

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

DEVELOPMENT OF BEAM WINDOW WITH A LARGE DIAMETER, A THIN WALL THICKNESS, AND A LARGE PROOF PRESSURE OUT OF TI-6AL-4V THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING

牧村俊助^{#, A)}, 設楽弘之^{B)}, 長澤 豊^{B)}, 尾ノ井正裕^{B)}, 深尾祥紀^{A)}, 亀井直矢^{A)}, 栗下裕明^{A)}
Shunsuke Makimura^{#, A)}, Hiroyuki Shidara^{A)}, Yutaka Nagasawa^{B)}, Masahiro Onoi^{B)}, Yoshinori Fukao^{A)}, Naoya Kamei^{A)},
Hiroaki Kurishita^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, J-PARC Center

^{B)} Metal Technology Co. Ltd.

Abstract

In high energy accelerators, a beam window is utilized to separate/confine the atmosphere of beam ducts and vacuum chambers. The beam window should be thin and be made of low-density material to reduce beam loss through the beam window. Furthermore, large diameter of the beam window is often desirable to reduce the loss by the beam halo. In the recent accelerators, superconducting magnets are frequently used to obtain high magnetic field. However there is a concern that the sudden pressure rise occurs by emission of liquid helium and consequent evaporation in the severe quench-incident. Actually, such a quench-incident took place at CERN-LHC in September, 2008 and affected the subsequent beam operation. Therefore, the beam window whose break crucially affects another region must endure the high pressure. It is known that the proof pressure of the sphere-shaped window is higher than that of the plate-shaped window. In KEK under collaboration with Metal Technology Co., Ltd., the development is underway to realize the large-diameter, thin, and high-pressure resistant beam windows made of Ti-6Al4V through an additive manufacturing.

1. はじめに

粒子加速器の運転において、粒子は真空中を輸送されるが、標的周辺環境の隔離、ビームライン領域の隔壁、二次粒子取り出し口など様々な目的でビーム窓が使用される。ビーム窓は、透過する粒子のロスを低減するために低密度で薄い材料で製造する事が望まれる。また、ビーム輸送をロスなく行うために大口径であることも望まれる。次世代粒子加速器では高輝度な粒子ビームを得るために超伝導電磁石が主要なビーム光学機器として利用されているが、電磁石に重大な事象が発生した場合には、電磁石を冷却する液体ヘリウムがビームライン中に急激に放出される重大事故が危惧されている。実際、CERN-LHC では、2008 年 9月に Quench incident が発生し、以後の運転に大きな影響を与えた[1]。この Quench incident では、真空ダクト内の圧力が 0.8 MPa まで上昇したと報告されている。新しいビームラインを建設する際に、全ての真空構成要素において 0.8 MPa までの耐圧を達成する必要は無いが、例えば、J-PARC ハドロン実験施設で建設が進む COMET 実験でのビーム窓のように移動が困難な大型装置に囲まれているために近接して交換することが困難なビーム窓や、上流の加速器真空中に影響の与える可能性のあるビーム窓にはリークの影響を最小限に限定するために、高い耐圧性能が要求される。また、J-PARC ニュートリノ実験施設のように、ビーム窓は粒子ビームが透過する際のビームロスによって発熱し、直接冷却が必要となる場合もある。その場合

にも、ビーム窓を冷却する冷媒の圧力が窓材に負荷されるため、ビーム窓には高い耐圧性能が要求される[2]。このように低密度で薄い材料による大口径かつ耐圧性能の高いビーム窓の要望が高まっている。

2. ビーム窓に発生する応力

2.1 通常、採用される平板ビーム窓と本研究で提案するビーム窓に発生する応力

ビーム窓には隔離する雰囲気、すなわち真空圧力と大気間の差圧や雰囲気ガス、冷媒圧力の差圧などが負荷される。通常、ビーム窓は、金属製の平板状の薄板を溶接やロウ付けでフランジに固定して製造する。ビーム窓には、先に述べた隔離する雰囲気の違いによる差圧が一樣に付加され、たわみを生じ、曲率半径を有する球殻形状に変形する。一樣な内圧を受ける球殻に発生する応力 σ は、板厚が十分に小さければ、集中した曲げ応力ではなく、厚み方向にも平面方向にも一樣な引張応力が発生する。内圧を p 、曲率半径 r 、板厚を t とすると以下の(1)式のように表されることが知られており、曲率半径が小さい方が応力を低減できる[3]。また、ビーム窓端部の回転拘束を無視して、ビーム窓半径を R 、たわみ量を w とすれば、幾何学的な形状から、(2)式が成立し、さらに、ビーム窓径 R が十分にたわみ w よりも大きければ(3)が成立し、すなわちたわみが大きい方が応力を低減できることがわかる (Fig. 1)。

[#] shunsuke.makimura@kek.jp

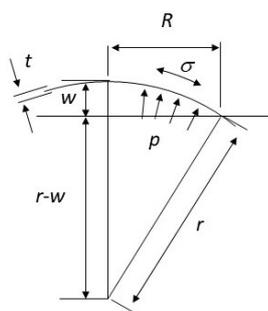


Figure 1: Definition of the characters in the calculation model of the beam window

$$\sigma = \frac{pr}{2t} \quad (1)$$

$$r = \frac{w^2 + R^2}{2w} \quad (2)$$

$$r = \frac{R^2}{2w} \text{ より } \sigma = \frac{pR^2}{4wt} \quad (3)$$

通常、採用される平板をフランジに固定する製造法の場合、元の平板の形状に制限され、たわみを大きくできないため、球殻部に発生する応力は大きくなる。また、ビーム窓端部では平面から球殻形状に至る領域では、曲げ応力が発生する。ビーム窓製造の際には、この曲げ応力を緩和するために平板とフランジとの接触部に R 加工 (丸みをつける加工) を施すが、発生する応力は丸みの半径や摩擦に対して感度が高く、技術的な難易度も高い。また、薄板をたわみなくフランジに接合する手法も難易度が高い。これらの課題を解決するために、本研究ではあらかじめ大きなたわみを有する球殻形状を持ち、端部は角度を付け厚みを増やし、フランジと一体構造となったビーム窓 (以後、球殻ビーム窓とする) の開発を目

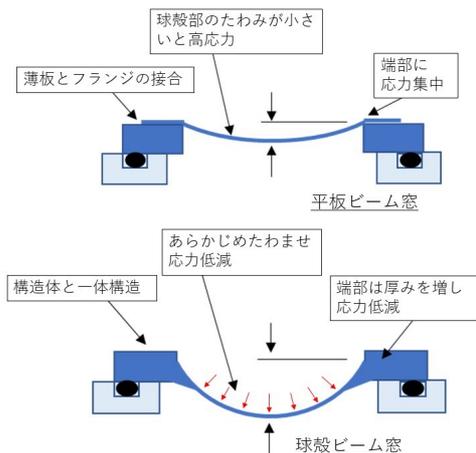


Figure 2: Models of the flat-plate window and the sphere window

指している。Figure 2 に平板ビーム窓と本研究で提案する球殻ビーム窓の比較図を示す。

2.2 有限要素法による解析

ここで有限要素法 ANSYS [4]による解析から得られた結果から、従来の平板ビーム窓と、本研究で開発を目指す球殻ビーム窓に発生する応力に関して議論する。平板ビーム窓では、通常、入手性が良いために採用される SUS316L を窓材とした。窓の直径を 200 mm、厚みを 0.1 mm、フランジ外径を 260 mm、窓材のメッシュ 0.05 mm、フランジの窓と接触する端部の R を 5 mm、窓材とフランジの摩擦無として差圧 0.1 MPa を負荷した。このとき端部に発生するミーゼス応力は 324 MPa となり、焼きなまし材の降伏応力を超えている。ビーム窓の差圧を片側だけでなく双方から負荷したい場合には、弾性領域で使うことが望ましいので、この場合は、圧延などの方法で降伏応力を向上させる必要がある。また、解析結果からは平板から球殻になるための屈曲部外側に曲げ応力が集中していることが分かる (Fig. 3 -UP)。一方で、球殻ビーム窓の解析では、製造を目指しているチタン合金 Ti-6Al-4V を採用した。SUS316L と密度と厚みの積で標準化すると厚さ 0.18 mm に相当するが、今回の解析では球殻部全域にわたって 0.2 mm を採用している。球殻部の端部は R5 mm で徐々に厚みを増やし、フランジと一体構造としている。このとき凹面から 10 倍の 1 MPa の差圧を負荷しても、降伏応力 (825 MPa) を超えない 565 MPa の最大応力が球殻部に発生した (Fig. 3 -DOWN)。球殻ビーム窓では逆圧となる凸面からの差圧が加わった場合に発生する応力が懸念されるが、平板のように回転拘束が加わらず、変形に伴い、内圧を受ける球殻と外圧を受けるトロイダルシェルの複合構造となり、さらに、端部では

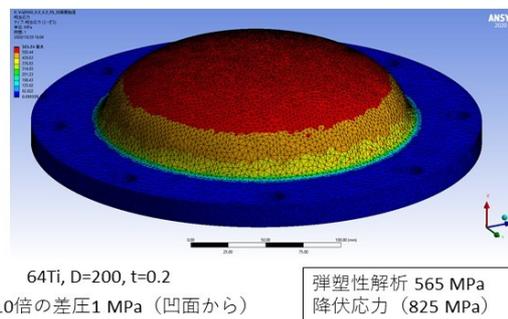
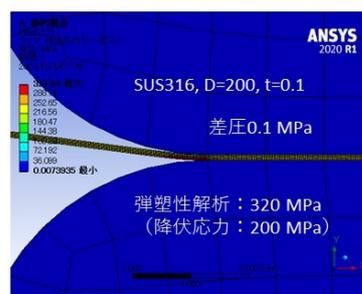


Figure 3: Mises stress on the flat-plate window (UP) and the sphere window (DOWN) through FEM analysis.

厚みの効果から応力集中しないため、結局、平板よりも高い 0.5 MPa 以上の差圧に耐えられることが明らかになった。

3. レーザー積層造形法による Ti-6Al-4V 合金製ビーム窓の製造

3.1 レーザー積層造形法によって Ti-6Al-4V 合金製ビーム窓を製造する理由

実際、これまでに 2 章で提案した球殻ビーム窓では、高い耐圧性能を持つことが既に知られており、バルク材からの削り出し法を中心に製造が行われてきた。一方で、ビーム窓材には比強度の高い材料が望ましく、耐熱性能も高く、強度も高いチタン合金は有望な材料と考えられるが、チタン合金として広く普及している Ti-6Al-4V 合金は加工性が良くないため、大口径の薄い球殻形状の製造や端部で厚みを増やし、フランジと一体化した構造の製造技術は確立しているとは言い難い。Ti-6Al-4V 合金への応用も目覚ましいレーザー積層造形法は、レーザーによって粉末を熔融させ、従来の加工法では実現できないような任意な形状を製造できる。本研究では、任意の形状を製造できる Ti-6Al-4V 合金の積層造形法の利点を生かし、球殻ビーム窓を製造する。

3.2 レーザー積層造形法による Ti-6Al-4V 合金製ビーム窓の製造法の開発

本研究では、一般にもっとも普及しているパウダーベッド方式のレーザー積層造形法を採用する[5]。レーザー積層造形法の場合、粉末の熔融凝固を繰り返すため、造形物の積層に伴い、残留応力が蓄積されて徐々に積層された造形物に変形してしまうため、薄い球殻を大口径で製造する造形性に関する確認が必要となる。これまでに行った試作では、直径 60 mm の厚さ 0.2 mm の球殻ビーム窓の積層造形に成功した (Fig. 4 -UP)。引き続き、大口径化を目指し、直径 166 mm の積層造形を行った。結果として、厚さ 0.2 mm では積層造形の途中で残留応力によるひずみによって形状を保てなくなった一方で、厚さ 0.6 mm では、おおそ球殻ビーム窓形状の積層造形に成功した (Fig. 4 -DOWN)。今後、薄いビーム窓の実現、さらなる大口径化を目指す。

レーザー積層造形法で製造した造形物は、一方向に熔融・凝固によって積層されるため積層方向に成長した柱状組織を持つことが知られている。また、未熔融な欠陥や空孔 (以後、空孔など) が残存することが知られている[6]。これらの積層造形による造形物の異方性や空孔などが、機械特性や真空性能に与える影響も確認が必要となる。

球殻ビーム窓では薄い球殻を横断する空孔が存在すると真空を保つことが出来ない。また、積層造形したままの粗い表面では真空シールは実現できないため、フランジのシール面を研磨する。研磨面の真空性能に空孔などが影響を与える可能性もあり、これらの真空性能を確認するために、直径 60 mm、厚さ 0.2 mm の球殻ビーム窓のフランジ面を研磨し、GS# 213 Sealant (GENERAL SEALANTS, INC.社[7])をシール材として用いて、ヘリウムリーク試験を行った。結果として、バックグラウンド (1×10



Figure 4: Pictures of the sphere window with a diameter of 60 mm and with a thickness of 0.2 mm (UP) and the window with a diameter of 166 mm and with a thickness of 0.6 mm (DOWN).

10^{-10} Pa \cdot m³/s) 以下のリーク量であることが確認できた。

これらの空孔などが特に疲労特性などの機械特性に影響を与えることは、よく知られており、薄い板である製造を目指す球殻ビーム窓においても機械特性に与える影響は大きくなる。一般にバルク材では、これらの機械特性に与える影響は、表面の研磨や、熱間等方圧加工法 (Hot Isostatic Pressing: HIP) 法によって、解決することが出来るが、薄い板形状でも影響を低減できるかの確認を行う必要がある。現在、機械特性の積層方向依存性を確認するための引張試験片製造しており、今後、調査を進めていく。

4. まとめと今後の計画

あらかじめ大きなたわみを有する球殻形状を持ち、端部は角度を付け厚みを増やし、フランジと一体構造となった球殻ビーム窓では、従来の平板ビーム窓に比較して大幅に発生する応力を低減できる。大口径・薄板・高耐圧性能をもつビーム窓を実現するため、比強度が高いが加工性の悪い Ti-6Al4V 合金製の球殻ビーム窓をレーザー積層造形法によって製造する開発を進めている。これまでに、直径 60 mm の厚さ 0.2 mm の球殻ビーム窓の積層造形に成功し、直径 166 mm のビーム窓の製造に取り組んでいる。真空シール面を研磨し、真空リーク試験を行った結果、バックグラウンド以下であることが確認できた。引き続き、機械特性の評価を行う。今後は、直径 290 mm までの大口径な薄い球殻ビーム窓の試作を進める。

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」、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] M. Bajko *et al.*, “REPORT OF THE TASK FORCE ON THE INCIDENT OF 19 SEPTEMBER 2008 AT THE LHC”, LHC Project Report 1168.
- [2] T. Ishida *et al.*, Nuclear Materials and Energy 15 (2018) 169-174.
- [3] S. Timoshenko and D. H. “Young, Elements of strength of materials, fifth edition” (1968), D. VAN NOSTRAND COMPANY INC.
- [4] <https://www.cybernet.co.jp/ansys/>
- [5] Shunyu Liu *et al.*, “Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review”, Materials and Design 164 (2019) 107552.
- [6] 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.
- [7] <https://www.generalsealants.com/>