

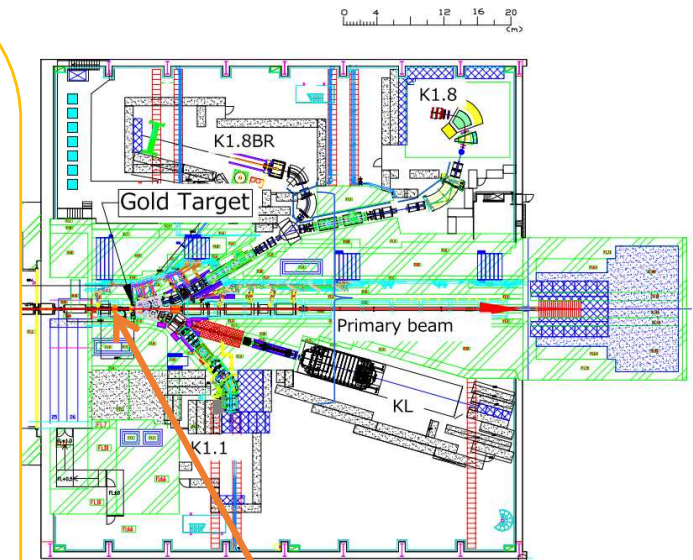
金属3Dプリンタで造形された純タングステンの評価

EVALUATION OF PURE TUNGSTEN MADE WITH METAL 3D PRINTER

KEK/ J-PARC

渡邊 丈晃 (Hiroaki Watanabe)

概要: J-PARCハドロン実験施設では、K中間子等の2次粒子を生成する次期標的として150kWの1次陽子ビームに対応した回転円盤型標的の開発を進めている。標的材としては、高密度の金属が望ましいためタングステンが1つの候補となっている。しかし、タングステンは難切削材のため、フィン加工といった複雑な形状の機械加工は極めて困難である。これを解決する1つの方法として、金属3Dプリンタによるタングステンの造形が考えられる。金属3Dプリンタであれば、相当複雑な形状でさえも実現可能であると期待される。しかしながら、金属3Dプリンタにより造形されたタングステン素材については、基本的な機械特性や物性については十分明らかにされていない。そこで、現在最も普及している**パウダーベッド型レーザー照射方式の金属3Dプリンタでタングステン素材の造形を行い、そこから各種試験片の製作を行った**。さらに試験片の半数について熱間等方圧加圧法(HIP)を施工した。本発表では、これらの試験片についての評価結果について報告を行う。



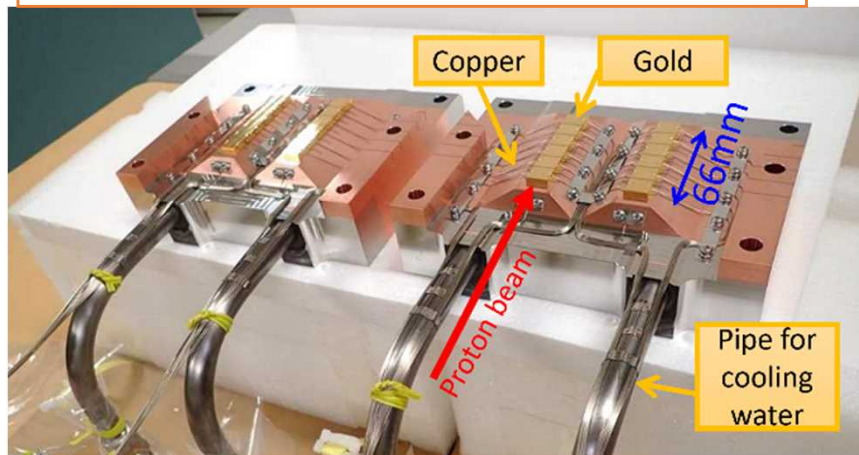
2次粒子生成標的

ハドロン実験施設における2次粒子生成標的

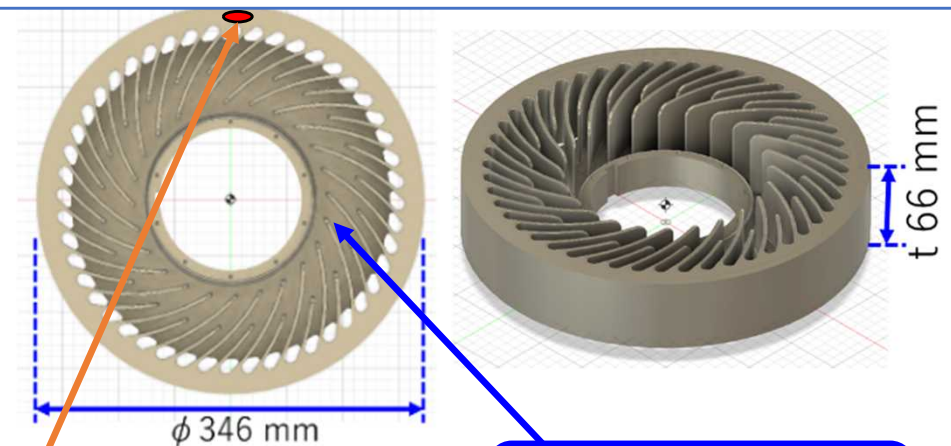
- J-PARCハドロン実験施設では30GeVの陽子ビームを使った原子核・素粒子実験を実施。
- 2020年から使用している固定型標的は1次ビーム強度で最大95kWに対応。（標的材は金）
- ハドロン施設では2次ビームの光学上の要請から、標的でのビームサイズが $\sigma_{\text{horizontal}}:2.5\text{ mm}$, $\sigma_{\text{vertical}}:1.0\text{mm}$ と小さく、標的中での発熱密度が高いのが特徴的である。
- 固定型標的の場合は、同じ位置で発熱し、かつ発熱領域が狭いため除熱には限界があり、95kWが限界と見積もっている。

次期標的として150kW以上のビーム強度に対応したHeガス冷却方式の**回転円盤型標的**を開発中。
素材の候補の1つ：**タングステン**（高密度、高热伝導率、高強度、高耐熱）
→タングステンは難切削材でフィン加工は困難 →**3Dプリンタの適用可能性を検証**

現行標的の写真（固定型標的）



新標的のベース案（フィン付き回転円盤）



ビーム照射位置

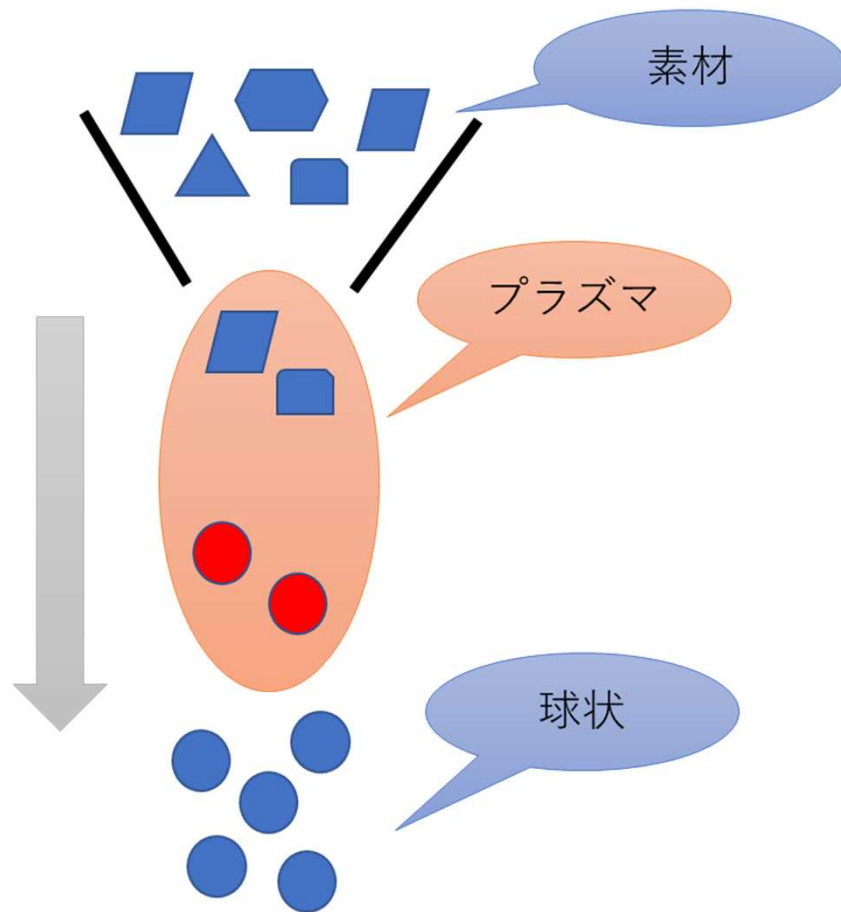
冷却用の
フィン構造

タングステンの3D Printing(metal additive manufacturing)について

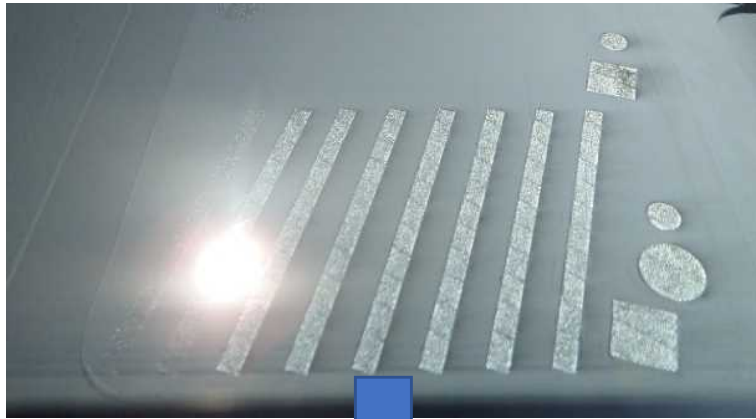
- タングステン：高融点(3420°C)、高熱伝導率（～170 W/m/K）、室温では脆性材料
- 3Dプリンタ（積層造形,AM）とは相性がわるい（と言われている）。
- 造形自体は実績がちらほら出始めている。
- 文献では、密度によるstudyが中心で、理論密度(19.3g/cm³)に対し、最大98%程度(18.9g/cm³)までの報告がある。
- その他の物性（熱伝導率）や強度については、今回のレーザー方式では報告が見当たらない。
- 3Dプリンタで製作した素材から 試験片を機械加工で切り出して、密度・熱伝導率の測定、および強度試験の1つとしてシャルピー試験を実施した。
 - 試験片の半数は内部欠陥の改善可能性を検証する目的で、HIP(熱間等方加圧法)で176 MPa-1850°C 3hoursの処理を実施。

3Dプリンタ(積層造形)で使用する素材

- 流動させるために球形にする必要がある。
- タングステンなどの高融点材料ではプラズマを利用した球状化法が使用される。
- 球状化したものを“ふるい”に通して粒径を選別している。
- 今回使用した粉体は平均粒度 (50%累積中位径 D50): $\sim 11 \mu\text{m}$



タングステンの積層造形



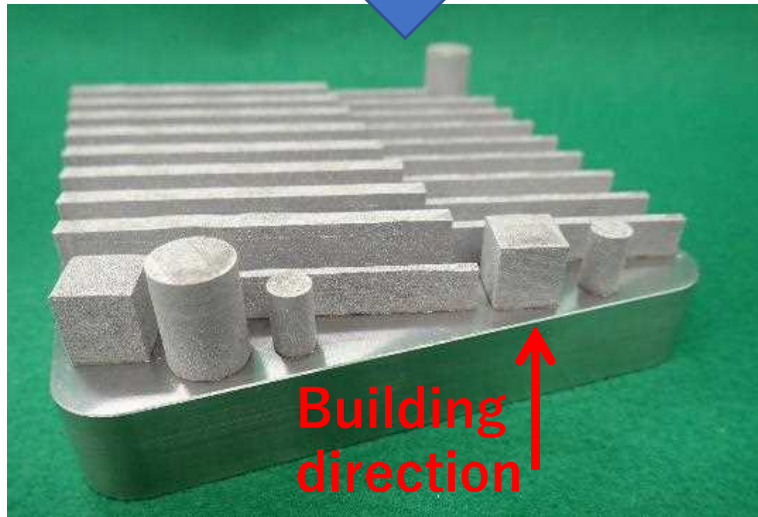
使用した装置

Concept Laser Mlab 200R (現GE社)

パウダーベッド型

レーザー溶融方式

(200Wのファイバーレーザー)



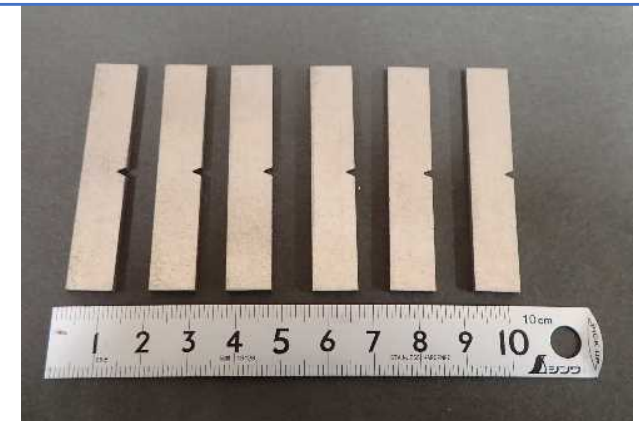
Building
direction

機械加工

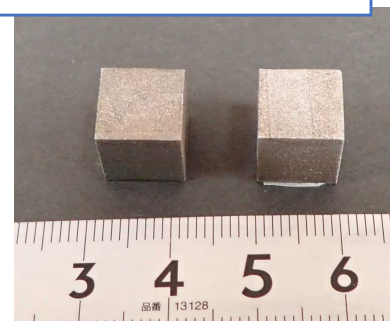
密度・比熱・熱伝導率の試験片



シャルピー試験の試験片 t2.5

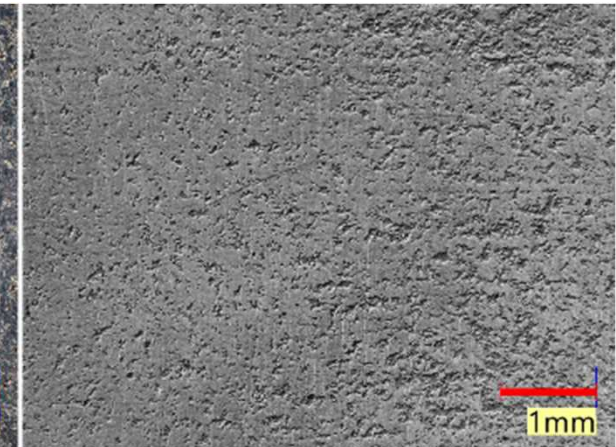
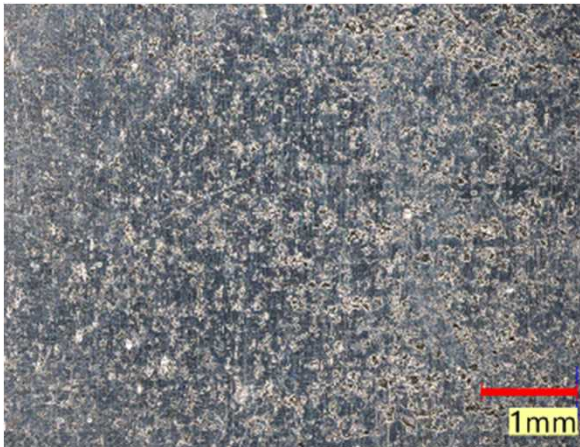
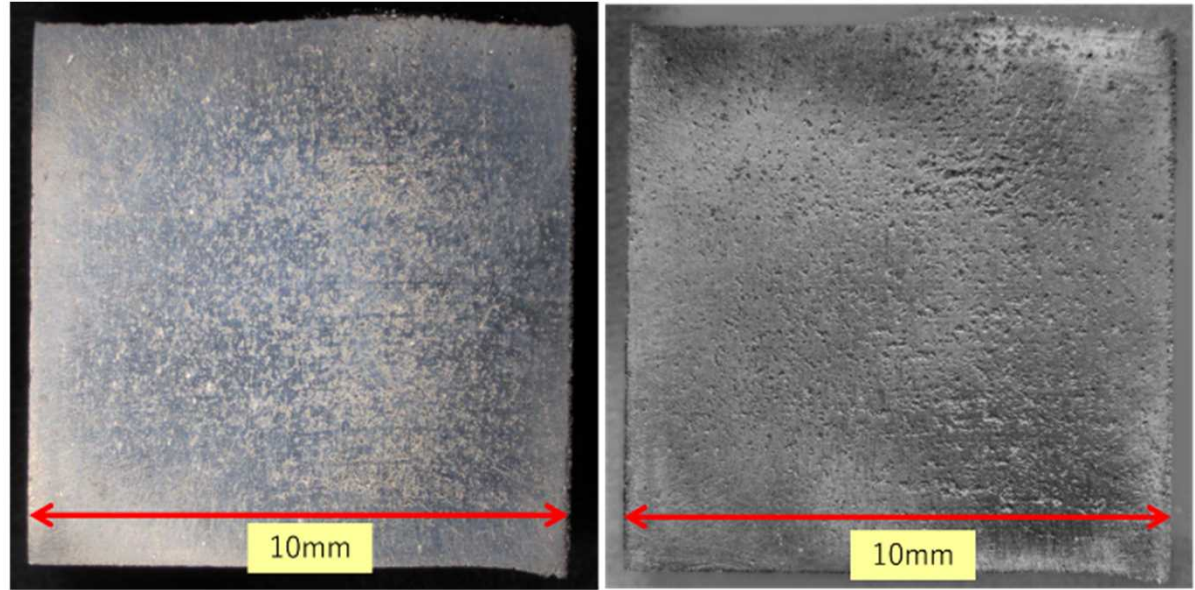


断面観察片
10mm角

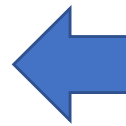
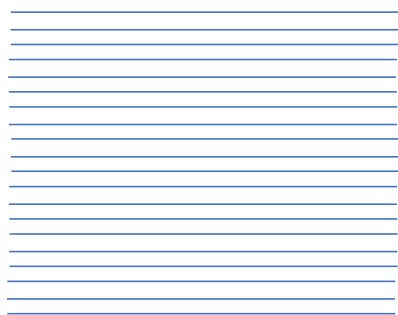


断面観察 1

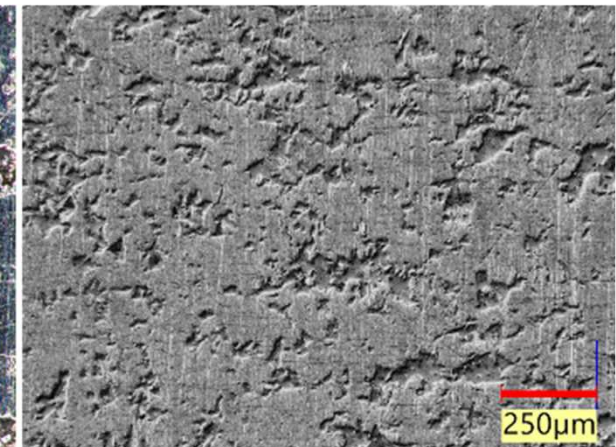
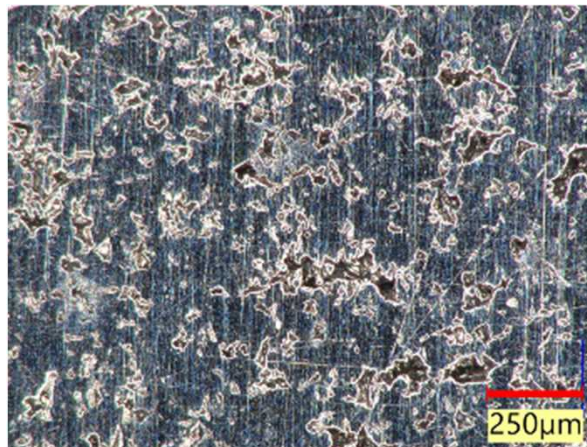
- HIPなし
- 放電加工で切断し、断面を研磨して、洗浄後に観察
- マクロなスケールでの内部欠陥（空隙、巣）が多数観測される（どの断面でも同様）



積層方向の横断面



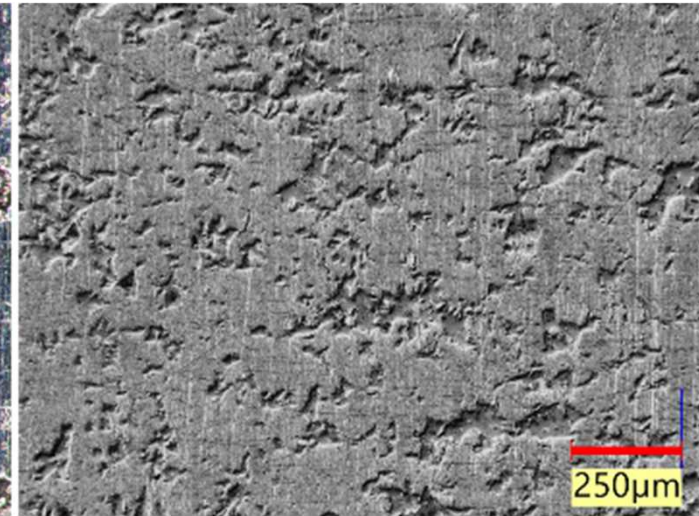
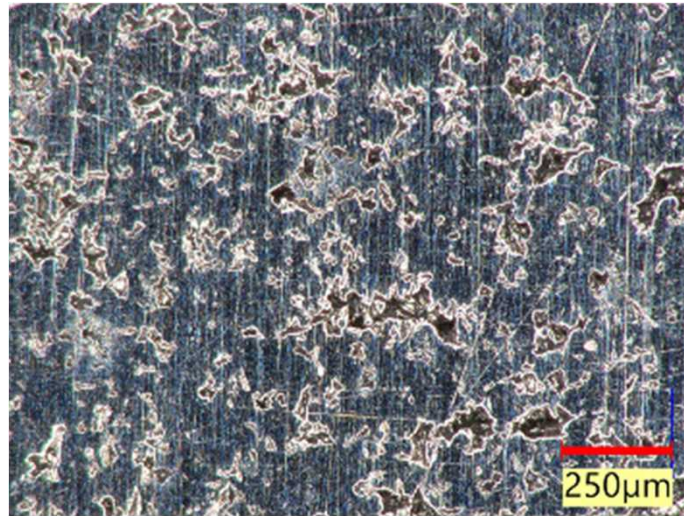
こちらから見た



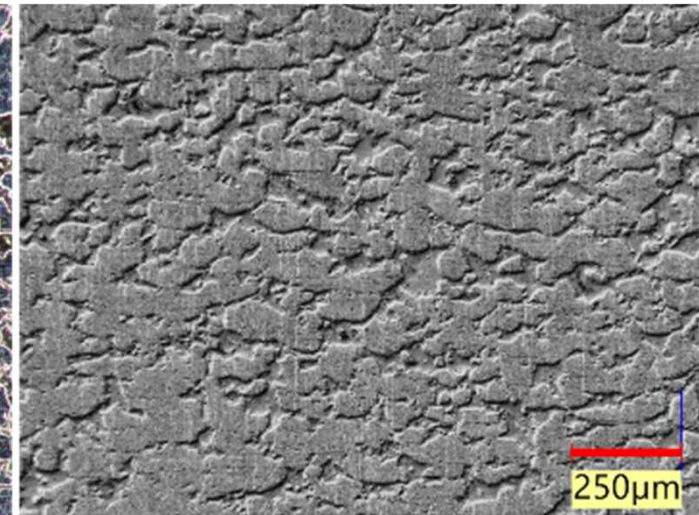
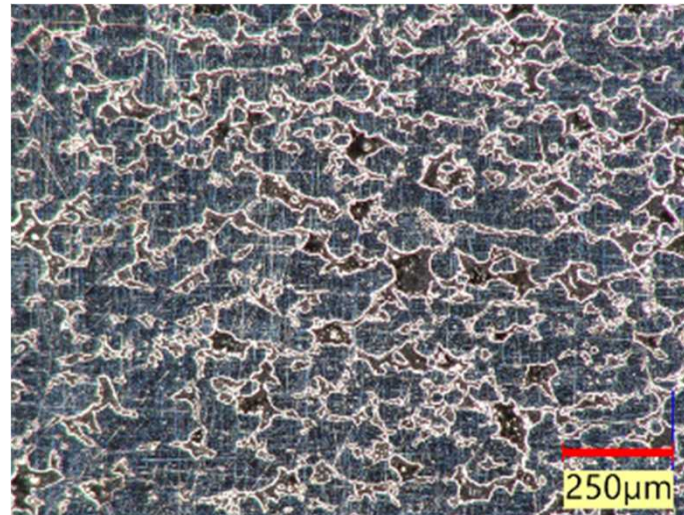
→ 積層方向

断面観察 1 つづき

HIPなし→



HIPあり→



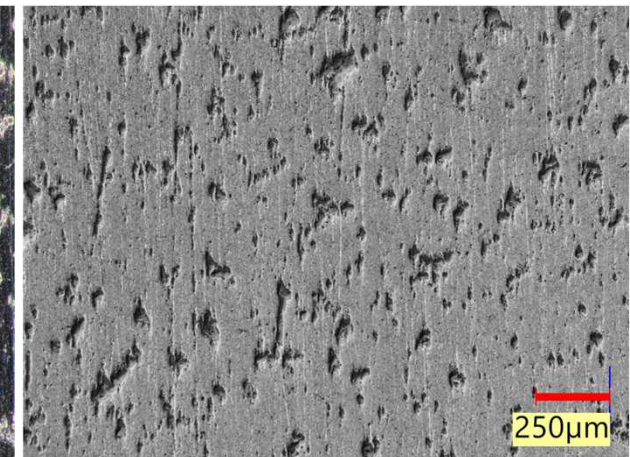
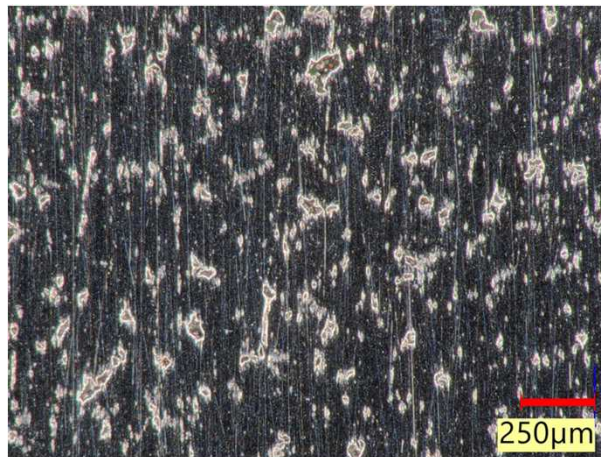
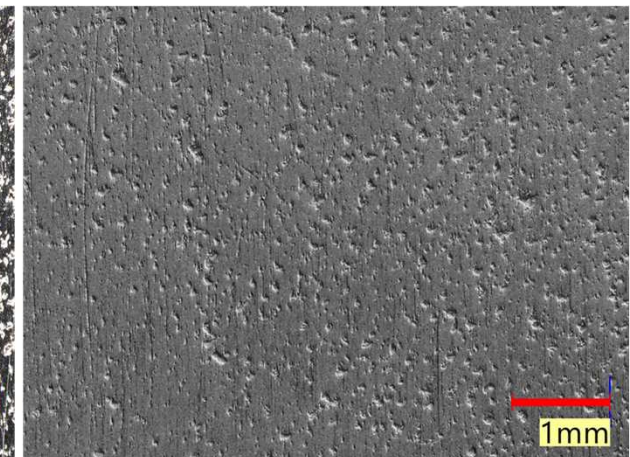
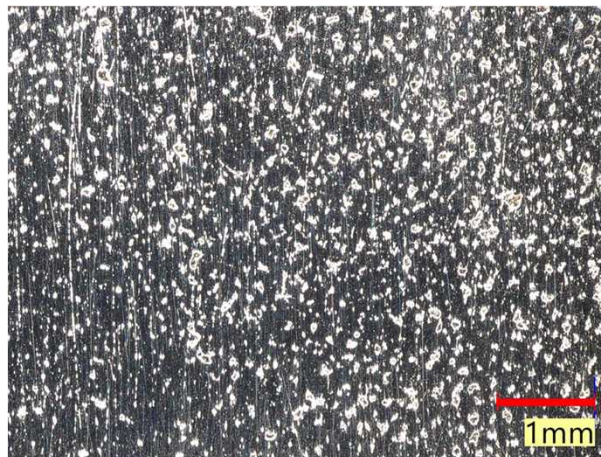
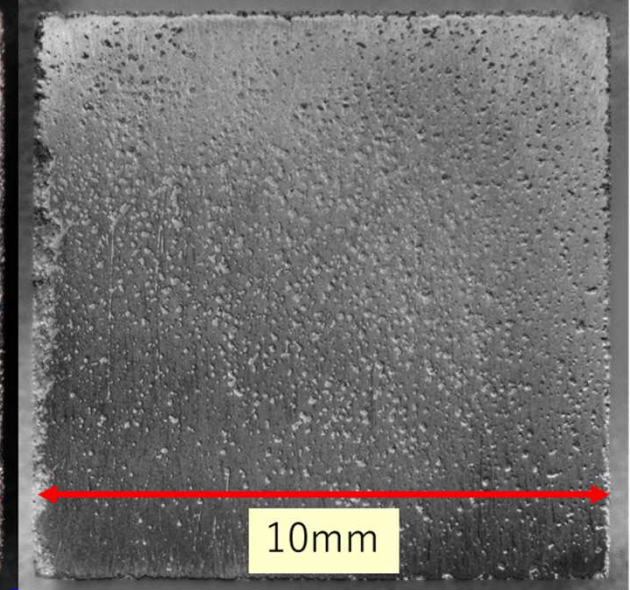
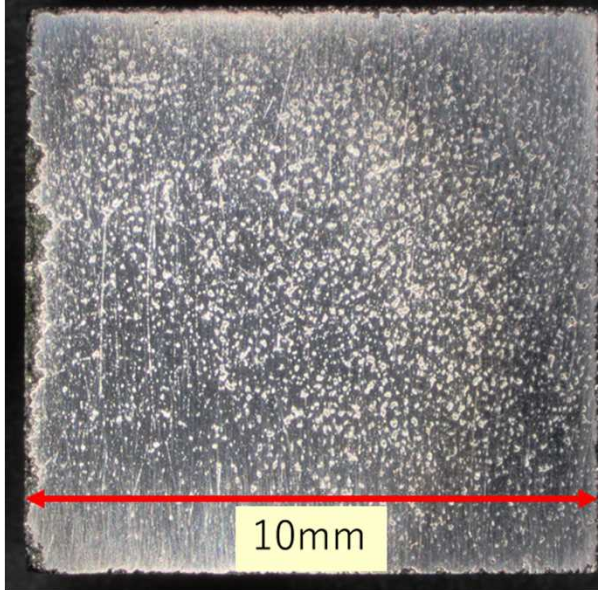
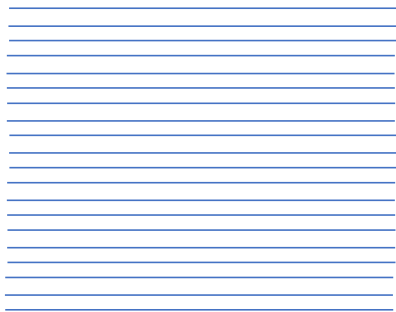
→ 積層方向

比較的マクロなスケールでの欠陥(空隙)は、HIP処理では改善されないように見える。

断面観察 2

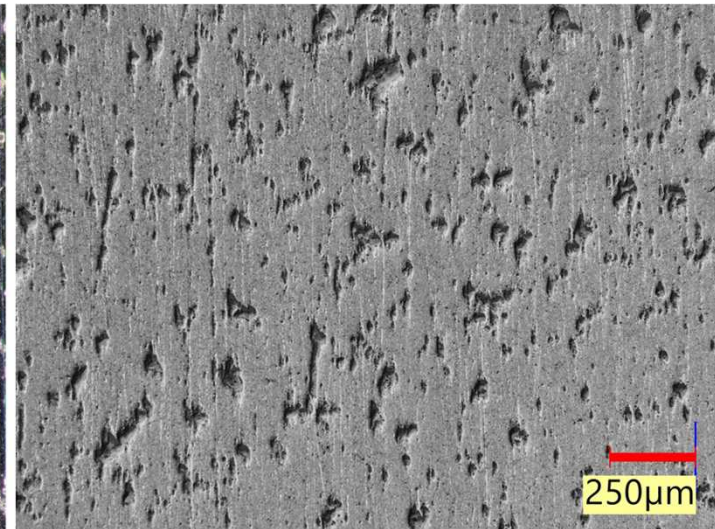
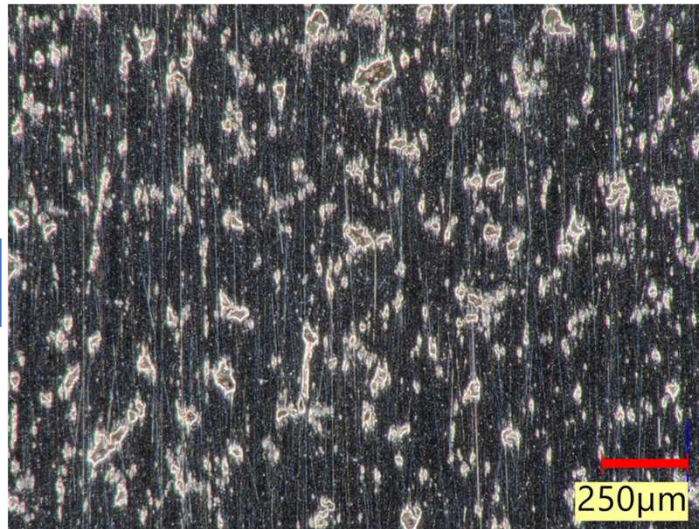
- HIPなし
- 放電加工で切断し、断面を研磨して、洗浄後に観察
- マクロなスケースでの内部欠陥（空隙、巣）が多数観測される（どの断面でも同様）

積層表面（上面）

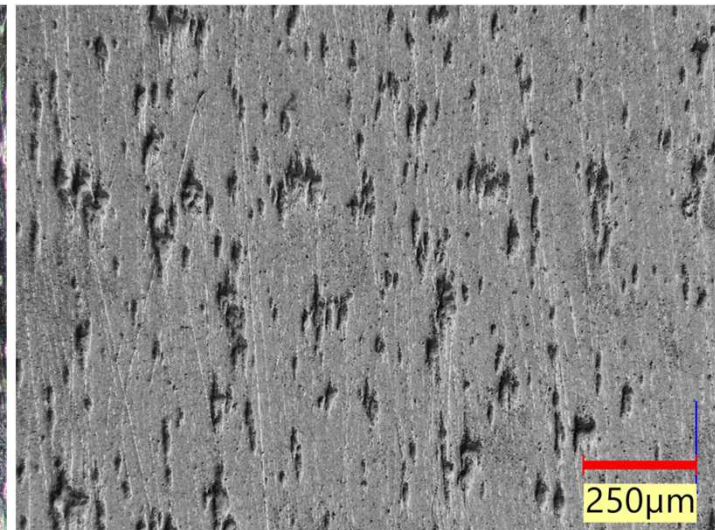
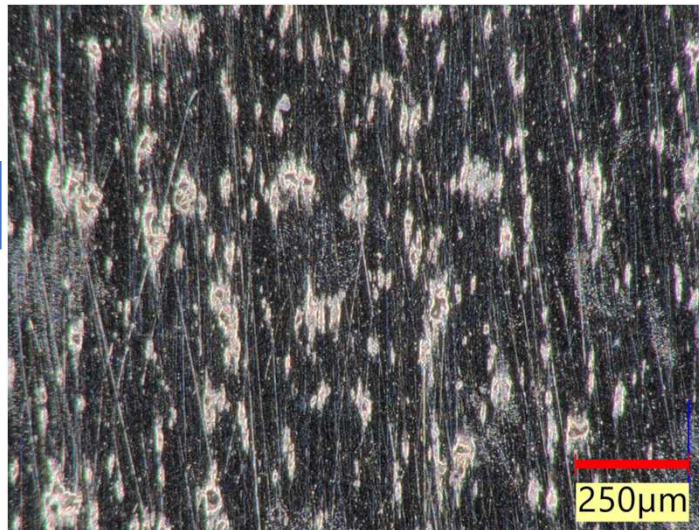


断面観察 2 つづき

HIPなし→



HIPあり→



比較的マクロなスケールでの欠陥(空隙)は、HIP処理では改善されないように見える。

物性測定

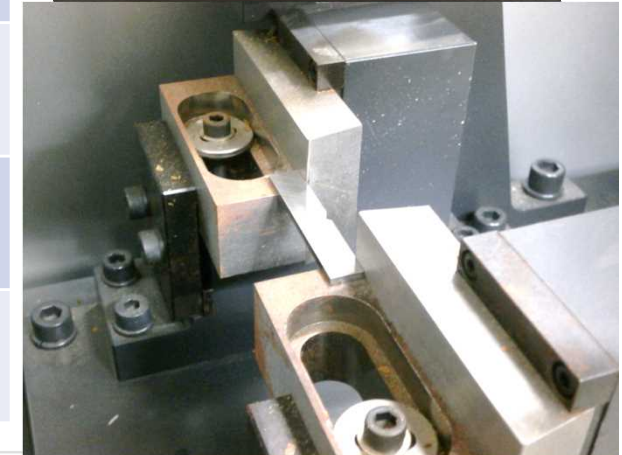
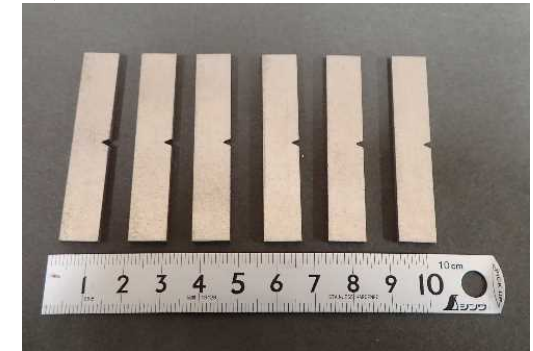
理論密度19.3

	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/g/K)	熱伝導率 (W/m/K)
測定方法→	液中秤量法	DSC法	レーザーフラッシュ法 (積層方向)
純タングステン (3Dプリンタ)	17.0	0.139	100
純タングステン (3Dプリンタ) HIPあり	17.7	0.135	115
純タングステン (通常製法,鍛造材)	19.2	0.141	166
合金 (通常製法、 W-97%, Ni-2%, Cu-1%)	18.5	0.132	109

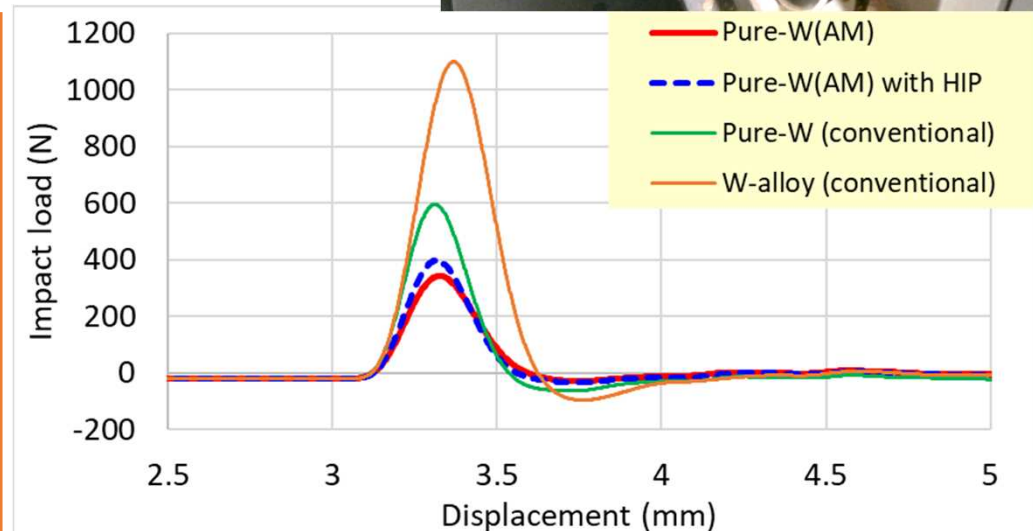
- 3Dプリンタで造形されたタングステンは、通常製法(19.2)と比べると:
 - 密度は88%とやや低く、HIP処理で92%まで増加。
 - 熱伝導率（積層方向）は約60%で、HIP処理で69%。
- HIPはマクロなスケールの欠陥にはあまり改善する効果がないためと推定している。

強度測定：シャルピー試験（秤量5J）

	Absorbed energy (\pm error) [J/cm ²]
純タングステン (3Dプリンタ)	0.97 (\pm0.09)
純タングステン(3Dプリンタ) HIPあり	0.97 (\pm0.05)
純タングステン (通常製法, 圧延材) *比較用	1.35 (\pm0.04)
合金 (通常製法、W-97%, Ni-2%, Cu-1%) *比較用	1.90 (\pm0.13)



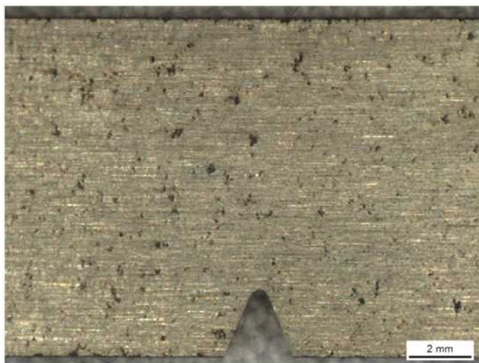
- 3Dプリンタで造形したタングステンは、通常製法と比べると
 - 吸収エネルギーは72%とやや低く、HIP処理で変化がなかった。
- 強度をもった組織結合が、内部欠陥（空隙）のため、実質7割程度にとどまると推定している。



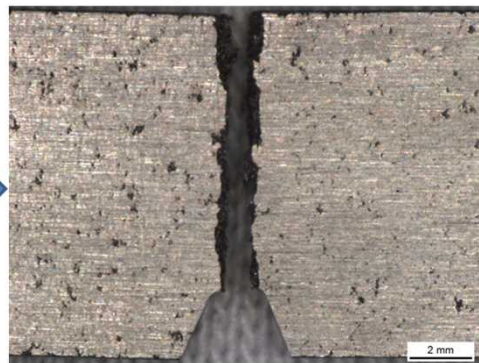
強度測定：シャルピー試験の表面観察

純タングステン (3Dプリンタ)

3Dプリンタ(HIPなし)

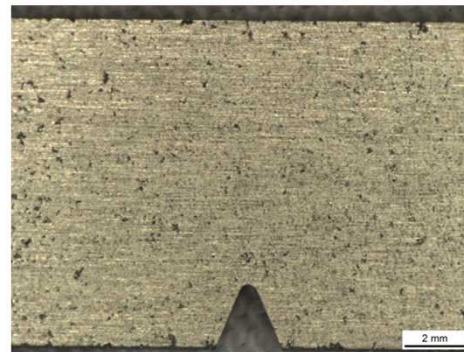


3Dプリンタ(HIPなし)

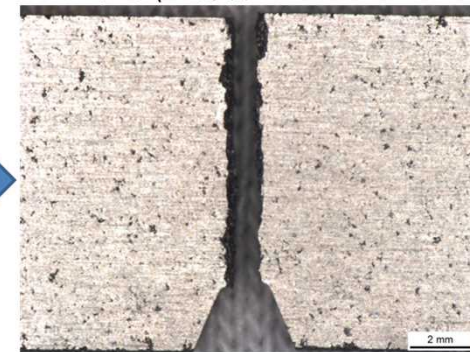


純タングステン (3Dプリンタ)HIPあり

3Dプリンタ(HIPあり)



3Dプリンタ(HIPあり)

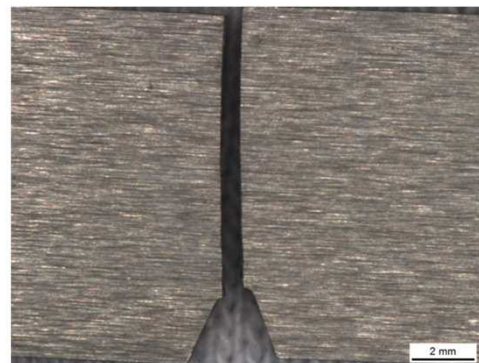


純タングステン (通常製法, 圧延材) *比較用

純タングステン(通常製法)

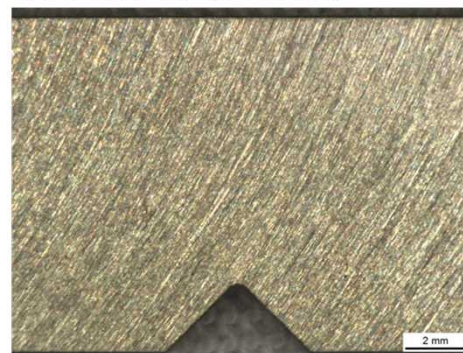


純タングステン(通常製法)

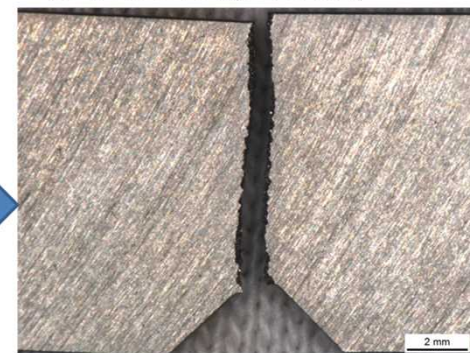


タングステン合金(通常製法)

タングステン合金(W-2Ni-1Cu)



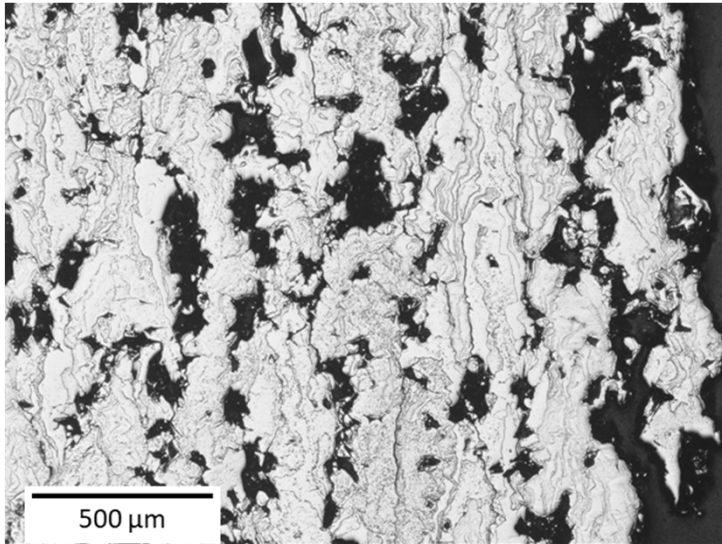
タングステン合金(W-2Ni-1Cu)



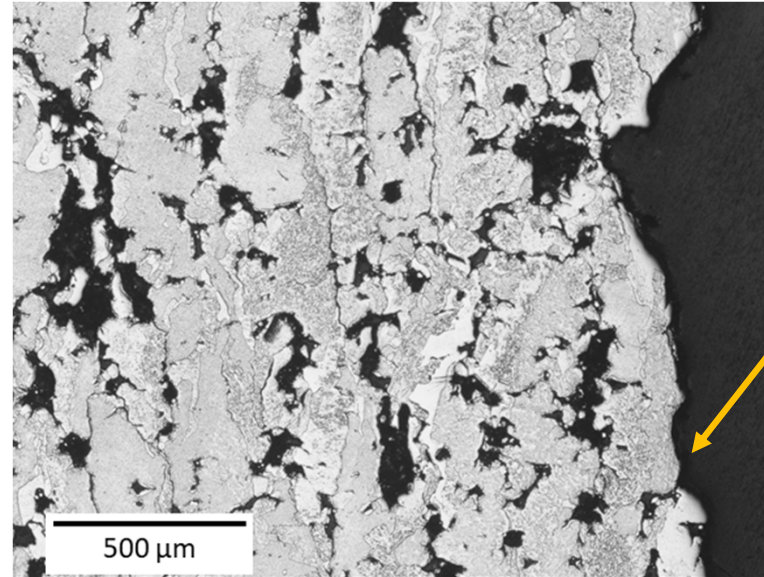
強度測定：シャルピー試験の表面観察（Vノッチ）

*エッチングあり(欠陥が実際よりも広がっている)

純タングステン (3Dプリンタ)

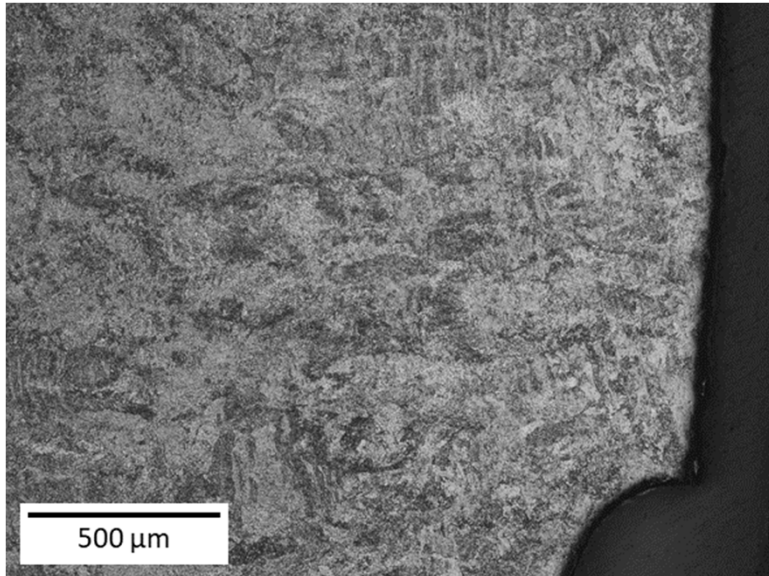


純タングステン (3Dプリンタ)HIPあり

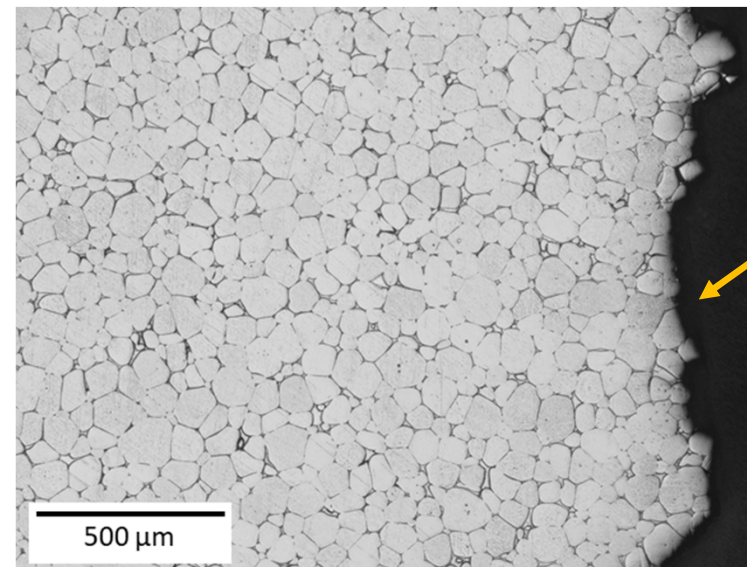


欠陥を經由して破断しているように見える

純タングステン (通常製法, 圧延材) *比較用



タングステン合金(通常製法)



粒界(Ni-Cu合金によるバインダ層)を經由して破断

まとめ・今後の計画

- 標的への適用性を調べる目的で金属3Dプリンタ(レーザー溶融型パウダーベッド方式)により純タングステンを造形し、物性や機械強度の測定を行った。
- 断面観察：
 - マクロなレベルでの内部欠陥(空乏)が多数観察される。
- 物性値：
 - 密度 HIPなし: 17.0 g/cm³ / HIPあり: 17.7 g/cm³ (それぞれ通常製法の88%, 92%)
 - 熱伝導率 HIPなし: 100 W/m/K / HIPあり: 115 W/m/K (それぞれ通常製法の60%, 69%)
- 機械強度:
 - シャルピー試験で通常製法の約70%の吸収エネルギー: 0.97 J/cm²。HIPで改善なし。
- 今後：
 - レーザーの照射条件を調整することで内部欠陥を減らし密度や強度が改善できないか模索している。
 - 機械強度評価のため、引張試験片を検討している。
 - 造形能力の評価(確認)のため、3次元形状のフィンを含む標的円盤形状の造形試験を計画している。
 - 並行して、タングステン合金の3Dプリンタの適用可能性を検討している。