

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03609

研究課題名(和文) 金属3Dプリンターによるタングステン製粒子生成標的の開発

研究課題名(英文) Development of the production target made of tungsten by a 3D printer

研究代表者

渡辺 丈晃 (Watanabe, Hiroaki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：00415043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：金属3Dプリンタ(金属積層造形法)による純タングステン製2次粒子生成標的の実現可能性の検証のため、現状最も普及しているパウダーベッド型レーザー溶融方式の金属積層造形法により純タングステン素材の造形試験・評価を実施した。具体的には、標的設計に必要な機械強度および熱物性の測定を実施した。結果は、通常製法の素材と比較すると、今回の造形条件では、密度・強度・熱伝導率はいずれも低く、現状では標的への適用は困難であると考えられる。一方、実機標的を想定した造形能力の評価を行ったところ、3次元的なフィン形状が正確に造形できることを確認し、純タングステンにおいても優れた造形能力があることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

純タングステン材は、高融点であることから耐熱素材の1つとして広く使用されているが、機械加工は極めて難しい素材であり、形状・サイズともに大きな制約がある。金属3Dプリンタ(積層造形)により複雑な形状が一体で造形可能となれば、加速器施設における粒子生成標的の大強度化へつながるだけでなく、コリメータや遮蔽材など多くの有用な応用に結び付くものと考えられる。本研究では、最も普及している方式の金属3Dプリンタで、造形能力の評価をするとともに、これまで十分に明らかでなかった機械強度や熱物性データなどを示すことができた点は特に重要な成果であったと考えている。

研究成果の概要(英文)：We have evaluated pure-tungsten specimens made by a metal 3-D printer (adaptive manufacturing, AM), which is Selective-Laser-Melting Power-Bed-Fusion type, for the secondary-particle production target. Mechanical strengths and thermal physical properties of the specimens were measured; however, these properties were low compared to conventional pure tungsten. Thus, the pure tungsten made by the AM with the current manufacturing condition is difficult to be adapted to the target material. On the other hand, a shaping capability was also tested assuming a realistic target shape; and confirmed to be accurate enough for the target application.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：2次粒子生成標的 純タングステン 金属3Dプリンタ 積層造形

1. 研究開始当初の背景

JPARC ハドロン実験施設では、30 GeV に加速された 1 次陽子ビームを 2 次粒子生成標的 (以下、標的) へ照射し、そこで発生する 2 次粒子のうち K 中間子、 π 中間子などを利用した原子核実験・素粒子実験が実施されている。現行の標的は固定型の純金製で、間接冷却方式により最大約 95 kW (5.2 秒サイクル時) 対応したものを使用している。しかし、この方式では 100 kW を超えるのが難しいと予想している。そこで、次期計画としては 150 kW を超えることを目標とし、大型の回転円盤型標的を計画している。より大強度の 1 次陽子ビームを標的に照射できれば、それに比例した K 中間子の収量を得ることが可能となり、実験成果へと直結する。したがって、より大強度に耐える 2 次粒子生成標的を実現するための基礎技術の開発を推進している状況である。

回転円盤型標的は図 1 に示すよう外径 346mm を想定しており、ヘリウムガス中で運用するので、円盤自身の回転によりガス流動を促進して冷却能力を向上させるため、内側にフィン構造を持つ形状をベース案として検討している。ただし、現行と同じ純金とすると素材コストが高価となりすぎるため、同程度の密度をもち耐熱性に優れた純タングステンを候補素材の 1 つとして選定している。しかしながら、純タングステンは超難切削材料であり、フィン形状を機械加工で実現するのは極めて困難である。そこで、最近実用化されつつある純タングステンの 3D プリント (積層造形) を適用することで、3 次元的なフィン形状をもつ標的が実現可能か検証をするものとした。

なお、本研究開始時には、タングステンの積層造形に関する論文が年間 10 報程度まで増えた時期であるが、その内容は素材の密度を高めるとともに、内部欠陥を減らす方向での研究が大半であり、現在もそれが続いている状況である。本研究では、研究開始当初では十分明らかでなかった (標的設計に必要な) 熱物性や機械強度の測定を含めて実施したものである。

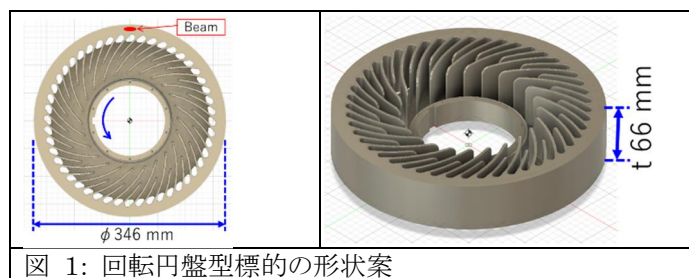


図 1: 回転円盤型標的の形状案

2. 研究の目的

最近実用化されつつある純タングステンの 3D プリント (積層造形) により、実際に純タングステン素材の造形試験を実施し、ハドロン実験施設の 2 次粒子生成標的へ適用可能であることを多角的に評価することが本研究の目的となる。そのためには 3D プリントの造形能力の評価とあわせて機械強度や熱物性のデータが必須であるため、これらの測定を行うことが重要な目的である。

3. 研究の方法

本研究では、金属 3D プリント (積層造形法) として最も普及しているレーザー溶融型の粉末床溶融結合法 (Power Bed Fusion) を採用した。使用粉末は、流動性をよくするためプラズマ法により球状化されたもので、平均粒度 (D50) で約 $11 \mu\text{m}$ のものを使用した。造形条件は、なるべく密度が高くなる条件を選定している。その条件化で、各種試験片の造形を行い、機械強度としてシャルピー衝撃試験および引張試験、熱物性として比熱および熱伝導率 (積層方向) の測定を実施した。熱伝導率の測定はレーザーフラッシュ法によるものである。また、試験片の半数は、他の素材の積層造形法で改善効果の報告のある熱間等方加圧法 (HIP 法) を施し、その効果の有無を検証した。HIP 処理は 1850°C - 176MPa で 3 時間である。機械強度および物性については、通常製法の純タングステン素材についても測定を行い比較を行うこととした。なお、各試験はすべて室温で実施したものである。上記の素材試験と並行して、造形能力の評価として、実機円盤形状を想定した 3 次元なフィンを持つ円盤の造形試験を実施した。

4. 研究成果

レーザー溶融型の粉末床溶融結合法の 3D プリント (Concept Laser Mlab 200R) により、実際に純タングステンにおいても造形可能であることを確認した。積層造形された素材の物性については、表 1 の通りの結果となった。密度が通常製法とくらべて約 88%、熱伝導率が約 60%であった。HIP 処理をするといずれも一定の改善効果が認められた。

	密度 [g/cm ³]	比熱 [J/g/K]	熱伝導率 *積層方向 [W/m/K]
純タングステン (積層造形*HIP 処理なし)	17.0	0.139	100
純タングステン (積層造形*HIP 処理あり)	17.7	0.135	115
純タングステン(通常製法)	19.2	0.141	166

表 1： 金属 3D プリンタ (積層造形) で製作された純タングステン素材の物性測定結果

次に機械強度については、シャルピー試験および引張試験の結果をそれぞれ表 2 と表 3 に示す。シャルピー試験の結果として、通常製法に比べて積層造形品は約 70%程度の吸収エネルギーであることが分かった。また HIP 処理をしても有意な改善効果が得られないことがわかった。引張試験の結果から、積層造形品の引張強度は通常製法の 1/10 程度と低いことが分かった。引張強度については HIP 処理により若干の改善効果が得られる結果となったが、十分な改善効果は得られなかった。ただし、引張試験については、最も強度の低い場所で破断となることから、後述するよう内部欠陥を多数内包する今回の素材について適用するのは過少評価の可能性あることを注記しておく。

	吸収エネルギー(±偏差) [J/cm ²]
純タングステン (積層造形*HIP 処理なし)	0.97 (±0.09)
純タングステン (積層造形*HIP 処理あり)	0.98 (±0.05)
純タングステン(通常製法)	1.35 (±0.04)

表 2： 金属 3D プリンタ (積層造形) で造形された純タングステン素材のシャルピー試験結果

	引張強度 (±偏差) [MPa]
純タングステン (積層造形*HIP 処理なし)	44 (±2)
純タングステン (積層造形*HIP 処理あり)	63 (±3)
純タングステン(通常製法)	約 500 (注:サンプルごとのバラつきが大きいため参考程度)

表 3： 金属 3D プリンタ (積層造形) で造形された純タングステン素材の引張試験結果

次に、積層造形品の断面観察を行ったところ、図 2 に示すよう、内部に多数の欠陥 (空乏) が観察された。これは積層方向およびその垂直方向のどちらの方向も同様に観察された。シャルピー試験片についても、破断箇所も拡大観察等をした結果、内部欠陥を経由して破断したと推定される。HIP 処理あり・なしでは欠陥の様相はほとんど差が見られなかったことから、欠陥 (空孔) が多い現状の造形品では HIP 処理は本質的な改善には結びついていないと考えられる。熱物性やシャルピー試験についての通常製法の試験データとの比較から正常な金属組織 (強度のある結合状態) は現状 6 割~7 割程度と推察される。

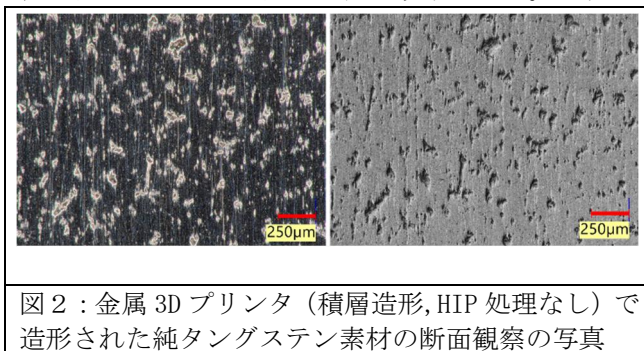


図 2： 金属 3D プリンタ (積層造形, HIP 処理なし) で造形された純タングステン素材の断面観察の写真

以上から、通常製法の純タングステンと比較をして、機械強度が低く、標的材として要求される密度としても不十分であり、除熱の観点で重要となる熱伝導率も低かったことから、今回の造形条件による純タングステン素材は、標的への適用は難しいと結論に至った。

上記の素材評価と並行して、実機標的を想定した造形能力の評価を実施した。具体的には、3次元的なフィン形状をもつ円盤を想定したものである。フィン角度はサポート材が不要な範囲で設計したものである。その造形試験の結果を図3に示す。設計形状は正確に再現されており、純タングステンにおいても高い造形能力があることが実証できた。

優れた造形能力があることから、素材の内部欠陥を減らして強度や熱物性を改善できれば、本手法の有用性が高いことは明白である。そこで、造形条件や造形手法の検討や、既存のタングステン合金を参考に数%程度の割合で合金化して脆弱性を改善させるなど、多角的な検討を継続している。

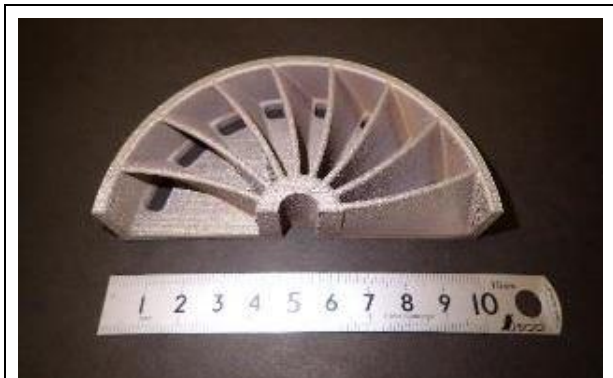


図3：造形能力の評価試験で試作した3次元フィン形状をもつ円盤の写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 渡邊 丈晃	4. 巻 -
2. 論文標題 金属3Dプリンタにより造形された純タンゲステン材の評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 65,69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 倉崎 るり、澤田 真也、高橋 仁、皆川 道文、渡邊 丈晃	4. 巻 18
2. 論文標題 大強度の遅い取り出し陽子ビームによる二次粒子生成用標的	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 加速器	6. 最初と最後の頁 225 ~ 232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.50868/pasj.18.4_225	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊 丈晃
2. 発表標題 金属3Dプリンタにより造形された純タンゲステン材の評価
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------