

小特集 マルチスケールの視点からの各種脆性改善手法とその最新研究

## 4. 高密度タングステン合金「ヘビーアロイ」の応用展開

### 4. Applied Development of High-Density Tungsten Alloy “Heavy Alloy”

案浦 康徳

ANNOURA Yasunori

日本タングステン株式会社

(原稿受付：2019年10月2日)

ヘビーアロイはタングステンを主成分とし、バインダー合金相をニッケル、銅、鉄等で構成した複合合金である。本章ではヘビーアロイの概要と使用事例、複合化によって付与される引張特性について紹介する。

**Keywords:**

tungsten, copper, nickel, iron, grain growth, diffusion bonding, ostwald ripening, elongation

#### 4.1 タングステンとは

タングステンとは、スウェーデン語で「重い石」という意味である。原鉱石は、灰重石（シーライト）及び狼鉄鉱（ウォルフラマイト）の2種類があり、一般に、前者を白、後者を黒と呼ぶ。白は、タングステンとカルシウムの酸化物が主体であり、黒は、タングステンと鉄、マンガンの酸化物が主体である。

当初は、錫鉱石の中に夾雑物（きょうごつぶつ）として混入していて、錫精錬の際に収率を低下させるので、錫を羊にたとえ、羊を狼（WOLF ウルフ）が喰うのに似ているために、狼鉄鉱（Wolf-ramite）の名がつけられている。その為に、タングステンの元素記号は、Tでなく、Wとなっている。

1908年アメリカのクーリッジ博士が、溶解でなく、粉末冶金法による製造方法を発明して以来、工業製品として使用されることになった。タングステンは、融点が3380℃で金属中最も高く、密度も 19.3 g/cm<sup>3</sup> と大きいことから、照明、自動車用などのランプや電子管のフィラメント、ヒータ、帯電ならびに放電電極材料等に広く用いられている。

しかし、一方で難加工材であるため、複雑形状の製作が

難しく、また、粉末冶金で製作を行うため、製作サイズは焼結炉などの設備に依存し、大型製品の製造が困難などの欠点がある。また、タングステンの特徴として、空気中で酸化しやすいという特徴を持っている。

#### 4.2 ヘビーアロイの特徴

ヘビーアロイは、上記で述べたタングステンの欠点を改良すると共にタングステンの特性を活かし、様々な用途への対応を可能にした材料である。

ヘビーアロイは、タングステンを主成分とし、バインダー合金相をニッケル、銅、鉄等で構成した複合合金であり、タングステンが非常に高融点であることから、粉末冶金で製造されている。製造方法の概要を図1に示す。原材料粉末を均一に分散するよう混合し、所定の圧力をかけプレス成型を行う。プレス成型後は高温の炉でタングステンの融点以下の温度で焼結を行い緻密化させ、素材を製作する。

当社ヘビーアロイの物理的特性を表1に示す。ヘビーアロイの種類は W-Ni-Cu 系、W-Ni-Fe 系の2種類に分別される。W-Ni-Cu 系のヘビーアロイは非磁性であるという特徴があり、W-Ni-Fe 系のヘビーアロイは弱磁性であり、機械

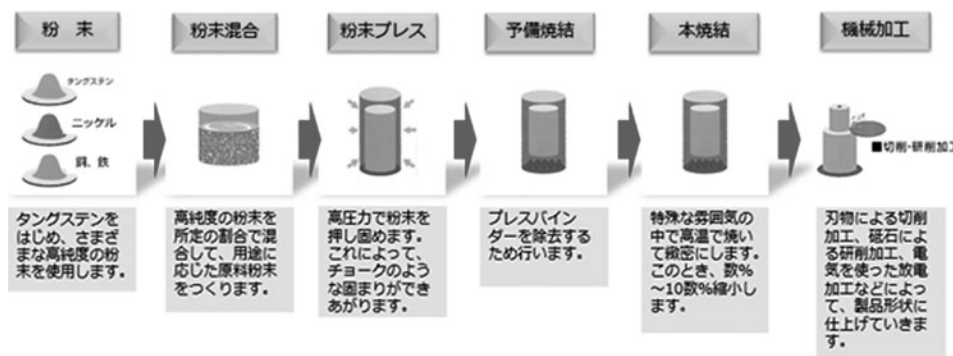


図1 ヘビーアロイの製造方法概要。

表1 当社ヘビーアロイの物理的特性.

材質名	HAC1	HAC1.5	HAC2	HAC9	HAF0.5	HAF1	HAF1.5	HAF2	HAX1
組成 (mass%)	W-2Ni-1Cu	W-3Ni-1.5Cu	W-4Ni-2Cu	W-3Ni-6Cu	W-1Ni-0.5Fe	W-2Ni-1Fe	W-3Ni-1.5Fe	W-5Ni-2Fe	W-Ni-Fe-a
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	18.4	18.1	17.8	17.1	18.6	18.4	18	17.4	18
硬さ	108(HRB)	30(HRC)	103(HRB)	27(HRC)	30(HRC)	108(HRB)	30(HRC)	103(HRB)	30(HRC)
抗折力 (Mpa)	1,100	1,000	1,200	1,100	1,400	1,400	1,400	1,000	1,400
引張り強さ (Mpa)	700	660	670	770	730	900	890	600	900
伸び (%)	0.5	2	1	3	10	12.2	15	1	10
ヤング率 (GPa)	370	-	365	-	370	375	-	365	370
導電率 (%)	23	21	19	20	※	※	※	※	※
熱膨張率 (10 <sup>-6</sup> /K, R.T. -873K)	5.1	-	5.8	6.0	4.8	5.3	-	5.6	5.3
熱伝導率 (W/m·K)	100	-	103	-	80	77	-	82	70
磁性	非磁性	非磁性	非磁性	非磁性	弱磁性	弱磁性	弱磁性	弱磁性	弱磁性

表2 最大製造可能サイズ.

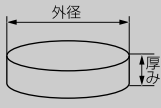
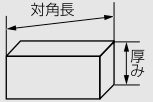
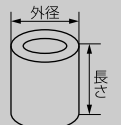
形状	製造可能 最大サイズ (mm)	実績最大 サイズ (mm)
	外形：φ350 最大重量 50kg/個	外形：φ350 厚み：30
	対角長：350 最大重量 5 kg/個	対角長：300 厚み：20
	外形：φ350 (肉厚 5 mm 以上) 最大重量 50 kg/個	



図2 ダーツバレル.

的特性 (引張強度, 抗折力, 伸び等) が高いという特徴がある。

ヘビーアロイは、粉末冶金で製造されるため、製作可能サイズはプレス設備や炉の容量に制約される。一体物の最大サイズとして、表2に示す形状での実績がある。

### 4.3 ヘビーアロイの用途

ヘビーアロイは、高密度で切削加工が容易なことから、スペースに制限がある小型のウェイトやねじ型のウェイトに広く使用されている。身近な製品例としては、ダーツのバレル (図2) などがある。また、γ線のような放射線の遮蔽性能に優れている。密度の高いヘビーアロイを用いることで、遮蔽部材のコンパクト化が可能になり、製品の小型化、省スペース化に寄与することができる。当社が製作した遮蔽材の使用実績として、マンモグラフィの遮蔽部材などの医療分野や高放射線領域で使用される監視カメラの基盤保護用の遮蔽ケースなどの原子力関連分野、加速器など応用物理学関連分野などがある。これらのウェイト材や遮蔽材といった製品分野では鉛が多く使用されていたが、近年の環境問題から、ヘビーアロイは鉛の代替材としても注目されている。

さらにヤング率が高く剛性があるという機械的特性か

ら、内面研削盤の砥石軸ケイル、火力、ガスタービンのバランス調整ウェイト (図3, 4) などの構造用部品に使用されている。また耐酸化性、低熱膨張、高熱伝導、高温時の優れた機械的特性からダイカスト金型部品、ガラスレンズモールド成型部品、半導体部品、各種電極にも使用されている。

特に電極に関しては、EV・PHV 自動車用電装部品、スターター、オルタネーター、ワイヤーハーネスの抵抗溶接工程に、純タングステン電極が使用されているが、ワーク形状、ワーク材質などによっては、タングステンが割れて使用できない場合や、形状が複雑で、タングステンでは高額になる電極では、ヘビーアロイの抵抗溶接電極 (図5) が使用されている。また、ヘビーアロイは、電気抵抗が純タングステンの2倍と高く、電極の発熱性を利用した溶接にも使用されている。

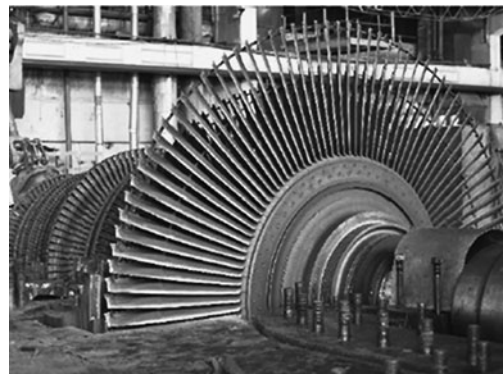


図3 タービンの外観.

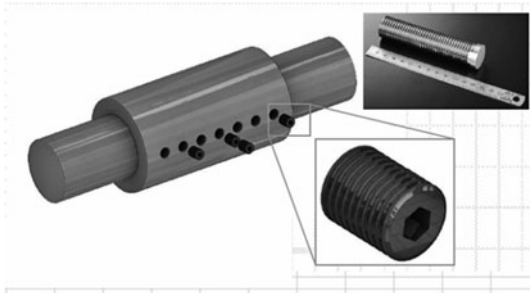


図4 バランス調整ウェイトイメージ図.

#### 4.4 タングステンの複合化による引張特性の向上

ヘビーアロイは純タングステンを複合化させた合金の一つである。その中で、W-Ni-Fe系のヘビーアロイはタングステン合金の中で高い引張特性を示す。純タングステン（スウェージ無し）の組織を図6に、W-Ni-Fe系のヘビーアロイの一例として、当社材料であるHAF1（97W-2Ni-1Fe）の組織を図7に示す。純タングステン（スウェージ無し）はタングステン粒子が石垣状になっているのに対し、ヘビーアロイは球状のタングステン粒子周囲をバインダー合金相が囲んでいる複合組織をしていることが特徴である。

ヘビーアロイの焼結機構として、微小のタングステン粒子がバインダー合金相内に固溶し、大きなタングステン粒子に析出する（オストワルド成長）ことで、数十 $\mu\text{m}$ 程度の球形状に粒成長が進み、緻密化される。また、タングステンとバインダー合金相はぬれが良く、高い密着性を持っている。この密着性は、切削等の大きな加工負荷以上に高いため、純タングステンと比較して、欠けにくく、加工性が



図5 抵抗溶接電極.

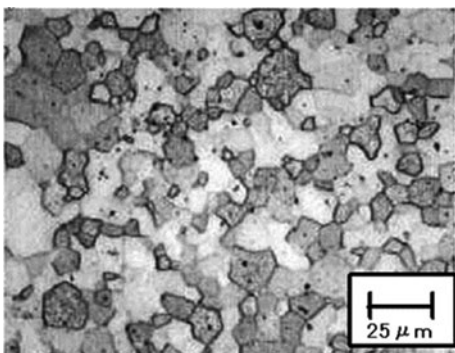


図6 純タングステン（スウェージ無し）の内部組織.

良好になる要因と考えられる。

図8にW-Ni-Fe系ヘビーアロイを常温引張試験した際の引張強度とニッケル-鉄バインダー合金相量の関係を示す。これらに含まれるニッケルと鉄の重量比率は2:1である。純タングステンの引張特性は引張試験条件が違うため、図8, 9中にデータを記載していないが、降伏点に達する前に破断し、引張強度は400 MPa, 0.2%程度の伸びがあることが分かっている。引張強度はバインダー金属が加わることで約900 MPaまで上昇し、若干ではあるが、タングステン割合が高い方が高い強度を示す。伸びはバインダー合金相の割合が増加するにつれ、増加する傾向がみられ、最大で30%程度の伸びを確認した。

ヘビーアロイの破壊形態のモデルを図10に示す。常温引張試験時、ヘビーアロイの破壊の起点は接合強度の弱いタングステン-タングステンの粒界に発生し、亀裂は粒界面に沿って進展はするものの、一旦バインダー相内で止められ、強度が高く、延性のあるバインダー合金相内（図10-

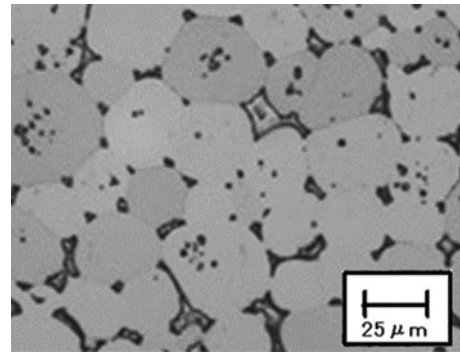


図7 ヘビーアロイ HAF1 の内部組織.

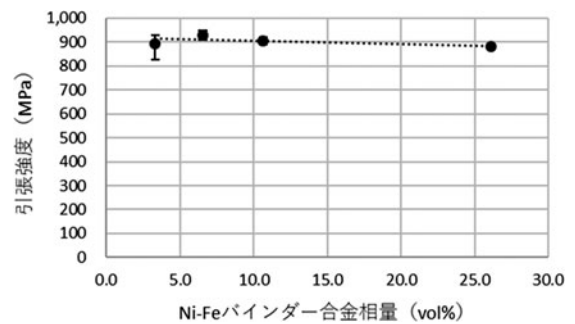


図8 引張強度とバインダー合金相量の関係.

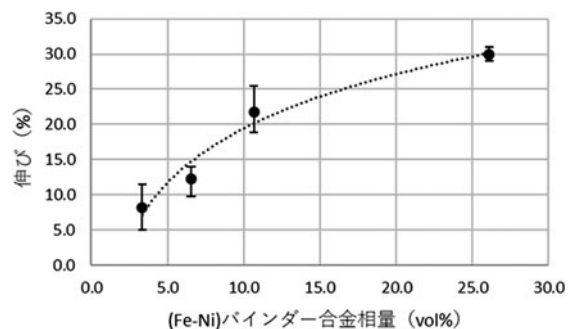


図9 伸びとバインダー合金相量の関係.

②) や密着性が高いタングステン - バインダー合金界面 (図10-③) を進展する [1]。また、変形している間中、タングステン粒子は周囲のバインダー合金相から応力を加えられて、ある限界応力レベルでタングステン粒子は粒内破壊 (図10-③) を起こす [2]。W-Ni-Fe 系のヘビーアロイはこうした複合組織に起因する破壊形態を示すため、高い引張特性が得られると考えられる。

純タングステン (スウェージ無し) は、常温引張試験時、破壊の起点はヘビーアロイ同様に、接合強度の弱いタングステン - タングステンの粒界に発生する。しかし、タングステンの結晶粒が小さいため、タングステン-タングステン粒界の数が多く、亀裂の進展を阻害するようなバインダー合金相もないため、亀裂はそのまま粒界に沿って一気に進行し、引張強度、伸びが低くなっていると考えられる。

#### 4.5 拡散接合による製造可能サイズの拡大

プレス設備や炉の容量の制約がある中で長尺品や大物品、中空体品などの製作が困難な形状を製作するために、複合組織を活かしたヘビーアロイの拡散接合を開発した。

拡散接合は、接合面を精密に加工し、突合せ、荷重をかけながら熱処理を行う。密着した面でタングステンとバインダー合金相の拡散が進み、結果として接合部は母材と同じ断面組織が得られる。拡散接合のモデルを図11に、接合部の断面組織を図12に示す。拡散接合の評価として、抗折力を測定したところ、1050~1500 MPa と母材単体の強度と同等の強度が得られた。拡散接合により、図13のような長さ100 mm を6枚接合した全長600 mm の板形状や、図14のような中空体の製作が可能となり、製作可能範囲が拡大

された。これまで組み立てが必要であった大型バランスアーや水冷経路が必要な中空体部品が商品化されている。

#### 4.6 最後に

タングステン合金の中で、ヘビーアロイはタングステンの結晶粒の大きさや、バインダー金属相の種類、量を制御することで、ある機械的特性に特化した材料設計が可能となる。粉末冶金の分野では、粉末加工技術、焼結技術などの技術革新が進んでおり、今後、ヘビーアロイの新製法へ適用することで、材料として更なる発展が可能となると期待している。

#### 参考文献

- [1] 金子 武：粉体および粉末冶金 35, 17 (1988).
- [2] 金子 武 他：粉体および粉末冶金 35, 92 (1988).

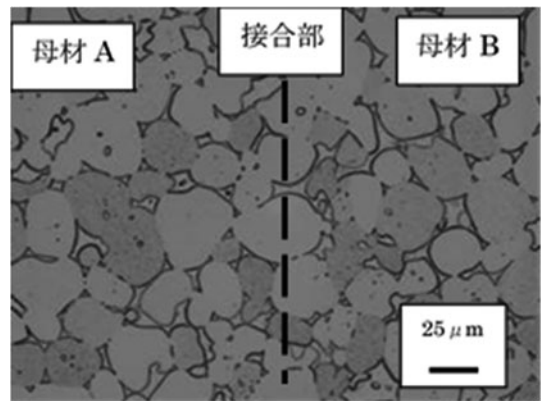


図12 接合部の HAC 2 断面組織。

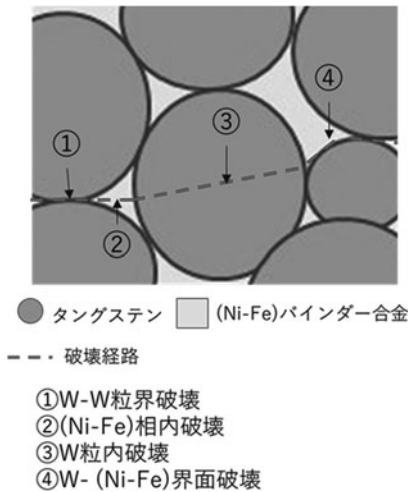


図10 ヘビーアロイの破壊形態のモデル。

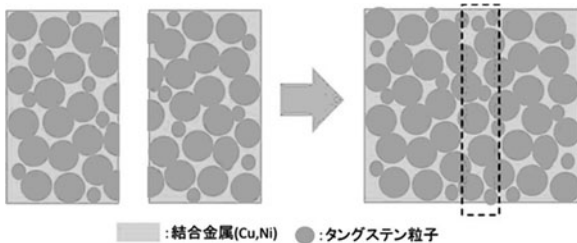


図11 拡散接合モデル図。

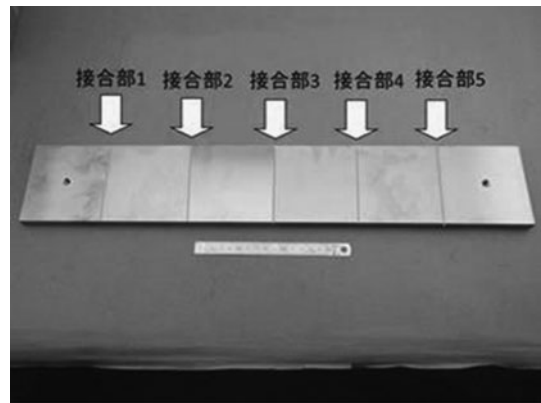


図13 600mm の板形状接合品。

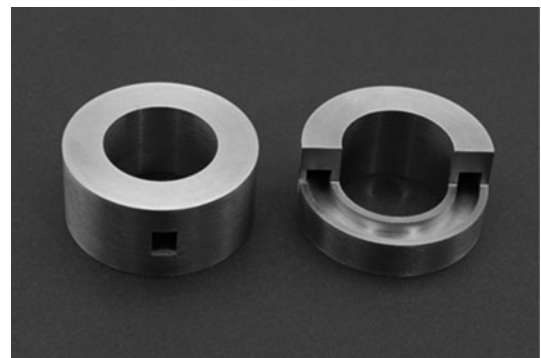


図14 中空体接合品 (左) と中空体の内部 (右)。