J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy Vol. 66 No. 1, 2019.
- [3] J. Macías *et al.*, Journal of Materials Science 57 (12), 2022, doi:10.1007/s10853-022-07027-9
- [4] ONO Yushi, “金属 AM のおける雰囲気ガスの影響”, 大陽日酸技報, No.39, 2020.