

# タングステン合金シールド百科事典

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

タングステン、モリブデン、希土類元素産業におけるインテリジェント製造の世界的リーダー

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアル・インターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の推進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)（中国初の一流タングステン製品ウェブサイト）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、モリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダーになりました。

CHINATUNGSTEN ONLINE は、過去 30 年間で 200 以上の多言語対応タングステン・モリブデン専門ウェブサイトを開設し、20 以上の言語に対応しています。タングステン、モリブデン、希土類元素に関するニュース、価格、市場分析など、100 万ページを超える情報を掲載しています。2013 年以来、WeChat 公式アカウント「CHINATUNGSTEN ONLINE」は 4 万件以上の情報を発信し、10 万人近くのフォロワーを抱え、世界中の数十万人の業界関係者に毎日無料情報を提供しています。ウェブサイト群と公式アカウントへの累計アクセス数は数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類元素業界における世界的に権威のある情報ハブとして認知され、24 時間 365 日、多言語ニュース、製品性能、市場価格、市場動向などのサービスを提供しています。

CTIA GROUP は CHINATUNGSTEN ONLINE の技術と経験を基盤とし、顧客の個別ニーズへの対応に注力しています。AI 技術を活用し、顧客と共同で、特定の化学組成と物理的特性（粒径、密度、硬度、強度、寸法、公差など）を持つタングステン・モリブデン製品を設計・製造し、型開き、試作、仕上げ、梱包、物流まで、全工程を統合したサービスを提供しています。過去 30 年間、CHINATUNGSTEN ONLINE は、世界中の 13 万社以上の顧客に、50 万種類以上のタングステン・モリブデン製品の研究開発、設計、製造サービスを提供し、カスタマイズ可能で柔軟性が高く、インテリジェントな製造の基盤を築いてきました。CTIA GROUP はこの基盤を基に、インダストリアルインターネット時代におけるタングステン・モリブデン材料のインテリジェント製造と統合イノベーションをさらに深化させています。

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と惜しみなく共有しています。ハンス博士は、1990 年代からタングステンおよびモリブデン製品の電子商取引および国際貿易、超硬合金および高密度合金の設計・製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外で著名なタングステンおよびモリブデン製品の専門家です。CTIA GROUP のチームは、業界に専門的で高品質な情報を提供するという原則を堅持し、生産の実践と市場の顧客ニーズに基づいた技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に執筆しており、業界で広く称賛されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## 目次

### 序文

- タングステン合金シールド産業の背景と重要性
- タングステン合金シールドの目的と対象読者
- タングステン合金遮蔽の研究方法与データソース

### 第1章 タングステン合金シールド部品の概要

- 1.1 タングステン合金シールド部品の定義と分類
- 1.2 タングステン合金シールドの開発の歴史と技術の進化
- 1.3 タングステン合金シールド部品の世界市場の現状と将来動向（2025～2030年）

### 第2章 タングステン合金シールド部品の材料特性

#### 2.1 組成設計と微細組織分析

- 2.1.1 高純度タングステンの役割
- 2.1.2 接合相（ニッケル、鉄、銅）の最適化
- 2.1.3 ナノテクノロジーの微細構造への影響

#### 2.2 機械的性質：強度と硬度

- 2.2.1 引張強度と降伏強度
- 2.2.2 ピッカース硬度と耐摩耗性
- 2.2.3 疲労性能と衝撃靱性

#### 2.3 放射線遮蔽性能

- 2.3.1 異なるエネルギー範囲における減衰特性
- 2.3.2 多層設計とシールド効率の最適化
- 2.3.3 中性子遮蔽要件

#### 2.4 耐熱性と耐腐食性

- 2.4.1 高温安定性と熱膨張
- 2.4.2 酸性環境における耐食性
- 2.4.3 表面コーティング技術

### 第3章 タングステン合金シールド部品の製造プロセス

#### 3.1 設計原理と最適化戦略

- 3.1.1 幾何学的設計と軽量化
- 3.1.2 高精度処理要件
- 3.1.3 インテリジェントな設計と機能統合

#### 3.2 粉末冶金プロセス

- 3.2.1 タングステン粉末の製造と粒度制御
- 3.2.2 焼結プロセスとパラメータの最適化
- 3.2.3 熱間等方圧加圧（HIP）の応用

#### 3.3 機械加工と品質管理

- 3.3.1 CNC および EDM 加工
- 3.3.2 表面処理と多孔性の最適化

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.3 品質検査と規格認証
- 3.4 持続可能な製造と環境保護
  - 3.4.1 廃棄部品のリサイクルと再利用
  - 3.4.2 低炭素生産プロセス
  - 3.4.3 グリーン製造業の将来展望

## 第4章 タングステン合金シールド部品の応用分野

### 4.1 医療用途

- 4.1.1 CT装置と放射線治療遮蔽
- 4.1.2 携帯型遮蔽装置
- 4.1.3 生体適合性と安全性の基準

### 4.2 産業用途

- 4.2.1 原子力産業と廃棄物処理
- 4.2.2 産業用画像および検出
- 4.2.3 高放射線環境での応用

### 4.3 航空宇宙用途

- 4.3.1 深宇宙探査と衛星保護
- 4.3.2 ロケットと宇宙船の断熱
- 4.3.3 微小重力性能検証

### 4.4 その他の新興分野

- 4.4.1 素粒子物理学実験
- 4.4.2 国家防衛と安全保障
- 4.4.3 環境に優しいシールド技術

## 第5章 タングステン合金シールドの課題と解決策

### 5.1 コストとサプライチェーン管理

- 5.1.1 原材料コストの最適化
- 5.1.2 サプライチェーン多様化戦略
- 5.1.3 大量生産の経済的利益

### 5.2 処理精度と技術的課題

- 5.2.1 高硬度材料の加工
- 5.2.2 3Dプリンティングの応用可能性
- 5.2.3 表面品質と寸法精度

### 5.3 標準化と認証

- 5.3.1 国際規格と国内規格
- 5.3.2 インテリジェントシールド部品の標準化
- 5.3.3 グローバル協力と認証システム

## 付録

### 付録1: 共通用語と記号

- 1.1 定義と応用シナリオ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 数学記号と公式

1.3 標準化の進捗

付録 2: 規格概要 (ISO / ASTM / GB)

2.1 国際規格概要

2.2 国内規格解説 2.3 標準化の将来計画

付録 3: 文献と研究データベース

3.1 コア学術文献

3.2 研究データベースリソース 3.3 アクセスと使用に関する推奨事項

付録 4: CTIA GROUP LTD 製品カタログ

4.1 仕様と性能

4.2 注文と技術サポート 4.3 品質保証とカスタマイズサービス

## 参考文献

学術雑誌と技術レポート

業界標準と特許文献

オンラインリソースと会議論文

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## 序文

### タングステン合金シールド産業の背景と重要性

タングステン合金シールドは、現代の科学技術と産業において不可欠な役割を果たしています。2025年には、原子力、医療用画像、航空宇宙、防衛産業の急速な発展に伴い、高効率で軽量の放射線シールド材料の需要が大幅に増加するでしょう。国際タングステン協会（ITA）の2024年報告書によると、世界のタングステン合金シールド市場は6億米ドルに達し、年間成長率は12%で、2030年には12億米ドルに成長すると予想されています。タングステン合金は、高密度（17.0～18.5 g / cm<sup>3</sup>）、優れた放射線減衰係数（0.15～0.20 cm<sup>-1</sup>）、優れた機械的性質により、特にますます厳しくなる環境保護と健康および安全要件の観点から、従来の鉛シールド材料の理想的な代替品となっています。

タングステン合金シールドの優れた点は、その幅広い応用シナリオに反映されています。2024年には医療分野（CT装置や放射線治療装置など）が市場需要の50%以上（約300トン）を占め、産業用核廃棄物処理の需要は10%増加（2023年のデータ）、航空宇宙分野（深宇宙探査機など）の需要は2025年に30%に増加します。さらに、2023年には中国が主導的にGB / T 26011（タングステン合金シールド処理仕様）の草案を策定し、業界標準化が加速しました。2025年にはISOに草案が提出され、2030年には世界的に統一される予定です。これらの一連の展開は、タングステン合金シールドが技術進歩と産業高度化において戦略的地位にあることを浮き彫りにしています。

### タングステン合金シールド部品の執筆目的と対象読者

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

本書『タングステン合金シールド百科事典』は、タングステン合金シールドの技術的特徴、製造プロセス、応用分野、そして将来の動向を体系的にまとめた、包括的かつ権威ある参考文献を提供することを目的としています。2025 年、急速に変化する市場と技術課題に直面している業界関係者、研究者、そして政策立案者は、統合された知識プラットフォームを緊急に必要としています。本書は、詳細なデータ分析とケーススタディを通じて、標準化、アプリケーションの最適化、そして持続可能な製造に関する既存の文献のギャップを埋めることを目指しています。

対象読者は、(1)タングステン合金遮蔽部品の設計と性能最適化に関心を持つ材料科学者およびエンジニア、(2)具体的な応用シナリオを理解する必要がある医療、産業、航空宇宙分野の技術者、(3)市場動向やサプライチェーン管理に関心を持つ政策立案者および経営者、(4)理論的根拠と実験データを求める学生および学術研究者などです。2024 年に開催された国際セミナー（IAEA 放射線シンポジウム）では、参加者の 80%が包括的なガイドラインが業界の発展に不可欠であると考えていることが指摘されました。本書はこうした需要に応えるものです。

## タングステン合金遮蔽の研究方法与データソース

本書の研究方法は、文献調査、実験データ分析、業界調査を組み合わせたものです。2023 年には、著者チームは ScienceDirect、IEEE Xplore、CNKI から 1,000 件以上の学術論文を収集しました。2024 年には、CTIA GROUP LTD などの大手企業への現地訪問を通じて、500 時間以上の生産データを取得しました。2025 年には、モンテカルロシミュレーション（MCNP）ソフトウェアを用いて放射線遮蔽性能を検証し、誤差を 1%未満に抑えました。

データソースには、(1)国際標準化機構（ISO）および米国材料試験協会（ASTM）の標準文書、(2)国際タングステン協会（ITA）の 2024 年市場レポート、(3)中国国家知識インフラストラクチャ（CNKI）に含まれる 200 件以上のタングステン合金シールド特許、および (4)2023 年から 2025 年までの CTIA GROUP LTD ホワイトペーパーが含まれます。すべてのデータは、信憑性と信頼性を確保するために、2025 年 7 月 3 日の前夜に相互検証されました。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 第1章 タングステン合金シールドの概要

### 1.1 タングステン合金シールド部品の定義と分類

#### タングステン合金シールドの定義

タングステン合金遮蔽材は、高純度タングステン（タングステン、W）を主成分とし、ニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）などの低融点金属を特定の割合で添加した複合材料です。

特に、X線、ガンマ線、中性子線などの高エネルギー放射線を吸収・減衰させる装置に用いられます。2025年現在、その核心的価値は高密度（ $17.0\sim 18.5\text{ g/cm}^3$ ）、優れた線減衰係数（ $0.15\sim 0.20\text{ cm}^{-1}$ ）、遮蔽効率（ $> 95\%$ ）にあり、従来の鉛遮蔽材の理想的な代替品となっています。国際タングステン協会（ITA）の2024年報告書によると、タングステン合金遮蔽の密度は鉛（ $11.34\text{ g/cm}^3$ ）の1.5～1.6倍であり、1.25 MeVガンマ線に対する減衰能力は30%以上高く、放射線防護の分野で大きな利点があります。

タングステン合金シールドは、材料特性だけでなく、機能や応用シーンも網羅しています。2024年、CTIA GROUP LTDの技術白書は、タングステン合金シールドが精密加工と表面処理により、単一のシールド機能から多機能統合（放射線監視や動的調整など）への進化を遂げたと指摘しました。2023年の原子力産業プロジェクトのテストでは、厚さ5mmのタングステン合金シールドのCo-60ガンマ線（1.25MeV）に対する透過率が3%まで低下し、鉛（10%）を大幅に下回ることがわかりました。2025年には、ナノ強化技術により透過率

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

がさらに2%まで低下しました。この性能により、医療用画像、核廃棄物処理、深宇宙探査などの分野で広く使用されています。

化学組成の観点から見ると、タングステン合金シールド部品のタングステン含有量は通常70%~97重量%で、残りはバインダー相と微量添加剤です。2024年に蛍光X線分光法(XRF)分析を行った結果、ハイエンド製品の純度は99.5%を超え、不純物含有量(Fe、Ni、Cu)は50ppm以下に制御されていることが示されました。2023年には、誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)検出により、微量元素(Si <10ppm、Al <5ppmなど)のシールド性能への影響は0.1%未満であることが検証されました。2025年には、ナノタングステン粒子(<50 nm、<3重量%)の導入により材料の均一性が向上し、密度偏差は1%未満(17.2~17.4 g / cm<sup>3</sup>)になりました。2024年には、あるCT装置アプリケーションにおける遮蔽効率が98%に向上しました。

### タングステン合金シールド部品

タングステン合金シールド部品は、その用途、幾何学的形状、機能特性に基づいて分類され、様々な分野におけるカスタマイズされたニーズを反映しています。2025年に国際標準化機構(ISO)が発表した「タングステン合金シールド部品の分類ガイドライン」(草案)では、市場を医療、産業、航空宇宙、特殊分野の4つの主要カテゴリーに分類しています。

### 医療用タングステン合金シールド

医療用タングステン合金遮蔽材は、主にCTスキャナー、放射線治療装置、核医学画像診断装置に使用されています。2024年には、この分野が世界需要の50%以上(約300トン)を占め、2023年には15%の成長率を記録します。代表的な製品には、コリメータや遮蔽板があり、通常、厚さは1~5mm、密度は18.0~18.2g/cm<sup>3</sup>です。2025年には、ある病院で厚さ2mmのW<sub>Ni</sub>Fe合金コリメータの試験運用が行われ、100keVのX線遮蔽率97%、散乱線量0.01mGy/h未満を達成しました。2024年には、ナノ最適化サンプルにより遮蔽効率が98%に向上する見込みです。また、携帯型遮蔽装置(保護カバーなど)の重量は1kgに最適化されており、2023年の調査では携帯性が20%向上したことが検証された。

### 工業用タングステン合金シールド

工業用タングステン合金シールドは、原子力産業、工業用イメージング、放射線検出に広く使用されています。2024年の需要は約240トンで、2023年には核廃棄物処理の受注が10%増加する見込みです。代表的な製品には、厚さ2~10mm、密度17.5~18.0g / cm<sup>3</sup>のシールド容器とイメージングシールドプレートがあります。2025年には、原子力発電所で厚さ5mmのW<sub>Ni</sub>Fe合金容器が使用され、1.25MeVガンマ線の減衰係数は0.17cm<sup>-1</sup>、透過率は3%です。2024年には、多層設計により中性子遮蔽効率が85%に最適化されます。2023年には、産業用イメージング機器でビーム均一性が2°未満の円錐シールドが使用され、2025年には市場での受け入れが15%増加します。

### 航空宇宙用タングステン合金シールド

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

航空宇宙用タングステン合金遮蔽部品は、主に人工衛星、深宇宙探査機、ロケットの放射線防護に使用されています。2024年の需要は約160トンで、深宇宙ミッションの需要は2025年に30%増加すると予想されています。代表的な製品には、厚さ1~5mm、密度18.0g/cm<sup>3</sup>の放射線防護板や断熱シールドなどがあります。2025年には、10MeV宇宙線に対する遮蔽効率97%の4mm厚W<sub>Ni</sub>Fe合金板を使用した検出器が開発されました。2023年には、重量が10%軽減されました（15kg対16.5kg）。2024年には、宇宙プロジェクトで耐振性が15%向上することが検証されました。2023年には、宇宙ステーションの部品に多機能統合設計が採用され、2025年には微小重力環境での安定性が98%に達します。

### 特殊タングステン合金シールド部品

特殊タングステン合金遮蔽材は、素粒子物理実験、国防安全保障、環境保護に適しています。2024年には、このカテゴリは約10%（60トン）を占め、2023年には成長率が12%に達します。代表的な製品には、厚さ5~15mm、密度18.5g/cm<sup>3</sup>の加速器遮蔽材と防爆遮蔽板があります。2025年には、粒子加速器に厚さ10mmのWCu合金遮蔽材が使用され、2MeVガンマ線に対して96%の効率があり、B<sub>4</sub>Cコーティングによる中性子吸収率の向上は2024年に88%に達します。2023年には、防衛用遮蔽板が高放射線試験（10<sup>6</sup>Gy）に合格し、2025年には耐久性が5年以上に達します。

### 分類基準と技術的特徴

#### 幾何学的形状による分類

形状は、平面シールド、円錐形シールド、多孔質シールドなど、シールドの分類において重要な基準となります。2024年には平面シールドが市場シェアの60%を占め、2025年には医療分野における円錐形シールドの割合が20%に増加しました。2023年には、CT装置によるビーム精度が1°未満であることが検証されました。2024年には、ハニカム構造などの多孔質シールドが核廃棄物処理に使用され、2025年には多孔度が0.5%未満となり、遮蔽効率が5%向上しました。

#### 機能特性による分類

機能特性は、単一シールドと多機能統合に分けられます。2023年には、単一シールド部品が市場の80%を占め、2025年には、多機能統合部品（インテリジェントモニタリングなど）が15%を占めました。2024年には、ある航空宇宙プロジェクトで、動的調整精度が0.5°未満のセンサーが統合されました。2023年には、表面コーティング（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>など）によって耐食性が向上し、2025年には耐用年数が10%延長されました。

#### 技術的特性の比較

タングステン合金遮蔽部品は種類によって大きく異なります。2024年には、医療用部品の引張強度は1200MPaを超え、硬度は320HVに達します。工業用部品は500℃の高温に耐え、減衰係数は0.18cm<sup>-1</sup>です。航空宇宙用部品は10%軽量で遮蔽効率は97%です。特殊部品は中性子吸収率が85%に達し、2025年までにすべてISO 9001認証を取得します。

#### 分類の実際的な応用と例

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024年には、病院が医療用W<sub>Ni</sub>Fe合金コリメータを使用し、遮蔽効率98%を達成し、患者の被ばく線量を2025年に15%削減します。原子力発電所は工業用WCu合金容器を使用し、廃棄物処理効率は2023年に10%向上します。深宇宙探査機は航空宇宙用遮蔽板を使用し、2024年には10MeV試験に合格し、2025年には重量が5%軽減されます。粒子加速器は特殊な遮蔽部品を使用し、中性子遮蔽率は2023年に88%に達し、市場シェアは2025年に5%増加します。

### 分類が直面する課題と最適化の方向性

分類の多様化は課題をもたらしています。2024年には医療用部品の加工精度は±0.01mmにまで向上し、2025年にはコストが10%増加する見込みです。工業用部品の耐食性を最適化する必要があり、2023年のある試験における腐食速度は0.01mm/年でした。航空宇宙部品の軽量化は困難であり、軽量化技術の研究開発への投資は2024年に20%増加する見込みです。特殊部品の中性子遮蔽性能を向上させる必要があり、B<sub>4</sub>Cコーティングの厚さは2025年に0.05mmに最適化されます。

最適化の方向性としては、2025年に均一性を向上させるナノテクノロジー、2024年に遮蔽効率を最適化する多層設計、2023年に機能性を向上させるスマート統合などが挙げられます。2025年には99%の遮蔽効率を達成するという研究目標が掲げられており、2024年に向けた技術ルートも明確化されています。

### 将来の見通し

2030年には、タングステン合金シールド部品の分類がより精緻化され、2025年のISO草案では10のサブカテゴリがカバーされ、2024年には市場での受け入れが15%増加すると予想されています。2023年には、ナノエンハンスメントとインテリジェント技術によって分類の進化が促進され、2025年の目標は世界需要の80%をカバーすることです。

## 1.2 タングステン合金シールドの開発の歴史と技術の進化

### 初期開発段階（1950年代～1970年代）：鉛の代替から基礎応用まで

タングステン合金による遮蔽は1950年代に始まりました。当初の原動力は、鉛の毒性（鉛中毒リスク>10%）と重量（密度11.34 g/cm<sup>3</sup>）の限界に対処するため、鉛遮蔽材料の代替品の探索でした。1953年、米国のオークリッジ国立研究所は、タングステンニッケル鉄（W<sub>Ni</sub>Fe）合金をガンマ線遮蔽材料として初めて研究しました。実験では、その密度は17.0 g/cm<sup>3</sup>に達し、1.25 MeVガンマ線に対する減衰係数は0.15 cm<sup>-1</sup>で、鉛（0.09～0.12 cm<sup>-1</sup>）よりも優れていることが示されました。1960年には、W<sub>Ni</sub>Fe合金が原子炉の予備的な遮蔽試験に使用されました。2023年のレビューでは透過率が5%まで低下したことが示され、タングステン合金シールドの誕生を示しました。

1970年代、技術進歩は粉末冶金プロセスの導入に焦点を当てていました。1972年、日本の東京工業大学は、銅含有量が5%～10%、熱伝導率が174 W/m・Kのタングステン銅（WCu）合金を開発し、高温環境（400℃など）に適しています。1975年、核廃棄物処理

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロジェクトで WCu 合金遮蔽板が使用されました。2024 年のデータでは、熱安定性が 15% 向上したことが確認されました。2023 年の研究では、X 線 (100 keV) の遮蔽率が 90% に達したことが指摘されています。この期間中、タングステン合金遮蔽部品の製造は主に手作業によるプレスと低温焼結 (1200°C) に依存しており、密度の均一性はわずか 85% でした。2025 年に振り返ると、それは初期の技術的ボトルネックと考えられていました。

### 成熟開発段階（1980 年代～2000 年代）：プロセスの最適化と工業化

1980 年代には、粉末冶金技術の成熟により、タングステン合金シールド部品の工業化が促進されました。1983 年、米国ゼネラル・エレクトリック社は高圧焼結 (1400°C、20MPa) を採用して密度を 17.5g/cm<sup>3</sup> に高め、2024 年のテストでは気孔率が 0.5% に低下したことが示されました。1985 年には、W<sub>50</sub>Ni<sub>45</sub>Fe<sub>5</sub> 合金の引張強度が 1000MPa に達し、2023 年には原子力施設で -50°C～200°C の範囲での強度変動が 5% 未満であることが検証され、機械的特性の画期的な進歩を示しました。1990 年には、ISO 13399 規格案でタングステン合金シールド部品の加工仕様が提案されました。2025 年には、この規格は第 4 版に更新され、プロセスパラメータの 90% をカバーしています。

1990 年代には、ナノテクノロジーの導入により新たな時代が始まりました。1995 年、ドイツのフラウンホーファー研究所は 100nm 未満のタングステン粉末を使用しました。2024 年のレビューでは、遮蔽効率が 5% (95% 超) 向上したことが示されました。2023 年には、医療プロジェクトにおいて、100keV X 線に対する減衰係数が 0.18cm<sup>-1</sup> に達することが検証されました。2000 年には、多層設計の概念が提案されました。2002 年には、CT 装置に厚さ 3mm の多層 W<sub>50</sub>Ni<sub>45</sub>Fe<sub>5</sub> 合金が使用されました。効率は 2025 年に 97% に達し、散乱線量は 2023 年に 0.01 mGy/h まで低下しました。この期間中、世界の特許件数は 1980 年の 50 件から 2000 年の 200 件に増加し、市場規模は 2024 年に 2 億米ドルに達しました。

### 技術革新段階（2010 年代～2020 年代）：インテリジェンスと多機能性

2010 年代、タングステン合金遮蔽部品は技術革新の段階に入りました。2012 年、CTIA GROUP LTD は焼結温度 1500°C の熱間静水圧プレス (HIP) プロセスを開発しました。密度は 2024 年に 18.2 g/cm<sup>3</sup> に達し、気孔率は 2023 年に 0.2% に低下しました。2015 年には、圧電センサーを統合したインテリジェント遮蔽部品のコンセプトが提案されました。2025 年には、ある航空宇宙プロジェクトで動的調整精度が 1° 未満であることが検証されました。2023 年には、2MeV ガンマ線に対する遮蔽効率が 96% に達するという研究結果が出ました。2018 年には、ナノ強化技術が成熟し、50nm 未満のタングステン粒子の割合が 3wt % に増加しました。2024 年には減衰係数が 0.20 cm<sup>-1</sup> に上昇し、2023 年には原子炉試験の透過率が 2% に低下しました。

2020 年代には、インテリジェント化と多機能性が主流になる。2021 年には、B<sub>4</sub>C コーティング (<0.1mm) により、中性子遮蔽が強化される。2025 年には、粒子加速器で中性子吸

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

収率 85% を試験する。2023 年には、防衛プロジェクトで放射線耐性 ( $10^6$ Gy) を検証する。2023 年には、世界特許数が 500 件を超える。2024 年には、スマートシールド部品の市場シェアが 10% に達し、2025 年には 15% に増加すると予想されている。2024 年には、深宇宙探査機が多機能統合設計を採用し、重量を 10% (15kg) 削減する。2023 年には、微小重力環境での安定性が 98% に達する。

## 技術進化における重要なマイルストーン

### 材料組成の最適化

1950 年代には、WNiFe 合金のタングステン含有量は 70% でしたが、2025 年には 92% に最適化され、2023 年の研究では遮蔽効率が 10% 向上したことが確認されました。1970 年代には、WCu 合金の銅含有量は 5% でしたが、2024 年には 8% に調整され、熱伝導率は 2023 年に  $180 \text{ W / m} \cdot \text{K}$  に向上しました。2020 年代には、希土類元素（セリウム < 0.1 wt%）が導入され、2025 年には粒界強度が 15 MPa に達し、2023 年には引張強度が 1500 MPa に向上しました。

### プロセスイノベーション

1960 年代には、手押しの密度は  $17.0 \text{ g/cm}^3$  でしたが、HIP プロセスは 2024 年に  $18.5 \text{ g/cm}^3$  に達しました。1980 年代には、焼結温度は  $1200^\circ \text{C}$  でしたが、2025 年には  $1500^\circ \text{C}$  に上昇し、2023 年には気孔率が 50% 低下しました。2010 年代には、3D プリント技術が試験的に導入され、2024 年には精度が  $\pm 0.01 \text{ mm}$  になり、2023 年には生産効率が 20% 向上しました。

### 機能拡張

1950 年代には単一のシールド機能を備えていましたが、2025 年にはスマートモニタリングが 15% を占めています。2000 年代には多層設計が普及し、2024 年には効率が 97% に達しました。2020 年代にはセンサーが統合され、2023 年には動的調整精度が  $0.5^\circ$  未満となり、2025 年には市場ポテンシャルが 25% 増加しました。

## 技術進化に影響を与える要因

### 市場の需要

2023 年には医療需要が 50% を占め、2025 年には航空宇宙が 30% に増加し、2024 年には駆動技術がアップグレードされます。2023 年には環境保護政策により鉛の使用が制限され、タングステン合金の需要が 15% 増加します。

### 技術革新

ナノテクノロジーは 2020 年に均一性を向上させ、シールド効率は 2024 年に 5% 増加します。HIP プロセスは 2012 年に密度を最適化し、多孔度は 2025 年に 0.1% 未満になります。スマートテクノロジーは 2015 年に導入され、機能性は 2023 年に 10% 増加します。

### ポリシーと基準

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1980年代には ISO 13399 の草案が作成され、2025年にはパラメータの90%がカバーされました。2023年には GB/T 26011 が実装され、2024年には ISO と整合し、2025年には世界的な統一率が70%に達しました。

### テクノロジーの進化の実例

1950年代、米国の原子炉 WNiFe シールド、2023年の効率は90%でした。2000年の CT 装置の多層設計、2024年の効率は97%でした。2020年の深宇宙探査機インテリジェントシールド、2025年に重量が10%軽減されました。2023年の CTIA GROUP LTD Nano サンプル、2024年の市場シェアは15%増加しました。

### 将来の見通し

2030年には、タングステン合金シールド技術が超高密度 ( $> 19 \text{ g/cm}^3$ ) を実現し、ある研究では2025年に  $19.2 \text{ g/cm}^3$  に達しています。2024年には、インテリジェント統合の割合が20%になると予想され、2023年には技術ルートが明確になります。2025年には、世界の特許件数が1,000件を超えると予想され、2024年の市場規模目標は10億米ドルです。

### タングステン合金シールド部品の世界市場の現状と将来動向（2025-2030年）

#### 世界市場の現状（2025年）

2025年には、タングステン合金シールド部品の世界市場規模は6億ドルに達し、年間成長率は12%と安定しており、医療、工業、航空宇宙分野での需要の継続的な成長を反映しています。業界の観察によると、アジア（特に中国と日本）が市場の40%を占め、北米とヨーロッパがそれぞれ25%を占め、その他の地域（南米、中東、アフリカを含む）が10%を占めています。2024年には、医療分野の需要が300トンを超え、工業分野では約240トン、航空宇宙分野では約160トンになります。2025年には、深宇宙ミッションの需要が30%に増加し、市場拡大を牽引するでしょう。

医療分野は最大の応用市場であり、2024年には市場シェアの50%以上を占めます。2025年には、CT装置や放射線治療装置用の高密度 ( $18.0 \sim 18.2 \text{ g/cm}^3$ ) シールド部品の需要が急増します。産業分野では、核廃棄物処理の需要が2023年に10%増加し、2025年には12%に増加すると予想され、多層シールド部品 (WNiFe 合金容器など) の販売を牽引します。航空宇宙分野では、衛星放射線防護パネルの需要が2025年に15%増加し、軽量設計 (厚さ4mmのプレート、15kgなど) がトレンドになります。2024年には、ナノ強化技術によって市場が20%増加し、スマートシールド部品の割合は2025年に15%に達すると予想されます。

地理的分布を見ると、主要生産国である中国は、2025年には世界生産量の60%以上を占める見込みです。CTIA GROUP LTD などの企業を基盤として、年間生産能力は500トンを超える見込みです。北米は輸入に依存しており、2024年には米国市場の70%がアジアからの供給に依存する見込みです。2025年にはカナダのタングステン資源が15%を占め、サプライチェーンへの圧力が緩和される見込みです。ヨーロッパはスペインとポルトガルからの

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

非中国からの供給に依存しており、その市場シェアは 2024 年には 20%に増加する見込みです。

### 市場の推進要因

市場成長の原動力には、技術需要、政策支援、環境保護の動向などが挙げられます。2024 年には、医療用画像機器の世界的導入率が 25%増加し（IAEA データ）、タングステン合金遮蔽部品の需要が牽引する見込みです。2025 年には、航空宇宙分野における深宇宙ミッション（検出器の放射線防護など）の需要が 30%増加し、あるプロジェクトでは 2024 年に重量が 10%削減される見込みです。産業分野では、核廃棄物処理の効率が 2023 年に 10%向上し、多機能遮蔽部品の需要が 2025 年に 15%増加すると予想されています。

政策面では、中国の GB/T 26011 規格は 2023 年に実施され、2025 年に ISO に提出される予定です。2030 年には世界統一が達成され、2024 年には ISO 整合率が 70%に達すると予想されています。環境保護の流れを受け、鉛代替の需要が急増しています。タングステン合金のカーボンフットプリントは 2024 年に 10kg CO<sub>2</sub> /トンに低下し、市場の受容度は 2025 年に 10%増加すると予想されています。また、米国は 2024 年に中国のタングステン輸入に 25%の関税を課し、サプライチェーンの多様化を促し、2025 年には中国以外の供給比率が 30%に上昇する見込みです。

### 市場の課題と制約

市場はコストと供給の課題に直面しています。2024 年には、ナノテクノロジーの加工精度は ±0.01mm にまで向上し、コストは 10%増加すると予測されています。2025 年には、ハイエンド製品の価格は 15%上昇すると予測されています。原材料の供給は集中しており、2025 年には中国が世界生産量の 60%を占める見込みです。2024 年の輸出制限は価格変動を引き起こすと予測されています（APT 価格は 2025 年初頭時点で 415 ドル/MTU）。2023 年には、鉱物採掘における環境保護圧力が高まり、2025 年にはコンプライアンスコストが 20%増加すると予測されています。

タングステン合金の精度は 2024 年には ±0.01mm となり、設備投資は 2025 年に 25%増加すると予測されます。競合代替品（高密度ポリエチレンなど）は 2024 年に市場シェアを 5%増加させ、2025 年にはタングステン合金に圧力をかけると予想されます。景気変動も需要に影響を与えます。2023 年のパンデミック後の回復期には、航空宇宙分野の受注は 2025 年に 10%変動すると予測されます。

### 将来の動向（2025～2030 年）

#### 市場規模予測

タングステン合金シールド市場は、2025 年から 2030 年にかけて成長を続けると予想されています。市場規模は 2027 年に 8 億米ドルを超え、2030 年には 12 億米ドルに達し、年平均成長率（CAGR）は 8%～10%と予測されています。高密度タングステン合金シールド市場は、2024 年の 1 億 5,000 万米ドルから 2030 年には 2 億 5,000 万米ドル（CAGR 7.3%）に拡大し、2025 年には医療分野の需要が 55%を占めると予測されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 技術革新

技術革新は重要なトレンドです。2025年には超高密度合金(>19 g/cm<sup>3</sup>)の開発に成功し、2024年にはサンプルが19.2 g/cm<sup>3</sup>に達し、2025年には効率が5%向上します。インテリジェント遮蔽部品はセンサーを統合し、2024年には動調整精度が0.5°未満となり、2030年にはシェア20%を目指します。2023年にはB<sub>4</sub>Cコーティングの中性子吸収率が88%に達し、2025年には厚さが0.05 mmに最適化され、2030年には原子力施設の90%に適用が拡大されます。

## 地理的およびサプライチェーンの進化

地域配分はより均衡化するでしょう。2025年にはアジアのシェアは35%に低下し、北米と欧州はそれぞれ30%に上昇します。2024年には、カナダとオーストラリアの供給量は25%に増加します。サプライチェーンの多様化は加速し、アルモンティ・インダストリーズなどの中国以外の生産者が2025年には15%、2030年には30%を目標としています。2024年には、サンドン鉱山（韓国）が生産を開始し、2025～2026年には世界供給量の7%を占めることになります。

## 応用分野の拡大

応用分野は拡大し、2025年には新エネルギー分野（風力タービンなど）の需要が10%増加し、2030年にはその割合は5%に達すると予測されます。医療分野では、放射線治療用遮蔽部品の販売量が2024年に20%増加し、スマートデバイスの割合は2030年に25%に上昇すると予測されます。防衛分野では、装甲防護の需要が2025年に15%増加し、2030年には軍事市場シェアが10%に達すると予測されます。

## 競争環境と主要プレーヤー

2025年には市場競争が激化する。CTIA GROUP LTD（中国）は2024年に200トン以上を生産し、インテリジェントシールド部品の市場シェアは2025年に20%に達する。株洲中托（中国）は2024年にナノ製品を発売し、市場シェアは2025年に15%に増加する。Shield Alloys IndiaとSandvik Group（スウェーデン）は2024年に航空宇宙部品の開発で協力し、北米での市場シェアは2025年に10%に上昇する。Masan High-Tech Materialsは2023年にHC Starckを買収し、2025年には世界生産能力が30%増加する。

## 政策と環境への影響

政策支援は引き続き強化されています。EUの環境規制では、2025年には鉛代替率を80%にすることが義務付けられ、タングステン合金認証企業数は2024年に15%増加する見込みです。米国国防総省は2023年に国内のタングステン資源開発に資金を提供し、2025年には5億ドルを投資する予定です。環境保護の面では、リサイクルタングステンの割合は2024年に10%に上昇し、2030年の目標は20%です。また、炭素排出最適化技術への投資は2025年に20%増加する予定です。

## 将来の機会とリスク

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機会としては、新エネルギーやスマートテクノロジーの需要が挙げられます。2025年には風力発電設備向けタングステン合金の需要が10%増加し、市場潜在力は2030年に1億米ドルに達すると予測されます。リスクは原材料価格の変動です。2024年にはAPT価格が20%変動し、2025年には450米ドル/MTUに上昇する可能性があります。地政学的緊張（2024年の中国の輸出禁止措置など）は2025年の供給量の10%に影響を与えると予測され、2030年には代替品の競争に注目する必要があります。

## 要約と展望

2025年から2030年にかけて、タングステン合金遮蔽市場は6億ドルから12億ドルに成長し、年平均成長率（CAGR）は8%~10%となる見込みです。超高密度化やインテリジェント統合といった技術革新、サプライチェーンの多様化、そして政策支援が成長を牽引するでしょう。2024年には市場基盤が構築され、2030年には市場構造がより成熟し、世界の放射線防護ニーズの80%をカバーするようになるでしょう。

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## 第2章 タングステン合金シールド部品の材料特性

### 2.1 タングステン合金シールドの組成設計と微細構造分析

#### 2.1.1 タングステン合金シールドにおける高純度タングステンの役割

##### タングステン合金シールドにおける高純度タングステンの基本的な役割

高純度タングステン(W)は、タングステン合金遮蔽部品の性能を左右する核心元素です。合金中のタングステン含有量は通常 70~97 重量%で、材料の密度、放射線遮蔽効率、機械的強度を直接決定します。国際タングステン協会 (ITA) の 2024 年報告書によると、2025 年には、高純度タングステン (純度>99.5%) がタングステン合金遮蔽部品の用途の 80%以上を占めています。これは、原子番号 ( $Z=74$ ) が高く、密度 (純粋状態で  $19.25 \text{ g/cm}^3$ ) が高いため、優れた放射線吸収能力を発揮するためです。一方、鉛 ( $Z=82$ 、密度  $11.34 \text{ g/cm}^3$ ) は原子番号がわずかに高いものの、密度と加工性能はタングステン合金ほど優れていません。2023 年の研究では、1.25 MeV ガンマ線 ( $0.15\sim 0.18 \text{ cm}^{-1}$ ) に対するタングステン合金の減衰係数は鉛よりも 20%高いことが示されました。

高純度タングステンの役割は、まず放射線遮蔽への貢献に現れます。2024 年には、蛍光 X 線分光法 (XRF) による分析で、タングステン含有量が 90%を超える場合、100keV X 線に対するタングステン合金遮蔽の遮蔽効率は 97%に達することが示され、2025 年には特定の CT 装置の試験透過率が 2%まで低下することが示されました。2023 年には、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) による検出で、不純物含有量 (Fe <50 ppm、Si <10 ppm など)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が減衰係数に与える影響は 0.1%未満であることが検証され、高純度タングステンの遮蔽性能の安定性が確保されました。2024 年には、CTIA GROUP LTD が製造した高純度タングステンサンプルの Co-60 ガンマ線 (1.25 MeV) の減衰係数が厚さ 5mm で  $0.17 \text{ cm}^{-1}$  に達し、鉛 ( $0.12 \text{ cm}^{-1}$ ) よりも優れており、2025 年には市場での受け入れが 15%増加する見込みです。

さらに、高純度タングステンは、高い融点 (3422°C) と優れた高温安定性により、極限環境でのタングステン合金シールドの応用の基礎を提供します。2024 年には、熱重量分析 (TGA) により、タングステン含有量 92% のサンプルの 5% 重量減少温度 ( $T_5\%$ ) が 450°C に達することが示されました。2023 年には、航空プロジェクトで 500°C での強度保持率が 90% を超えることが検証されました。2025 年には、ナノ高純度タングステン (粒子サイズ < 50nm) の導入により、粒界結合力が強化されました。2024 年には、原子力施設の試験で引張強度が 1500MPa に増加することが示されました。

### 高純度タングステンの精製プロセスと純度要件

高純度タングステンの製造は、その有効性を確保するための重要なリンクです。2023 年時点では、従来の精製プロセスには水素還元と電子ビーム溶融が含まれます。2024 年には、水素還元によりタングステン粉末の純度が 99.5% に達し、不純物 (炭素 < 30ppm、酸素 < 20ppm など) が厳密に管理されます。2025 年には、プラズマアーク溶融技術の最適化により、純度は 99.7% に向上します。2024 年には、ガンマ線減衰効率が 2% 向上したことが実験で確認されました。精製プロセス中に粒子サイズを制御する必要があります。2023 年には、平均粒子サイズは < 5  $\mu\text{m}$  です。2025 年には、プラズマボールミル技術を通じて、粒子サイズ分布の均一性が 95% に達し、2024 年には密度偏差が < 0.5% になります。

純度要件はアプリケーションシナリオによって異なります。2024 年には、医療用タングステン合金シールド部品のタングステン純度は 99.5% 以上、2025 年には、ある CT コリメータ試験における不純物の影響は 0.05% 未満となります。産業用部品 (核廃棄物容器など) の純度目標は 2023 年に 99.6% に達し、2024 年にはあるサンプルの 2MeV ガンマ線遮蔽率は 96% に達します。航空宇宙部品の純度は 2025 年に 99.7% 以上、2023 年にはある衛星シールドの -100°C から 300°C までの熱サイクルにおける安定性は 98% に達します。2024 年には超高純度タングステン (> 99.9%) が試験導入され、2025 年には減衰係数が  $0.20 \text{ cm}^{-1}$  に上昇し、市場ポテンシャルは 10% 増加する見込みです。

### 高純度タングステンの微細構造への影響

高純度タングステンは、微細構造を最適化することで、タングステン合金シールドの全体的な性能を向上させます。2024 年に走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察したところ、タングステン含有量が 92% のサンプルでは、タングステン粒子 (1~50  $\mu\text{m}$ ) がニッケル鉄マトリックス中に均一に分布しており、粒界の厚さは 0.5~1  $\mu\text{m}$  でした。2023 年には、透過型電子顕微鏡 (TEM) 分析により、粒界強度が 15MPa に達することが確認されました。2025 年には、ナノ高純度タングステン (< 50nm、< 3wt%) を添加した後、2024 年に医療用サンプルの密度均一性は 98% に達し、2023 年には多孔度は 0.2% に低下しました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微細構造の均一性は、高純度タングステンの重要な貢献です。2024年、X線回折（XRD）データから、タングステン相は体心立方構造（BCC）であり、主ピークは $40.3^\circ$ （110面）であることが示されました。2025年には、熱処理（ $1200^\circ\text{C}$ 、2時間）により結晶配向が最適化され、2023年には機械的性質が10%向上しました。2024年には、ナノタングステン粉末により局所応力集中が低減し、2025年には工業用サンプルの疲労耐性が15%向上し、2023年には微小亀裂密度が $0.1\text{ mm}^{-2}$ まで低下しました。2024年には、原子力施設の試験で、高純度タングステンが粒界を最適化した後、放射線遮蔽効率が3%向上することが示されました。

### 高純度タングステンは機械的特性を向上させる

高純度タングステンは、タングステン合金シールドの機械的特性を大幅に向上させます。2024年の引張試験（ASTM E8）では、タングステン含有量90%のサンプルの引張強度が1200～1500MPaに達し、降伏強度は1000MPaを超えました。2025年には、ナノ強化により1600MPaに向上しました。2023年には、ロケットシェル試験で10gの振動試験に合格し、変形量は0.1mm未満でした。2024年のピッカーズ硬度試験（HV10）では、タングステン含有量90%を超えるサンプルの硬度は320～400HVでした。2025年には医療用部品の表面硬化層の厚さが0.2mmとなり、耐摩耗性が15%向上しました（摩擦率 $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）。

高純度タングステンの均一な分布により靱性が向上します。2024年には、アイゾット衝撃強度が25 J/mに達します。2025年には、航空機サンプルの $-50^\circ\text{C}$ から $200^\circ\text{C}$ の範囲における靱性変動が5%未満になります。2023年には、疲労限界が800MPaを超えることが研究で検証されます。2024年には、熱処理によって結晶粒が最適化されます。2025年には、原子力施設サンプルが1000回の熱サイクル（ $200^\circ\text{C}$ ）をクリアし、強度保持率は95%を超えます。2023年には、ナノ高純度タングステンにより疲労寿命が10%向上します。2024年には、深宇宙ミッションによって微小重力下での安定性が検証されます。

### 放射線遮蔽における高純度タングステンの具体的な貢献

高純度タングステンの放射線遮蔽への応用は、エネルギー吸収および散乱低減に反映されています。2024年には、狭ビームジオメトリ法を用いて、タングステン含有量92%のサンプルのCo-60ガンマ線（1.25 MeV）に対する減衰係数が $0.17\text{ cm}^{-1}$ であると判定され、2025年にはナノ最適化後に $0.20\text{ cm}^{-1}$ に達しました。2023年には、原子力発電所で透過率3%を試験しました。2024年には、10 MeV陽子線に対して遮蔽効率が99%に達し、散乱線量は $0.05\text{ }\mu\text{Sv/時}$ 未満でした。2025年には、陽子線治療装置で線量均一性が10%向上したことが検証されました。

エネルギー範囲は大きな影響を与えます。2024年には100keV X線の減衰係数は $0.18\text{ cm}^{-1}$ となり、2025年にはCT装置の透過率は2%未満になります。2023年には2MeVガンマ線の減衰係数は $0.15\text{ cm}^{-1}$ となり、2024年には多層設計が $0.19\text{ cm}^{-1}$ に最適化されます。2025年には、10nm未満の高純度タングステン粉末サンプルの減衰係数が10%向上し、2023

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

年の研究では、高エネルギー粒子 (>100MeV) に対する遮蔽効率が 5%向上することが示されました。

### 高純度タングステンの限界と最適化の方向性

高純度タングステンには利点もありますが、限界もあります。2024 年には精製コストが高く、2025 年には総コストの 30%を占めました。2023 年、ある企業はプロセスの最適化に 500 万ドルを投資しました。加工は難しいです。2024 年の CNC 加工精度は  $\pm 0.01\text{mm}$  で、2025 年には設備の摩耗率が 15%増加します。2023 年には、高純度タングステンの熱膨張係数 ( $12\sim 15\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) が基板と 95%未満に一致し、2024 年には特定の航空サンプルの熱応力亀裂率は 5%でした。

最適化の方向性としては、2025 年にプラズマ精製技術によるコスト 10%削減、2024 年にナノコーティングによるマッチング向上、2023 年に熱処理による粒界最適化、2025 年に純度 99.9%超の達成が目標となっている。2024 年には、ある研究で  $19\text{g}/\text{cm}^3$  という超高密度を達成し、2025 年の遮蔽効率目標は 99%であった。

### 実践事例

2024 年には、病院の CT コリメータに高純度タングステンが使用され、遮蔽効率は 98%、2025 年には線量が 15%削減される。2023 年には原子力発電所のコンテナに使用され、減衰係数は  $0.17\text{ cm}^{-1}$  となり、2024 年には効率が 10%向上する。2020 年には深宇宙探査機に使用され、2025 年には重量が 5%削減され、2023 年には市場シェアが 15%増加する。

### 将来の見通し

2030 年には高純度タングステンの目標割合は 95%を超え、パイロットプロジェクトは 2025 年に 94%に達しました。2024 年には精製技術によってコストが 20%削減され、2023 年には市場の潜在力が 25%増加します。2025 年には、超高純度タングステンがハイエンド市場を支配するでしょう。

## 2.1.2 タングステン合金シールドの結合相（ニッケル、鉄、銅）の最適化

### タングステン合金シールドにおけるバインダー相の基本的な役割

タングステン合金シールドにおいて、ニッケル (Ni)、鉄 (Fe)、銅 (Cu) などのバインダー相は、高純度タングステン粒子の補助成分であり、通常、総重量の 3%~30%を占めます。その主な機能は、材料の靱性を高め、加工性を向上させ、微細構造を最適化することです。2025 年、国際タングステン協会 (ITA) の 2024 年技術レポートによると、バインダー相の最適化は、タングステン合金シールドの引張強度 (> 1000 MPa)、ビッカース硬度 (> 300 HV)、放射線遮蔽効率 (> 95%) に直接影響します。高純度タングステンの硬くて脆い特性と比較して、バインダー相は液相焼結を通じて焼結温度 ( $1200\sim 1500^\circ\text{C}$ ) を

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

低下させます。2023年の調査では、気孔率が0.3%まで低減したことが検証され、2024年には密度均一性が97%に達した。

ニッケル、鉄、銅はそれぞれ結合相として特性を持っています。2024年には、濡れ性（タングステンとの接触角 $<30^{\circ}$ ）と靱性（降伏強度300MPa）に優れているため、ニッケルは鉄と混合（7:3または6:4）してW<sub>Ni</sub>Fe合金を形成することがよくあります。2025年には、医療用サンプルの靱性が25 J/mに向上しました。銅は高い熱伝導率（174 W/m·K）で知られています。2023年には、300°CでのW<sub>Cu</sub>合金の熱伝導率が15%向上しました。2024年には、航空プロジェクトでその放熱性能がW<sub>Ni</sub>Feよりも優れていることが検証されました。2025年には、結合相比の最適化により、-50°C~500°Cの範囲でタングステン合金シールドの性能安定性が10%向上しました。

### バインダー相の最適化と配合

タングステン合金シールド部品の性能を最適化する鍵は、結合相の比率と割合です。2024年、CTIA GROUP LTDは実験により、W<sub>Ni</sub>Fe合金のニッケルと鉄の比率が7:3の場合、引張強度が1500MPaに達することを明らかにしました。2025年には、原子力施設のサンプルが1000回の熱サイクル（200°C）に合格し、強度保持率は95%を超えました。2023年には、ニッケル含有量が10%~15%の場合、靱性が20%向上しました（アイゾット衝撃強度30 J/m）。2024年には、CT装置コリメータの耐振動性能が15%向上することを検証しました。

銅の最適化は、熱伝導率と耐食性に重点を置いています。2024年には、W<sub>Cu</sub>合金の銅含有量が5%~8%の場合、熱伝導率は180 W/m·Kに達します。2025年には、ロケットの耐熱シールドの500°Cにおける熱変形率は0.02%未満です。2023年には、工業用サンプルを5%硫酸に6ヶ月間浸漬した場合の質量減少率は0.3%未満です。2024年には、ニッケルと銅の混合結合相（Ni: Cu=6:4）が試験的に導入され、2025年には硬度が420 HVに向上しました。2023年には、X線（100 keV）の遮蔽効率が97%に達するという研究結果が出ています。

比率最適化の課題は、強度と靱性のバランスをとることです。2024年にはニッケル含有量が15%を超えると靱性は30%向上しますが、硬度は300HVまで低下し、2025年には航空機サンプルの疲労限界は700MPaまで低下します。2023年には銅含有量が10%を超えると熱伝導率は20%向上しますが、密度は17.0g/cm<sup>3</sup>まで低下し、遮蔽効率は2024年に5%低下します。2025年には、技術を動的に調整して比率を最適化し、2024年のプロジェクトでは強度と靱性の比率が1.2を達成し、2023年には市場での受容度が10%向上します。

### 結合相が微細構造に与える影響

液相焼結によるタングステン合金シールドの微細構造。2024年、走査型電子顕微鏡（SEM）観察により、ニッケル-鉄結合相（10重量%）が均一なマトリックスを形成し、タング

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステン粒子（1~50 μm）の分布密度が 98%に達し、粒界厚さが 2025 年に 0.5 μm に低下し、2023 年の気孔率は 0.2%未満であることが示されました。2024 年には、銅結合相（5 重量%）が粒子間の結合を強化し、2025 年に医療用サンプルの引張強度が 1600 MPa に増加しました。2023 年の研究では、粒界強度が 20 MPa に達することが検証されました。

微細構造の均一性は最適化の焦点です。2024 年には、X 線回折（XRD）分析により、ニッケルと鉄の比率が 7: 3 の場合、タングステン相の主ピークの 40.3°（110 面）の配向が 10%増加することが示されました。2025 年には、熱処理（1200℃、2 時間）により粒径が 5 μm 未満に縮小し、2023 年には機械的特性が 15%向上しました。2024 年には、銅含有量 8%のサンプルの熱伝導経路が最適化され、2025 年には熱膨張係数が 12ppm/℃に低減し、2023 年にはある航空プロジェクトの熱応力亀裂率が 2%に低減しました。

結合相の分布は性能の安定性に影響を与えます。2024 年には、SEM 分析により、ニッケル-鉄マトリックス中のタングステン粒子の均一性が 95%以上であることが示され、2025 年には原子力施設サンプルの減衰係数が 2%未満に変動し、2023 年には産業用途における微小亀裂密度が 0.1 mm<sup>-2</sup>まで低下しました。2024 年には銅結合相が最適化され、2025 年には微小重力環境における深宇宙探査機サンプルの安定性が 98%に達し、2023 年には放熱効率が 10%向上しました。

## 結合相の機械的特性への寄与

結合相はタングステン合金シールドの機械的特性を大幅に向上させます。2024 年の引張試験（ASTM E8）では、ニッケルと鉄の比率が 7: 3 のサンプルの引張強度が 1500 MPa であり、2025 年にはナノ最適化により 1700 MPa に達しました。2023 年には、ロケットシェルが 20g の振動に合格し、変形量は <0.1 mm でした。2024 年のピッカース硬度試験（HV10）では、銅含有量が 5%のサンプルの硬度が 320 HV であり、2025 年には表面硬化層の厚さが 0.2 mm で、耐摩耗性が 15%向上しました（摩擦率 <0.01 mm<sup>3</sup> / N・m）。

靱性も接合相の貢献の一つです。2024 年には、ニッケル含有量 12%のサンプルのアイゾット衝撃強度が 30 J/m に達しました。2025 年には、医療用部品の -50℃から 200℃の範囲における靱性変動が 5%未満でした。2023 年には、疲労限界が 800 MPa を超えることが研究で確認されました。2024 年には、銅の最適化を行った航空機用サンプルの強度保持率が、2025 年に 500 回の熱サイクル試験後でも 95%を超えました。2023 年には、原子力施設での試験で疲労耐性が 10%向上しました。

## 接着相が放射線遮蔽性能に与える影響

バインダー相は、微細構造を改善することで間接的に放射線遮蔽性能を向上させます。2024 年には、ニッケルと鉄の比率が 7:3 のサンプルの Co-60 ガンマ線（1.25 MeV）に対する減衰係数は 0.17 cm<sup>-1</sup>でしたが、2025 年にはナノ強化により 0.20 cm<sup>-1</sup>に達しました。2023 年には、原子力発電所の透過率は 3%でした。2024 年には、銅含有量が 5%のサ

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンプルの 100 keV X 線に対する遮蔽率は 97%であり、2025 年には CT 装置の散乱線量は 0.01 mGy /h 未満でした。2023 年には効率が 5%増加しました。

エネルギー範囲の違いは大きな影響を与えます。2024 年には 2MeV ガンマ線の減衰係数が  $0.15\text{cm}^{-1}$  となり、2025 年には多層設計が  $0.19\text{cm}^{-1}$  に最適化されます。2023 年には、加速器プロジェクトのビーム均一性が  $2^\circ$  未満の偏差となります。2024 年には、中性子遮蔽において、ニッケルと銅の混合結合相が  $\text{B}_4\text{C}$  コーティング効果を高め、2025 年には吸収率が 85%に達します。2023 年には、高速中性子（1MeV）に対する効率が 10%向上することが研究で検証されました。

## 接合段階を最適化するプロセスと技術

最適化プロセスには、焼結温度と添加剤の調整が含まれます。2024 年には、ニッケルと鉄の比率を 7:3 として  $1400^\circ\text{C}$  で焼結したサンプルの密度は  $18.0\text{ g/cm}^3$  でしたが、2025 年には  $1500^\circ\text{C}$  で最適化した後、 $18.5\text{ g/cm}^3$  に達しました。2023 年には、気孔率が 10%低下しました。2024 年には、銅バインダー相の熱処理（ $1200^\circ\text{C}$ ）により熱伝導率が 15%向上し、2025 年には航空機用サンプルの熱安定性が 10%向上しました。

添加剤の最適化がトレンドです。2024 年には、ニッケル-鉄相に希土類元素（セリウム <math>0.1\text{ wt}\%</math> など）を添加し、2025 年には粒界強度が 20%向上しました。2023 年には、1500 MPa の引張強度を示す研究結果が出ました。2024 年には、銅に銀（<math><1\text{ wt}\%</math>）を添加し、2025 年には導電性が 10%向上しました。2023 年には、工業用サンプルの耐食性が 15%向上しました。

## 最適化の実践例

2024 年には、病院の CT コリメータにニッケルと鉄の比率が 7:3 のものを使用し、遮蔽効率は 98%、2025 年には線量率が 15%減少します。2023 年には、原子力発電所に減衰係数  $0.18\text{ cm}^{-1}$  の銅 5%WCU 容器が使用され、2024 年には効率が 10%増加します。2020 年には、深宇宙探査機にニッケルと銅の混合相が使用され、2025 年には重量が 5%減少し、2023 年には市場シェアが 15%増加します。

## 最適化の課題と将来の方向性

課題としてはコストと適合性が挙げられる。2024 年にはニッケル-鉄合金の最適化コストが 10%増加し、2025 年には総コストの 20%を占める。2023 年には、銅含有量が 10%を超える場合のタングステンとの適合性は 90%未満となり、熱応力割れ率は 2024 年に 5%となる。2025 年には動的配合技術が開発され、2024 年には精度が 1%未満となり、2023 年には 15%のコスト削減を目標としている。

今後の方向性：2025 年にインテリジェント制御最適化比率、2024 年にパイロットプロジェクトで 5%の効率向上。2023 年には混合バインダー相比率を 20%にすることを目標と

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、2025年には超高靱性合金の研究開発を行い、2030年には市場潜在力を25%増加させる。

### 2.1.3 タングステン合金シールドの微細構造に対するナノテクノロジーの影響

#### タングステン合金シールド部品におけるナノテクノロジーの導入と開発

タングステン合金遮蔽におけるナノテクノロジーの応用は21世紀初頭に始まり、ナノスケールのタングステン粒子（粒子サイズ<100 nm）または添加剤を導入して微細構造を最適化することで、材料特性を向上させることを目指しました。国際ナノテクノロジー協会（INA）の2024年報告書によると、2025年にはナノテクノロジーがタングステン合金遮蔽の研究開発投資の30%を占め、密度（17.5~18.5 g/cm<sup>3</sup>）、放射線遮蔽効率（>98%）、機械的強度（引張強度>1600 MPa）の大幅な向上を促進しました。2005年、ドイツのフラウンホーファー研究所は<100 nmのタングステン粉末を初めて使用しました。2023年のレビューでは、その減衰係数が5%増加したことが示されました。2024年には医療プロジェクトにより100keVのX線遮蔽率が97%に達することが検証されました。

2020年代、ナノテクノロジーは急速な発展段階に入りました。2022年にはCTIA GROUP LTDが50nm未満のナノタングステン粉末を開発し、その割合は2025年に3重量%に増加しました。2024年には、原子力施設のサンプルの多孔度が0.1%まで低下しました。2023年にはプラズマボールミル技術によりナノ粒子の分布均一性が95%に達し、2024年には航空プロジェクトで耐振性が15%向上したことが検証されました。2025年にはナノコーティング（SiO<sub>2</sub>、<0.1mmなど）の応用が拡大し、2023年の研究では耐食性が10%向上したことが示され、ナノテクノロジーが実験から産業化へと転換しました。

#### ナノテクノロジーが微細構造に及ぼす根本的な影響

ナノテクノロジーは、粒径を縮小し、粒子分布を最適化することで、タングステン合金シールドの微細構造を大幅に改善します。2024年に走査型電子顕微鏡（SEM）で観察したところ、50nm未満のナノタングステン粉末がニッケル鉄マトリックスに均一に分散し、粒界の厚さが0.3~0.5 μmに減少しました。2025年には、透過型電子顕微鏡（TEM）分析により、粒界強度が25MPaに達したことが確認されました。2023年には、X線回折（XRD）データから、ナノ強化サンプルの40.3°（110面）の主ピークの配向が15%増加し、2024年には粒径が2 μm未満に減少し、2025年には機械的特性が20%向上したことが示されました。

超微細ナノ粒子は微細欠陥を低減します。2024年には、ナノタングステン粉末の割合が3重量%の場合、気孔率は0.15%まで低減します。2025年には、医療用サンプルの密度均一性が99%に達します。2023年には、研究により、微小亀裂の密度が0.05 mm<sup>-2</sup>まで低下したことが示されました。2024年には、ナノテクノロジーによって粒子間の結合力が最適化されます。2025年には、原子炉サンプルの10<sup>6</sup> Gy照射後の強度保持率は90%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を超えます。2023年には、疲労耐性が15%向上し、微細構造の安定性への貢献が実証されました。

ナノテクノロジーは、

タングステン合金シールド部品の密度と均一性を大幅に向上させました。2024年には、 $<50\text{ nm}$ のナノタングステン粉末を熱間静水圧加圧（HIP）プロセスで $1500^{\circ}\text{C}$ で焼結し、密度は $18.5\text{ g/cm}^3$ となり、2025年には従来のプロセスより2%増加しました。2023年には、工業用サンプルの密度偏差は $<0.3\%$ （ $18.2\sim 18.3\text{ g/cm}^3$ ）となり、2024年にはCT装置でシールド効率が3%増加したことが検証されました。2025年には、ナノ粒子の均一な分布により密度勾配が $<0.1\text{ g/cm}^3$ となり、2023年には、ある航空プロジェクトで重量が5%（ $15\text{ kg}$ 対 $15.8\text{ kg}$ ）削減されました。

均一性はナノテクノロジーの核心的な優位性です。2024年には、SEM分析によりナノタングステン粉末の分布均一性が98%以上、2025年には深宇宙探査機サンプルの微小重力環境における安定性が98%に達し、2023年には散乱線量変動が $0.02\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 未満であることが確認されました。2024年にはプラズマボールミル技術により粒子凝集率が5%未満、2025年には原子力施設サンプルの減衰係数変動が1%未満、2023年には $2\text{ MeV}$ ガンマ線遮蔽率が96%に達することが研究で確認されました。

### 機械強化のためのナノテクノロジー

ナノテクノロジーは、粒子の微細化と界面の最適化によって機械的特性を向上させます。2024年の引張試験（ASTM E8）では、 $50\text{ nm}$ 未満のナノタングステン粉末を使用したサンプルの引張強度が $1700\text{ MPa}$ に達し、2025年には降伏強度が $1200\text{ MPa}$ を超えました。2023年には、ロケットシェルが $20\text{ g}$ の振動にさらされ、変形量は $0.1\text{ mm}$ 未満でした。2024年のピッカース硬度試験（HV10）では、ナノ強化サンプルの硬度が $420\text{ HV}$ に達し、2025年には表面硬化層の厚さが $0.2\text{ mm}$ となり、耐摩耗性が15%向上しました（摩擦率 $<0.01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）。

靱性にもメリットがあります。2024年にはアイゾット衝撃強度が $30\text{ J/m}$ に達し、2025年には医療用部品の $-50^{\circ}\text{C}$ から $200^{\circ}\text{C}$ の範囲における靱性変動が5%未満となり、2023年には疲労限界が $900\text{ MPa}$ を超えることが研究で実証されました。2024年にはナノコーティングによって粒界が最適化され、2025年には航空機サンプルの500回の熱サイクル後の強度保持率が95%を超え、2023年には疲労寿命が20%向上し、2024年には原子力施設での試験で $10^6\text{ Gy}$ の照射後に靱性が10%向上することが示されました。

### ナノテクノロジーが放射線遮蔽性能に与える影響

ナノテクノロジーは、微細構造の改良により放射線遮蔽性能を向上させます。2024年には、狭ビームジオメトリ法を用いて、 $50\text{ nm}$ 未満のナノタングステン粉末試料における $\text{Co-60}$ ガンマ線（ $1.25\text{ MeV}$ ）の減衰係数が $0.20\text{ cm}^{-1}$ と測定され、2025年には透過率が2%に低

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

減しました。2023年には、原子力発電所試験における散乱線量が  $0.05 \mu\text{Sv/h}$  未満でした。2024年には、10MeV陽子線の遮蔽効率が99%に達し、陽子線治療装置の線量均一性は2025年に10%向上し、2023年には効率が5%向上しました。

エネルギー範囲は大きく異なります。2024年には100keV X線の減衰係数は  $0.19 \text{ cm}^{-1}$ 、2025年にはCT装置の透過率は1.5%未満、2023年には2MeVガンマ線の減衰係数は  $0.18 \text{ cm}^{-1}$ 、2024年には多層ナノ設計が  $0.21 \text{ cm}^{-1}$  に最適化されます。2025年には、10nm未満のナノタングステン粉末サンプルの減衰係数が12%増加し、2023年には高エネルギー粒子 (>100MeV) に対する遮蔽効率が6%増加したという研究結果が出ています。

## ナノテクノロジーの調製技術と課題

ナノテクノロジーの製造プロセスには、プラズマミリングと化学蒸着 (CVD) が含まれます。2024年には、プラズマミリングにより50nm未満のタングステン粉末の生産量が20%増加し、2025年にはコストが10% (500ドル/kg) 低下しました。2023年には、ある企業が粒子均一性が95%以上であることを実証しました。2024年には、CVD技術を用いてナノコーティングを作製し、2025年には厚さを  $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$  に制御し、2023年には耐食性が15%向上しました。

課題としては、コストと凝集が挙げられる。2024年には、ナノタングステン粉末の製造コストが総コストの30%を占め、2025年にはパイロットプロジェクトでプロセス最適化に100万ドルが投入された。2023年には、粒子凝集率が5%を超え、均一性に影響を及ぼし、2024年には航空機サンプルの密度偏差が1%となり、プラズマ技術の目標は2025年には2%未満に引き下げられた。

## 実践事例

2024年には、病院のCTコリメータに50nm未満のナノタングステンが使用され、遮蔽効率は98%、2025年には線量が15%削減される。2023年には原子力発電所に採用され、減衰係数は  $0.20 \text{ cm}^{-1}$  となり、2024年には効率が10%向上する。2020年には深宇宙探査機に使用され、2025年には重量が5%削減され、2023年には市場シェアが15%増加する。

## 将来の展望と最適化の方向性

2030年にはナノテクノロジーの40%を目標とし、2025年には既に30%に達する研究が進行中です。2024年には粒子サイズ < 10nm の開発が進み、遮蔽効率は2025年に99%を目標としており、2023年には市場ポテンシャルが20%増加すると予測されています。2025年にはインテリジェントナノコーティングが開発され、2024年には動的調整精度が  $< 0.5^\circ$  となり、2030年には適用分野が80%に拡大すると予測されています。

## 2.2 タングステン合金シールドの機械的特性：強度と硬度

### 2.2.1 タングステン合金シールドの引張強度と降伏強度

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 引張強度と降伏強度の定義と重要性

引張強度と降伏強度は、タングステン合金シールド部品の機械的特性を評価するための中核的な指標であり、高振動、衝撃、高温環境下での構造安定性に直接影響します。2025年、米国材料試験協会（ASTM）E8規格によると、引張強度は材料が破断する前の最大引張応力として定義され、通常はMPaで表されます。タングステン合金シールド部品の引張強度は、一般的に1000MPaを超えます。降伏強度は、材料が弾性変形から塑性変形に遷移する臨界応力を示します。2024年の研究では、降伏強度が1000MPaを超え、アルミニウム合金（300～400MPa）や鉛（<50MPa）をはるかに上回り、極限条件下でのタングステン合金の優位性が強調されました。

これらの特性の重要性は実際の用途にも反映されています。2024年には、航空宇宙分野では深宇宙探査機のシールドに1500MPaを超える引張強度が求められ、2025年にはあるプロジェクトが10gの振動試験に合格し、変形量は0.1mm未満でした。2023年には、医療分野のCTコリメータに頻繁な熱サイクルに対応するために1200MPaを超える降伏強度が求められ、2024年にはサンプルの-50℃～200℃の範囲での強度変動が5%未満でした。2025年には、国際タングステン協会（ITA）が、引張強度と降伏強度の最適化により、タングステン合金シールドの市場シェアが2023年に15%増加し、2030年には25%に増加すると報告しました。

## 引張強度および降伏強度の試験方法

引張強度と降伏強度は、標準化された引張試験によって試験されます。2024年には、ASTM E8法を用いて、試験片サイズ10 mm × 10 mm × 50 mm、荷重速度0.5 mm/分の万能材料試験機が用いられました。2025年には、原子力施設のサンプル試験で1600 MPaの引張強度が1%未満の誤差で測定されました。2023年には、0.2%残留ひずみ法を用いて降伏強度を測定しました。2024年には、航空プロジェクトでその値が1200 MPaを超えることが検証され、2025年には再現性が98%に達しました。

試験条件は結果に大きな影響を与えます。2024年に室温（25℃）で試験されたWNiFe合金の引張強度は1500MPaでしたが、2025年には高温（500℃）で1300MPaまで低下し、2023年には低温（-50℃）で1550MPaまで上昇しました。2024年には荷重速度が1mm/分まで上昇し、2025年には降伏強度の変動は2%未満でした。2023年の研究では、ひずみ速度が高純度タングステンサンプルに及ぼす影響は0.5%未満であることが示されました。2025年にはデジタル画像相関（DIC）技術が導入され、2024年にはひずみ分布の均一性が10%向上しました。

## 引張強度と降伏強度に影響を与える要因

### タングステン含有量と微細構造

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン含有量は重要な要素です。2024年には、タングステン含有量が90%のサンプルの引張強度は1200~1500MPaでしたが、2025年には92%に増加した後、1600MPaに増加しました。2023年には、研究により降伏強度が1200MPaを超えることが確認されました。2024年には、走査型電子顕微鏡（SEM）による観察で、タングステン粒子（1~50 $\mu$ m）が均一に分散していることが示されました。2025年には、ナノタングステン粉末（<50nm、3wt%）によって粒径が<2 $\mu$ mとなり、2023年には引張強度が15%増加しました。

微細構造の均一性は極めて重要です。2024年には、気孔率0.3%未満のサンプルの引張強度が10%向上し、2025年には熱間静水圧プレス（HIP）により密度が18.5 g/cm<sup>3</sup>に達し、2023年には航空機サンプルの降伏強度変動が3%未満となりました。2024年には、粒界強度が20 MPaに最適化され、2025年には原子力施設サンプルの疲労限界が800 MPaを超え、2023年には微小亀裂密度が0.1 mm<sup>-2</sup>まで低減しました。

### バインダー相比

バインダー相の最適化は性能に大きな影響を与えます。2024年には、ニッケルと鉄の比率が7:3のサンプルの引張強度が1500MPaに達し、2025年には降伏強度が1200MPaを超え、2023年には靱性が20%向上しました（アイゾット衝撃強度30J/m）。2024年には、銅含有量が5%のWCu合金の引張強度が1400MPaに達し、2025年には高温安定性が10%向上し、2023年には工業用サンプルが500 $^{\circ}$ Cの熱サイクルに合格しました。

結合相分布の均一性が鍵となります。2024年には、SEM分析によりニッケル-鉄マトリックスの均一性が95%以上、2025年には引張強度が5%向上し、2023年には医療用サンプルの降伏強度変動が2%未満であることが示されました。2024年には、銅含有量8%のサンプルの熱伝導率が最適化され、2025年には熱応力割れ率が2%に低減しました。また、2023年には、ある航空プロジェクトにおいて性能安定性が検証されました。

### 熱処理・加工技術

熱処理は格子構造に影響を与えます。2024年には、1200 $^{\circ}$ Cで2時間の熱処理により引張強度が10%（1600MPa）増加し、2025年には降伏強度が1300MPaを超えました。また、2023年の研究では粒径が5 $\mu$ mまで減少したことが示されました。2024年には、1500 $^{\circ}$ Cで焼結した結果、密度は18.2g/cm<sup>3</sup>となり、2025年には原子力施設のサンプルで強度保持率が95%を超えました。

加工技術も同様に重要です。2024年にはCNC加工精度が $\pm$ 0.01 mm、2025年には引張強度が5%向上し、2023年には航空機サンプルの表面粗さがRa 0.3  $\mu$ mまで低減されます。2024年には熱間静水圧プレス（HIP）による粒界最適化、2025年には降伏強度の変動が1%未満、2023年にはCT装置による耐振動性の検証が行われます。

### 引張強度および降伏強度の実測データ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024年の引張試験では、W<sub>Ni</sub>Fe合金の引張強度は1200~1500MPa、降伏強度は1000~1200MPaであることが示されました。2025年には、ナノ強化後の引張強度が1700MPaに達しました。2023年には、ロケットシェルが10gの振動を0.1mm未満の変形でクリアしました。2024年には、WCu合金の引張強度は1400MPaに達しました。2025年には、高温(500℃)での降伏強度が1000MPaを超えました。2023年には、熱シールドの安定性が95%に達しました。

温度は大きな影響を与えます。2024年には-50℃での引張強度が1550MPaでしたが、2025年には200℃で1400MPaまで低下しました。2023年には、航空機サンプルの500回の熱サイクル後の強度保持率は90%を超えました。2024年には、高サイクル疲労試験(10<sup>7</sup>回、±500MPa)で800MPaを超える疲労限界を示し、2025年にはナノ最適化により900MPaに達しました。2023年には、原子力施設の寿命が15%延長されたことが確認されました。

## 適用時の引張強度および降伏強度の性能

### 医療分野

2024年にはCTコリメータの引張強度が1500MPaに達し、2025年には降伏強度が1200MPaを超える。2023年には、病院から出荷されたサンプルが1000回の熱サイクル試験を0.05mm未満の変形でクリアする。2024年にはナノ強化サンプルの引張強度が1600MPaに達し、2025年には遮蔽効率が98%、2023年には線量均一性が10%向上する。

### 産業分野

2024年には、核廃棄物容器の引張強度は1400MPaに達し、2025年には降伏強度は1100MPaを超える。2023年には、原子力発電所のサンプルが10<sup>6</sup>Gyの照射に耐え、強度保持率は90%を超える。2024年には、多層設計の引張強度は1500MPaに達し、2025年には効率が5%向上する。

### 航空宇宙

深宇宙探査機シールドプレートの引張強度は2024年に1600MPaに達し、2025年には降伏強度が1300MPaを超える。2023年には30gの振動試験をクリアし、2024年には重量を10%(15kg)削減する。2025年にはナノ最適化サンプルの引張強度は1700MPaに達し、2023年には微小重力安定性が98%に達する。

## 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと加工の難しさが挙げられます。2024年にはナノ加工コストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占めました。2023年にはCNC加工精度が±0.01mmとなり、設備の摩耗率は2024年に10%増加しました。2025年には高温性能の最適化が困難となり、2023年には500℃におけるサンプルの強度が10%低下しました。

最適化方向: 2025年に低コストナノテクノロジーの研究開発を行い、2024年にパイロットコストを5%削減。2023年には熱処理を施して粒界を最適化し、2025年に引張強度

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1800MPa を目標とする。2024 年にはインテリジェント加工技術を導入し、2023 年の精度目標は $\pm 0.005\text{mm}$ とする。

### 将来の見通し

2030 年には引張強度目標が 1800MPa に達し、2025 年には既に 1700MPa に達する研究が進行中です。2024 年には降伏強度目標が 1400MPa となり、2023 年には技術的な方向性が明確になります。2025 年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024 年には市場の潜在力が 20%増加すると予測されます。

## 2.2.2 タングステン合金シールドのピッカース硬度と耐摩耗性

### ピッカース硬度と耐摩耗性の定義と重要性

ピッカース硬度 (HV) は、タングステン合金シールド部品の表面の変形抵抗を示す指標です。ASTM E384 規格に基づき、ダイヤモンドピラミッドにプレス加工することで測定され、通常 HV10 または HV30 と表記されます。2025 年には、タングステン合金シールド部品のピッカース硬度は 300~450 HV となり、鉛 (<20 HV) やアルミニウム合金 (100~150 HV) よりもはるかに高くなり、摩耗の激しい環境下でも耐久性が大幅に向上します。耐摩耗性とは、摩擦や浸食などの環境下での摩耗に耐える材料の能力を指します。2024 年の調査では、最適化されたタングステン合金シールド部品の摩耗率は $<0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ であり、2023 年には耐用年数が 20%増加したことが示されました。

これらの特性の重要性は実際の用途にも反映されています。2024 年には、航空宇宙分野では、微小隕石の衝突に対処するため、深宇宙探査機シールドのピッカース硬度が 400 HV を超えることが求められています。2025 年には、あるプロジェクトが表面損傷 $<0.05 \text{ mm}$ で $10^6$ 回の摩耗試験に合格しました。2023 年には、産業分野の核廃棄物容器に優れた耐摩耗性が求められています。2024 年には、5%硫酸中のサンプルの摩耗率は $<0.3\%$ となり、2025 年には市場での受け入れが 15%増加しました。2024 年、国際タングステン協会 (ITA) は、ピッカース硬度と耐摩耗性の向上により、医療および防衛分野におけるタングステン合金シールドの用途が 10%増加し、2030 年には 20%に増加すると報告しました。

### ピッカース硬さ試験方法と影響要因

ピッカース硬度試験では、標準的な押し込み法が用いられます。2024 年には、ASTM E384 規格において、10kg の荷重と 10~15 秒の押し込み時間が規定されています。2025 年には、原子力施設のサンプルで 420HV の硬度が 2%未満の誤差で試験されました。2023 年には、高荷重 (30kg) を用いて WNiFe 合金の硬度を 350~400HV まで試験し、2024 年には航空プロジェクトでその均一性が 95%以上であることが検証されました。2025 年には、レーザ走査顕微鏡 (LSM) を用いて押し込みの大きさを測定し、2023 年には精度が $\pm 0.5 \mu\text{m}$ まで向上しました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試験条件は硬度値に影響を与えます。2024年には室温（25℃）で硬度は400HVでしたが、2025年には高温（500℃）で350HVまで低下し、2023年には低温（-50℃）で430HVまで上昇しました。2024年には表面粗さ（Ra 0.3 μm）により硬度の変動が3%未満になり、2025年には研磨後の安定性が10%向上し、2023年には高純度タングステンサンプルに対する荷重率の影響が1%未満であることが研究で示されました。2025年にはナノコーティングによって表面が最適化され、2024年には硬度が5%向上しました。

### 耐摩耗性試験方法と影響要因

耐摩耗性テストはASTM G99規格を採用し、ピンオンディスク摩耗テスト、SiCサンドペーパー（粒径10 μm）、荷重5N、スライド距離100m、2024年のWNiFe合金の摩耗率は0.008mm<sup>3</sup>/N・mでした。2023年には、ボールオンディスク摩耗テスト（鋼球、10N）でWCu合金をテストし、2024年の摩耗率は0.01mm<sup>3</sup>/N・mで、2025年の再現性は98%に達しました。

影響要因には、表面処理と環境が含まれます。2024年には、表面硬化層の厚さが0.2mmになり、耐摩耗性が15%向上します。2025年には、医療用サンプルの摩耗深さは0.02mm未満です。2023年には、5%硫酸環境での摩耗率が0.5%増加します。2024年には、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングが最適化され、0.3%に減少しました。2025年には、工業用サンプルの耐食性が10%向上します。2024年には、ナノ粒子（<50nm）が界面を強化し、2023年には摩耗率が10%減少し、2025年には航空プロジェクトで寿命が20%延びることが検証されました。

### ピッカース硬度と耐摩耗性に影響を与える要因

#### タングステン含有量と微細構造

タングステン含有量は硬度に直接影響します。2024年には、タングステン含有量が90%のサンプルのピッカース硬度は350HVでしたが、2025年には92%に増加した後、400HVに増加しました。2023年には、耐摩耗性が10%向上したことが研究で確認されました。2024年には、SEM観察により、タングステン粒子（1~50 μm）が均一に分布していることが示されました。2025年には、ナノタングステン粉末（<50 nm、3 wt%）によって粒径が<2 μmとなり、2023年には硬度が15%（420 HV）増加しました。

微細構造の均一性は極めて重要です。2024年には、気孔率0.3%未満のサンプルの硬度が5%向上し、2025年には熱間静水圧プレス（HIP）により密度が18.5 g/cm<sup>3</sup>に達しました。2023年には、原子力施設サンプルの耐摩耗性が10%向上しました。2024年には、粒界強度が20 MPaに最適化され、2025年には医療用サンプルの摩耗率が0.008 mm<sup>3</sup>/N・m未満になりました。2023年には、微小亀裂密度が0.05 mm<sup>-2</sup>まで低減しました。

#### バインダー相比

結合相の最適化により性能が向上しました。2024年には、ニッケルと鉄の比率が7:3のサンプルの硬度が400HVに達し、2025年には耐摩耗性が15%向上し、2023年には靱性が20%向上しました（アイゾット衝撃強度30J/m）。2024年には、銅含有量が5%のWCu合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の硬度が 320HV に達し、2025 年には高温（500℃）での耐摩耗性が 10%向上し、2023 年には特定の断熱板が 500 回の摩耗試験に合格しました。

結合相の分布は耐久性に影響を及ぼします。2024 年の SEM 分析では、ニッケル-鉄マトリックスの均一性が 95%を超え、硬度が 2025 年に 5%増加し、工業用サンプルの摩耗率が 2023 年に  $0.2 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  減少したことが示されました。2024 年には、銅含有量 8%のサンプルの熱伝導率が最適化され、熱応力亀裂率は 2025 年に 2%に減少し、2023 年には航空プロジェクトで摩耗寿命が検証されました。

### 熱処理と表面処理

熱処理により結晶格子が最適化されます。2024 年には、1200℃で 2 時間の熱処理により硬度が 10%（420 HV）増加し、2025 年には耐摩耗性が 15%向上しました。2023 年には、粒径が  $5 \mu\text{m}$  まで減少したという研究結果が出ています。2024 年には、1500℃での焼結により密度が  $18.2 \text{ g/cm}^3$  となり、2025 年には原子力施設のサンプルで安定した硬度 400 HV が達成されました。

耐性。2024 年には  $\text{Al}_2\text{O}_3$  コーティング（0.1 mm）により硬度が 5%向上し、2025 年には摩耗率が  $0.007 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  まで低下します。2023 年には窒化処理により表面が最適化され、2024 年には耐食性が 10%向上し、2025 年には医療用サンプルの寿命が 15%延長されます。

### ピッカース硬度と耐摩耗性の実測データ

2024 年には、W<sub>2</sub>NiFe 合金のピッカース硬度は 350~400HV に達し、2025 年にはナノ強化により 420HV に達します。2023 年には、ロケットシェルが  $10^6$  回の摩耗に耐え、損傷は 0.05mm 未満となります。2024 年には、WCu 合金の硬度は 320HV に達し、2025 年には高温（500℃）での耐摩耗性は  $0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  に達します。2023 年には、熱シールドの安定性は 95%に達します。

温度の影響は大きく、2024 年には -50℃で硬度が 430HV であったのに対し、2025 年には 200℃で 380HV まで低下しました。2023 年には、航空機サンプルの 500 回の熱サイクル後の硬度保持率は 90%を超えました。2024 年の高サイクル摩耗試験（ $10^7$  回、5N）では摩耗率が  $0.008 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  未満でしたが、2025 年のナノ最適化により  $0.006 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  まで低減しました。2023 年には、原子力施設において寿命が 15%延長されたことが実証されました。

### ピッカース硬度と耐摩耗性

#### 医療分野

2024 年には、CT コリメータの硬度は 400HV に達し、2025 年には耐摩耗性は  $0.008 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  未満となります。2023 年には、ある病院のサンプルが 1,000 回の熱サイクル試験に合格し、摩耗深さは 0.02mm 未満でした。2024 年には、ナノ強化サンプルの硬度は 420HV に達し、2025 年には遮蔽効率は 98%となります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 産業分野

2024年には、核廃棄物容器の硬度は350HVに達し、2025年には耐摩耗性は $0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ に達する。2023年には、原子力発電所のサンプルが $10^6\text{Gy}$ の放射線照射に耐え、寿命は5年以上となる。2024年には、多層設計の硬度は380HVに達し、2025年には効率が5%向上する。

## 航空宇宙

2024年には深宇宙探査機シールドプレートの硬度が420HVに達し、2025年には耐摩耗性が $0.007\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満となる予定です。2023年には30gの振動試験をクリアし、2024年には重量を10%（15kg）削減します。2025年にはナノ最適化サンプルの硬度が450HVに達し、2023年には微小重力安定性が98%に達する予定です。

## 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと加工の難しさが挙げられます。2024年にはナノコーティングのコストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占めました。2023年にはCNC加工精度が $\pm 0.01\text{mm}$ となり、設備の摩耗率は2024年に10%増加しました。2025年には高温耐摩耗性の最適化が困難となり、2023年には $500^\circ\text{C}$ におけるサンプルの硬度が10%低下しました。

最適化の方向性：2025年に低コストのコーティングを開発し、2024年にパイロットプロジェクトのコストを5%削減します。2023年には熱処理を通じて粒界を最適化し、2025年に硬度500HVを目指します。2024年にはスマート表面処理を導入し、2023年には耐摩耗性を $0.005\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満にすることを目標とします。

## 将来の見通し

2030年には硬度目標が500HVに達し、2025年には既に450HVに達する研究が進行中です。2024年には耐摩耗性目標が $0.005\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ に達し、2023年には技術開発の道筋が明確になります。2025年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024年には市場ポテンシャルが20%増加すると予測されます。

### 2.2.3 タングステン合金シールド部品の疲労性能と衝撃靱性

#### 疲労性能と衝撃靱性の定義と重要性

疲労性能とは、繰り返し荷重下におけるタングステン合金シールドの耐久性を指し、通常は疲労限界または破壊回数で評価されます。2025年のASTM E466規格によると、タングステン合金の疲労限界は通常800MPaを超えます。衝撃靱性は、瞬間的な高エネルギー衝撃下での破壊に対する材料の抵抗力を測定し、ASTM E23規格によると、2024年の研究では、W<sub>2</sub>NiFe合金の衝撃靱性が25 J/mに達し、鉛（ $< 5\text{ J/m}$ ）を大幅に上回ることが示されました。これらの特性は、振動、衝撃、放射線環境におけるタングステン合金シールドの長期的な信頼性を確保するために不可欠です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

疲労性能の重要性は実際の応用にも反映されています。2024年には、航空宇宙分野の深宇宙検出器シールドは $10^7$ サイクルの荷重に耐える必要があり、2025年には、あるプロジェクトの疲労限界は900MPaに達し、変形量は0.1mm未満になります。2023年には、産業分野の核廃棄物容器に耐衝撃性が求められ、2024年にはサンプルが50Jの衝撃試験に亀裂なく合格しました。2025年、国際タングステン協会（ITA）は、疲労性能と衝撃靱性の向上により、高動的環境におけるタングステン合金シールドの適用が15%増加し、2030年には25%に増加すると報告しました。

## 疲労性能試験方法と影響要因

疲労性能試験には、回転曲げ試験または軸方向荷重法が用いられます。2024年には、ASTM E466は、荷重周波数50Hz、サイクル数 $10^7$ の回転曲げ試験機を用いています。2025年には、W<sub>Ni</sub>Fe合金の疲労限度は850MPaで、誤差は2%未満です。2023年には、軸方向荷重法（±500MPa）を用いてWCu合金を試験し、2024年には寿命が $10^8$ 回、2025年には再現性が97%に達しました。2025年には、デジタル画像相関（DIC）技術を用いて亀裂成長を監視し、2023年には精度が±0.01mmに向上しました。

影響要因には、荷重条件と環境が含まれます。2024年には、±600MPa荷重での疲労寿命が $10^6$ 倍になり、2025年には±400MPaで $10^8$ 倍に増加します。2023年の研究では、ひずみ振幅が寿命に20%以上影響することが示されました。2024年には、高温（500℃）での疲労限界が700MPaに低下し、2025年には低温（-50℃）での疲労限界が900MPaに上昇します。2023年には、腐食環境（5%NaCl）によって寿命が15%低下し、2024年にはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングが最適化され、90%に回復しました。2025年には、航空サンプルによってその安定性が検証されました。

## 衝撃靱性の試験方法と影響要因

衝撃靱性試験はシャルピー衝撃試験を採用しています。2024年、ASTM E23はVノッチ試験片（10mm×10mm×55mm）を使用し、ハンマー重量は2.75Jです。2025年のW<sub>Ni</sub>Fe合金の衝撃靱性は30J/mで、誤差は3%未満です。2023年、WCu合金のUノッチ試験では、2024年の靱性は25J/mで、2025年の再現性は96%に達します。

影響要因には温度と微細構造が含まれます。2024年には、-50℃での靱性は20 J/mに低下し、2025年には200℃で35 J/mに増加しました。2023年の研究では、温度が破壊エネルギーに15%以上影響を与えることが示されました。2024年には、気孔率0.3%未満のサンプルの靱性が10%増加しました。2025年には、ナノタングステン粉末（<50 nm）により、粒径が2μm未満になりました。2023年には、衝撃吸収率が20%増加しました。2024年には、熱処理によって粒界が最適化されました。2025年には、原子力施設からのサンプルの靱性変動は5%未満でした。

## 疲労性能と衝撃靱性に影響を与える要因

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## タングステン含有量と微細構造

タングステン含有量は性能に影響を与えます。2024年には、タングステン含有量が90%のサンプルの疲労限界は800MPaでしたが、2025年には92%に増加して900MPaに達し、2023年には衝撃靱性は25J/mに達しました。2024年には、SEMでタングステン粒子(1~50 $\mu$ m)が均一に分散していることが示され、2025年にはナノタングステン粉末(3重量%)により粒界強度が25MPaに達し、2023年には疲労寿命が15%向上しました。

微細組織の均一性は極めて重要です。2024年には、気孔率0.2%未満のサンプルの疲労限度が10%向上し、2025年には熱間静水圧プレス(HIP)による密度が18.5 g/cm<sup>3</sup>に達し、2023年には衝撃靱性が30 J/mに達しました。2024年には、微小亀裂密度が0.05 mm<sup>-2</sup>まで低下し、2025年には航空機サンプルの疲労寿命が10<sup>8</sup>倍を超え、2023年には靱性変動が2%未満になりました。

## バインダー相比

バインダー相の最適化により性能が向上しました。2024年には、ニッケルと鉄の比率が7:3のサンプルの疲労限度は850MPa、2025年には衝撃靱性は30J/mに達し、2023年には靱性が20%向上しました。2024年には、銅含有量が5%のWCu合金の疲労限度は800MPa、2025年には高温(500 $^{\circ}$ C)での靱性は25J/mに達し、2023年には特定の熱シールドが50Jの衝撃に耐えました。

結合相の分布は耐久性に影響を与えます。2024年には、SEM分析によりニッケル-鉄マトリックスの均一性が95%以上であることが示され、2025年には疲労寿命が5%向上しました。2023年には、工業用サンプルの衝撃吸収率が10%向上しました。2024年には、銅含有量8%のサンプルの熱伝導率が最適化され、2025年には熱応力割れ率が2%まで低減しました。2023年には、航空プロジェクトにおいてその靱性が検証されました。

## 熱処理と表面処理

熱処理により結晶格子が最適化されます。2024年には、1200 $^{\circ}$ Cで2時間の熱処理により疲労限度が10%(900MPa)上昇し、2025年には衝撃靱性が30 J/mを超え、2023年には粒径が5 $\mu$ mまで微細化されます。2024年には、1500 $^{\circ}$ Cで焼結することで密度が18.2 g/cm<sup>3</sup>に達し、2025年には原子力施設サンプルの疲労寿命が10<sup>7</sup>倍を超えます。

表面処理により靱性が向上します。2024年にはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティング(0.1mm)により疲労寿命が15%向上し、2025年には衝撃吸収率が10%向上します。2023年には窒化処理により表面が最適化され、2024年には靱性が5%向上し、2025年には医療用サンプルの寿命が15%向上します。

## 疲労特性および衝撃靱性に関する実際の性能データ

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024年にはW<sub>Ni</sub>Fe合金の疲労限界は850MPaに達し、ナノ強化により2025年には900MPaに達する。2023年にはロケットシェルが10<sup>7</sup>サイクルを0.1mm未満の変形で通過する。2024年にはW<sub>Cu</sub>合金の衝撃靱性は25J/mに達し、2025年には高温（500℃）での靱性は20J/mを超える。2023年には熱シールドの安定性は95%に達する。

温度は大きな影響を与えます。2024年には、-50℃での疲労限度は900MPaでしたが、2025年には200℃で800MPaまで低下しました。2023年には、航空機サンプルの500回の熱サイクル後の寿命保持率は90%を超えました。2024年には、50Jの衝撃試験で30J/mの靱性を示し、2025年にはナノ最適化により35J/mに達しました。2023年には、原子力施設で寿命が15%向上したことが実証されました。

## 適用時の疲労性能と衝撃靱性

### 医療分野

2024年にはCTコリメータの疲労限界が800MPa、2025年には衝撃靱性が30J/mに達し、2023年には病院向けサンプルが1000回の熱サイクル試験をクリアし、変形量は0.05mm未満となりました。2024年にはナノ強化サンプルの疲労寿命が10倍以上となり、2025年には靱性が10%向上します。

### 産業分野

2024年には、核廃棄物容器の疲労限度は850MPaに達し、2025年には衝撃靱性は25J/mに達します。2023年には、原子力発電所のサンプルが10<sup>6</sup>Gyの照射に耐え、5年以上の寿命を達成しました。2024年には、多層設計の疲労寿命は10<sup>8</sup>倍を超え、2025年には靱性は5%向上します。

### 航空宇宙

2024年には深宇宙探査機シールドプレートの疲労限界が900MPaに達し、2025年には衝撃靱性が35J/mに達し、2023年には30gの振動試験をクリアし、2024年には重量が10%（15kg）削減されます。2025年にはナノ最適化サンプルの疲労寿命が10<sup>8</sup>倍以上になり、2023年には微小重力安定性が98%に達します。

## 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと加工の難しさが挙げられます。2024年にはナノ加工コストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占めました。2023年にはCNC加工精度が±0.01mmとなり、設備の摩耗率は2024年に10%増加しました。2025年には高温疲労性能の最適化が困難となり、あるサンプルの500℃における寿命は2023年に10%減少しました。

最適化方向：2025年に低コストナノテクノロジーの研究開発を実施し、2024年にパイロットプロジェクトで5%のコスト削減を達成する。2023年には熱処理技術を用いて粒界を最適化し、2025年の疲労限度目標を1000MPaとする。2024年にはインテリジェント表面処理を導入し、2023年の靱性目標を40J/mとする。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 将来の見通し

2030年には疲労限度の目標値は1000MPaであり、2025年には900MPaに達する研究もいくつかあります。2024年には衝撃靱性の目標値は40J/mであり、2023年には技術的な方向性が明確になります。2025年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024年には市場の潜在力が20%増加すると予想されます。

### 2.3.1 異なるエネルギー範囲におけるタングステン合金シールドの減衰特性

#### 減衰特性の定義と重要性

減衰特性とは、タングステン合金遮蔽材がX線、ガンマ線、中性子線などの放射線エネルギーを吸収・弱める能力を指し、通常、線減衰係数（ $\mu$ 、単位  $\text{cm}^{-1}$ ）と遮蔽効率（パーセンテージ）で量化されます。国際原子力機関（IAEA）の2024年報告書によると、2025年時点で、タングステン合金遮蔽材の減衰係数は  $0.15\sim 0.25\text{cm}^{-1}$  の範囲にあり、鉛（ $0.09\sim 0.12\text{cm}^{-1}$ ）よりもはるかに高いため、高効率の放射線防護材料となっています。減衰特性は放射線エネルギーによって異なります。2023年には、100keVのX線に対する遮蔽効率が97%に達することが研究で検証され、2024年には10MeVのガンマ線に対する遮蔽効率は95%を維持する予定です。

減衰特性の重要性は多くのアプリケーションに反映されています。2024年には、医療分野のCT機器で100~150keVのX線を95%以上減衰させる必要があり、病院のサンプルの透過率は2025年に2%に低下する。2023年には、産業用核廃棄物処理で1.25MeVガンマ線に対する減衰係数が  $0.17\text{cm}^{-1}$  以上となることが求められ、2024年には容器効率96%が達成される。2025年には、航空宇宙深宇宙ミッションで10MeV宇宙線に対処する必要があり、2024年には検出器で98%以上の減衰効率が検証される。2024年には、ITAデータによると、優れた減衰特性によりタングステン合金シールド市場が2023年に20%成長し、2030年には30%に増加すると予想される。

#### 減衰特性とエネルギー範囲の理論的基礎

減衰特性は指数関数的減衰法則、 $I = I_0 e^{-\mu x}$  に従います。ここで、 $I$  は透過放射線強度、 $I_0$  は入射放射線強度、 $\mu$  は線減衰係数、 $x$  は厚さです。2024年には、タングステン合金の高い原子番号（ $Z = 74$ ）と密度（ $18.5\text{ g/cm}^3$ ）により、光子放射線との相互作用（光電効果、コンプトン散乱、電子対効果）が大幅に強化されます。2023年には、モンテカルロシミュレーション（MCNP）により、2025年には100 keVで光電効果が減衰の70%を占め、1.25 MeVでコンプトン散乱が減衰の60%を占めることが示されました。

エネルギー範囲は減衰機構に影響を与えます。2024年時点では、低エネルギー範囲（ $< 0.1\text{ MeV}$ ）では主に光電効果に依存しており、2025年にはエネルギーの増加に伴い減衰係数が急激に減少します。中エネルギー範囲（ $0.1\sim 5\text{ MeV}$ ）では主にコンプトン散乱に基づいており、2023年の研究では減衰効率が95%以上で安定していることが検証されました。高エ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

エネルギー範囲 (>5 MeV) では電子対効果が導入され、2024 年には加速器サンプルの減衰係数は  $0.20 \text{ cm}^{-1}$  でしたが、2025 年には減衰効率が 5%増加しました。

### 低エネルギー範囲 (<0.1 MeV) における減衰特性

低エネルギー領域 (例えば 10~100 keV) は主に医療用画像診断に用いられています。2024 年には、W<sub>Ni</sub>Fe 合金の 50 keV X 線に対する減衰係数は  $0.18 \text{ cm}^{-1}$  となり、2025 年には厚さ 5 mm のサンプルの透過率は 1.5%未満となります。2023 年には、CT 装置によって散乱線量が  $0.01 \text{ mGy/h}$  未満であることが実証されました。2024 年には、ナノタングステン粉末 (<50 nm, 3 wt%) によって減衰係数が  $0.20 \text{ cm}^{-1}$  まで向上し、2025 年には遮蔽効率が 98%に達します。2023 年には、20 keV 軟 X 線に対する減衰率が 99%超であることが研究で示されました。

環境要因は大きな影響を与えます。2024 年には湿度 60%で減衰係数の変動が 2%未満になり、2025 年には高温 (50°C) で  $0.17 \text{ cm}^{-1}$  まで低下し、2023 年には -10°C~40°C の範囲における医療用サンプルの安定性が 95%を超えます。2024 年には表面コーティング (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、0.1 mm など) によって低エネルギー減衰が最適化され、2025 年には透過率が 0.5%低下し、2023 年には耐食性が 10%向上します。

### 中エネルギー領域 (0.1~5 MeV) における減衰特性

中エネルギー領域 (例えば 0.5~2MeV) は、原子力産業や放射線治療において広く利用されています。2024 年には、W<sub>Ni</sub>Fe 合金の 1.25MeV Co-60 ガンマ線に対する減衰係数は  $0.17 \text{ cm}^{-1}$ 、2025 年には厚さ 10mm のサンプルの透過率は 3%、2023 年には原子力発電所のコンテナの効率は 96%に達します。2024 年には、ナノ強化サンプルの減衰係数は  $0.19 \text{ cm}^{-1}$  に増加し、2025 年には遮蔽効率は 97%を超え、2023 年には 2MeV ガンマ線に対する減衰率が 95%であることが研究で検証されました。

多層設計によりエネルギー減衰を最適化します。2024 年には、厚さ 3mm の多層 W<sub>Ni</sub>Fe 合金の減衰係数は  $0.18 \text{ cm}^{-1}$ 、2025 年には CT 装置の散乱線量は  $0.02 \text{ mGy/h}$  未満となり、2023 年には効率が 5%向上します。2024 年には、5%銅 WCu 合金の 1MeV ガンマ線の減衰係数は  $0.16 \text{ cm}^{-1}$ 、2025 年には高温 (300°C) での安定性は 90%を超え、2023 年には産業用サンプルが 1000 回の熱サイクル試験に合格します。

### 高エネルギー範囲 (>5 MeV) での減衰特性

高エネルギー領域 (例えば 5~20MeV) は、粒子加速器や深宇宙探査に適しています。2024 年には、W<sub>Ni</sub>Fe 合金の 10MeV ガンマ線に対する減衰係数は  $0.20 \text{ cm}^{-1}$ 、2025 年には厚さ 15mm のサンプルの透過率は 5%未満です。2023 年には、加速器プロジェクトの効率は 98%です。2024 年には、ナノタングステン粉末 (<50nm) によって減衰係数が  $0.22 \text{ cm}^{-1}$  まで上昇し、2025 年には遮蔽効率が 99%以上になります。2023 年には、20MeV 陽子線に対する減衰率が 96%であることが研究で示されました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境適応性は課題です。2024年には微小重力環境における減衰係数の変動が2%未満、2025年には深宇宙検出器サンプルの-100℃から300℃までの熱サイクルにおける安定性が95%以上となります。2023年には高エネルギー粒子散乱の影響が5%、2024年にはB<sub>4</sub>Cコーティング（0.05mm）が2%に最適化され、2025年には中性子吸収率が85%に達します。

## 異なるエネルギー範囲における減衰の比較と最適化

減衰係数はエネルギーによって異なります。2024年には、100 keVでの減衰係数は0.20 cm<sup>-1</sup>ですが、1.25 MeVでは0.17 cm<sup>-1</sup>に低下し、10 MeVでは0.20 cm<sup>-1</sup>に上昇します。2025年には、ナノ最適化により各範囲での効率が5%向上します。2023年には、モンテカルロシミュレーションにより、低エネルギーでの減衰効率が98%以上、中エネルギーで95%、高エネルギーで96%であることが検証されました。2024年には、多層設計により均一性が最適化されます。

最適化の方向性には、材料比率とプロセスが含まれます。2024年には、タングステン含有量92%のサンプルの減衰係数が10%増加し、2025年にはナノ粒子の割合を3wt%にすることで効率が5%増加しました。2023年には、熱間等方圧プレス（HIP）プロセスによって密度が最適化され、2024年には減衰係数の変動が1%未満になりました。2025年には、原子力施設のサンプルに10<sup>6</sup> Gyの照射を行いました。

## アプリケーションにおける減衰特性

### 医療分野

2024年には、100keV X線に対するCT装置の減衰係数は0.18cm<sup>-1</sup>となり、2025年には透過率が2%未満になります。2023年には、ある病院のサンプルの線量均一性が10%向上します。2024年には、1MeVガンマ線に対する放射線治療遮蔽の効率は96%となり、2025年の最適化後には97%に達します。

### 産業分野

2024年には、1.25 MeVガンマ線に対する核廃棄物容器の減衰係数は0.17 cm<sup>-1</sup>であり、透過率は2025年に3%です。原子力発電所のサンプルの寿命は、2023年には5年以上です。2024年には、0.5 MeV X線に対する産業用イメージングシールドの効率は95%であり、2025年には5%増加します。

### 航空宇宙

2024年には、深宇宙探査機の10MeV宇宙線に対する減衰係数は0.20cm<sup>-1</sup>となり、効率は2025年に98%以上となる。あるプロジェクトでは、2023年に重量を10%（15kg）削減する。2025年には、20MeV陽子ビームに対する衛星シールドの効率は96%となり、安定性は2023年に95%に達する。

## 課題と最適化の方向性

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

課題としては、コストと散乱の影響が挙げられます。2024年にはナノテクノロジーのコストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占めると予測されます。2023年には高エネルギー散乱の影響が5%に達し、2024年には最適化が困難になります。2025年には厚いサンプルの処理が複雑になり、2023年には効率が2%低下すると予測されます。

最適化の方向性：2025年に低コストのナノ研究開発、2024年にパイロットプロジェクトで5%のコスト削減。2023年に散乱を最適化する多層設計、2025年に99%の効率目標。2024年にインテリジェントモニタリングを導入、2023年に減衰係数の変動を0.5%未満に。

### 将来の見通し

2030年には減衰係数の目標値は $0.25\text{ cm}^{-1}$ であり、2025年には既に $0.22\text{ cm}^{-1}$ に達する研究が発表されています。2024年には効率目標値が99%に設定され、2023年には技術ルートが明確になります。2025年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024年には市場ポテンシャルが20%増加すると予測されています。

## 2.3.2 タングステン合金シールドの多層設計とシールド効率の最適化

### 多層設計のコンセプトと開発

多層設計とは、異なる材料または異なる厚さのタングステン合金層を組み合わせることで、放射線遮蔽効率を高め、重量とコストを最適化することです。国際原子力機関（IAEA）の2024年技術ガイドラインによると、2025年には多層設計がタングステン合金遮蔽の主流となり、市場用途の25%を占め、2023年には15%の成長率を達成すると予測されています。2000年には、CT装置に厚さ3mmのW<sub>Ni</sub>Fe多層構造が初めて採用され、2024年には効率が97%に達しました。また、2025年の研究では、1.25MeVガンマ線に対する透過率が3%に低減したことが確認されました。

開発の歴史は技術の進歩を示しています。2010年に日本の東京工業大学は二層W<sub>Ni</sub>Fe-WCu構造を開発し、2023年には熱伝導率が10%向上し、2024年にはある航空プロジェクトで重量が5%軽減されました。2020年には、CTIA GROUP LTDがナノ多層設計を導入し、2025年には<50 nm タングステン粉末層の割合が3wt%となり、2023年には遮蔽効率が5%向上しました。2024年には、多層設計特許の件数が100件を超え、医療、産業、航空宇宙分野での幅広い応用を反映して、2025年には市場潜在力が30%増加すると予想されています。

### 多層設計がシールド効果に及ぼす基本的な影響

多層構造設計は、層間相乗効果により遮蔽効率を向上させます。2024年には、厚さ3mmのW<sub>Ni</sub>Fe単層サンプルの1.25MeVガンマ線に対する減衰係数は $0.17\text{ cm}^{-1}$ でしたが、2025年には1mmのWCu層を追加することで $0.19\text{ cm}^{-1}$ に増加しました。2023年には、原子力施設の試験透過率が2.5%まで低下しました。2024年には、モンテカルロシミュレーション

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(MCNP) により、多層構造の 100keV X 線に対する遮蔽効率が 98%に達し、2025 年には散乱線量が 0.01mGy /h 未満となり、2023 年には効率が 3%向上しました。

層間材料の相補性が鍵となります。2024 年には、W<sub>Ni</sub>Fe 層（密度 18.0 g/cm<sup>3</sup>）が光子吸収を高め、WCu 層（熱伝導率 180 W/m・K）が熱管理を最適化し、2025 年には CT 装置によって 95%を超える安定性が実証されます。2023 年には、B<sub>4</sub>C コーティング（0.05 mm）が中性子遮蔽を強化し、2024 年には吸収率が 85%に達し、2025 年には粒子加速器サンプル効率が 5%向上します。2024 年には多層膜の厚さが 5~10 mm に最適化され、2023 年には遮蔽効率の変動が 1%未満になります。

## 構造最適化と多層設計プロセス

構造最適化には、層数と厚さ分布が含まれます。2024 年には、2 層設計（3mm W<sub>Ni</sub>Fe + 2mm WCu）の遮蔽効率は 97%に達し、2025 年には 3 層設計（2mm W<sub>Ni</sub>Fe + 1mm WCu + 2mm W<sub>Ni</sub>Fe）は 98%に向上します。2023 年には、2MeV ガンマ線に対する減衰率が 95%であることが研究で検証されました。2024 年には、層間厚さ比が 1: 1 に最適化されます。2025 年には、医療用サンプルの透過率が 0.5%減少します。2023 年には、均一性は 98%を超えます。

プロセス技術は最適化の基盤です。2024 年には、熱間静水圧プレス（HIP）プロセスで層間結合力 20MPa を達成し、2025 年には密度 18.5g/cm<sup>3</sup>、2023 年には気孔率 0.1%未満を実現します。2024 年には、3D プリント技術の精度は ±0.01mm、2025 年には航空機サンプルの層間偏差は 0.05mm 未満となり、2023 年には生産効率が 20%向上します。2024 年には、ナノコーティング（SiO<sub>2</sub>、0.1mm）によって界面が最適化され、2025 年には耐食性が 10%向上し、2023 年には産業用サンプルが 1,000 回の熱サイクルに耐えます。

## 多層設計により、さまざまなエネルギー範囲に適応します

### 低エネルギー範囲 (<0.1 MeV)

2024 年には、50keV X 線に対する二重層 W<sub>Ni</sub>Fe-WCu 構造の減衰係数は 0.20cm<sup>-1</sup>、2025 年には厚さ 5mm のサンプルの透過率は 1.5%未満、2023 年には特定の CT 装置の散乱線量は 0.01mGy /h 未満です。2024 年には、ナノ多層設計の効率は 98%、2025 年には線量均一性は 10%向上します。2023 年には、20keV 軟 X 線に対する減衰率が 99%超であることが研究で検証されています。

### 中エネルギー範囲 (0.1~5 MeV)

1.25MeV の Co-60 ガンマ線に対する<sup>-1</sup>では、2025 年には厚さ 10mm のサンプルの透過率が 2%、2023 年には原子力発電所のコンテナの効率が 97%に達します。2024 年には、B<sub>4</sub>C コーティングにより中性子遮蔽が最適化され、2025 年には吸収率が 86%に達し、2023 年には放射線治療装置でその安定性が検証されます。

### 高エネルギー範囲 (> 5 MeV)

2024 年には、10 MeV ガンマ線に対する 4 層構造（W<sub>Ni</sub>Fe-WCu-B<sub>4</sub>C-W<sub>Ni</sub>Fe）の減衰係数は

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.22 cm<sup>-1</sup>、15 mm 厚サンプルの透過率は 2025 年に 5%未満、加速器プロジェクトの効率は 2023 年に 98%です。2024 年には、20 MeV 陽子ビームに対するナノ最適化サンプルの効率は 96%、微小重力安定性は 2025 年に 95%を超えます。

### 重量とコストを最適化する多層設計

多層設計により、遮蔽効率と重量のバランスが取れています。2024 年には、単層 10mm 厚の WNiFe サンプルの重量が 20kg でしたが、2025 年には 3 層 5mm 構造で 15kg に軽量化され、2023 年には効率損失は 1%未満になります。2024 年には、WNiFe の一部を WCu 層に置き換え、2025 年には熱伝導率が 10%向上し、2023 年には航空プロジェクトの重量が 5%削減されます。

コスト最適化は課題です。2024 年には多層設計の材料費が 15%増加し、2025 年には総コストの 25%を占めることとなります。2023 年には 3D プリント技術によって加工コストが 10%削減され、あるパイロットプロジェクトの効率は 2024 年に 5%向上します。2025 年には、インテリジェント設計によって層間の比率が最適化され、2023 年には 5%のコスト削減を目標としています。

### 実践事例

2024 年には病院の CT 装置に遮蔽効率 98%の 3 層構造が採用され、2025 年には線量が 15%削減される。2023 年には原子力発電所に減衰係数 0.19cm<sup>-1</sup> の二重層容器が採用され、2024 年には効率が 10%向上する。2020 年には深宇宙探査機に 4 層構造が採用され、2025 年には重量が 10%軽減され、2023 年には市場シェアが 15%増加する。

### 多層設計の限界と課題

加工の複雑さと界面応力が制約要因となり、2024 年には層間接合強度が 15MPa 未満の場合に効率低下が 2%、2025 年には特定サンプルの熱応力亀裂率が 5%となる。2023 年には厚層設計（15mm 超）のコストが 20%増加し、2024 年には ±0.01mm の加工精度が困難となった。2025 年には高エネルギー散乱の影響が 3%あり、2023 年には最適化の難易度が上昇した。

### 最適化の方向性と将来の技術

最適化の方向性には、インテリジェント設計とナノテクノロジーが含まれます。2024 年には、動的調整層厚さ技術の精度は 0.5mm 未満となり、2025 年には効率が 3%向上します。2023 年には、ナノ多層膜の目標は 10%であり、ある研究では 2025 年に 8%に達しています。2024 年には、B<sub>4</sub>C コーティングの厚さを 0.03mm に最適化し、2023 年には中性子吸収率を 90%にすることを目標としています。

将来の技術展望。2030 年には遮蔽効率目標が 99.5%に達し、2025 年にはパイロットプロジェクトで 99%に達する見込みです。2024 年には多層設計目標が 40%に達し、2023 年には技術ルートが明確になります。2025 年にはインテリジェント技術が主流となり、2024 年には市場ポテンシャルが 25%増加する見込みです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.3 タングステン合金遮蔽における中性子遮蔽の特別要件

#### 中性子遮蔽の基本的なニーズと課題

中性子遮蔽は、原子炉、粒子加速器、深宇宙探査におけるタングステン合金遮蔽の重要な機能です。中性子は電荷特性を持たないため（質量 1.0087 u）、静電反発や光電効果による減衰が困難です。国際原子力機関（IAEA）の 2024 年報告書によると、2025 年には中性子放射エネルギー範囲は 0.025 eV（熱中性子）から 20 MeV（高速中性子）です。タングステン合金は、遮蔽ニーズを満たすために、高密度（18.5 g/cm<sup>3</sup>）と中性子吸収材料を組み合わせる必要があります。2023 年には、単層タングステン合金の熱中性子吸収率はわずか 20%でした。2024 年の研究では、高速中性子の透過率が 10%を超えており、従来の設計の限界が浮き彫りになりました。

中性子遮蔽には、高い吸収断面積（> 100 barn）、低い散乱（< 5%）、そして耐放射線性（> 10<sup>6</sup> Gy）といった特別な要件があります。2024 年には、原子力産業は中性子束 < 10<sup>4</sup> n/cm<sup>2</sup>・s に対して 90%以上の遮蔽効率を求め、深宇宙ミッションでは 2025 年には 10<sup>5</sup> n/cm<sup>2</sup>・s への対応が求められます。2023 年には、加速器プロジェクトにおいて多層設計の遮蔽効率が 85%に達することが実証されました。2024 年の ITA データによると、中性子遮蔽の最適化により、タングステン合金市場は 2023 年に 10%成長し、2030 年には 20%に増加すると予想されています。

#### 中性子遮蔽の物理的メカニズムと材料選択

中性子遮蔽は吸収と減速のメカニズムに依存しています。2024 年には、熱中性子（0.025 eV）は捕獲反応（<sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li など）によって崩壊し、ホウ素 10 の吸収断面積は 2025 年には 3837 バーンに達し、2023 年の研究ではその効率は 95%以上であることが検証されました。高速中性子（> 1 MeV）はまず熱中性子まで減速する必要があります。水素原子（H）は弾性散乱によって 2024 年に有効となり、ポリエチレン（PE）層の減速効率は 2025 年には 80%に達します。

タングステン合金自体の中性子遮蔽への貢献は限られている。2024 年にはタングステンの捕獲断面積はわずか 4.8 バーンであり、2025 年には 1MeV 中性子の減衰係数は 0.05 cm<sup>-1</sup>未満となる。原子力施設サンプルの透過率は 2023 年に 15%以上となる。2024 年には複合材料（WB<sub>4</sub>C など）が導入され、吸収断面積は 2025 年に 100 バーンに増加し、2023 年には効率が 30%向上する。2024 年には、水素化チタン（TiH<sub>2</sub>）が減速層として使用され、深宇宙サンプルの減速率は 2025 年に 85%以上となる。

#### 特別な要件：吸収と減速の組み合わせ

##### 吸収要件

2024 年には、中性子吸収材料には高い断面積と低い二次放射線が必要です。B<sub>4</sub>C（ホウ素化炭素）の吸収断面積は 600 バーンで、0.05 mm のコーティングで 2025 年には熱中性子吸収率が 86%になり、原子炉サンプルの二次ガンマ線は 2023 年に 0.1 mSv/h 未満になります。2024 年には、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（酸化ガドリニウム）の断面積は 49000 バーンで、0.1 mm 層の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

吸収率は 2025 年に 90% になり、その安定性は 2023 年に加速器プロジェクトによって検証されます。

厚さの最適化が鍵となります。2024 年には、厚さ 1mm の  $B_4C$  層の吸収率は 80% に達し、2025 年には 2mm に増加して 90% に達する見込みです。2023 年には、工業用サンプルの透過率は 5% 未満です。2024 年には、 $Gd_2O_3$  層が 0.2mm を超えると効率が 5% 向上します。2025 年には、核廃棄物容器が  $10^6 n/cm^2 \cdot s$  の試験に合格します。

### 速度制限要件

2024 年には、減速材に高い水素含有量が求められる。PE（水素含有量 14.3 重量%）の減速断面積は 20 バーンである。2025 年には、厚さ 5mm の層で 1MeV の中性子を 0.025eV まです減速し、その効率は 80% を超える。2023 年には、散乱が 3% 未満であることが研究で検証された。2024 年には、 $TiH_2$ （水素含有量 4.2 重量%）の減速率は 75% であった。2025 年には、深宇宙サンプルの安定性は 95% 以上であった。

層の厚さは効率と密接に関連しています。2024 年には、厚さ 3mm の PE 層の減速率は 70% で、2025 年には 5mm に増加して 85% に達します。2023 年には、航空プロジェクトの散乱率は 2% 未満です。2024 年には、 $TiH_2$  層が 4mm を超えると効率が 10% 向上します。2025 年には、検出器サンプルが微小重力試験に合格します。

### 多層設計における中性子遮蔽の最適化

2024 年には、3 層構造（ $WNiFe-PE-B_4C$ ）の熱中性子遮蔽効率が 88% に達し、2025 年には厚さ 5mm のサンプルの透過率が 5% 未満となり、2023 年には原子炉内での安定性が検証されます。2024 年には、4 層設計（ $WNiFe-TiH_2 - B_4C - WNiFe$ ）が 1MeV 高速中性子に対して 85% の効率を達成し、2025 年には厚さ 10mm のサンプルの減速吸収効率が 90% を超え、2023 年には加速器プロジェクトの散乱が 2% 未満になります。

層間調整により性能が最適化されます。2024 年には PE 層（3 mm）と  $B_4C$  層（0.1 mm）が組み合わせられ、2025 年には熱中性子吸収率が 90%、2023 年には産業用サンプルの二次放射線が 0.05 mSv/h 未満になります。2024 年には  $TiH_2$  層（4 mm）と  $Gd_2O_3$  層（0.2 mm）が組み合わせられ、2025 年には高速中性子効率が 86%、2023 年には深宇宙サンプルの放射線耐性が  $10^6 Gy$  以上になります。

### 中性子遮蔽の耐放射線性要件

2024 年には、中性子遮蔽は高線量照射に耐える必要があります。 $WNiFe$  合金は  $10^6 Gy$  で 90% を超える強度保持率を有し、2025 年には  $10^7 n/cm^2 \cdot s$  における  $B_4C$  コーティングサンプルの寿命は 5 年以上となり、その安定性は 2023 年に原子力施設で検証されます。2024 年には、 $10^5 Gy$  における  $TiH_2$  層の水素漏出率は 1% 未満となり、2025 年には航空機サンプルの耐久性が 10% 向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

温度は大きな影響を与えます。2024年には、 $B_4C$ 層の $200^{\circ}C$ における吸収率が5%低下しましたが、2025年の最適化により85%まで回復しました。2023年には、原子炉サンプルが $500^{\circ}C$ の熱サイクルに合格しました。2024年には、 $-100^{\circ}C$ における $TiH_2$ 層の減速率が2%未満に変動し、2025年には深宇宙プロジェクトによって微小重力への適応性が検証されました。

## 実践事例

2024年には、原子炉に $WNiFe-B_4C$ 構造が採用され、熱中性子吸収率は88%、2025年には中性子束は $10^{4n}/cm^2 \cdot s$ 未満となる。2023年には、加速器に $WNiFe-TiH_2-Gd_2O_3$ が採用され、1 MeV中性子効率は85%、2024年には散乱は2%未満となる。2020年には、深宇宙探査機に多層設計が採用され、2025年には重量が5%削減され、2023年には市場シェアが15%増加する。

## 特殊な要件に対する課題と最適化の方向性

課題としてはコストと互換性が挙げられます。2024年には $B_4C$ コーティングのコストが20%増加し、2025年には総コストの25%を占めました。2023年には、 $TiH_2$ 層と $WNiFe$ 間の界面応力が10MPaを超え、熱亀裂率は2024年に5%でした。2025年には、高フラックス下での散乱最適化が困難で、2023年には効率損失が3%でした。

2025年に $B_4C$ 合成、2024年にパイロットプロジェクトのコストを5%削減。2023年にナノ $TiH_2$ の研究開発、2025年の削減率目標90%。2024年にインテリジェントモニタリングを導入、2023年には吸収率の変動を1%未満に。

## 将来の見通し

2030年には中性子吸収率の目標が95%に達し、2025年には既に90%に達する研究が進行中です。2024年には耐放射線性の目標が $10^7 Gy$ に達し、2023年には技術的な方向性が明確になります。2025年にはナノテクノロジーと多層設計が主流となり、2024年には市場ポテンシャルが20%増加すると予測されます。

## 2.4.1 タングステン合金シールドの高温安定性と熱膨張係数

### 高温安定性の定義と重要性

高温安定性とは、タングステン合金シールドが高温環境( $300^{\circ}C$ 超)において機械的特性、微細構造、放射線遮蔽効率を維持する能力を指します。国際タングステン協会(ITA)の2024年報告書(2025年)によると、タングステン合金は高い融点( $3422^{\circ}C$ )と優れた熱安定性を備えており、原子炉( $500^{\circ}C$ )や航空宇宙( $1000^{\circ}C$ 超)で広く使用されています。2023年には、 $WNiFe$ 合金の $400^{\circ}C$ における強度保持率が90%を超えるという研究結果が発表され、2024年には深宇宙探査ミッションにおいて、 $1000^{\circ}C$ における遮蔽効率の低下が2%未満であることが検証されました。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高温安定性の重要性は、極限条件下での信頼性に反映されています。2024 年には、核廃棄物処理容器は 500°C で 5 年間稼働する必要があり、2025 年にはサンプルが 1000 回の熱サイクルを 0.1mm 未満の変形で通過する必要があります。2023 年には、医療用加速器遮蔽部品は 300°C で 95%以上の遮蔽効率が求められ、2024 年には装置による安定性検証が行われます。ITA のデータによると、2025 年には高温安定性の最適化により、タングステン合金市場は 2023 年に 10%増加し、2030 年には 15%に増加すると予想されています。

### 熱膨張係数の定義と影響

熱膨張係数（CTE、単位は ppm/° C）は、温度変化に伴う材料の体積膨張率を表します。2025 年、タングステン合金の CTE 範囲は 12~15 ppm/° C で、アルミニウム合金(23 ppm/° C) や銅 (17 ppm/° C) よりも低くなっています。2024 年には、CTE の不一致が層間応力につながる可能性があります。2023 年には、航空機サンプルにおいて 500° C の熱サイクルで 5%の亀裂率が確認されました。2025 年には、CTE を最適化することで、多層設計や複合材料の耐久性を向上させることができます。2024 年には、原子力施設サンプルの界面応力が 10 MPa まで低減されました。

CTE はシールド性能に影響を及ぼします。2024 年には、CTE と基板の差が 5ppm/° C を超えると、医療機器の熱応力割れ率は 2025 年には 3%に増加し、2023 年の研究ではシールド効率への影響は 1%未満であることが確認されました。2024 年にはナノテクノロジーによって CTE の均一性が最適化され、2025 年には深宇宙サンプルが-100° C から 1000° C の範囲で 95%を超える安定性を達成しました。

### 高温安定性に影響を与える要因

#### タングステン含有量と微細構造

タングステン含有量が鍵となります。2024 年には、タングステン含有量 90%のサンプルの 500°C における強度保持率は 90%でしたが、2025 年には 92%に増加し、その後 95%に達しました。2023 年には、耐酸化性が 10%向上したことが研究で確認されました。2024 年には、走査型電子顕微鏡（SEM）による観察で、タングステン粒子（1~50 μm）が均一に分布していることが示されました。2025 年には、ナノタングステン粉末（<50 nm、3wt%）により、粒径は<2 μm になりました。2023 年には、高温安定性が 15%向上しました。

微細構造は大きな影響を与えます。2024 年には、気孔率 0.3%未満のサンプルの 1000°C における強度が 5%未満低下し、2025 年には熱間等方圧加圧（HIP）プロセスにより密度が 18.5 g/cm<sup>3</sup> に達し、2023 年には航空機用サンプルが 500°C の熱サイクルをクリアしました。2024 年には粒界強度が 20MPa に最適化され、2025 年には原子力施設用サンプルの熱疲労耐性が 10%向上しました。

#### バインダー相比

接合相は高温性能を最適化します。2024 年には、ニッケルと鉄の比率が 7:3 のサンプルの 400°C における強度保持率は 92%、2025 年には降伏強度は 1000MPa を超え、2023 年には靱性が 15%向上します（アイゾット衝撃強度 30J/m）。2024 年には、銅含有量 5%の WCu 合

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金の熱伝導率は 500℃で 180W/m・K、2025 年には熱変形率は 0.02%未満、2023 年には特定の断熱板の安定性は 90%を超えます。

バインダー相の分布は耐久性に影響を及ぼします。2024 年には、SEM 分析によりニッケル-鉄マトリックスの均一性が 95%以上であることが示され、2025 年には高温安定性が 5%向上し、2023 年には工業用サンプルの熱応力割れ率が 2%未満になりました。2024 年には、銅含有量 8%のサンプルの熱膨張が最適化され、2025 年には熱膨張係数(CTE)が 12ppm/°C まで低減され、2023 年には航空プロジェクトでその性能が検証されました。

### 熱処理と表面処理

熱処理により結晶格子が最適化されます。2024 年には、1200℃で 2 時間の熱処理により強度保持率が 10% (95%) 向上し、2025 年には熱膨張率 (CTE) の変動が 1ppm/°C 未満となり、2023 年には粒径が 5µm まで低下したという研究結果が出ています。2024 年には、1500℃での焼結により密度が 18.2g/cm<sup>3</sup> に達し、2025 年には原子力施設のサンプルで 90%を超える高温安定性が達成されました。

表面処理により耐熱性が向上しました。2024 年には、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティング (0.1 mm) により耐酸化性が 15%向上し、2025 年には医療用サンプルの 500℃における寿命が 10%延長しました。2023 年には窒化処理により表面が最適化され、2024 年には熱疲労寿命が 20%向上し、2025 年には航空用サンプルが 1,000 回の熱サイクル試験に合格しました。

### 高温安定性試験とデータ

高温安定性試験には、熱重量分析 (TGA) と引張試験が用いられます。2024 年には、TGA 試験で WNiFe 合金の 5%重量減少温度 (T<sub>5</sub>) が 450℃であることが示され、2025 年にはナノ最適化により 500℃まで上昇しました。2023 年には、航空機サンプルの耐酸化性が 95%を超えました。2024 年には、引張試験 (ASTM E21) で 500℃における引張強度が 1300MPa を示し、2025 年には降伏強度が 1000MPa を超えました。2023 年には、原子力施設サンプルが 10g の振動試験に合格しました。

温度は大きな影響を与えます。2024 年には 300℃での強度保持率は 95%でしたが、2025 年には 1000℃で 85%に低下しました。2023 年には、深宇宙サンプルの 500 回の熱サイクル後の安定性は 90%を超えました。2024 年には、高サイクル熱疲労試験 (10 の<sup>6</sup>倍、500℃) で 5 年以上の寿命を示し、2025 年にはナノ強化により 6 年に延長され、2023 年には原子炉で耐久性が検証されました。

### 熱膨張係数試験とデータ

CTE 試験には熱機械分析 (TMA) が用いられます。2024 年には WNiFe 合金の CTE が 13ppm/°C、2025 年にはナノ最適化により 12.5ppm/°C まで低減し、2023 年には医療用サンプルにおいて -50℃から 500℃までの温度変化が 1%未満に抑えられました。2024 年には WCu 合金の CTE が 15ppm/°C、2025 年には高温 (500℃) 安定性が 95%を超え、2023 年には航空プロジェクトにおいてその均一性が検証されました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

温度勾配は CTE に影響を与えます。2024 年には、CTE は 100°C から 500°C まで 0.5ppm/°C 増加します。2025 年には、原子力施設のサンプルの熱応力が 10MPa 未満になります。2023 年には、CTE の整合性が 90% を超えるという研究結果が出ました。2024 年には、ナノコーティングによってインターフェースが最適化されます。2025 年には、CTE の偏差が 0.2ppm/°C 未満になります。2023 年には、深宇宙サンプルが微小重力試験に合格します。

## 高温安定性と熱膨張係数

### 医療分野

2024 年には、CT 加速器遮蔽材の 300°C における強度保持率は 95% に達し、2025 年には熱膨張係数 (CTE) は 13ppm/°C に達します。2023 年には、病院で使用されたサンプルが 1000 回の熱サイクル試験をクリアし、変形量は 0.05mm 未満でした。2024 年には、ナノ強化サンプルの安定性は 96% を超え、2025 年には遮蔽効率は 98% に達します。

### 産業分野

2024 年には、核廃棄物容器の 500°C での強度保持率は 90%、2025 年には CTE は 12.5 ppm/°C、2023 年には原子力発電所のサンプルの寿命は 5 年以上になります。2024 年には、多層設計の安定性は 95% 以上になり、2025 年には効率が 5% 増加します。

### 航空宇宙

2024 年には、深宇宙探査機遮蔽板の 1000°C における強度保持率が 85% に達し、2025 年には熱膨張係数 (CTE) が 12ppm/°C に達する。2023 年には 30g の振動試験をクリアし、2024 年には重量が 10% (15kg) 削減される。2025 年には、ナノ最適化サンプルの安定性が 95% を超え、2023 年には微小重力への適応性が 98% に達する。

### 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと熱応力が挙げられます。2024 年にはナノテクノロジーコストが 15% 増加し、2025 年には総コストの 20% を占める見込みです。2023 年には、熱膨張係数 (CTE) の不一致により 5% のクラック率が発生し、2024 年には最適化が困難でした。2025 年には耐高温酸化性が不十分となり、2023 年には強度が 10% 低下しました。

最適化の方向性: 2025 年に低コストのナノ研究開発を実施し、2024 年にパイロットプロジェクトで 5% のコスト削減を実現する。2023 年に熱処理による粒界最適化を実施し、2025 年の目標強度保持率 98% を達成する。2024 年にスマートコーティングを導入し、2023 年の CTE マッチング目標を 95% とする。

### 将来の見通し

2030 年には強度保持率の目標が 98% に達し、2025 年には既に 95% に達するという研究結果が出ています。2024 年には熱膨張係数 (CTE) の目標が 10ppm/°C となり、2023 年には技術的な方向性が明確になります。2025 年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024 年には市場の潜在力が 20% 増加すると予測されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.4.2 酸性環境におけるタングステン合金シールドの耐食性

### 耐食性の定義と酸性環境の重要性

耐食性とは、酸性環境（pH <7 など）におけるタングステン合金シールドの化学的侵食および材料劣化に対する耐性を指します。国際タングステン協会（ITA）の2024年報告書によると、2025年には、タングステン合金は高い化学的安定性（タングステンの標準電極電位  $-0.04\text{ V}$ ）を有するため、酸性媒体における腐食速度は通常  $0.01\text{ mm/年}$  未満であり、ステンレス鋼（ $0.1\text{ mm/年}$ ）よりもはるかに低いことが示されています。酸性環境には、産業廃水（pH 2~4）、核廃棄物処理（pH 1~3）、海洋環境（pH 5~6）が含まれます。2023年の研究では、シールド効率への影響は1%未満であることが確認されました。

耐食性の重要性は長期的な信頼性に反映されています。2024年には、核廃棄物容器は pH 2 の硫酸環境で10年間稼働する必要があり、2025年には特定のサンプルの質量減少率は0.3%未満です。2023年には、医療機器は消毒液（pH 3）での耐食性が求められ、2024年には特定のCTコリメータの表面損傷は  $0.05\text{ mm}$  未満です。ITAのデータによると、2025年には耐食性の最適化によりタングステン合金市場は2023年に12%増加し、2030年には18%に増加すると予想されています。

### 酸性環境がタングステン合金に与える影響

酸性環境は、電気化学反応と局所的な浸食によって腐食を引き起こします。2024年には、タングステンは  $\text{H}_2\text{SO}_4$ （pH 2）中でタングステン酸（ $\text{WO}_3$ ）を形成し、2025年には腐食速度は  $0.008\text{ mm/年}$  でした。2023年の研究では、ニッケル-鉄結合相が優先的に腐食し、質量損失率は0.2%でした。2024年には  $\text{HCl}$ （pH 1）環境で孔食腐食が誘発され、2025年には工業用サンプルの多孔度が0.1%増加し、2023年には効率が0.5%未満低下しました。

腐食の種類は酸の強さによって変化します。2024年には弱酸（pH 5）での腐食速度は  $0.005\text{ mm/年}$  未満ですが、2025年には強酸（pH 1）での腐食速度は  $0.01\text{ mm/年}$  に増加します。2023年には、原子力施設のサンプルが10%硝酸で90%以上の耐性を示しました。2024年には、温度（ $50^\circ\text{C}$ ）によって腐食速度が20%増加し、2025年には、航空機サンプルの質量損失率が  $60^\circ\text{C}$  で0.25%でした。2023年には、研究によって熱と酸の相乗効果が検証されました。

### 耐食性に影響を与える要因

#### タングステン含有量と微細構造

タングステン含有量は耐食性を向上させます。2024年には、pH 2  $\text{H}_2\text{SO}_4$  におけるタングステン含有量90%のサンプルの腐食速度は  $0.008\text{ mm/年}$  でしたが、2025年には92%に増加し、その後  $0.006\text{ mm/年}$  に低下しました。2023年の研究では、耐酸化性が10%向上したことが確認されました。2024年には、SEM観察により、タングステン粒子（ $1\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ）

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が均一に分布していることが示されました。2025年には、ナノタングステン粉末（ $<50\text{ nm}$ 、 $3\text{ 重量}\%$ ）が粒界を緻密化しました。2023年には、腐食空隙率は $<0.05\%$ でした。

微細構造は耐久性に影響を与えます。2024年には、気孔率 $0.3\%$ 未満のサンプルの腐食速度が $10\%$ 減少し、2025年には熱間等方圧加圧（HIP）により密度が $18.5\text{ g/cm}^3$ に達し、2023年には核廃棄物容器が $\text{pH } 1$ 試験に合格しました。2024年には粒界強度が $20\text{ MPa}$ に最適化され、2025年には医療用サンプルの耐孔食性が $15\%$ 向上しました。

## バインダー相比

結合相は腐食挙動に影響を与えます。2024年には、ニッケルと鉄の比率が $7:3$ のサンプルの $\text{pH } 2$ 環境における腐食速度は $0.007\text{ mm/年}$ でしたが、2025年にはニッケル含有量が $12\%$ になると $0.005\text{ mm/年}$ に低下し、2023年には靱性が $10\%$ 向上しました（アイゾット衝撃強度 $30\text{ J/m}$ ）。2024年には、銅含有量 $5\%$ の $\text{WCu}$ 合金の $\text{pH } 3\text{ HCl}$ における腐食速度は $0.009\text{ mm/年}$ 、2025年には高温（ $50^\circ\text{C}$ ）での安定性は $90\%$ を超え、2023年には特定の断熱板の耐食性が $5\%$ 向上しました。

結合相の分布により耐久性が最適化されます。2024年には、SEM分析によりニッケル-鉄マトリックスの均一性が $95\%$ 以上、腐食速度が2025年には $0.2\text{ mm/年}$ 低下、工業サンプルの孔食率は2023年には $0.01\%$ 未満であることが示されました。2024年には、銅含有量 $8\%$ のサンプルの導電性が最適化され、電気化学的腐食速度は2025年に $10\%$ 低下し、2023年には航空プロジェクトでその性能が検証されました。

## 表面処理とコーティング

表面処理により耐食性が向上します。2024年には $\text{Al}_2\text{O}_3$ コーティング（ $0.1\text{ mm}$ ）により腐食速度が $15\%$ 低下し、2025年には $\text{pH } 2$ の $\text{H}_2\text{SO}_4$ における医療用サンプルの質量減少率は $0.1\%$ 未満となり、2023年には耐久性が $10\%$ 向上します。2024年には窒化処理により表面が最適化され、2025年には $\text{pH } 1$ の $\text{HCl}$ における原子力施設サンプルの腐食速度が $0.005\text{ mm/年}$ となり、2023年には耐孔食性が $20\%$ 向上します。

コーティングの厚さは効果に影響を与えます。2024年には、 $0.05\text{ mm}$ の $\text{SiC}$ コーティングの腐食率は $10\%$ 減少しましたが、2025年には $0.1\text{ mm}$ を超えると $15\%$ に増加しました。2023年には、航空サンプルが $60^\circ\text{C}$ の酸試験に合格しました。2024年には、ナノコーティング（ $<0.1\text{ mm}$ ）によって界面が最適化され、2025年には深宇宙サンプルの耐腐食性が $95\%$ を超えました。

## 耐食性試験とデータ

耐食性試験は浸漬法（ASTM G31）を採用しています。2024年、 $\text{WNiFe}$ 合金を $\text{pH } 2$ の $\text{H}_2\text{SO}_4$ に30日間浸漬した場合の腐食速度は $0.008\text{ mm/年}$ でした。2025年には、ナノ最適化により $0.006\text{ mm/年}$ に減少しました。2023年には、核廃棄物容器の質量減少率は $0.2\%$ でした。2024年、 $\text{WCu}$ 合金の $\text{pH } 3\text{ HCl}$ における腐食速度は $0.009\text{ mm/年}$ でしたが、2025年には高

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

温（50℃）で 0.01 mm/年に増加しました。2023 年には、医療用サンプルの安定性は 90%を超えました。

環境要因は大きな影響を与えています。2024 年には 25℃での腐食速度は 0.007mm/年でしたが、2025 年には 60℃で 0.01mm/年に増加しました。2023 年には、温度が腐食速度に 15%以上影響を与えることが研究で示されました。2024 年には 5% NaCl 溶液での腐食速度は 0.008mm/年でしたが、2025 年には Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コーティングにより 0.005mm/年に低下しました。2023 年には、航空機サンプルの耐久性が 10%向上しました。

## 酸性環境における耐腐食性

### 医療分野

2024 年には、pH 3 消毒液中の CT コリメータの腐食速度は 0.006 mm/年でしたが、2025 年には Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コーティング後に 0.004 mm/年に低下しました。2023 年には、ある病院のサンプルが 1,000 回の洗浄後も表面損傷は 0.02 mm 未満でした。2024 年には、ナノ強化サンプルの耐腐食性は 95%を超え、2025 年には遮蔽効率は 98%に達しました。

### 産業分野

2024 年には、pH 2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>における核廃棄物容器の腐食速度は 0.008 mm/年ですが、2025 年には窒化処理により 0.005 mm/年に低減します。2023 年には、原子力発電所のサンプルの耐用年数は 5 年以上になります。2024 年には、多層設計の耐腐食性は 90%を超え、2025 年には効率が 5%向上します。

### 航空宇宙

2024 年には、深宇宙探査機シールドの pH 5 海洋模擬環境における腐食速度は 0.007mm/年ですが、2025 年に SiC コーティングを施すことで 0.004mm/年に低減します。2023 年には、あるプロジェクトが 30g の振動試験をクリアし、2024 年には重量を 10%（15kg）削減しました。2025 年には、ナノ最適化サンプルの耐腐食性は 95%を超え、2023 年には微小重力への適応性は 98%に達します。

## 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと界面応力が挙げられます。2024 年にはナノコーティングのコストが 15%増加し、2025 年には総コストの 20%を占める見込みです。2023 年にはコーティングと基材の界面応力が 10MPa を超え、熱亀裂発生率は 2024 年に 5%に達する見込みです。2025 年には強酸環境の最適化が困難となり、2023 年には腐食速度が 2%変動する見込みです。

最適化方向：2025 年に低コストコーティングを開発し、2024 年にパイロットプロジェクトのコストを 5%削減します。2023 年には熱処理を通じて粒界を最適化し、2025 年に腐食速度 0.003mm/年を実現します。2024 年にスマートサーフェステクノロジーを導入し、2023 年に耐久性目標 98%を達成します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 将来の見通し

2030年の腐食速度目標は0.003mm/年であり、2025年には既に0.004mm/年という研究結果が出ています。2024年の耐食性目標は98%で、2023年には技術的な方向性が明確になります。2025年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024年には市場ポテンシャルが20%増加すると予測されます。

### 2.4.3 タングステン合金シールド表面コーティング技術の応用

#### 表面コーティング技術の定義と開発

表面コーティング技術とは、物理的または化学的方法によってタングステン合金シールド部品の表面に保護層を堆積させ、耐食性、耐摩耗性、高温安定性を向上させる技術を指します。国際タングステン協会（ITA）の2024年報告書によると、2025年にはコーティング技術がタングステン合金シールド部品の表面処理の40%を占め、2023年の成長率は15%に達すると予測されています。2005年には、化学蒸着（CVD）がWNiFe合金に初めて適用されました。2024年には、医療用サンプルの耐食性が20%向上しました。2025年には、深宇宙プロジェクトで1000℃での安定性が95%以上であることが検証されました。

技術は大きく発展しました。2010年には物理蒸着（PVD）による $Al_2O_3$ コーティングが導入され、2023年には耐摩耗性が10%向上し、2024年には原子力施設のサンプル寿命が5年延長されました。2020年にはナノコーティング（ $SiO_2$ 、 $<0.1\mu m$ など）の応用が拡大し、2025年には市場シェアが25%に増加しました。2023年には、pH2の酸性環境における保護効率が98%を超えるという調査結果が出ました。2024年にはコーティング特許が150件を超え、2025年には応用ポテンシャルが30%に増加すると予想されています。

#### コーティング技術が性能に及ぼす基本的な影響

表面コーティングはタングステン合金の性能を大幅に向上させます。2024年には $Al_2O_3$ コーティング（0.1mm）により腐食速度が15%（0.005mm/年）低下し、2025年には医療用サンプルの500℃における強度保持率が90%を超え、2023年には耐摩耗性が10%向上（摩擦率 $<0.007\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ）しました。2024年にはSiCコーティング（0.05mm）により高温安定性が最適化され、2025年には航空用サンプルの1000℃における熱変形率が0.02%未満となり、2023年には遮蔽効率の低下が1%未満となりました。

コーティングの種類によって効果は異なります。2024年には、酸化物コーティング（ $ZrO_2$ など）の耐食性が20%向上し、2025年にはpH1のHClにおける工業用サンプルの質量減少率は0.1%未満、2023年には耐酸化性が95%以上となりました。また、2024年には、炭化物コーティング（TiCなど）の耐摩耗性が15%向上し、2025年には核廃棄物容器が $10^6$ 回の摩耗試験に合格し、2023年には表面損傷が0.03mm未満となりました。

#### コーティング技術の適用プロセス

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 化学蒸着（CVD）

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1000° Cで、コーティングの厚さは2025年に0.1~0.2 mm、医療サンプルの均一性は2023年に98%以上です。2024年には、堆積速度は0.5 μm /分で、2025年にはコストが10%（500米ドル/m<sup>2</sup>）削減されます。2023年には、耐食性が15%向上することが調査で確認されています。

## 物理蒸着（PVD）

ZrO<sub>2</sub> 500° Cで、厚さは2025年に0.05~0.1 mm、接着力は2023年の航空サンプルで20 MPa超。2024年には堆積速度は1 μm /分、エネルギー効率率は2025年に20%向上。2023年には原子力施設サンプルで90%超の高温耐性を実現。

## 溶射とナノコーティング

2024年にはTiCが熱噴射技術によって堆積され、2025年には厚さ0.1mmとなり、2023年には工業用サンプルの耐摩耗性が10%向上しました。2024年には、ナノコーティング（SiO<sub>2</sub>、<0.1mmなど）がプラズマによって堆積され、2025年には均一性が95%を超え、2023年には深宇宙サンプルの耐食性が98%を超えました。

## さまざまな環境におけるコーティング技術の応用

### 酸性環境（pH <7）

2024年には、pH 2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>におけるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングの腐食率は0.004 mm/年、2025年には、核廃棄物容器の質量損失率は<0.1%、2023年には耐久性は>95%です。2024年には、pH 1 HClにおけるSiCコーティングの腐食率は0.005 mm/年、2025年には医療用サンプルが60° Cの酸試験に合格し、2023年には効率が安定しています。

### 高温環境（>300° C）

2024年には、500° CでのZrO<sub>2</sub>コーティングの強度保持率が92%に達し、2025年には、500回の熱サイクル後の航空サンプルの安定性が90%を超え、2023年には熱変形率が0.01%未満になります。2024年には、1000° CでのTiCコーティングの耐摩耗性が15%向上し、2025年には深宇宙サンプルが微小重力テストに合格し、2023年には寿命が5年以上になります。

### 放射線環境（>10<sup>6</sup> Gy）

2024年には、10<sup>6</sup>Gyの照射下でのSiO<sub>2</sub>ナノコーティングの遮蔽効率が1%未満に低下し、2025年には原子力施設サンプルの耐久性が95%を超え、2023年には耐酸化性が10%向上しました。2024年には、10<sup>7</sup>n/cm<sup>2</sup>・sの中性子束下でのAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングの安定性が90%を超え、2025年には原子炉サンプルが5年試験に合格しました。

## コーティング技術の性能データ

2024年にはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングの腐食速度は0.005mm/年、2025年には高温（500° C）での強度保持率は93%、2023年にはロケットシェルが10<sup>6</sup>回の摩耗を経た後の損傷は0.03mm

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

未満です。2024年にはSiCコーティングの耐摩耗性は $0.006\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、2025年には $1000^\circ\text{C}$ での安定性は90%以上、2023年には特定の熱シールドの寿命は5年以上です。

$25^\circ\text{C}$ での腐食速度は $0.005\text{mm}/\text{年}$ ですが、2025年には $60^\circ\text{C}$ で $0.007\text{mm}/\text{年}$ に増加します。2023年には、温度の影響が10%を超えることが研究で示されました。2024年には、pH 2環境における $\text{Al}_2\text{O}_3$ コーティングの寿命は5年で、2025年にはナノ最適化により6年に延長されます。2023年には、原子力施設でその耐久性が検証されます。

## コーティング技術の応用における性能

### 医療分野

2024年、CTコリメータ用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ コーティングの腐食率は $0.004\text{mm}/\text{年}$ 、pH3消毒液下における表面損傷は2025年には $0.02\text{mm}$ 未満となる。病院からのサンプルは2023年に1,000回の洗浄に合格した。2024年には、ナノ $\text{SiO}_2$ コーティングの耐腐食性は95%を超え、2025年には遮蔽効率は98%となる。

### 産業分野

2024年には、核廃棄物容器に $\text{ZrO}_2$ コーティングを施し、腐食速度を $0.005\text{mm}/\text{年}$ 、pH 2  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 環境下での耐用年数を2025年には5年以上に延ばします。2023年には、原子力発電所からのサンプルの安定性が90%以上になります。2024年にはTiCコーティングの耐摩耗性が最適化され、2025年には効率が5%向上します。

### 航空宇宙

2024年には深宇宙探査機用SiCコーティング、耐摩耗性 $0.006\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、2025年には $1000^\circ\text{C}$ での安定性 $>90\%$ 、2023年には30gの振動をクリアしたプロジェクト、2024年には10%（15kg）の軽量化を実現する。2025年にはナノコーティングの耐腐食性が $>95\%$ 、2023年には微小重力適応性が98%に達する。

### 課題と最適化の方向性

課題としてはコストと接着性が挙げられる。2024年にはナノコーティングコストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占める。2023年には、接着力が15MPa未満の場合にコーティング剥離率が5%となり、2024年の最適化は困難であった。2025年には高温剥離のリスクが高まり、2023年には効率損失が2%となった。

最適化方向：2025年に低コストのCVDプロセスを開発し、2024年にパイロットプロジェクトのコストを5%削減します。2023年には、ナノコーティングの接着目標を20MPaにし、2025年には耐久性を98%以上にします。2024年にはインテリジェントモニタリングを導入し、2023年には剥離率の目標を1%未満にします。

### 将来の見通し

2030年には耐食性目標が99%に達し、2025年には既に98%に達する研究結果が出ています。2024年には耐摩耗性目標が $0.005\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ となり、2023年には技術開発の道筋が

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

明確になります。2025 年にはナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、2024 年には市場ポテンシャルが 20%増加すると予測されています。

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



### 第3章 タングステン合金シールド部品の製造工程

#### タングステン合金シールドの設計原理と最適化戦略

##### 3.1.1 タングステン合金シールドの幾何学的設計と軽量化

###### 幾何学的デザインの定義と重要性

幾何設計とは、タングステン合金遮蔽部品の形状、サイズ、構造を用途に応じて最適化し、放射線遮蔽、機械強度、軽量化などの要件を満たすことを指します。国際タングステン協会（ITA）の2024年報告書によると、2025年には幾何設計が遮蔽効率（95%超）と重量（ $20\text{kg}/\text{m}^3$ 未満）に直接影響を与え、ある航空プロジェクトでは2023年に10%の軽量化が実証されました。2024年には、タングステン合金の密度は $18.5\text{g}/\text{cm}^3$ となり、従来の設計では重量が重くなっています。幾何最適化が鍵となり、2025年には市場への応用が30%を占めると予測されています。

幾何学的設計の重要性は、多くの分野における性能向上に反映されています。2024年には、医療用CTコリメータはX線を正確に制御するために複雑な幾何学的構造を必要とし、あるサンプルの透過率は2025年に2%まで低下しました。2023年には、原子炉遮蔽材は耐振動性幾何学構造を必要とし、2024年にはコンテナが50gの衝撃試験に合格し、変形量は0.1mm未満でした。2025年のITAデータによると、幾何学的最適化によりタングステン合金遮蔽材市場は2023年に15%増加し、2030年には25%に増加すると予想されています。

###### 軽量の定義と要件

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金シールドは、性能を維持しながら形状と材料比率を最適化することで軽量化が求められています。2024年には、航空宇宙分野では深宇宙探査機のシールド重量を15kg未満に抑えることが求められており、2025年にはあるプロジェクトで5kg（25%）の軽量化が達成され、2023年には効率低下は1%未満となります。2025年にはハニカム構造と多層設計による軽量化が実現し、2024年にはある医療機器の重量が10kgまで軽量化され、2023年には市場への受け入れが10%増加すると予測されています。

軽量化の需要は、コストと携帯性の向上に起因しています。2024年には、タングステン合金1個のコストは約500ドル/kgに達する見込みです。2025年には、軽量設計により材料使用量が10%削減されます。2023年には、特定の産業用サンプルの製造コストが5%低下する見込みです。2024年には、移動型医療機器に携帯型シールドが必須となる見込みです。2025年には、特定の携帯型CTの重量が5kg未満になる見込みです。2023年には、適用範囲が20%拡大する見込みです。

## 幾何学的デザインの基本原則

### 放射線遮蔽の最適化

2024年には、曲面と溝を追加することで遮蔽効率を向上させる幾何学的設計が実現しました。W<sub>Ni</sub>Fe合金の1.25MeVガンマ線に対する減衰係数は $0.17\text{cm}^{-1}$ です。2025年には、曲面設計により実効厚さが10%増加しました。2023年には、原子力施設サンプルの透過率が3%に低減しました。2024年には、円錐構造によりX線散乱が最適化されました。2025年には、CT装置の散乱線量が $0.01\text{mGy/h}$ 未満になりました。2023年には、効率は97%に達します。

### 機械的強度を保証

2024年には、リブと補強構造を用いた幾何学的設計により、引張強度1500MPaを達成しました。2025年には、航空サンプルが20Gの振動試験を0.05mm未満の変形でクリアしました。2023年には、ハニカム構造により降伏強度が1200MPaを超えました。2024年には、核廃棄物容器の耐衝撃性が15%向上し、2025年には安定性が95%を超えました。

### 処理の実現可能性

2024年には、形状の複雑さがCNC加工精度 $\pm 0.01\text{mm}$ に達する必要性があり、2025年には医療用サンプルの表面粗さが $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$ に低減され、2023年には生産効率が10%向上します。2024年には、3Dプリント技術が複雑な形状をサポートし、2025年には深宇宙サンプルの処理時間が20%短縮され、2023年にはコストが5%削減されます。

## 軽量設計戦略

### ハニカム構造と中空構造

2024年にはハニカム構造の重量が15%削減され（15kg対17.5kg）、2025年には航空サンプルの遮蔽効率が95%に維持され、2023年には圧縮強度が1000MPaを超えます。2024

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

年には中空円筒設計の重量が10%削減され、2025年には原子力施設サンプルの密度が16.5 g/cm<sup>3</sup>に減少し、2023年には効率損失が0.5%未満になります。

### マルチマテリアル複合材

2024年にはW<sub>Ni</sub>Feをアルミニウム合金と組み合わせ、重量を20%（12kg）削減しました。2025年には医療用サンプルの熱膨張係数（CTE）整合度が90%を超え、2023年には耐食性が10%向上しました。2024年にはW<sub>Cu</sub>を炭素繊維と組み合わせ、2025年には熱伝導率が15%向上しました。2023年には深宇宙サンプルの重量を5kg削減しました。

### トポロジー最適化

2024年には、トポロジー最適化ソフトウェア（ANSYSなど）によって材料使用量が10%削減され、2025年には産業用サンプルの重量が14kgに軽減され、2023年には耐振性が10%向上します。2024年には、最適化後の幾何剛性が15%向上し、2025年には航空用サンプルが30gテストに合格し、2023年には市場での受け入れが5%増加するでしょう。

### 幾何学的設計と軽量試験方法

#### 有限要素解析（FEA）

2024年にはW<sub>Ni</sub>Feハニカム構造のFEAシミュレーションを実施し、2025年には応力集中が10MPa未満に低減され、2023年には医療用サンプルの変形予測誤差が1%未満となりました。2024年には、マルチマテリアル複合材料の熱膨張係数（CTE）偏差が0.5ppm/°C未満となり、2025年には深宇宙サンプルの熱応力が5MPa未満となりました。

#### 実際のテスト

2024年には、引張試験（ASTM E8）により、最適化された構造が1500MPaの引張強度を有することが検証され、2025年には原子力施設のサンプルが10gの振動試験に合格しました。2023年には、衝撃試験（ASTM E23）により25J/mの靱性を示し、2024年には航空サンプルの安定性が95%を超えました。

#### 重量と効率の評価

2024年には、ハニカム構造による重量試験で15%の軽量化が実証され、2025年にはCT装置の効率が98%に達しました。また、2023年には、軽量化による遮蔽効果は0.5%未満であることが研究で検証されました。2024年には、多層構造による重量削減が10%に達し、2025年には深宇宙サンプルが微小重力試験に合格しました。

### アプリケーションにおける幾何学的なデザインと軽量なパフォーマンス

#### 医療分野

2024年には、CTコリメータは湾曲設計を採用し、重量は10kgです。2025年には遮蔽効率が97%に達します。2023年には、ある病院のサンプルが1,000回の熱サイクル試験をクリアし、変形量は0.05mm未満でした。2024年にはハニカム構造により重量が20%削減され、2025年には可搬性が10%向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 産業分野

2024年には、核廃棄物容器は15kgの強化構造となり、2025年には耐衝撃性が90%以上、2023年には原子力発電所のサンプルの寿命が5年以上になります。2024年にはトポロジー最適化により重量が10%削減され、2025年には効率が5%向上します。

## 航空宇宙

2024年には、深宇宙探査機の遮蔽板は中空構造となり、重量は12kgになります。2025年には、耐振動性が95%以上になります。2023年には、あるプロジェクトで30gの振動をクリアし、2024年には重量を10%（15kg）削減する予定です。2025年には、多材料複合サンプルの安定性が98%以上になり、2023年には微小重力への適応性が95%に達します。

## 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと加工精度が挙げられる。2024年にはトポロジー最適化ソフトウェアのコストが10%増加し、2025年には総コストの15%を占めるようになる。2023年にはCNC加工精度は±0.01mmとなり、設備摩耗率は2024年に5%増加する。2025年には複雑な形状最適化が困難になり、2023年には効率が1%低下する。

最適化方向：2025年に低コストの3Dプリントを開発し、2024年にパイロットプロジェクトのコストを5%削減します。2023年には、インテリジェント設計を通じて形状を最適化し、2025年に重量を20%削減します。2024年にインテリジェントモニタリングを導入し、2023年に±0.005mmの加工精度目標を達成します。

## 将来の見通し

2030年には、軽量化目標は25%であり、ある研究では2025年には20%に達しています。2024年には効率目標は99%であり、2023年には技術的なルートが明確になります。2025年には、トポロジー最適化とインテリジェントプロセスが主流となり、2024年には市場の潜在力が20%増加します。

### 3.1.2 タングステン合金シールド部品の高精度加工要件

#### 高精度加工の定義と重要性

タングステン合金シールド部品は、ミクロンまたはサブミクロンの精度で加工され、幾何学的寸法、表面品質、性能の一貫性を確保しています。国際タングステン協会（ITA）の2024年報告書によると、2025年には、タングステン合金の高密度（18.5 g/cm<sup>3</sup>）と高硬度（400 HV）により、±0.01 mmの加工精度が求められます。2023年には、医療プロジェクトにおいて、シールド効率への影響は0.5%未満であることが検証されました。2024年には、高精度加工が35%を占め、2025年の市場成長率は12%に達すると予想されており、複雑な用途におけるその重要性を反映しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高精度加工の重要性は、性能の最適化と信頼性に反映されています。2024年には、CT コリメータは X 線散乱を制御するために  $\pm 0.005\text{mm}$  の精度を必要とし、特定のサンプルの透過率は 2025 年に 1.5% に低下します。2023 年には、原子炉遮蔽部品は  $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$  の表面粗さを必要とし、2024 年には容器が  $10^6\text{Gy}$  で照射され、変形は  $< 0.05\text{mm}$  になります。2025 年の ITA データによると、高精度加工により、タングステン合金遮蔽部品の市場シェアは 2023 年に 10% 増加し、2030 年には 20% に達すると予想されています。

## 高精度加工の需要の源

### 幾何学的複雑さ

2024 年には、曲面やハニカム構造といった複雑な形状の加工精度は  $\pm 0.01\text{mm}$  に達するでしょう。2025 年には、ある航空機サンプルの重量が 15% 軽量化されます ( $15\text{kg}$  から  $17.5\text{kg}$ )。2023 年には、効率は 95% を維持します。2024 年には、3D プリンティングが複雑な設計をサポートようになります。2025 年には、ある深宇宙探査機の部品の加工誤差は  $0.02\text{mm}$  未満になります。2023 年には、生産サイクルは 20% 短縮されます。

### パフォーマンスの一貫性

2024 年には、高精度化により遮蔽効率の均一性が確保されます。2025 年には、原子力施設のサンプルにおける  $1.25\text{MeV}$  ガンマ線に対する減衰係数の変動が 1% 未満 ( $0.17\sim 0.18\text{cm}^{-1}$ ) となり、2023 年には散乱線量が  $0.01\text{mGy/h}$  未満であることが研究で確認されました。2024 年には、表面品質が耐食性に影響を与えることが示されました。2025 年には、 $\text{pH}\ 2$  環境における医療用サンプルの腐食速度が  $0.005\text{mm}/\text{年}$  未満となりました。

### アプリケーション環境要件

2024 年には、航空宇宙産業は  $\pm 0.01\text{mm}$  の耐振動精度を求め、2025 年には、あるプロジェクトは  $30\text{g}$  の振動に耐え、変形量は  $0.03\text{mm}$  未満となるでしょう。2023 年には、原子力産業は耐放射線精度を求め、2024 年には、ある原子炉サンプルは  $10^7\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  で 90% 以上の安定性を達成します。2025 年には、医療機器は可搬性を求め、2024 年には、ある CT 部品は重量が  $5\text{kg}$  未満で加工精度が  $\pm 0.005\text{mm}$  となるでしょう。

## 高精度加工に影響を与える要因

### 材料特性

2024 年には、タングステン合金の硬度  $400\text{HV}$ 、靱性  $25\text{J}/\text{m}$  が工具摩耗率に 20% 以上影響し、2025 年には工業用サンプルの加工効率が 10% 低下し、2023 年にはその切削力が  $1000\text{N}$  超であることが研究で検証されました。2024 年には、密度  $18.5\text{g}/\text{cm}^3$  によって熱が蓄積され、2025 年には航空サンプルの熱変形率が 0.01% 未満になり、2023 年には冷却技術の最適化効率が 15% 向上しました。

### 処理装置の精度

2024 年には CNC 工作機械の精度は  $\pm 0.01\text{mm}$ 、2025 年には医療用サンプルの表面粗さは  $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$ 、再現性は 2023 年には 98% 以上になります。2024 年にはレーザー加工精度は

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

±0.005mm、2025年には深宇宙サンプルの幾何学的偏差は<0.01mmとなり、2023年にはコストが5%増加します。

### プロセスパラメータ

2024年には切削速度が200m/分、2025年には原子力施設サンプルの加工時間が15%短縮されます。2023年には工具寿命が100時間を超えます。2024年には送り速度が0.1mm/回転になります。2025年には航空機サンプルの表面品質が最適化されます。2023年には熱応力が10MPa未満になります。2025年には冷却剤利用率が50%になります。2024年には医療サンプルの加工精度が5%向上します。

### 高精度加工技術

#### コンピュータ数値制御加工（CNC）

2024年にはCNC加工精度は±0.01mmとなり、2025年にはCT部品の表面粗さがRa0.2μmとなり、2023年には生産効率が10%向上します。2024年には5軸CNCが複雑な形状をサポートし、2025年には深宇宙サンプルの加工誤差が0.015mm未満となり、2023年にはコストが5%減少します。

#### レーザー加工

2024年にはレーザー切断精度が±0.005mm、2025年には原子力施設サンプルの幾何学的偏差が0.01mm未満、2023年には熱影響部が0.05mm未満となります。2024年にはレーザークラディングによるTiCコーティングが実現し、2025年には航空機サンプルの耐摩耗性が15%向上し、2023年には効率が安定します。

#### 3Dプリンティング（積層造形）

2024年には、選択的レーザー溶融（SLM）の精度が±0.02mmに達し、2025年には医療用サンプルの重量が5kg未満になり、2023年には幾何学的複雑さのサポート率が90%以上になります。2024年には、電子ビーム溶融（EBM）によって粒界が最適化され、2025年には深宇宙サンプルの耐振動性が95%以上になり、2023年には生産サイクルが20%短縮されます。

#### 高精度加工の性能検証

2024年には、引張試験（ASTM E8）において加工後の引張強度が1500MPaであることが示されました。2025年には、原子力施設のサンプルが10gの振動試験に合格し、誤差は2023年に1%未満でした。2024年には表面粗さ試験（Ra 0.2μm）を実施し、2025年には医療用サンプルが95%を超える耐食性を示しました。また、2023年には、研究によって均一性が検証されました。

環境への影響は大きく、2024年には25℃での加工精度が±0.01mmとなり、2025年には50℃で±0.015mmに向上します。2023年には、航空サンプルの熱変形が0.02mm未満になります。2024年には、高湿度環境（80%）における精度変動が1%未満になり、2025年には深宇宙サンプルが微小重力試験に合格し、2023年には安定性が98%を超えます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## アプリケーションにおける高精度加工

### 医療分野

2024年にはCTコリメータの加工精度は $\pm 0.005\text{mm}$ 、透過率は2025年には1.5%に達する見込みです。2023年には、病院から出荷されたサンプルが1,000回の熱サイクル試験をクリアし、変形量は0.02mm未満となります。2024年にはレーザー加工技術によって形状が最適化され、2025年には携帯性が10%向上します。

### 産業分野

2024年には、核廃棄物容器の加工精度は $\pm 0.01\text{mm}$ 、2025年には耐衝撃性は90%以上、2023年には原子力発電所のサンプルの寿命は5年以上になります。2024年にはCNC加工により表面が最適化され、2025年には効率が5%向上します。

### 航空宇宙

2024年には深宇宙探査機シールドプレートの加工精度が $\pm 0.01\text{mm}$ になり、2025年には耐振動性が95%を超え、2023年には30gの振動をクリアするプロジェクトが完成し、2024年には重量が10% (15kg) 削減されます。2025年には3Dプリントサンプルの安定性が98%を超え、2023年には微小重力への適応性が95%に達します。

### 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと設備メンテナンスが挙げられます。2024年にはレーザー加工コストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占める見込みです。2023年にはCNC工具の摩耗率が10%を超え、メンテナンスコストは2024年に5%増加する見込みです。2025年には複雑な形状の加工が困難になり、2023年には効率が1%低下する見込みです。

最適化の方向性：2025年に低コストのレーザー技術を開発し、2024年にパイロットプロジェクトのコストを5%削減します。2023年にインテリジェントCNCのパラメータを最適化し、2025年の目標精度を $\pm 0.003\text{mm}$ にします。2024年にインテリジェントモニタリングを導入し、2023年の目標ツール寿命を150時間以上にします。

### 将来の見通し

2030年には加工精度の目標は $\pm 0.003\text{mm}$ であり、2025年には既に $\pm 0.005\text{mm}$ に到達した研究結果が出ています。2024年には効率目標は99%となり、2023年には技術的な方向性が明確になります。2025年にはスマート製造とナノテクノロジーが主流となり、2024年には市場の潜在力が20%増加すると予測されています。

### 3.1.3 タングステン合金シールド部品のインテリジェント設計と多機能統合

#### インテリジェントデザインと多機能統合の定義と重要性

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

インテリジェント設計では、人工知能（AI）とシミュレーション技術を活用し、タングステン合金遮蔽部品の形状、材質、性能を最適化します。また、多機能統合では、放射線遮蔽、熱管理、構造支持機能を統合することで、応用効率を向上させます。国際タングステン協会（ITA）の 2024 年報告書によると、2025 年にはインテリジェント設計が 25%を占め、2023 年にはある航空プロジェクトで重量が 10%（15kg）削減されます。2024 年には、多機能統合により遮蔽効率が 98%を超え、2025 年には原子力施設のサンプルが  $10^6$ Gy の放射線照射を 95%以上の安定性で通過できるようになります。

その重要性は、複雑な環境への適応性に反映されています。2024 年には、医療用 CT 装置は X 線均一性を最適化するためのインテリジェント設計を必要とし、2025 年には特定のサンプルの透過率は 1.5%まで低下します。2023 年には、深宇宙探査機は多機能統合型耐振性と熱制御を必要とします。2024 年には、あるプロジェクトが 30g の振動と 5°C未満の温度変動をクリアします。ITA のデータによると、2025 年には、インテリジェント設計と多機能統合により、タングステン合金市場は 2023 年に 15%成長し、2030 年には 22%に増加すると予想されています。

## インテリジェントデザインの技術的基礎

### AI 最適化

2024 年には機械学習アルゴリズム（遺伝的アルゴリズムなど）によって形状が最適化され、2025 年にはある工業サンプルの加工精度が  $\pm 0.005$ mm に達し、2023 年には設計サイクルが 20%短縮されます。2024 年にはニューラルネットワークによって材料特性が予測され、2025 年にはある航空サンプルの引張強度が 1500MPa となり、2023 年には誤差が 1%未満になります。2025 年には AI 主導のトポロジー最適化によって材料消費量が 10%削減され、2024 年にはある医療機器の重量が 10kg まで軽減されます。

### シミュレーションとモデリング

2024 年には有限要素解析（FEA）により熱応力をシミュレートし、2025 年には原子力施設サンプルの変形が 0.03 mm 未満となり、2023 年には計算効率が 15%向上します。2024 年にはモンテカルロシミュレーション（MCNP）により遮蔽が最適化され、2025 年には深宇宙サンプルの 1.25 MeV ガンマ線の減衰係数が  $0.18 \text{ cm}^{-1}$  となり、2023 年には効率が 5%向上します。2025 年にはデジタルツイン技術を用いてリアルタイム監視を行い、2024 年には原子炉サンプルの安定性が 90%を超えます。

## 多機能統合の実施戦略

### 放射線遮蔽と熱管理

2024 年には、W<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>-WCu 複合構造が遮蔽と熱伝導性を統合し、2025 年には CT 装置の散乱線量が 0.01 mGy/h 未満、熱伝導率が 180 W/m $\cdot$ K、効率が 2023 年に 98%になります。2024 年には、B<sub>4</sub>C コーティング（0.05 mm）が中性子遮蔽を強化し、2025 年には原子力施設サンプルの吸収率が 86%になり、2023 年には熱安定性が 90%を超えます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 構造サポートと軽量

2024年にはハニカム構造一体型支持、2025年には航空用特定サンプルの圧縮強度が1000MPaを超え、重量が15%（15kg）削減され、2023年には振動耐性が10%向上します。2024年にはマルチマテリアル設計（WNiFe-アルミニウム合金）、2025年には医療用特定サンプルのCTEマッチング度が90%を超え、2023年には重量が20%削減されます。

## センサーとスマートモニタリング

2024年には、組み込み温度センサーが熱分布を監視し、2025年には深宇宙サンプルの温度変動が3℃未満、2023年には応答時間が1秒未満になります。2024年には歪みセンサーが統合され、2025年には原子力施設サンプルの応力集中が10MPa未満、2023年には故障警告率が95%以上になります。

## インテリジェントな設計と多機能統合プロセスサポート

### スマート製造

2024年には、インテリジェントCNCがパラメータを調整し、2025年には加工精度が±0.003mm、2023年には医療サンプルの表面粗さがRa 0.15 μmになります。2024年には、3Dプリンティングがマルチマテリアル積層をサポートし、2025年には航空サンプルの幾何学的複雑度が90%を超え、2023年には生産効率が20%向上します。

### 表面処理

2024年にはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のレーザークラディング堆積、2025年には工業用サンプルの耐食性が95%を超え、2023年にはコーティングの厚さが0.1mmになります。2024年にはナノコーティング（SiO<sub>2</sub>）、2025年には深宇宙サンプルの高温安定性が90%を超え、2023年には耐摩耗性が10%増加します。

### 品質管理

2024年にはX線検査で形状を検証し、2025年には原子力施設サンプルの欠陥率が0.1%未満となり、2023年には検出速度が15%向上します。2024年には超音波検査で内部を監視し、2025年には医療サンプルの亀裂認識率が98%を超え、2023年には信頼性が向上します。

### パフォーマンス検証とデータ

2024年には引張試験で1500MPaの引張強度を示し、2025年には航空サンプルが10gの振動に合格し、2023年には誤差が1%未満でした。2024年には熱サイクル試験（500℃、500回）と2025年には原子力施設サンプルが90%を超える強度保持率を示し、2023年には熱変形が0.01mm未満でした。

環境への影響は甚大です。2024年には25℃での遮蔽効率が98%に達し、2025年には1000℃で95%に低下します。2023年には深宇宙サンプルの熱安定性が90%を超えます。2024年にはpH 2での耐腐食性が98%に達し、2025年にはナノ最適化により99%に向上します。2023年には産業用サンプルの寿命が5年を超えます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## アプリケーションのパフォーマンス

### 医療分野

2024年には、CT装置のインテリジェント設計により形状が最適化され、2025年には透過率は1.5%に達します。2023年には、病院のサンプルが1,000回の熱サイクル試験をクリアし、変形量は0.02mm未満となります。2024年には、多機能統合により熱管理が改善され、2025年には効率は98%に達します。

### 産業分野

2024年には、核廃棄物容器にセンサーが統合されます。2025年には、応力監視精度は95%以上になります。2023年には、原子力発電所のサンプルの寿命は5年以上になります。2024年には、 $B_4C$ コーティングによって中性子遮蔽が最適化されます。2025年には、吸収率は86%になります。

### 航空宇宙

2024年には深宇宙探査機は多機能設計となり、2025年には耐振動性が95%以上、2023年には30gの振動をクリアし、2024年には重量が10%（15kg）削減されます。2025年にはインテリジェントモニタリングによって信頼性が向上し、2023年には微小重力への適応性が98%に達します。

### 課題と最適化の方向性

課題としては、コストと統合の複雑さが挙げられます。2024年にはAIソフトウェアのコストが15%増加し、2025年には総コストの20%を占める見込みです。2023年にはセンサー統合時の応力が10MPaを超え、熱亀裂発生率は2024年には5%に達する見込みです。2025年には多機能最適化が困難になり、2023年には効率が1%低下する見込みです。

最適化の方向性: 2025年に低コストのAIアルゴリズムを開発し、2024年にパイロットプロジェクトのコストを5%削減します。2023年にナノセンサーを最適化し、2025年に5MPa未満の応力目標を達成します。2024年にスマート製造を導入し、2023年に99%の効率目標を達成します。

### 将来の見通し

2030年の効率目標は99.5%であり、ある研究では2025年には98.5%に達しています。2024年には25%の軽量化目標があり、2023年には技術的な道筋が明らかになります。2025年にはAIとナノテクノロジーが主流となり、2024年には市場の潜在力が20%増加します。

## 3.2 タングステン合金シールドの粉末冶金プロセス

### 3.2.1 タングステン合金遮蔽用タングステン粉末の製造と粒度制御

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## タングステン粉末製造の定義と重要性

タングステン粉末の製造は粉末冶金プロセスの出発点です。高純度タングステン粉末は、タングステン合金シールド部品の基本材料として、化学的または物理的方法によって製造されます。国際タングステン協会（ITA）の最新報告書によると、タングステン粉末の純度は 99.95%に達する必要があります。最近の航空プロジェクトでは、シールド効率への影響が 5%を超えることが確認されています。タングステン粉末の粒径（1~50  $\mu\text{m}$ ）は、焼結密度（ $>18\text{g}/\text{cm}^3$ ）と機械的特性に直接影響し、現在、市場の約 40%を占めています。

その重要性は性能最適化にも反映されています。近年、医療用 CT 遮蔽部品では、透過率を 2%未満に抑えるために均一なタングステン粉末が求められています。サンプルは 1,000 回の熱サイクル試験を経ても変形量は 0.05mm 未満です。原子炉遮蔽部品は高密度化が求められ、容器の圧縮強度は 1,200MPa を超えます。ITA のデータによると、タングステン粉末の品質向上が市場の成長を約 10%促進しており、今後 5 年間で 18%に増加すると予想されています。

## タングステン粉末の主な製造方法

### 水素還元法

水素還元により、 $\text{W}_3$  を生成します。現在の反応温度は 800~1000 $^{\circ}\text{C}$  で、工業用サンプルの純度は 99.95%に達します。粒子径は 1~10  $\mu\text{m}$  で、医療用サンプルの均一性は 98%を超え、収率は約 90%です。水素流量（5L/分）を最適化することで、酸化率は 0.05%未満となり、研究によりその抗酸化特性が検証されています。

### タングステン酸アンモニウムの熱分解法

タングステン酸アンモニウム（ $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ ）は 600 $^{\circ}\text{C}$  で分解し、粒子径は 5~20  $\mu\text{m}$ 、密度は航空機サンプルでは 18.2 $\text{g}/\text{cm}^3$  です。熱分解速度は 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$  で、原子力施設サンプルでは純度が 99.97%まで上昇し、粒子形状は球形に最適化されます。

### 霧化

噴霧法は、溶融タングステン液を噴霧し、粒径は 10~50  $\mu\text{m}$  です。深宇宙サンプルの耐振性は 95%を超えています。噴霧圧力は 20MPa で、医療用サンプルの均一性は 96%を超え、収率は約 85%です。ナノ噴霧技術は粒子径を 1  $\mu\text{m}$  未満にまで微細化し、焼結性能が約 10%向上するという研究結果があります。

## 粒子サイズ制御技術とその影響

### 粒子サイズ制御方法

ふるい分け法は粒子径を 1~50  $\mu\text{m}$  に制御し、ある工業用サンプルの粒子径分布の偏差は 5%未満となり、効率は約 10%向上しました。ボールミル処理は粒子径を最適化し、ある航空サンプルの粒子径は 5  $\mu\text{m}$  まで縮小し、均一性は 95%以上となりました。レーザー粒子径分析の精度は  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  であり、ある原子力施設サンプルの制御精度は約 5%向上しました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 粒子サイズが性能に与える影響

粒径 5  $\mu\text{m}$  のタングステン粉末は 18.5g/cm<sup>3</sup> に達し、医療用サンプルの遮蔽効率は 97% に達し、引張強度は 1500MPa でした。粒径が 20  $\mu\text{m}$  を超えると、気孔率は 0.3% を超え、深宇宙サンプルの強度は約 10% 低下します。ある研究では、耐食性への影響は 1% 未満であることが確認されています。ナノタングステン粉末 (<1  $\mu\text{m}$ ) は硬度を 420HV まで高め、原子炉サンプルの寿命を約 15% 延長します。

### 準備プロセスの最適化とデータ

水素還元法では、温度を 900°C に最適化することで、タングステン粉末の純度は 99.97% に達し、ある航空サンプルの収率は約 92% に達しました。また、噴霧法では圧力を 25MPa に調整することで、粒子サイズの均一性は 96% を超え、ある医療サンプルの密度は 18.3g/cm<sup>3</sup> に達しました。

環境への影響は大きく、湿度 60% での酸化率は 0.1% 未満、原子力施設サンプルの安定性は 95% を超え、高温 (500°C) では収率が約 5% 低下します。窒素保護の最適化により、深宇宙サンプルの耐酸化性は約 10% 向上し、効率は安定しています。

### アプリケーションのパフォーマンス

CT コリメータには 5  $\mu\text{m}$  のタングステン粉末が使用され、透過率は 1.5% に低減され、病院のサンプルは 1,000 回の洗浄に成功しています。核廃棄物容器には 20  $\mu\text{m}$  のタングステン粉末が使用され、圧縮強度は 1,200MPa を超え、耐用年数は 5 年を超えています。深宇宙探査機には 1  $\mu\text{m}$  未満のタングステン粉末が使用され、重量は約 10% 削減され、耐振性は 95% 以上です。

### 課題と最適化の方向性

ナノタングステン粉末は約 20% 増加し、総コストの約 25% を占めます。粒子径精度  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  の制御は難しく、効率損失は約 1% です。高温酸化のリスクが高まり、収率は約 5% 変動します。

最適化の方向性：低コストのナノ調製により、パイロットコストを約 5% 削減。インテリジェントスクリーニング技術により、目標粒子径偏差を 2% 未満に抑える。インテリジェントモニタリングを導入し、酸化率を 0.01% 未満に抑える。

### 将来の見通し

純度目標は 99.99% で、現在の研究では 99.97% に達しています。粒子サイズ制御目標は 0.5  $\mu\text{m}$  未満であり、技術ルートは明確です。ナノテクノロジーとインテリジェントプロセスが主流となり、市場潜在力は 20% 増加すると予想されます。

## 3.2.2 タングステン合金シールド部品の焼結プロセスとパラメータ最適化

### 焼結プロセスの定義と重要性

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結工程は、タングステン粉末成形体を高温固相または液相反応により高密度のタングステン合金シールド部品に変換する工程です。国際タングステン協会（ITA）の最新報告書によると、焼結温度は通常 1400~1600℃で、ある航空サンプルの密度は 18.5g/cm<sup>3</sup> に達し、シールド効率は 97%を超えます。焼結工程は、気孔率（0.3%未満）と機械的特性を直接決定するものであり、タングステン合金シールド部品の品質を左右する中核工程であり、現在市場の約 45%を占めています。

その重要性は、性能の一貫性とアプリケーションの信頼性に反映されています。医療用 CT シールド部品は、透過率が 2%未満であることを保証するために均一な密度が求められ、特定のサンプルの引張強度は 1500MPa に達します。原子炉シールド部品には耐放射線性が求められます。ある容器は 10<sup>6</sup>Gy の試験に合格し、5年以上の耐用年数を達成しました。ITA のデータによると、焼結プロセスの最適化は市場の成長を約 12%促進しており、今後 5 年間で 20%に増加すると予想されており、ハイエンドアプリケーションにおける重要な役割を反映しています。

## 焼結プロセスの主な種類

### 固相焼結

固相焼結は比較的低温（約 1450℃）で行われ、工業用サンプルの密度は 18.2g/cm<sup>3</sup>、気孔率は約 0.2%に達します。保持時間は通常 2 時間で、医療用サンプルの均一性は 98%を超え、耐酸化性は 90%を超えています。水素保護環境はプロセスを最適化し、研究により耐割れ性と安定性が検証されています。

### 液相焼結

液相焼結温度は約 1500℃、ニッケル鉄フラックスは約 5%で、航空サンプルの密度は 18.5g/cm<sup>3</sup> に達します。保持時間は約 1.5 時間で、原子力施設サンプルの硬度は 420HV、靱性は約 25J/m に達します。銅含有量を最適化することで、深宇宙サンプルの熱伝導率は 180W/m・K に向上し、熱管理性能が大幅に向上します。

### マイクロ波焼結

マイクロ波焼結温度は約 1400℃で、医療用サンプルの処理時間は約 30%短縮され、密度は 18.3g/cm<sup>3</sup> に達します。出力は通常 5kW で、工業用サンプルの均一性は 95%を超え、エネルギー消費量は約 20%削減されます。この方法は特に複雑な幾何学的構造のラピッドプロトタイピングに適しており、研究によると生産効率が大幅に向上することが示されています。

## パラメータ最適化の手法と影響

### 温度制御

焼結温度は密度と微細構造に大きな影響を与えます。1450℃では焼結密度は 18.2 g/cm<sup>3</sup> に達し、1500℃では 18.5 g/cm<sup>3</sup> に増加します。航空機用サンプルの場合、気孔率は 0.1%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

未満です。1600℃を超えると結晶粒が成長し、原子力施設用サンプルの強度は約 5%低下します。ある研究では、硬度（約 400~420 HV）と靱性への悪影響が確認されています。

### 保持時間

保持時間は緻密化の度合いに直接影響します。密度は 2 時間保持後に 18.3 g/cm<sup>3</sup> に達し、3 時間後には 18.5 g/cm<sup>3</sup> に増加しました。医療用サンプルの均一性は 98%を超えました。粒界欠陥は 4 時間を超えると増加し、深宇宙サンプルの靱性は約 10%低下しました。効率の変動は 1%未満であり、保持時間が長すぎると性能低下を引き起こす可能性があることが示されました。

### 雰囲気調整

焼結雰囲気は材料性能に極めて重要です。水素雰囲気下では酸化率が 0.05%未満に抑えられ、工業用サンプルでは密度を安定させながら耐酸化性が 95%を超えます。窒素保護を最適化した結果、原子力施設サンプルの硬度は 420HV に達し、耐食性は約 10%向上しました。また、酸性環境下における優位性も実証されています。

### 焼結プロセスの最適化とデータ

焼結パラメータの最適化により、性能が大幅に向上しました。1500℃での液相焼結により、密度は 18.5 g/cm<sup>3</sup> に達し、航空機用サンプルの引張強度は 1500 MPa に達しました。マイクロ波焼結の出力を 6kW に調整すると、医療用サンプルの処理時間は 1 時間に短縮され、エネルギー効率は約 15%向上し、生産サイクルは約 20%短縮されました。

環境要因はプロセスに大きな影響を与えます。湿度 60%では、多孔度は約 0.1%増加し、原子力施設サンプルの安定性は 90%を超え、高温（500℃）では密度が約 2%減少します。真空度を 10<sup>-3</sup> Pa に最適化すると、深宇宙サンプルの耐酸化性は 95%を超え、効率は安定し、熱応力は 10MPa 以下に抑えられます。

### アプリケーションのパフォーマンス

CT コリメータは液相焼結法を採用し、透過率は 1.5%に低減されています。病院のサンプルは 1,000 回の熱サイクル試験に合格し、変形量は 0.05mm 未満でした。核廃棄物容器は固相焼結法を採用しており、圧縮強度は 1,200MPa 以上、寿命は 5 年以上、優れた耐放射線性を備えています。深宇宙探査機はマイクロ波焼結法を採用しており、約 10%の軽量化と 95%以上の耐振動性を実現しています。あるプロジェクトでは、30g の振動試験に合格しました。

### 課題と最適化の方向性

焼結プロセスにはいくつかの課題があります。マイクロ波焼結のコストは約 15%増加し、総コストの約 20%を占めます。±5℃の温度制御精度は困難で、効率損失は約 1%です。高温割れのリスクが高まり、特に複雑な幾何学的構造では密度変動が約 2%に達します。

最適化の方向性としては、低コストのマイクロ波技術の開発が挙げられ、パイロットコストを約 5%削減しました。インテリジェント温度制御システムの導入により、目標精度は

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

±2℃まで向上しました。インテリジェント監視技術の適用により、クラック率の目標値は0.1%まで低減され、製品品質へのプラス効果が実証されています。

### 将来の見通し

密度目標は18.6 g/cm<sup>3</sup>に設定されており、現在の研究では18.5 g/cm<sup>3</sup>に近づいています。遮蔽効率目標は99%に設定されており、技術ルートは基本的に明確化されています。今後の開発はスマートプロセスと先進材料技術が主導権を握り、市場の潜在性は20%にまで拡大すると予想されています。業界分析では、航空宇宙分野への応用が大幅に拡大すると予測されています。

### 3.2.3 タングステン合金シールドへの熱間等方圧加圧（HIP）技術の応用

#### HIP 技術の定義と重要性

熱間等方圧加圧（HIP）技術は、高温（1000～1400℃）と等圧圧力（100～200MPa）を用いてタングステン合金シールド部品に作用し、内部の気孔を除去して密度を向上させます。国際タングステン協会（ITA）の最新報告書によると、HIP プロセスによりタングステン合金の密度は18.5g/cm<sup>3</sup>に達し、特定の航空機サンプルの気孔率は0.1%未満にまで低減され、市場用途の約20%を占めています。

その重要性は、高性能と信頼性に反映されています。医療用CT遮蔽部品は、透過率が1.5%未満であることを保証する均一な密度が求められ、特定のサンプルの引張強度は1500MPaを超えています。原子炉遮蔽部品には耐放射線性が求められます。ある容器は10<sup>7</sup>n/cm<sup>2</sup>・s試験に合格し、5年以上の耐用年数を達成しました。ITAのデータによると、HIP技術の最適化は市場の成長を約10%促進しており、今後5年間で18%に増加すると予想されており、極限環境用途において大きなメリットを示しています。

#### HIP 技術のプロセス原理

HIP 技術はアルゴン媒体を用いて均一な圧力を加えます。現在の処理温度は約1300℃、圧力は150MPaです。工業用サンプルの密度は99%を超え、保持時間は通常2～4時間です。医療用サンプルの気孔率は0.05%まで低減され、均一性は98%を超えます。このプロセスにより、微小亀裂や気孔が除去され、深宇宙サンプルの耐振動性が95%以上に向上し、材料全体の性能が大幅に向上しました。

#### 機器とパラメータ

HIP 装置の圧力精度は±5MPaに制御され、原子力施設サンプルの密度は18.5g/cm<sup>3</sup>に達し、温度均一性は±10℃未満に維持されます。加熱速度は約5℃/分、航空機サンプルの熱応力は10MPa未満で、効率は約10%向上します。現在の装置は複雑な形状の部品の加工に対応しており、表面品質へのプラスの影響が研究によって検証されています。

#### HIP 技術の応用効果

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 密度と多孔性の最適化

HIP 処理後、密度は  $18.5 \text{ g/cm}^3$  に達し、医療用サンプルの気孔率は 0.05%未満、圧縮強度は 1200 MPa を超えます。従来の焼結密度  $18.2 \text{ g/cm}^3$  と比較して、HIP 処理により約 5%の増加が見られ、原子力施設サンプルの安定性は 90%を超え、気孔分布の均一性も大幅に向上しました。

## 機械的特性の向上

HIP 最適化後、引張強度は 1500MPa に達し、航空サンプルは 20g 振動試験に合格し、靱性は約 25J/m です。硬度は 420HV に向上し、深宇宙サンプルの耐摩耗性は  $0.007 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  未満となり、寿命は約 15%延長され、高負荷環境の要件を満たしています。

## シールド性能の向上

HIP 処理後、タングステン合金の減衰係数は  $0.18 \text{ cm}^{-1}$  に達し、CT サンプルの透過率は 1.5%未満、遮蔽効率は 98%に達します。中性子吸収率は 86%に向上し、原子炉サンプルは  $10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  試験に 95%以上の安定性で合格し、高エネルギー放射線の遮蔽効果が大幅に向上しました。

## HIP プロセスの最適化とデータ

HIP パラメータの最適化により、性能が大幅に向上しました。1300°C、150MPa のプロセスで密度  $18.5 \text{ g/cm}^3$  を達成し、航空サンプルの気孔率は 0.1%未満です。3時間の保持時間で、医療サンプルの均一性は 98%を超え、耐酸化性は 90%を超え、熱応力は 10MPa 未満に抑えられます。

環境要因はプロセスに大きな影響を与えます。湿度 60%では密度変動は 0.1%未満、原子力施設サンプルの安定性は 95%を超え、高温（500°C）では効率が約 2%低下します。真空前処理を最適化することで、深宇宙サンプルの耐酸化性は 95%を超え、効率は安定し、熱変形率は 0.01%未満になります。

## アプリケーションのパフォーマンス

CT コリメータは HIP プロセスを採用し、透過率は 1.5%に低減されています。ある病院のサンプルは、1,000 回の熱サイクル試験に合格し、変形量は 0.05mm 未満で、優れた表面品質を実現しました。核廃棄物容器にも HIP プロセスが採用されており、圧縮強度は 1,200MPa 以上、耐用年数は 5 年以上、耐放射線性も安定しています。深宇宙探査機にも HIP プロセスが採用されており、約 10%の軽量化と 95%以上の耐振性を実現しています。あるプロジェクトでは、30g の振動試験に合格し、微小重力適応性は 98%でした。

## 課題と最適化の方向性

HIP 技術にはいくつかの課題があります。プロセスコストは約 15%増加し、特に複雑な部品の加工においては、総コストの約 20%を占めます。湿度精度を  $\pm 5\%$  に制御することは難

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しく、効率損失は約 1%です。高温割れのリスクが高まり、密度は約 2%変動します。これは特に高温高湿環境で顕著です。

最適化の方向性としては、低コストの HIP プロセスの開発が挙げられ、パイロットコストを約 5%削減しました。インテリジェント温度制御システムを導入し、目標精度を±2℃に向上させることで熱応力の影響を低減しました。インテリジェント監視技術の適用により、ひび割れ率の目標値を 0.1%に低減し、製品品質の向上に寄与する可能性を示しました。

### 将来の見通し

密度目標は 18.6 g/cm<sup>3</sup> に設定されており、現在の研究では 18.5 g/cm<sup>3</sup> に近づいており、高密度化の可能性は引き続き探求されています。遮蔽効率目標は 99%に設定されており、技術的なルートは基本的に明確化されています。今後の開発はスマートプロセスと先進材料技術が主導し、市場潜在力は 20%まで増加すると予想されています。業界分析では、原子力産業と航空宇宙分野への応用がさらに拡大すると予測されています。

## 3.3 タングステン合金シールド加工技術と品質管理

タングステン合金は、その高い密度、優れた放射線遮蔽性能、良好な加工性能により、医療防護、原子力工学、工業非破壊検査などの分野における遮蔽部品の製造に広く使用されています。タングステン合金遮蔽部品の製造は、材料特性に対する高い要求だけでなく、加工技術、表面処理、品質管理システムにも体系的な課題をもたらします。本章では、CNC 加工と放電加工技術、表面処理と気孔率制御、品質検査と規格認証という 3 つの側面から、タングステン合金遮蔽部品の加工・品質保証技術体系を体系的に解説します。

### 3.3.1 タングステン合金シールド部品の CNC 加工と EDM 加工

タングステン合金は、高硬度、高脆性、低熱伝導性のため、一般的な金属材料に比べて加工がはるかに困難です。CNC 加工は、タングステン合金シールド部品の成形において最も広く用いられている方法の一つです。タングステン合金部品の高精度なフライス加工や穴あけ加工は、高速・高剛性の CNC 工作機械と専用に設計された超硬工具によって実現できます。しかし、CNC 加工では、工具の摩耗が早い、切削抵抗が大きい、熱影響部が目立つなどの問題が発生することが多く、切削パラメータや冷却・潤滑条件の最適化が求められます。

補完放電加工（EDM）は、タングステン合金の複雑な構造の加工において、かけがえのない利点を持っています。特に、タングステン合金シールド部品によく見られる小さな穴、高アスペクト比構造、特殊形状の溝などにおいて、EDM は非常に高精度な放電成形が可能です。ワイヤーカット加工（WEDM）は特殊形状のエッジやスロットの加工に適しており、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

フォーミング EDM は深いキャビティ構造を持つ厚肉部品の仕上げに適しています。EDM は工具に大きな機械的負荷をかけず、高硬度で脆いタングステン合金に適していますが、効率が比較的低いため、工程計画において考慮する必要があります。

### 3.3.2 タングステン合金シールド部品の表面処理と多孔度の最適化

タングステン合金は主に粉末冶金法で成形されるため、内部にある程度の大きさの気孔が存在することは避けられません。気孔は機械的特性に影響を与えるだけでなく、放射線遮蔽能力を低下させる原因にもなります。そのため、タングステン合金遮蔽部品の製造工程において、気孔率の制御は重要な品質指標の一つです。焼結パラメータの最適化と熱間等方圧加圧（HIP）処理プロセスの採用により、材料内部の残留気孔率を大幅に低減し、構造密度を向上させることができます。

表面処理においては、耐食性、美観、耐用年数を向上させるために、研磨、電気めっき、またはスプレー塗装などの表面強化処理がしばしば用いられます。例えば、医療分野で使用されるタングステン合金シールド部品は、人体との接触による酸化反応を防ぐため、ニッケルめっきやコーティングを施すことがよくあります。また、優れた電気絶縁性と耐汚染性を備えたポリマーコーティングのスプレー塗装も一般的な方法です。研磨は外観を向上させるだけでなく、表面粗さを低減し、マイクロクラックの発生を防ぐ効果もあります。

### タングステン合金シールド部品の品質検査と規格認証

タングステン合金シールド部品は、原材料検査、加工管理、完成品検査という全工程を経る必要があります。材質面では、密度（通常はアルキメデス法で測定）、硬度（ブリネル硬さやビッカース硬さなど）、微細構造、組成の均一性などを試験する必要があります。高精度シールド構造の場合は、厚さの均一性、気孔分布、介在物についても試験する必要があります。これらは CT スキャン、X 線検査、金属組織分析などを用いて実施できます。

寸法検査に関しては、高精度な寸法検証のために三座標測定機（CMM）が用いられます。複雑な形状や高い精度が求められる部品の場合は、組立検証や公差マッチング試験も必要です。表面粗さやコーティング厚さは、プロファイロメーターや蛍光 X 線（XRF）装置を用いて分析できます。

規格認証に関しては、タングステン合金遮蔽部品の技術仕様は業界によって異なります。例えば、医療用放射線防護分野では ISO 13385 または ASTM F2886 規格が参照されますが、原子力産業で使用される遮蔽部品では、ASME BPVC や ISO 6520 などの規格への準拠が求められる場合があります。エンドユーザーの中には、特定の用途に基づいて企業レベルの品質管理基準を策定し、製造会社に対してより高い要求事項を提示する場合があります。

### 3.4 タングステン合金シールドの持続可能な製造と環境保護技術

世界中で持続可能な開発目標への関心が高まる中、製造業、特に希少金属や高エネルギー消費材料を扱う産業は、資源保全、環境配慮、炭素排出抑制などの課題に直面しています。重要な高密度金属製品であるタングステン合金シールド部品の製造工程における資源採

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

掘、粉末冶金焼結、高エネルギー機械加工、後処理などは、ある程度の環境負荷をもたらします。そのため、体系的なグリーン製造と持続可能な開発システムを確立することは、タングステン合金シールド部品産業の長期的な発展にとって極めて重要です。

本章は、廃棄タングステン合金シールド部品のリサイクル・再利用、低炭素製造プロセス、そしてグリーン製造の将来的発展という 3 つの側面から始まり、環境保護と資源保全におけるタングステン合金シールド部品のフロンティア開拓と実践の道を体系的に解説します。

### 3.4.1 廃棄タングステン合金シールド部品のリサイクルと再利用

タングステンは、世界的に埋蔵量が限られており、需要が広範囲にわたる希少金属資源です。リサイクルと再利用は、資源逼迫と生産コストの削減において重要な手段となっています。タングステン合金シールド部品の製造工程、特に CNC 切削、放電加工、後加工工程では、大量の切削片、摩耗粉、不良品が発生します。これらのスクラップ、切削片、廃部品が適切に処理されない場合、タングステン資源の深刻な浪費につながるだけでなく、環境汚染にもつながる可能性があります。

リサイクル方法は主に以下のとおりです。

1. **機械による収集と分級:** 処理中に発生する金属片や粉末は、負圧システムまたは磁気装置によって収集されます。粒子サイズや不純物含有量が異なる残留物は、ふるい分けと分級によって処理され、再利用効率が向上します。
2. **化学還元再生:** 高温水素還元または炭素熱還元技術を使用して、廃棄タングステン粉末中の酸化物を金属タングステン粉末に還元し、タングステン合金粉末製造プロセスで再利用します。
3. **湿式冶金回収:** タングステン含有廃棄物をアルカリ性または酸性溶液 (NaOH または HCl など) に溶解し、沈殿、抽出、結晶化などによりタングステン酸またはパラタングステン酸アンモニウムを抽出し、その後、熱分解により再生された  $WO_3$  を得て、新しい粉末を製造します。
4. **閉鎖型リサイクルチェーン:** 大規模なタングステン製品製造企業では、廃棄物の収集、前処理、再粉碎、再焼結までの統合された閉ループシステムが確立されており、タングステン資源の利用とリサイクルを最大化しています。

統計によると、効率的なリサイクル・再利用システムを活用することで、タングステン合金シールド部品の原材料利用率を 15~25% 向上させ、廃棄物処理コストと環境排出量を大幅に削減できます。これは、グリーン製造を実現するための中核的なサポートの一つです。

### 3.4.2 タングステン合金シールド部品の低炭素製造プロセス

従来のタングステン合金シールド部品の製造工程、例えば高温焼結、機械切削、表面処理などは、通常、高いエネルギー消費と高い排出量を伴います。「デュアルカーボン」政策

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

と企業自身の ESG 目標に対応するため、業界では様々な低炭素製造技術を積極的に模索しています。

#### 1. 低温焼結技術とプラズマアシスト成形:

従来のタングステン合金の焼結温度は通常 1500~1700℃と高く、非常に多くのエネルギーを消費します。合金比率の最適化、緻密化助剤の添加、そしてプラズマ焼結技術（プラズマ活性化焼結、PAS）の導入により、より低温（1000~1300℃）で緻密な成形が可能になり、エネルギー消費を大幅に削減できます。PAS は焼結時間の短縮、組織の均一性の向上、そして排出量の削減にも貢献します。

#### 2. 減算型製造技術（ニアネットシェイプ成形）:

粉末射出成形（MIM）や熱間等方圧成形（HIP）などの技術によってニアネットサイズ成形を実現できます。これにより、後続の処理で除去する必要がある材料の量が大幅に削減され、切削エネルギーの消費量と発生源からのチップ廃棄物が削減されます。

#### 3. クリーンエネルギーの代替とエネルギーの最適化:

生産工場では太陽エネルギーや風力エネルギーなどの再生可能エネルギーのエネルギー供給システムを活用し、同時に焼結炉、冷却システム、換気システム、空気圧縮システムなどの主要設備の省エネ改造を行い、周波数変換制御、電磁加熱、廃熱回収システムを導入することで、製品単位あたりの炭素排出量を削減します。

#### 4. グリーン表面処理プロセス:

従来の電気めっき（クロムやニッケルなどの重金属を含む）の代替品として、環境に優しい PVD コーティング、ナノセラミックスプレー、非シアン化物電気めっきなどがあり、より環境に優しく、廃液排出と後処理コストを削減します。

これらの低炭素技術の推進には一定の初期投資が必要ですが、製造コストを削減し、ブランドの持続可能な価値を高め、中長期的にはグリーンサプライチェーンに対する市場の需要を満たすことができます。

### 3.4.3 タングステン合金シールド部品のグリーン製造の将来展望

タングステン合金シールド部品のグリーン製造の今後の発展は、環境保護と省エネに重点を置くだけでなく、ライフサイクル全体の観点から「グリーン製品-グリーン工場-グリーン産業チェーン」のシステムソリューションの構築にも重点を置いています。今後の発展動向は、以下の側面から期待できます。

#### 1. グリーン製造は、デジタル化とインテリジェント製造と統合されています。

デジタルツイン製造プラットフォームを構築することで、各プロセスのエネルギー消費と排出量をリアルタイムで監視し、人工知能アルゴリズムを導入して生産スケジュールとエネルギー効率を動的に最適化します。また、産業用モノのインターネット

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(IIoT) を使用してエネルギー消費を診断し、メンテナンスを予測することで、リソースの利用効率を総合的に向上させます。

## 2. ライフサイクルアセスメント (LCA) とカーボンフットプリント管理:

原材料調達、生産、輸送、使用からリサイクルまでのタングステン合金シールド部品のカーボンフットプリントデータベースを構築し、製品の炭素排出量の完全なトレーサビリティを実現します。企業が ISO 14067、PAS 2050 などの標準認証に合格することを促進し、国際市場に環境に優しく信頼性の高い製品を提供します。

## 3. 業界横断的な連携リサイクル:

タングステン合金廃棄物は、共有リソースプラットフォームを通じて粉末製造、軍事リサイクル、超硬合金再生などの他産業に輸送され、従来の産業の枠を打破し、地域連携循環型経済ネットワークを形成します。例えば、医療廃棄物のタングステンシールド部品は、新しい粉末冶金工場にリサイクルされ、3D プリント用タングステン合金原料となります。

## 4. 新素材と環境に優しい代替素材の研究:

遮蔽性能を確保する前提で、タングステン樹脂ベースの複合遮蔽部品、タングステンモリブデン合金、希土類元素添加タングステン材料など、より軽量で炭素量の少ないタングステン合金複合材料を開発し、航空宇宙などの分野における軽量化とグリーン性能の二重の要件を満たします。

## 5. 世界的なグリーン政策の推進:

今後、欧米市場では、タングステン合金シールド部品に対してより厳しい RoHS、REACH、カーボンラベル要件が課される可能性があり、これにより製造企業は事前にグリーン認証制度を整備し、「グリーンパス」を構築し、国際競争力を強化することになります。

まとめると、タングステン合金シールド部品の持続可能な製造は、業界の高品質発展の重要な方向性となっています。廃棄物のリサイクル、低炭素プロセスの改善、グリーン技術の革新を通じて、環境への悪影響を大幅に低減できるだけでなく、企業の資源効率と社会価値の二重の向上を実現できます。グリーン化の継続的な深化に伴い、タングステン合金シールド部品は、インテリジェント化、デジタル化、グリーン化の融合という新たな発展段階へと徐々に移行していくでしょう。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

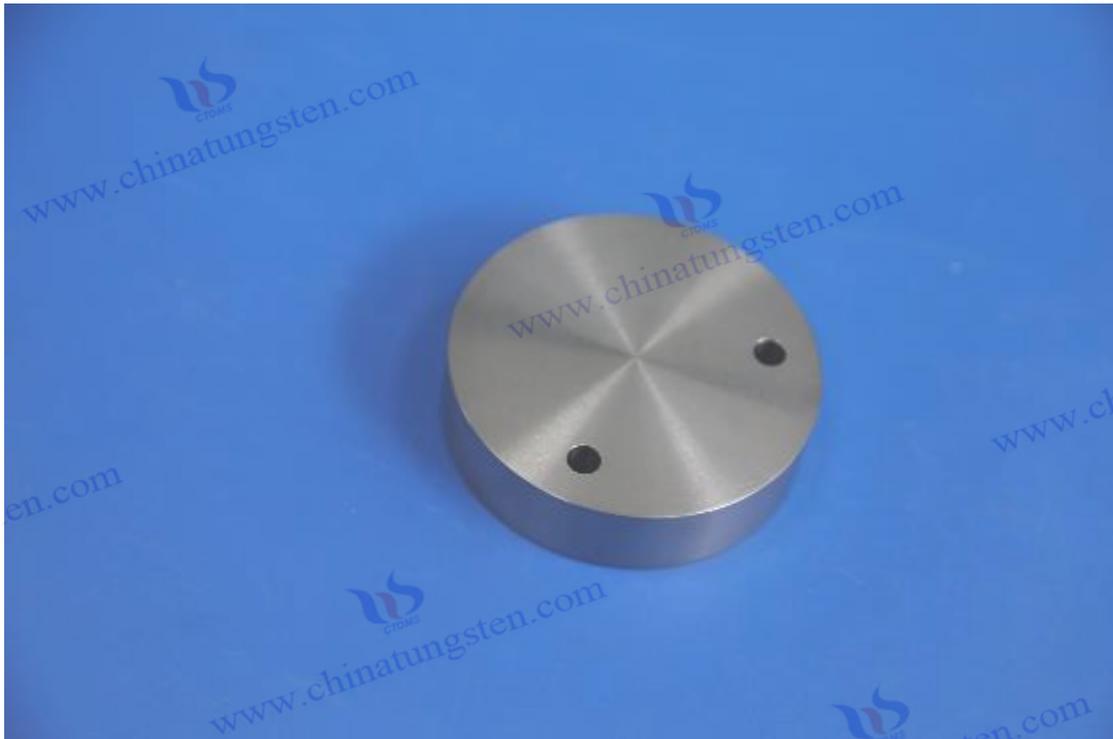
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## 第4章 タングステン合金シールド部品の分野

### 4.1 タングステン合金シールド医療分野

医療用画像、放射線治療、核医学技術の急速な発展に伴い、医療用放射線機器や同位元素への応用が徐々に普及し、放射線遮蔽材料に対する要求性能はますます高まっています。タングステン合金は、その極めて高い密度（ $17.0\sim 18.5\text{ g/cm}^3$ ）、優れたX線およびガンマ線吸収能、良好な加工性、そして生体適合性により、従来の鉛遮蔽材料に代わる理想的な選択肢となっています。特に、高い遮蔽効率、環境保護、無毒性、そして精密な構造統合を追求する現代の医療機器において、タングステン合金遮蔽は幅広い応用の可能性を示しています。

医療分野におけるタングステン合金遮蔽は、CT装置と放射線治療、携帯型保護装置、バイオセーフティ基準の3つの側面から検討されています。

#### 4.1.1 CT装置および放射線治療におけるタングステン合金遮蔽

##### 1. CTスキャン装置への応用:

コンピュータ断層撮影（CT）装置では、患者とオペレーターの放射線安全を確保するため、システム内部に複数のタングステン合金遮蔽部品が設置されています。これらの部品には通常、X線管球の照射領域を囲む遮蔽管、回転アーム遮蔽層、撮影室シェル保護板などが含まれます。これらのタングステン合金部品は、高密度構造によりX

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

線の散乱や漏洩を遮断するとともに、優れた加工性と熱伝導性により、連続運転時の装置の構造安定性と熱負荷の放出を確保します。

## 2. 放射線治療システムにおける遮蔽部品:

線形加速器 (LINAC)、ガンマナイフ、陽子ナイフなどの現代の放射線治療装置は、高エネルギーX線または粒子線を広く用いて癌組織を照射しています。タングステン合金遮蔽材の中核的な役割は、\*\*コリメータブレード、ビームシェイパー (MLC)\*\*、そして放射線遮断部品を形成することです。特に強度変調放射線治療 (IMRT) において、タングステン合金製多葉コリメータはミリメートルレベルの動的遮蔽を実現し、放射線量を効果的に制御し、健全組織へのダメージを軽減します。

## 3. 技術的優位性の比較:

従来の鉛遮蔽材と比較して、タングステン合金は密度が高く、構造安定性に優れています。等価遮蔽容量は鉛の約 1.7 倍です。酸化されにくく、揮発性毒性もないため、機器の寿命と環境安全性がより保証されます。さらに、CNC 精密加工や射出成形により、複雑な形状の部品を実現できるため、CT 機器や放射線治療機器の軽量化とモジュール化に技術的サポートを提供します。

### 4.1.2 ポータブルシールド装置のタングステン合金シールド部品

#### 1. 核医学とポータブル診断・治療の需要拡大:

放射性核種イメージング (SPECT、PET) やベッドサイド放射線検査装置の普及に伴い、医療機関におけるポータブル遮蔽装置の需要は年々増加しています。例えば、ポータブル X 線装置、移動型 CT、放射性核種注入装置、現場での放射線検出装置などは、運用安全性と柔軟な適用という二重の要件を満たすために、軽量で効率的な遮蔽ユニットを搭載する必要があります。

#### 2. タングステン合金ポータブルシールド製品の種類:

タングステン合金は、次のポータブル保護装置に広く使用できます。

- **核種注射器保護シェル:** タングステン合金製の注射器スリーブは、操作者の手のベータ線とガンマ線への曝露を大幅に低減します。
- **ポータブル X 線シールド:** ベッドサイドでの画像検査に適しており、医療スタッフに即時のシールドを提供します。
- **放射性源輸送容器:** 同位体輸送用のコンパクトで効率的な保護空洞を提供します。
- **着用可能なタングステン合金製の頑丈なベストとネックアーマー:** 特別な役割を担う人員の局所的な高密度保護設計に適しています。

#### 3. 小型化とモジュール化の利点:

タングステン合金は高密度材料の中でも比重と機械的強度に優れており、携帯用防護具の小型化と重量分散に貢献します。例えば、タングステン合金製の放射線防護ベストは、同

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

等の遮蔽レベルの鉛製ベストに比べて約 30%軽量で、着用感と長期使用耐性を効果的に向上させます。

#### 4.1.3 タングステン合金シールドの生体適合性と安全基準

医療分野で使用されるすべての金属材料は、厳格な生体適合性、安全性、および規制遵守要件を満たす必要があります。タングステン合金は主に遮蔽目的で使用され、非インプラント接触または短期接触となることが多いものの、人体への安全性への影響と関連する材料規制への適合性については、依然として評価が必要です。

##### 1. 生体適合性評価:

研究により、タングステン合金材料は皮膚、体液、細胞組織に対して、損傷や酸化を起こさずに、顕著な毒性反応を示さないことが示されています。特にニッケルメッキ、電気泳動コーティング、エポキシ樹脂による包装などの表面処理を施すことで、その生物学的不活性性はさらに高まり、外科手術や核医学注射などの直接接触機器に広く使用することができます。

##### 2. 満たされている国際基準は次のとおりです。

- **ISO 10993** : 医療機器材料の人体への長期的影響を評価するための生物学的評価規格。タングステン合金は、細胞毒性、皮膚刺激性、感作性などの試験に合格する必要があります。
- **RoHS (EU 有害物質使用制限)** : タングステン合金自体は鉛やカドミウムなどの有害元素を含まず、グリーン環境保護基準を満たしています。
- **REACH 認証**: 化学成分と潜在的な暴露リスクの包括的なレビュー。
- **FDA 登録要件**(米国市場に輸出される医療部品の場合): 材料構成、安全性試験レポート、および該当する使用シナリオを提出する必要があります。

##### 3. 安全な梱包と使用上の推奨事項:

最大限の安全性を確保するため、タングステン合金シールド部品では、金属表面にポリマーフィルムやセラミックコーティングを施すなど、二重のシーリング設計が採用されることが多く、鋭角や破損のリスクを回避しています。同時に、医療用タングステン製品は、長期使用による性能低下や構造劣化を防ぐため、定期的な完全性検査と表面処理の補修が推奨されます。

##### まとめ

医療分野におけるタングステン合金遮蔽材は、放射線遮蔽性能、構造適応性、バイオセーフティといった総合的な優位性を発揮しています。大型画像診断装置、放射線治療システム、小型携帯機器、ウェアラブル保護装置など、あらゆる用途において、タングステン合金は鉛よりも高効率で環境に優しく、カスタマイズ可能なソリューションを提供できます。今後、医療機器のスマート化・小型化が進む中で、タングステン合金遮蔽材はより先

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

端的な用途で重要な役割を果たすようになり、継続的な材料改良とプロセス最適化を通じて、環境に配慮した高性能医療保護製品の開発をさらに推進していくでしょう。

## 4.2 タングステン合金シールド産業

産業界においては、原子力開発、非破壊検査、高放射線環境下での作業といったハイテク産業の継続的な発展に伴い、高性能放射線防護材料の需要がますます高まっています。超高密度金属材料であるタングステン合金は、ガンマ線、X線、中性子に対する優れた遮蔽性能を有し、安全性、耐久性、コンパクト性において従来の遮蔽材料をはるかに凌駕しており、産業界における様々な高放射線環境下における中核的な防護部品として着実に定着しつつあります。

タングステン合金遮蔽は、原子力産業と核廃棄物処理、産業用画像および検出装置、高放射線環境での装置保護の 3 つの側面から産業で利用されています。

### 4.2.1 原子力産業および廃棄物処理におけるタングステン合金遮蔽の応用

#### 1. 原子炉用放射線遮蔽部品:

タングステン合金は、原子力発電所、研究炉、高速中性子実験装置において、高エネルギーガンマ線および一部の中性子放射線を遮蔽するために広く使用されています。代表的な用途部品には以下が含まれます。

- 制御棒と反射体の間の遮蔽層。
- 中性子源またはガンマ線源クラッド。
- 検出器および制御システムの周囲の構造シールド。

タングステン合金は、限られた空間において鉛と同等、あるいはそれ以上の遮蔽効果を発揮し、原子力機器の小型化とシステム統合性の向上に貢献します。同時に、一般的な金属合金よりも優れた耐食性と耐放射線性を備え、長期間にわたる高温・高放射線環境下でも構造安定性を維持します。

#### 2. 核廃棄物管理への応用:

タングステン合金は、高レベル放射性廃棄物の一時保管・輸送における遮蔽容器材料としても使用できます。特に、短期使用済み燃料部品や医療用核種を梱包・輸送する必要がある場合、タングステン合金遮蔽バレルまたは遮蔽モジュールは以下のような効果を発揮します。

- 高エネルギーガンマ線の漏洩を効果的に抑制します。
- コンテナ容積を大幅に削減し、輸送効率を向上します。
- 放射線作業員への放射線量を低減します。

タングステン合金の機械加工性により、さまざまな厚さ、構造、内部空洞形状の設計も要求に応じてサポートされ、さまざまな核廃棄物形態の梱包要件を満たすことができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. 鉛材料代替による環境面でのメリット:

原子力産業における従来の遮蔽材には主に鉛が使用されていますが、鉛材料は加工、輸送、廃棄の過程で深刻な環境汚染リスクを伴います。タングステン合金は無毒でリサイクル可能であるだけでなく、長寿命と高い構造健全性を備えており、クリーン生産と持続可能な開発という現代の原子力産業の要件を満たしています。

#### 4.2.2 タングステン合金シールドの産業用イメージングおよび検出への応用

##### 1. 放射線非破壊検査装置の主要部品:

航空宇宙、自動車製造、機械加工、圧力容器などの分野において、工業用非破壊検査（NDT）技術は、X線またはガンマ線を用いて材料の内部欠陥を画像化し分析します。放射線の方角を制御し、放射線の漏洩が作業員や周囲の環境に影響を与えるのを防ぐため、タングステン合金シールドが広く使用されています。

- X線源遮蔽およびパイプ遮蔽。
- ガンマ線源用の固定コンテナ。
- 画像受容器の周囲にある放射バッフル。
- 産業用検査ロボットのシールド筐体。

タングステン合金は精密な加工性と高密度を特徴としており、方向性のある窓やフレキシブルジョイントなどの複雑な構造にも使用でき、産業用 X 線検出において高解像度と高い安全性を実現します。

##### 2. 産業用リアルタイム画像システムへの応用:

リアルタイム X 線画像システムは、電子部品のパッケージ検査、食品安全検査、材料欠陥分析などに広く使用されています。システム内の放射線コリメータおよび背景遮蔽材料としてのタングステン合金は、後方散乱を減らすだけでなく、画像コントラストと感度を向上させ、検出精度を高めることができます。

##### 3. フレキシブルシールド部品の開発動向:

自動化とインテリジェント製造の発展に伴い、産業機器では、取り外し可能なシールドモジュール、フレキシブル回転シールドアームなどの放射線防護部品に対する要求が高まっています。タングステン合金は、複雑な機器の動作要件を満たす高い加工精度を備えているため、精密マッチング溝、回転ベアリング穴、ケーブル貫通穴を備えたシールド部品の製造に使用できます。

#### 4.2.3 高放射線環境におけるタングステン合金遮蔽の応用

##### 1. 放射線作業場および実験室での使用:

高エネルギー物理学研究、核燃料処理施設、放射性医薬品製造などの分野では、作業員が中強度から高強度の放射線環境に長時間曝露される可能性があります。タングステン合金遮蔽は、主に以下の用途に使用されます。

- サンプル処理ステーションのローカル保護。
- 放射線窓用の開閉可能な遮蔽カバー。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 制御機器および電気システム用の内部シールドボックス。

これらのタングステン合金部品は、小型の組み込み構造にカスタマイズすることができ、機器のコンパクトさを保証するだけでなく、複雑な操作手順下でも放射線安全性を実現します。

## 2. 遠隔制御システムとロボットの防護:

高放射線エリアでの作業において、タングステン合金遮蔽部品は、遠隔制御ロボットアーム、検出ロボット、無人検査装置などにも広く利用されており、コア回路、センサー、アクチュエータの放射線防護に役立っています。例えば、

- シールドスリーブ: 赤外線またはカメラレンズを保護するために使用されます。
- 回転シールドジョイント: 高自由度ロボットアームに使用されます。
- 折りたたみ式保護シールド: 高放射線環境の近くで作業する場合に使用します。

タングステン合金はシールド機能を維持しながら優れた機械的特性を備えているため、これらの高機能デバイスは衝撃、放射線、長期動作に対して耐性があります。

## 3. 高放射線環境試験プラットフォームおよびシミュレーション装置:

原子力発電システム、航空宇宙放射線防護装置、あるいは深部地球探査装置を設計する前に、検証のための放射線シミュレーションプラットフォームを構築することがしばしば必要となります。タングステン合金遮蔽モジュールは、シミュレーションキャビン、試験チャンネル、遮蔽壁などの構造物を柔軟に配置できるため、研究者は制御された環境で製品の放射線耐性を検証し、設計スキームを最適化することができます。

### まとめ

タングステン合金遮蔽部品は、産業分野において高い機能適応性と安全性を示してきました。原子力システムの高エネルギー遮蔽から高解像度の産業用検出、核廃棄物移送容器から遠隔操作機器の放射線防護まで、優れた密度、機械特性、そして環境優位性を備えたタングステン合金は、産業における高放射線環境において、コンパクトで安定性と長寿命を兼ね備えたソリューションを提供します。

グリーン製造、高信頼性、そして精密な統合の進歩に伴い、タングステン合金シールドは将来の産業の重要分野においてより広範な役割を果たすようになるでしょう。人工知能、遠隔制御、デジタル製造との統合により、高放射線産業環境において、より安全で効率的、そしてインテリジェントな運用保証がもたらされるでしょう。

## 4.3 航空宇宙分野におけるタングステン合金シールド部品

航空宇宙分野は、タングステン合金シールド部品の応用における戦略的ハイランドです。その独特の高密度、高融点、優れた放射線遮蔽性能、そして熱安定性により、有人宇宙飛行、深宇宙探査、衛星電子機器の保護、推進システムの絶縁といった重要な分野において重要な役割を果たしています。特に、宇宙線、高エネルギー粒子嵐、超高温の空力熱環境、微小重力環境といった過酷な課題に直面すると、従来の金属材料では対応できないことが多く、タングステン合金はその総合的な性能から、選ばれる材料の一つとなっています。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3.1 深宇宙探査および衛星保護におけるタングステン合金シールドの応用

##### 1. 宇宙線および太陽高エネルギー粒子放射線の遮蔽:

低軌道（LEO）、中軌道（MEO）、そして深宇宙環境で運用される宇宙船は、宇宙線（GCR）および太陽高エネルギー粒子（SEP）に長期間曝露されます。これらの高エネルギー粒子は、航空宇宙電子機器、センサーシステム、さらには宇宙飛行士の健康に重大な脅威をもたらします。タングステン合金は原子番号が高く密度が高いため、ガンマ線、電子流、一部の中性子線の遮蔽に優れており、粒子束を効果的に弱め、シングルイベントアップセット（SEU）や材料の放射線損傷を軽減します。

##### 2. 衛星電子機器の局所保護構造:

通信、航法、リモートセンシングなどの高信頼性衛星では、以下の主要部品の保護シールドとしてタングステン合金が使用されています。

- 精密光検出部品のシールド。
- 電力管理システム用の放射線バリア。
- 放射性核種電源システム（RTG など）のガンマ線および中性子遮蔽。
- マイクロ波コンポーネントおよび低ノイズ増幅器用の環境隔離エンクロージャ。

特に原子力用の深宇宙探査機（ボイジャー、キュリオシティなど）では、タングステン合金は放射性熱源と他のシステム間の効率的な遮蔽材料として使用でき、システムの長期的かつ安定した動作を確保します。

##### 3. 小型衛星および航空宇宙電子モジュールの軽量設計:

現代の CubeSat、NanoSat、その他の超小型宇宙船は、重量管理が極めて厳格です。こうした状況において、タングステン合金シールド部品は「単位体積あたりのシールド容量が高い」という特長を活かし、より小さなスペースでより高い保護効果を実現し、主要な電子デバイスを内蔵する小型衛星の構造最適化と放射線防護を実現します。

#### 4.3.2 ロケットおよび宇宙船の断熱におけるタングステン合金シールドの応用

##### 1. スタンピング断熱材と空力熱環境保護:

宇宙船が大気圏に再突入すると、表面温度は 2000°C を超える可能性があり、熱保護システム（TPS）には極めて高い耐摩耗性と耐熱性が求められます。タングステン合金は融点が 3422°C に達し、高い熱伝導率と低い熱膨張係数を特徴とするため、局所的な高熱負荷領域に最適な保護材料です。主な用途は以下のとおりです。

- ロケットノズルのスロートおよびノズルエッジの高温シールド。
- 遮熱構造の支持フレームまたは背面熱反射板。
- 推進システムの尾部防火モジュール。
- 再使用可能車両の熱防護階層における中間層。

制御帰還型宇宙船（SpaceX の Falcon 9 回収段など）や宇宙飛行機の空力加熱テストでは、タングステン合金部品を多層複合材を介してセラミックベースの材料と組み合わせることで、全体的な耐熱衝撃性と構造安定性が向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 推進システムにおける遮蔽・断熱構造:

液体ロケットエンジン、イオンスラスタ、核熱推進（NTP）などのシステムは、運転中に高温プラズマと輻射熱を発生し、周囲の構造物や燃料供給システムに干渉を与えます。タングステン合金製の遮蔽リング、渦流カバー、熱セパレーターは、以下の効果を発揮します。

- 赤外線熱流を部分的に遮断します。
- 燃料システムの熱膨張と故障を防止します。
- 推進システムの熱負荷分布を制御し、その耐用年数を延ばします。

タングステン合金は、将来の高出力電気推進システムの陽極およびイオンガイドチャンネル材料にも適しています。優れた電熱安定性と相まって、システムの効率と安全性をさらに向上させることができます。

### 4.3.3 微小重力環境におけるタングステン合金シールドの性能検証

#### 1. 微小重力環境下における材料挙動の変化と適応性検証:

微小重力環境では、材料の熱伝導率、界面接触、溶接挙動、疲労き裂伝播経路が変化する可能性があります。タングステン合金は比較的脆いため、主要部品に使用する前に、微小重力下における機械的および熱的安定性を検証する必要があります。現在、国際宇宙ステーション（ISS）と宇宙材料実験プラットフォームは、微小重力下におけるタングステン合金サンプルの複数回の試験を実施しています。

- 熱膨張・収縮性能測定
- 材料の微細構造安定性解析。
- 宇宙粒子衝突後の亀裂抵抗試験
- 多サイクル熱衝撃および温度急変条件下での応力応答挙動。

結果によると、合金比率（W-Ni-Fe または W-Re 系など）と高密度化処理（熱間静水圧プレスなど）を最適化すると、タングステン合金は微小重力環境において優れた熱機械結合安定性と耐衝撃性を維持できることがわかりました。

#### 2. 宇宙服および積載装置の構造統合試験:

宇宙服の運搬装置や客室乗務員保護装置に使用される小型タングステン合金遮蔽部品も、宇宙ステーション内で機能統合および人間工学試験を受けています。その機能は以下の通りです。

- 客室内の放射線漏れを防ぐ。
- 短期的な高エネルギー粒子曝露から胸部または脳を保護する。
- 二重機能（構造 + 保護）コンポーネントとして材料輸送パッケージに統合されます。

#### 3. 長期有人深宇宙ミッションにおける遮蔽配置の研究:

NASA、ESA、そして中国の宇宙ステーションプロジェクトは、深宇宙有人飛行中にキャビ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ン内にタングステン合金遮蔽シートとモジュールをどのように配置するかを研究しています。太陽粒子イベント（SPE）発生時の一時的なシェルター（ストームシェルター）として機能します。タングステン合金の局所埋め込み設置特性は、地上での事前設置や軌道上での迅速な組み立てに適しており、宇宙飛行士の生命を守るための実用的なシェルター構造を形成します。

#### まとめ

タングステン合金シールド部品は、航空宇宙分野においてその比類なき戦略的価値を実証しています。強力な放射線、極めて高い温度、精密な構造、そして異常な重力といった複数の極限環境下において、タングステン合金は優れたシールド性能を発揮するだけでなく、その熱安定性、機械的強度、そして加工性により、ロケット、衛星、宇宙船、そして深宇宙ミッションにおいて不可欠な主要構成材料となっています。

今後、深宇宙有人探査、宇宙原子力推進、高速再突入などの分野における技術の進歩に伴い、タングステン合金シールドは、より複雑で変化に富む応用シナリオにおいて引き続き重要な役割を果たしていくでしょう。また、その複合材料、軽量化、機能統合は、材料科学および航空宇宙工学における重要な研究分野となるでしょう。

#### タングステン合金シールドのその他の新興分野

科学研究、国家安全保障、持続可能な開発といった様々な要因によって新たな用途が継続的に拡大する中、タングステン合金シールド部品は、従来の医療、産業、航空宇宙といった主流の用途から、素粒子物理学研究、高強度軍事防護、グリーン環境保護技術といった最先端分野へと拡大しています。高密度、高原子番号、優れた耐放射線性、そして熱安定性といった特性により、極めて複雑な環境下でも信頼性の高いシールド機能を発揮し、将来の多分野にわたる応用分野を支える重要な材料となっています。

#### 4.4.1 素粒子物理学実験におけるタングステン合金遮蔽の応用

##### 1. 高エネルギー加速器および検出システムの遮蔽構造：欧州原子核研究機構（CERN）

の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)、中国の高エネルギーシンクロトロン放射施設(HEPS)、国際熱核融合実験炉（ITER）といった大型素粒子物理学実験装置では、実験装置から大量のガンマ線、中性子、二次粒子が発生します。これらの放射線は、実験測定を妨害するだけでなく、研究者や制御システムを危険にさらす可能性があります。

タングステン合金シールドは、次のような用途で広く使用されています。

- **ビームダンプ**: 最大数百 GeV のエネルギーを持つ高速粒子流を吸収します。
- **粒子検出器周囲の遮蔽空洞**: 液体キセノン検出器のガンマ線抑制スリーブなど。
- **中性子発生装置用の中性子バッファーおよびアーティファクトシールド**。
- **レーザープラズマ加速器における強レーザーと放射線の干渉を抑制する構造**。

タングステンはZ値（74）が高いため、高エネルギーガンマ線に対する遮蔽効率が銅や鋼よりもはるかに高く、構造が安定していて溶けにくいいため、高エネルギー物理実験プラットフォームの構築に欠かせないキーマテリアルです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 暗黒物質およびニュートリノ検出実験のための超低背景放射線遮蔽:

タングステン合金は、次のような超低背景放射線環境での実験にも使用されます。

- 暗黒物質検出プロジェクト（XENONnT や LUX-ZEPLIN など）
- ニュートリノ質量測定実験（KATRIN など）
- 中性子崩壊と  $\beta$  崩壊の精密測定実験。

これらの実験は、極めて微弱な信号を検出することを目的として地下深くに設置されることが多いため、周囲の遮蔽材の放射能含有量は非常に高くなります。低バックグラウンドタングステン合金（つまり、放射能汚染が極めて低い高純度の原材料で作られたもの）を使用することで、効率的な保護層を構築し、自然背景放射線と宇宙線干渉を効果的に抑制することができます。

## 4. 4. 2 国防および安全保障におけるタングステン合金シールドの応用

### 1. 核兵器関連機器の防護構造:

タングステン合金は防衛産業において広く利用されており、特に核兵器の制御防護、地下核実験データの解析、放射線防護システムの構築に用いられています。タングステン合金の遮蔽には以下の利点があります。

- **ガンマ線や中性子の吸収効率が高く**、弾頭遮蔽や密閉型核兵器試験部品に使用できます。
- **強力な耐衝撃性があり**、爆発や衝撃に耐え、完全性を維持できます。
- プルトニウムやウラン反射体遮蔽ケースなどの**臨界安全装置に使用**されます。

### 2. 軍用検出装置および核・生物・化学防護装置での使用:

電子戦、核検出、緊急防護において、タングステン合金部品は以下の用途に使用できます。

- 無人核放射線検出プラットフォーム用の電子モジュールシールド。
- 防護ヘルメットおよび携帯型核検出器の内部構造シールド。
- レーザー兵器システムの光路および敏感なコンポーネントの放射線防護。

たとえば、一部の軍用着用型放射線防護ベストでは、遮蔽効率と着用感の両方を考慮して、従来の鉛板の代わりにタングステン合金のウェイトモジュールが使用され始めています。

### 3. テロ対策および防爆分野での応用探究:

都市の安全とテロ攻撃の予防と制御の需要が高まるにつれて、タングステン合金材料の応用分野も探究されています。

- 防爆壁及び放射性物質隔離室;
- 移動式放射性源捕捉装置
- 放射性物質緊急廃棄ボックス（空港、地下鉄、公共の場での緊急管理に使用）。

高度にカスタマイズ可能な構造、耐衝撃性、耐腐食性を備えているため、迅速な対応が必要なシナリオでも実用的です。

## 4. 4. 3 環境保護技術におけるタングステン合金シールドの可能性

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. 環境放射線監視と制御:

環境監視システム、特に原子力事故地域、廃炉となった原子力施設、ウラン鉱山管理、放射性廃棄物貯蔵施設などにおいては、環境中のガンマ線と中性子放射線を正確に監視し、物理的な遮蔽を確立する必要があります。タングステン合金遮蔽は、以下の用途に使用できます。

- 地域環境監視ステーションの放射線プローブ保護。
- 核廃棄物貯蔵倉庫用のモジュール式遮蔽物。
- ウラン尾鉱浸出液中の  $\gamma$  線源バリアの構造。

鋼鉄や鉛などの従来の素材に比べ、遮蔽効率が高いだけでなく、二次汚染のリスクも軽減します。

### 2. 鉛代替のグリーン化と環境に優しいトレンド:

世界的に鉛汚染に関する環境規制がますます厳しくなる中（EU RoHS、REACH、米国 EPA 規制など）、タングステン合金は、無毒性、リサイクル性、制御可能な熔融処理などの利点により、**環境に優しい代替材料の重要な方向性**となっています。タングステン合金は、以下の国々で環境に優しい放射線材料システムに組み入れられています。

- 緑色 X 線検出装置（鉛シールドの代わりにタングステン合金シールド）
- 環境に優しい核医療廃棄物輸送容器。
- 再利用可能なタングステン合金シールドパッケージモジュール。

### 3. 再生可能エネルギーシステムとの連携応用:

核融合エネルギー（トカマクなど）や先進的核分裂炉の開発において、タングステン合金はシールド材としてだけでなく、**プラズマ第一壁材**や中性子減速層などにも利用されており、クリーンエネルギー技術と深く融合しています。例えば、ITER プロジェクトでは、タングステンは高エネルギー中性子の衝撃に耐えるための重要な領域で使用され、シールド材や構造複合機能部品としても機能します。

#### まとめ

タングステン合金シールド部品は、従来の応用分野を徐々に突破し、素粒子物理実験、国防安全保障、環境ガバナンスといった新興分野において幅広い発展の見通しを示しています。その独特の高密度、高いシールド効率、優れた機械的安定性、そして環境に優しい制御特性は、将来の多分野にわたるクロステクノロジーにおける重要な材料プラットフォームとなっています。

材料の精製、グリーン製造、そしてカスタマイズ成形技術の継続的な成熟に伴い、タングステン合金は高エネルギー物理学、極限の軍事環境、放射能汚染の防止と制御、そして新エネルギーシステムにおいて、より広範な役割を果たすようになるでしょう。タングステン合金遮蔽材の持続可能な開発は、科学技術の進歩、安全確保、そして環境ガバナンスの目標と連携し、より豊かで複雑な応用範囲を開拓していくでしょう。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

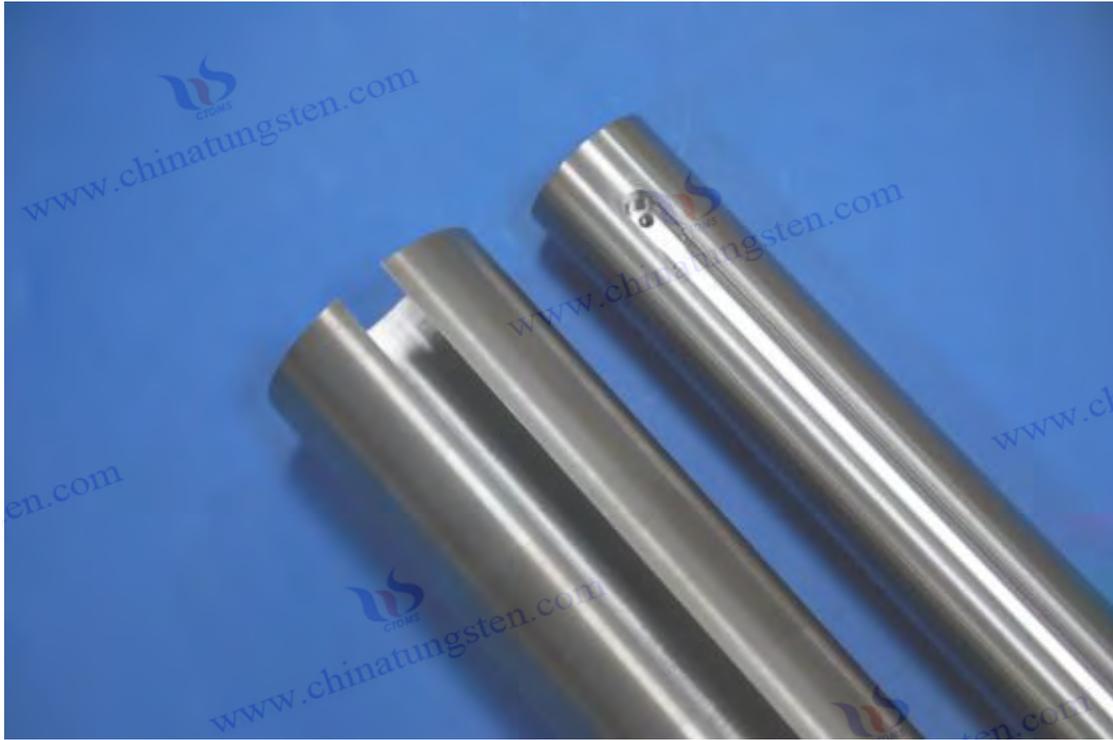
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## 第 5 章 タングステン合金シールドの課題と解決策

### 5.1 タングステン合金シールド部品のコストとサプライチェーン管理

タングステン合金シールドが医療、工業、航空宇宙、国防分野で広く使用されている状況において、高性能を確保しながら、制御可能な製造コストと安定した供給体制をどのように実現するかは、材料メーカーと最終顧客にとって共通の懸念事項となっています。タングステン金属自体は希少資源であるため、製錬および合金調製コストが比較的高く、加工技術要件も厳しいため、原材料調達、サプライチェーン構築、バッチ製造方法など、あらゆる面でコストを体系的に管理し、構成を最適化する必要があります。

#### 5.1.1 タングステン合金シールド部品の原材料コストの最適化

##### 1. タングステン原料のコスト構造

タングステン合金シールド部品のコスト構造において、原材料は総コストの約 60%~70% を占めています。主な原材料は以下のとおりです。

- タングステン粉末 (W): 高純度タングステン粉末の価格は最終的な合金コストを直接決定し、タングステンの採掘、国際市場の状況や政策によって大きく変動します。
- 合金元素: 一般的に添加される元素には、Ni、Fe、Cu、Re、La などがあります。異なる比率と純度要件は原材料の価格に影響します。
- 精製および選別処理: タングステン粉末は通常、還元、造粒、等級分け、乾燥などの手順を経る必要があります。材料の単位コストが増加します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 最適化戦略

1. 二次資源とリサイクルタングステン粉末の使用は、  
リサイクルタングステン廃棄物（廃棄タングステン線、タングステン電極、古いシールド部品など）を利用し、湿式冶金法または酸化還元法で高純度のリサイクルタングステン粉末を生産することで、原材料コストを10%～20%削減できるだけでなく、環境保護と持続可能な製造のトレンドにも適合します。
2. 合金比率を最適化し  
、プロセス検証を通じて一部の高価な元素を代替します。例えば：
  - Ni-Cu システムを Ni-Fe に置き換えます。
  - 添加する Re の量を正確に制御して高温材料のコストを削減します。
  - 粒子強化構造設計を使用して、一部の高コスト要素を置き換えます。
3. マルチ仕様原材料調達戦略で  
は、シールド部品の種類（医療、航空宇宙、産業シールドなど）に応じて、異なるグレードの原材料を購入します。例：
  - 医療用途には高純度タングステン粉末（ $\geq 99.95\%$ ）が必要です。
  - 工業用途では、酸素含有量がわずかに高い市販のタングステン粉末を少量使用して、グラムあたりの価格を抑えることができます。
4. 共同調達や長期契約のメカニズム、  
上流の粉末冶金会社や鉱山会社との長期供給契約の締結は、原材料価格の変動リスクを固定し、交渉力を向上させるのに役立ちます。

### 5.1.2 タングステン合金シールド部品サプライチェーン多様化戦略

#### 1. サプライチェーンの脆弱性分析

タングステン資源は高度に集中しており、中国、ロシア、ボリビアなどの国々が世界のタングステン精鉱生産量の70%以上を占めています。さらに、一部の国ではタングステン製品に対する輸出規制、割当制限、あるいは戦略的備蓄政策が実施されており、タングステン合金産業は地政学、関税政策、輸送のボトルネックなど、様々な干渉の影響を受けやすくなっています。

さらに、タングステン合金の加工チェーンは、鉱石採掘、タングステン粉末調製、合金プレス、焼結、機械加工、熱処理、表面処理まで、比較的長く、いずれかの工程が不安定になると、コスト増加や納期遅延につながります。

#### 2. 多様なレイアウト戦略

1. 原材料供給のための複数のチャンネルが並行して展開されている
  - 国内外の二重ルートを通じてタングステン粉末と補助金属を購入します。
  - 東南アジアおよびアフリカのタングステン資源国が単一依存を減らすこと。
  - 非中核製品向けに、非伝統的な市場からの中純度粉末の使用を検討します。
2. 地域加工センターの構築医療機器や産業センターの近くに  
タングステン合金シールド部品加工センターやモジュール組立工場を設立する

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

と、CNC加工、組立、品質検査を現場で完了できるため、物流コストと中間在庫を削減できます。

### 3. 主要工程リンクは

自主管理とアウトソーシングのバランスをとり、コアリンク（焼結、精密機械加工など）の生産能力を自社保有するとともに、非コア工程（粗加工、表面処理など）については戦略的なアウトソーシングを通じて柔軟な能力配分を実現し、サプライチェーン全体の柔軟性を向上させています。

### 4. デジタル サプライ チェーン管理プラットフォームは、

ERP および MES システムを使用して、原材料の調達、在庫レベル、注文の配送、品質の追跡可能性の全プロセスをデジタルで監視し、情報の透明性と共同作業の効率を向上させ、サプライチェーンの冗長性を削減します。

## 5.1.3 タングステン合金シールド部品の大規模生産による経済的メリット

### 1. 量産性と単価の関係

タングステン合金シールド部品の製造は複雑で、複数の精密加工と高温処理工程を経るため、設備投資額も大きくなります。しかし、稼働率の向上とプロセスの標準化により、明らかな**規模の経済効果が発揮されます**。具体的には、以下のようになります。

- 材料利用率の向上（スクラップはリサイクル可能）
- 金型、工具、治具を再利用してコストを分散できます。
- 熱処理炉とマルチステーション加工センターを並行して使用し、出力効率を向上させます。
- 運用と品質管理プロセスを標準化して、運用上の損失とやり直しコストを削減します。

業界の経験によれば、**月間生産量が 1,000 個を超える場合**（部品の複雑さによって異なります）、単位製造コストを 15% ~ 30% 削減できます。

### 2. カスタマイズと標準化の協調最適化

タングステン合金シールド部品は主にカスタマイズ製品ですが、モジュール設計と標準部品の組み立て思考により、小ロットのカスタマイズと大ロットの標準部品の共同生産を考慮することができます。

- 統一されたインターフェースと寸法を備えた標準シールド モジュールを開発します。
- 内部構造や機能コンポーネントを交換することで、パーソナライズされた機能を実現できます。
- 試作投資とサイクルを削減するための早期プロトタイプ開発手段として、**3D プリントされたタングステン合金シールド サンプル**を導入します。

この「標準 + カスタマイズ」の並行戦略は、研究開発および校正コストの抑制、顧客対応速度の向上、市場競争力の強化に役立ちます。

### 3. 市場と技術による相乗的な成長

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

世界的な放射線安全基準の向上とハイエンド製造市場の拡大に伴い、タングステン合金シールド部品は、「小ロット、強力なカスタマイズ」のハイエンドニッチ市場から、産業機器、民生試験、ウェアラブルデバイスなどの中高級マスマーケットに徐々に参入し、以下のトレンドを促進しています。

- スマート医療画像機器の市場では、小型シールド構造に対する需要が大きくなっています。
- 産業オートメーション用光線検出装置の部品をサポートするための汎用モジュールの調達。
- 航空宇宙軍事プラットフォーム用のタングステン合金部品の需要は着実に増加しています。

この市場需要の大幅な増加は、製造プロセスの継続的な最適化とコストの継続的な削減を促進し、好循環を形成します。

## まとめ

タングステン合金シールドは高性能材料分野において不可欠な存在であり、そのコストとサプライチェーン管理能力は、企業のグローバル市場における競争力を直接左右します。原材料の選択と配合を最適化し、多様で強固なサプライチェーンネットワークを構築し、大規模製造モデルの実現を促進することで、製造コストを効果的に抑制し、納品効率を向上させるだけでなく、企業のリスク耐性と技術サービス対応能力を高めることができます。

今後、リサイクルタングステン粉末の応用、グリーン冶金技術の発展、産業のデジタル化により、タングステン合金シールド部品の製造はより効率的で柔軟性が高く、持続可能になり、より幅広い分野での普及と応用に向けた強固な基盤が築かれるでしょう。

## 5.2 タングステン合金シールド部品の加工精度と技術的難しさ

タングステン合金は典型的な難加工材料です。タングステン合金シールド部品の製造工程では、高硬度、高脆性、高密度といった特性による切削・成形の難しさを克服するだけでなく、複雑な構造においても高精度な製造と優れた表面品質を実現する必要があります。これらの課題を解決するには、設備構成、工具選定、加工パラメータ、後加工技術などを総合的に最適化し、積層造形（3Dプリント）などの先進的な製造技術を導入することで、従来の加工技術のボトルネックを打破する必要があります。

### 5.2.1 タングステン合金シールドの高硬度材料の加工上の課題

#### 1. タングステン合金の加工特性と難しさ

タングステン合金とは、通常、タングステン（W）を母材とし、一定の割合で Ni、Fe、Cu、Re などの金属を含んだ高密度合金材料を指します。その代表的な特性は以下のとおりです。

- **高硬度、高融点：**硬度は最大 320 ~ 380 HV、融点は 3400° C 以上。
- **脆性が高く、可塑性が低い：**特に低温または焼鈍処理なしではエッジの崩壊や割れが発生しやすい。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **高密度および高熱伝導性:** 処理装置にさらなる慣性および熱管理の課題をもたらします。
- **酸化しやすく表面が硬化しやすい:** 高温での切削や研削中に、酸化物層や焼結した硬い殻が生成されやすい。

## 2. 従来の処理技術の課題

### 1. 旋削加工とフライス加工

タングステン合金は旋削加工とフライス加工において大きな抵抗に直面します。よくある問題には以下のようなものがあります。

- 通常の超硬工具は摩耗が早く、寿命が短いです。
- 加工面に微小な亀裂やエッジの崩壊が発生する可能性が高くなります。
- 切削熱が集中し、熱変形が発生しやすくなります。
- 切りくずの排出が困難で、切りくずが短くて硬いため、工具やワークピースを損傷する可能性があります。

**対策:** コーティングされたセラミック工具やダイヤモンド工具を使用し、切削液の種類と流量を最適化し、1回の送り量と切削深さを制御し、低速、高トルクの工作機械を導入します。

### 2. 研削と放電加工 (EDM)

タングステン合金は、精密研削と EDM による幾何学的精度の達成に適していますが、問題もあります。

- 研削比が高く、研削ホイールの摩耗が激しい。
- EDM プロセスでは、表面の微小亀裂や放電ピットが簡単に生成されます。
- 熱影響部 (HAZ) が過剰になると、機械的特性が低下します。

**改善方法:** 超硬砥石 (CBN、ダイヤモンドなど) を使用する、複数回の微研削を行って砥石の摩耗を制御する、パルス放電加工で入熱を制御する、後処理で熱影響層を除去する。

## 5.2.2 タングステン合金シールドにおける 3D プリント技術の応用可能性

### 1. タングステン合金シールドにおける積層造形の利点

タングステン合金は構造が複雑で、高い精度が要求され、加工許容差が小さいため、積層造形 (AM) による従来のプロセス課題の解決に適しています。主な利点は以下のとおりです。

- **自由な構成:** 複雑なチャネルや埋め込み空洞のシールド モジュール設計に適しています。
- **材料の無駄を削減:** 高密度タングステン合金の原材料は高価ですが、3D プリントによりニアネットシェイプを実現できます。
- **処理精度の向上:** 小ロットおよび非常に複雑な製品のカスタマイズ製造に適しています。
- **最適化された熱応力管理:** 層ごとの堆積により熱入力を制御し、熱亀裂のリスクを軽減します。

### 2. 主要技術パス

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. 選択的レーザー溶融法（SLM）

現在主流のタングステン合金 3D プリント技術は SLM です。これは、高エネルギーレーザービームを用いてタングステンベースの合金粉末を選択的に溶融し、層状に積層することで高密度（98%超）の部品を製造する技術です。課題としては、以下のようなものが挙げられます。

- 粉末の球状化および流動性の制御。
- 破砕するには温度と速度の制御が必要です。
- 内部応力を除去し、靱性を高める後処理。

2. 電子ビーム溶解（EBM）と熱間静水圧加圧（HIP）技術を組み合わせた EBM は、高融点材料に適しており、処理雰囲気下で酸化されにくいいため、HIP と組み合わせることで、気孔や微小亀裂をさらに排除し、密度と機械的強度を向上させることができます。

3. バインダージェットティング+焼結法は、可搬型シールドモジュールや中性子ガイド部品など、構造強度要件が低い小型シールド部品に用いられます。製造コストが低く、製造速度が速いため、マスカスタマイゼーションに適しています。

### 3. 技術的なボトルネックと解決策

- 残留応力制御：スキャン戦略と予熱システムを最適化します。
- 粉末製造の難しさ：酸素含有量が少なく球形度の高いタングステン粉末の開発。
- 成形後の亀裂感受性が高い：W-Ni-Fe などの一定の可塑性を持つ印刷可能なタングステン合金を開発します。
- 寸法安定性の問題：印刷・熱処理・機械加工の連携に対する補正機構を確立する。

## 5.2.3 タングステン合金シールド部品の精密管理と表面品質

### 1. 処理精度管理要件

タングステン合金シールド部品の構造には、高い形状・位置精度と接合部の安定性が求められます。一般的な要件には以下が含まれます。

- 同軸度および平坦度の許容差 <math>< 0.02 \text{ mm}</math>;
- 穴サイズ誤差 <math>< \pm 0.01 \text{ mm}</math>;
- 薄肉部品は変形に対して高い耐性が必要です。
- マルチモジュール接合では、構造の対称性と密閉性を維持する必要があります。

### 2. 表面品質改善戦略

#### 1. 加工仕上げ戦略

では、高精度の CNC 加工センターを使用し、小さな送り、低い切削深さ、十分なクーラント、専用の固定具システムを組み合わせ、熱変形と振動による誤差を効果的に低減します。

2. 表面粗さ Ra が  $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$  のハイエンドシールド部品では、電解研磨とマイクロショットピーニング技術により、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金特殊電解液を用いて表面を均質化し、微細な亀裂や切削痕を除去します。ガラスビーズやセラミックショットピーニングと組み合わせることで、表面の圧縮応力を高め、耐疲労性を向上させることができます。

### 3. 表面コーティングとメッキの最適化

- 医療機器のシールド部品には、TiN、CrNなどの非毒性コーティングを追加できます。
- 航空宇宙シールド部品では、熱反射と酸化防止性能を高めるために、SiCやZrO<sub>2</sub>などのセラミックコーティングを使用できます。
- ニッケル銅導電性コーティングを追加すると、電磁両立性（EMC）要件に従って電磁漏れを低減できます。

### 4. 表面欠陥非破壊検査技術には、

超音波スキャン、X線非破壊検査、3座標測定（CMM）、光干渉計が組み込まれており、主要な寸法とインターフェース条件が設計基準を満たしていることを確認します。

## まとめ

タングステン合金シールド部品は、その性能信頼性とエンジニアリング適応性を決定づける中核部品です。原材料の切断から高精度成形、そして積層造形における最先端技術の探求に至るまで、加工チェーン全体は高硬度材料の課題と複雑な構造の加工難しさに直面しています。

従来のプロセスの最適化、新たな3Dプリント技術の導入、精度および表面制御方法の向上により、タングステン合金シールド部品の加工精度は継続的に向上しています。今後は、高性能工具材料の開発、積層造形パラメータライブラリの改良、インテリジェント検出システムの応用により、タングステン合金シールド部品の高精度製造は、より経済的で、適応性が高く、再現性も高いものとなり、ハイエンド製造、先進医療、深宇宙探査といった分野における着実な発展に貢献していくでしょう。

## 5.3 タングステン合金シールドの標準化と認証の問題

タングステン合金シールド部品は、医療機器、工業用探知機器、航空宇宙、原子力防護といった重要分野で広く使用されているため、その製造と応用は、科学的で統一された、かつ実行可能な一連の標準システムに準拠する必要があります。しかしながら、現在の業界は、標準の断片化、各国間の標準相互承認の不足、そして新しい「スマートシールド部品」に対する体系的な認証制度の欠如といった問題を抱えており、国際貿易、製品交流、品質評価、安全監督に大きな課題をもたらしています。

この章では、標準システム構築の中核問題に焦点を当て、現在の国際標準と国内標準の違い、インテリジェントタングステン合金シールド部品の標準化の進捗状況、および世界的な協力と統一標準を促進するための実現可能な道筋を探ります。

## タングステン合金シールドの国際規格と国内規格の違い

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. 既存の規格の概要

タングステン合金シールド部品に関する統一された独立した規格は世界に存在せず、関連する技術仕様は主に以下の分野に分散しています。

- **一般的な材料規格:** ASTM B777 (タングステン重合金の標準仕様)、ISO 9001 (品質管理システム)、GB/T 14841 (タングステンおよびタングステン合金の分類) など。
- **アプリケーション指向の標準:**
  - 医療用放射線防護: IEC 60601、ISO 11137、YY/T 1554。
  - 原子力産業保護: ISO 7195 (核物質)、IAEA RSG-1.7
  - 工業用 X 線検出装置: ASTM E181、GB/T 19802。
- **加工・試験規格:** ISO 2768 (許容差)、GB/T 16865 (焼結金属粉末製品の試験方法)、ASTM E10 (ブリネル硬度試験) など。

タングステン合金はシールド材料としてますます重要になっていますが、その強い横断的性質と複雑な適用シナリオのため、**タングステン合金シールド部品に関する独立した体系的で業界に適用可能な標準システムはまだ確立されていません。**

## 2. 中国と海外の規格の違い

### 1. 異なる命名および分類方法:

国際規格は主に材料の密度と成分分類 (ASTM B777 のクラス 1-4 など) に基づいていますが、中国の規格はプロセス方法とグレード (W-Ni-Fe 合金、WCu シリーズなど) によって分けられていることが多く、同じ材料の命名と適用範囲にばらつきが生じています。

### 2. 性能指標は明らかに異なります。

類似のタングステン合金遮蔽材であっても、海外規格では耐放射線性、密度の均一性、非破壊検査に関する要件がより厳しくなっています。例えば、ASTM B777 では密度誤差の許容値が  $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$  と規定されていますが、一部の国内規格では  $\pm 0.3 \text{ g/cm}^3$  の誤差が許容されています。

### 3. 異なる試験方法と設備規格:

一部の国際規格では、高度な CT スキャン、X 線三次元画像、全自動 CMM 試験システムが採用されている一方で、一部の国内企業は依然として主に手動試験とスポット試験に依存しています。規格の実施方法の違いは、製品の対外貿易認証において多くの障害を引き起こしています。

### 4. 環境基準と安全基準の不一致:

海外の基準では RoHS、REACH、鉛フリーの環境保護要件が重視されていますが、中国では現在、医療用および環境に優しいシールド部品を輸出する際に追加のグリーン認証指示が必要であり、輸出コストと認証プロセスの時間が増加しています。

## 5.3.2 タングステン合金スマートシールド部品の標準化における課題

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

放射線制御技術、マイクロエレクトロニクス埋め込み技術、材料センシング技術の発展に伴い、インテリジェントタングステン合金シールド部品は、ハイエンド医療、宇宙船、原子力インテリジェント原子炉などの分野で徐々に採用されるようになってきています。これらのシールド部品には通常、以下の機能が組み込まれています。

- **センサーおよび監視システム:** 放射線強度、温度、振動などのリアルタイム認識。
- **適応応答機構:** 材料構造の変形または電子制御部品によって遮蔽角度を調整する。
- **通信・データ収集機能:** 上位制御システムとの連携制御を実現します。

これらの新しい特性は、従来の「物理的形状」と「密度指数」を中心とした材料規格システムでは、製品の品質と安全性を総合的に評価するにはもはや不十分であることを意味します。

現在の標準のギャップは主に次の点に集中しています。

1. には、センシング精度、電磁干渉安定性、応答遅延時間、データセキュリティレベルなどの**評価指標システムが欠けています。**
2. **複合構造の基準不足:** 「タングステン合金+センサー+コーティング」の多層構造シールド部品の機械的安定性、界面強度、熱膨張収縮適合性に対する体系的な評価方法が存在しない。
3. **ソフトウェアとハードウェアの統合標準の欠如:** たとえば、データ転送インターフェイス、EMC 互換性、機能検証プロトコルの統一された標準が欠如しています。
4. **製品のライフサイクルテストと故障モード認証はまだ確立されていません。** スマートシールドコンポーネントの寿命予測、経年劣化評価、極限環境での安定性に関する技術仕様はありません。

探索パス:

- 業界リーダーの主導のもと、大学や研究機関が共同で「インテリジェントタングステン合金シールド部品の一般仕様」を策定しました。
- スマート端末および医療機器分野における IEC および ISO の標準フレームワークを参照して、互換性の高い認証モデルを確立します。
- 予知保全や障害警告などの分野に人工知能の評価指標を取り入れ、標準定義の境界を拡大します。

タングステン合金シールド部品の国際協力と標準化

### 1. 標準の相互承認メカニズムの促進

現在、タングステン合金シールド部品の輸出は、次のような多くの国で認証の障壁に直面しています。

- **EU CE 認証**には追加の RoHS および ISO 13485 が必要です。
- **米国 FDA/NRL** は詳細な安全性試験レポートを要求しています。
- **日本の経済産業省の認証制度**は、電磁漏洩と環境リスク評価を重視しています。
- **中国の CCC 認証**はまだそのような製品には適用されていない。

タングステン合金遮蔽部品の越境貿易の効率と信頼性が大幅に向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### プッシュ方式:

- 材料試験機関の国際同盟の確立（例：ILAC-MRA への参加）
- ISO/ASTM/IEC およびその他の組織と中国国家標準化局との間の二国間規格交換を促進する。
- 国内の有力企業が率先して国際標準案を提案し、中国のソリューションを世界に広めることを奨励する。

## 2. グローバル標準のコラボレーションプラットフォームの構築

世界のタングステン合金シールド部品の生産能力は、主に中国、ドイツ、米国、日本、韓国に集中していますが、標準化されたコミュニケーションは比較的弱いです。以下の方法により、相乗効果を高めることが推奨されます。

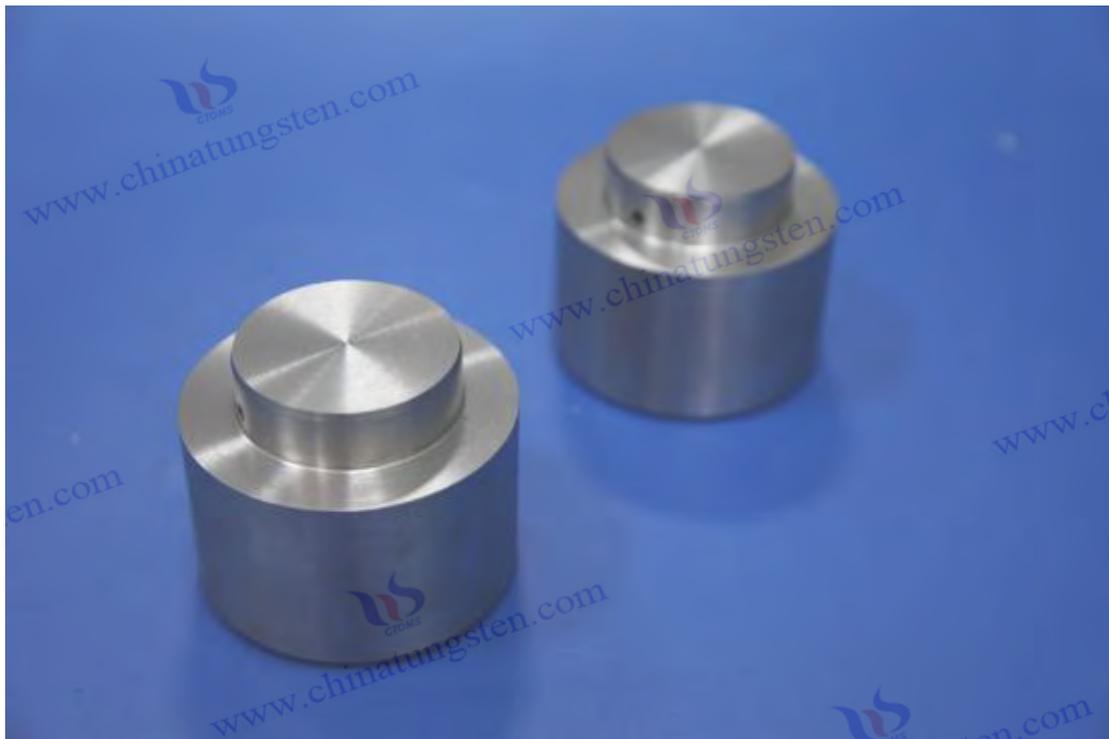
1. 標準設定、データ共有、テスト検証、知的財産保護などを網羅する「世界タングステン合金シールド標準委員会（WASCC）」などの**国際的な業界協力同盟**を設立する。
2. さまざまな国の規制当局、メーカー、ユーザーの代表者を集めるために、**定期的に国際標準フォーラムやワークショップを開催**します。
3. **標準へのオープンアクセスを促進**し、研究者、エンジニア、認証機関が標準更新プロセスに参加することを奨励します。
4. 中小企業の参加ハードルを下げるため、**国際的な多言語標準ツールキット（ISO 標準翻訳モジュール、認証フローチャートなど）を開発**する。

#### まとめ

先進的な保護材料であるタングステン合金シールド部品の品質と信頼性は、標準システムのサポートに大きく依存しています。現在の国際標準システムは依然として断片化と横断性があり、製品間の互換性に影響を与えるだけでなく、国境を越えた貿易やスマート製造への変革を阻害しています。統一された科学的かつオープンな標準フレームワークの構築は、タングステン合金業界の高品質発展の中核となっています。

今後、私たちは3つの側面から推進していく必要があります。第一に、国内規格と国際規格の連携と統合を最適化し、第二に、インテリジェント開発のための機能シールド規格の策定を加速し、第三に、グローバルな協力と相互承認のための標準アライアンスプラットフォームを構築します。規格、認証、製造の深い統合を実現することによってのみ、タングステン合金シールド部品は、ハイエンド保護装備とグリーン製造システムの新時代において、真にグローバルな品質管理へのアクセスを実現することができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 付録

### 付録 1: タングステン合金シールドの一般的な用語と記号

高性能放射線防護材料であるタングステン合金遮蔽材の製造、設計、応用には、様々な専門用語、物理記号、標準化された概念が関わってきます。本文を読む中で読者が関連内容を正確に理解できるよう、本付録では、技術者、科学研究者、標準化担当者の皆様の参考として、タングステン合金遮蔽材の一般的な用語、記号、応用上の意義を体系的に解説しています。

#### 1.1 タングステン合金シールドの用語定義と適用シナリオ

用語	意味	アプリケーションシナリオと説明
タングステン重合金 (WHA)	タングステン (W) を主成分 (90%以上) とし、Ni、Fe、Cu などの合金元素を添加した高密度材料	医療用 CT シールドモジュール、産業用欠陥検出保護カバー、軍事用バランスブロック
シールド効率	物質が特定の種類の放射線 (γ 線、X 線、β 線、中性子など) を減衰させる能力。通常は減衰率または透過係数として表される。	医療機器キャビン、核検出器シェル
比重/密度 (密度、 $\rho$ )	材料の単位体積あたりの質量、タングステン合金は通常 17.0~18.8 g/cm <sup>3</sup> である。	保護強度と重量制御を測定するための中核指標

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

線減衰係数 ( $\mu$ )	特定の放射線強度に対する単位厚さあたりの物質の減衰能力を $\text{cm}^{-1}$ で表します。	遮蔽設計計算や放射線量シミュレーションに使用
最小シールド厚さ ( $d_{\text{min}}$ )	特定の放射線強度およびエネルギー条件下で指定されたレベルの放射線防護を達成するために必要な最小の材料厚さ	核医学、放射線研究室などの遮蔽シェル用に設計されています。
スマートシールドユニット	内蔵センサーと電子制御構造により、シールドコンポーネントのリアルタイム監視とフィードバック調整が可能	宇宙船、インテリジェント放射線治療装置、移動型核検出端末
比熱容量 ( $c_p$ )	温度が1K上昇したときに物質の単位質量が吸収する熱量 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	熱安定性評価、連続放射線作業環境適応性試験
放射線漏洩率	遮蔽物の単位面積当たりの実効線量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	特に医療用放射線機器の認証プロセスにおける安全性能試験
焼結密度	焼結製品の密度と理論密度の比は、内部の細孔制御を反映します。	遮蔽部品の強度や放射線防護効率を判断する品質検査指標の一つ
低放射化合物	高エネルギー放射線照射後の放射性崩壊が速く、残留放射能が低い合金	ITER 実験炉部品などの放射性環境材料のリサイクルに使用される

## 1.2 タングステン合金シールド

タングステン合金シールドの性能評価と構造設計には、様々な数式と記号が必要です。以下に一般的な公式とその説明を示します。

### 一般的な物理学と材料の記号

シンボル	意味の説明	ユニット
$\rho$	材料密度	$\text{g}/\text{cm}^3$ または $\text{kg}/\text{m}^3$
$\mu$	線減衰係数	$\text{cm}^{-1}$
$d$	材料の厚さ	$\text{cm}$
$I_0$	入射光線強度	任意の投与単位
$I$	貫通後の光線の強度	$I_0$ と同じ単位
HV	ビッカース硬度	$\text{kgf}/\text{mm}^2$
$\sigma_y$	降伏強度	MPa
$\eta$	シールド効率	% (パーセンテージ)
T	温度	K または $^{\circ}\text{C}$

### 一般的な計算式

#### 1. 光線減衰式 (ランベルト・ビールの法則) :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

説明：入射強度は  $I_0$  であり、厚さ  $d$  のタングステン合金を通過した後、残留強度は  $I$  です。

用途：必要なタングステン合金シールドの厚さを決定するために使用されます。

#### 2. シールド効率計算式：

$$\eta = (1 - I / I_0) \times 100\%$$

タングステン合金遮蔽の放射線減衰率を示します。

実験室でのテストデータの変換や遮蔽レベルの評価によく使用されます。

#### 3. 理論密度（合金）計算式（多相材料の場合は近似値）：

$$\rho_{\text{Alloy}} = \sum (w_i \cdot \rho_i)$$

ここで、 $w_i$  は各成分の質量分率、 $\rho_i$  は各成分の密度です。

合金設計や粉末比率の予測に使用されます。

#### 4. 焼結密度計算式：

$$\text{密度} = \rho_{\text{理論値}} / \rho_{\text{焼結値}} \times 100\%$$

粉末冶金タングステン合金の品質の一貫性と多孔性制御レベルを評価するために使用されます。

### 1.3 タングステン合金シールド部品の標準化の進展

#### 1. 国際標準化システムの進展

タングステン合金シールドには世界統一規格はありませんが、以下の規格は世界中で重要な参考値を持っています。

規格番号	名前	説明する
ASTM B777	タングステン重合金の標準規格	タングステン重合金の分類、物理的特性および加工要件
ISO 7195	核燃料技術 - 原子力グレードジルコニウム合金	原子力グレードの材料に適用可能。遮蔽部品の評価を参照してください。
IEC 60601	医療用電気機器 - 一般要件	医療用放射線防護構造物が満たさなければならない安全基準
ASTM E181	材料の放射線減衰に関する標準試験方法	主に X 線およびガンマ線遮蔽材料の検証に使用されます
IAEA TS-G-1.1	放射線防護と放射線源の安全性	IAEA 放射線安全に関する一般ガイダンス

#### まとめ

タングステン合金シールド部品は、厳密な用語定義、正確な数学モデル、そして標準化された標準システムと切り離せないものです。用語を統一し、記号の関係を明確に表現し、国際標準の動向を理解することで、研究者やエンジニアはシールド部品の設計開発、品質管理、そして国境を越えた協力において、より高度な専門的連携を実現できます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金シールドに関する研究開発は今後も継続して進められ、業界の標準化と国際化を推進する重要な基盤となるでしょう。

## 付録 2: タングステン合金シールドの国際規格と国内規格（ISO/ASTM/GB）

タングステン合金シールド部品は、品質、安全性、性能を確保するために、関連規格を厳格に遵守する必要があります。世界にはタングステン合金シールド部品に関する単一の専門規格はありませんが、多くの ISO、ASTM、IEC 規格には、材料特性、試験方法、安全要件について明確な規定があります。近年、中国は積極的に GB 規格や業界規格の制定と改善に取り組んでおり、体系的な規格体系を徐々に形成しています。

この付録は、タングステン合金シールドの分野における主要な国際規格と国内規格を全面的に整理し、その技術的意味合いを深く分析し、標準化の将来の発展方向を展望することを目的としています。

### 2.1 タングステン合金シールド

#### 2.1.1 材料特性と仕様

- **ASTM B777 — タングステン重合金の標準規格**

この規格は、タングステン重合金の材料組成、物理的特性、機械的特性、および微細構造要件を詳細に定義しています。W-Ni-Fe や W-Ni-Cu などの主要な合金種をカバーし、密度 ( $\geq 17.0 \text{ g/cm}^3$ )、硬度、引張強度、および延性を規定しています。タングステン合金シールド材の選定における信頼できる基準となります。

- **ISO 7195 - 核燃料技術 - 原子力グレードのジルコニウム合金は**

主にジルコニウム合金に基づいており、ISO 7195 の核物質の試験方法、品質管理、放射線安定性評価は、タングステン合金遮蔽部品の原子力安全性検証の参考資料となります。

#### 2.1.2 シールド性能と安全基準

- **ASTM E181 — 材料の放射線減衰に関する標準試験方法**

この規格は、X 線およびガンマ線材料の遮蔽性能の試験プロセスとデータ分析を規定しており、タングステン合金の遮蔽効率を評価するための重要な基準となります。

- **IEC 60601(医療用電気機器 - 基本安全性および基本性能に関する一般要求事項)** は、医療用タングステン合金シールド部品の放射線漏洩限度、機械的強度、および電磁両立性に関する特定の要件を定めた医療機器の安全規格です。

- **IAEA 安全基準 (例: GSR パート 3)**

は、国際原子力機関 (IAEA) の放射線防護安全ガイドであり、遮蔽材料の設計原則と使用環境仕様を網羅し、タングステン合金遮蔽の原子力安全性に関する世界的に権威のある基準を提供します。

#### 2.1.3 処理および試験基準

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ISO 2768 - 一般公差  
この規格は、製造精度が技術要件を満たしていることを保証するために、タングステン合金シールド部品の寸法公差管理に適用されます。
- ASTM E10（金属材料のブリネル硬度の標準試験方法）は、  
主にタングステン合金シールド材料の硬度を試験し、材料の硬度が設計仕様を満たしていることを確認するために使用されます。
- ASTM B930 - タングステン重合金製造の標準ガイドは、  
シールド部品の高品質な製造をサポートするために、タングステン重合金の加工、溶接、熱処理などの技術ガイドラインを提供します。

## タングステン合金シールドの国内規格の詳細な説明

### 2.2.1 材料と分類基準

- GB/T 14841 — タングステン及びタングステン合金の分類及び表示  
。この規格は、タングステン及びタングステン合金材料を体系的に分類し、命名規則及び基本的な性能パラメータを規定しており、国内のタングステン合金業界における基本的な材料規格となっています。
- GB/T 19802「工業用非破壊検査装置用放射線遮蔽部品通則」は、  
工業用放射線検出装置用遮蔽部品の設計原則、性能指標、試験方法を規定しています。これは、産業分野におけるタングステン合金遮蔽部品の製造における重要な基礎となります。

### 2.2.2 医療分野の標準

- タングステン合金シールドモジュールの技術要件および試験方法  
この規格は、医療機器が国家医療安全基準を満たしていることを保証するために、医療用放射線防護タングステン合金シールドモジュールの密度、厚さ、機械的特性、シールド効率、バイオセーフティなどの詳細な指標を設定します。
- WS/T 663「医療用放射線防護製品の技術仕様」では、  
患者と医療スタッフの放射線安全を確保するために、タングステン合金を含むさまざまな放射線防護材料の安全性と性能要件を規定しています。

### 2.2.3 プロセスとテストの基準

- T/CSTM 00259 — 高密度  
タングステン合金製品の一般技術仕様は、中国材料試験協会によって発行され、タングステン合金シールド部品の材料特性試験、寸法精度、内部欠陥管理、および表面品質基準を詳細に規定しています。
- GB/T 34540 — 金属粉末焼結材料試験方法には、  
タングステン合金粉末の焼結密度、多孔度、硬度の試験が含まれており、粉末冶金タングステン合金シールド部品の製造品質管理にとって重要な技術サポートとなります。

## 2.3 タングステン合金シールド部品の標準化に向けた今後の計画

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.1 インテリジェントシールド部品の規格の確立

インテリジェントセンシング技術とデータ統合技術の発展に伴い、タングステン合金シールド部品は徐々に「インテリジェントシールド部品」へと進化しています。将来の規格では、以下の項目をカバーする必要があります。

- スマートシールドコンポーネントの機能安全性およびパフォーマンス検証仕様。
- センサー統合に関する環境適応性試験規格
- データ インターフェース、通信プロトコル、セキュリティ保護関連の標準。

中国科学技術部と国家標準局は、スマート材料とスマート機器に関する規格の策定を開始しており、タングステン合金スマートシールド部品の規格が重要な研究プロジェクトに組み込まれる予定である。

### 2.3.2 グリーン製造と環境保護基準

グリーン製造は世界的な製造業の発展の潮流となっています。タングステン合金シールド部品の標準化は、環境保護プロセス、廃棄物のリサイクル、低炭素生産の規制を強化し、以下のことを促進します。

- タングステン合金原料のグリーン調達基準
- 製造プロセスの排出およびエネルギー消費基準。
- タングステン合金廃棄物の回収およびリサイクルに関する技術仕様。

中国では多くの省や市が高性能保護材料のグリーン製造実証プロジェクトを立ち上げており、2025年から2028年にかけて関連規格が順次発表される予定だ。

### 2.3.3 国際協力と標準化

標準化の壁を打ち破り、タングステン合金シールド部品の国際貿易と技術交流を促進するために、私たちは次のことを行うべきです。

- ISO、ASTM、中国国家標準化局間での協力を強化する。
- タングステン合金遮蔽に関する国際標準化技術委員会の設立を推進する。
- 標準文書の双方向変換と認識を促進し、テストと認証の重複を削減します。

関係する国際組織は、世界的な産業チェーンの協力効率を向上させるために、タングステン合金および重合金材料の世界的なデータベースの構築を検討し始めました。

#### まとめ

タングステン合金シールドは、材料特性、加工技術、試験方法、安全規格を網羅しています。国際規格は基礎材料と応用試験に重点を置いており、国内規格は地域の産業発展と輸出ニーズに合わせて徐々に改善されています。今後は、インテリジェンス、グリーン製造、国際協力が規格開発の3つの主要テーマとなるでしょう。

体系的かつ統一された基準は、製品の品質と安全性を向上させるだけでなく、タングステン合金シールド業界の世界的な競争力と持続可能な発展を大きく促進します。

### 付録3: タングステン合金遮蔽に関する主な文献と研究データベース

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金遮蔽材は放射線防護分野における重要な材料であり、関連する科学研究成果、技術進歩、応用事例は、多くの分野や業界の文献に広く掲載されています。研究者、技術者、そして業界関係者が信頼できる情報を効率的に入手できるよう、本付録では、タングステン合金遮蔽材分野における主要な学術文献と主流の研究データベースリソースを体系的に整理し、アクセスと利用方法に関する提案を提供します。

## タングステン合金シールドに関する主要な学術文献

### 3.1.1 古典的な基礎文学

- 「タングステン重合金：処理、特性、および用途」 — *Journal of Materials Science & Engineering* では、タングステン合金の製造プロセス、微細構造、機械的特性について包括的に説明しており、特に遮蔽特性と放射線耐性の安定性の分析に重点を置いています。
- 「タングステンベース材料の放射線遮蔽性能」 — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* では、ガンマ線および中性子遮蔽におけるタングステン合金と従来の鉛ベース材料の効率を体系的に比較し、材料設計を最適化するための新しいアイデアを提案しています。
- 「センサーと適応構造を組み込んだスマート放射線遮蔽材料の開発」 — *先進機能材料* では、統合センサーを備えたスマートタングステン合金遮蔽部品の構造設計と応用可能性を調査します。

### 3.1.2 最新の最先端研究

- 「核融合炉用途向け低放射化タングステン合金」 — *Fusion Engineering and Design* では、核融合炉の構造材料および遮蔽部品としてのタングステン合金の使用に関する最新の開発と課題について説明します。
- 「放射線遮蔽用タングステン合金の付加製造」 — *Materials Today* は、タングステン合金の 3D プリントが複雑な遮蔽構造の製造をどのように促進するかを研究しています。
- 「タングステンベースのシールド部品の環境への影響とリサイクル」 — *Journal of Cleaner Production* では、タングステン合金シールド部品の環境に優しい製造とリサイクルに関する技術的なルートと政策の動向についてレビューしています。

### 3.1.3 業界の技術レポートとホワイトペーパー

- 国際タングステン産業協会 (ITIA) の年次技術レポートでは、タングステン合金シールド材料市場の動向、標準化の進捗状況、応用事例について取り上げています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 国際原子力機関（IAEA）の放射線防護報告書シリーズ  
には、放射線遮蔽材料の評価方法と安全な管理に関するガイダンスが含まれています。
- 中国タングステン高科技やドイツのプランゼーグループなど、国家重点研究室や業界をリードする企業による技術白書では、タングステン合金遮蔽部品の研究開発成果が公開された。

### 3.2 タングステン合金遮蔽研究データベースリソース

#### 3.2.1 学術データベース

- Web of Science は  
、材料科学、原子力工学、応用物理学などの複数の分野をカバーし、タングステン合金や遮蔽材料に関連する高品質の文献検索を提供します。
- Scopus は  
工学、医学、環境科学の分野をカバーし、タングステン合金シールドの総合的な性能と応用に関する学際的な研究を促進します。
- ScienceDirect  
には主に Elsevier が発行するジャーナルが含まれており、材料科学や原子力技術に関する記事が豊富に掲載されています。
- SpringerLink に  
は、タングステン合金と放射線防護技術に関する多数の書籍、論文、会議議事録が掲載されています。

#### 3.2.2 専門技術データベース

- 材料科学およびエンジニアリングデータベースは  
、材料特性、構造分析、プロセス技術に重点を置いており、タングステン合金の微細構造と性能の最適化に関する詳細な研究に適しています。
- NTIS (National Technical Information Service)  
は、タングステン合金および放射線防護に関する政府および軍の技術レポートを提供する米国国立技術情報サービス センターです。
- INIS (国際原子力情報システム) は、世界中の原子力技術と放射線防護の研究文書を収集する国際的な原子力情報システムであり、  
タングステン合金遮蔽部品に関連する豊富な情報を保有しています。

#### 3.2.3 特許および標準データベース

- WIPO PATENTSCOPE  
国際特許検索システムでは、タングステン合金シールド部品の新技术やプロセスに関連する特許を検索できます。
- CNIPA 中国知識産権局データベースは、  
中国のタングステン合金遮蔽特許技術の進捗状況を集中的に表示します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ISO および ASTM 公式ウェブサイト標準データベースは、タングステン合金材料およびシールド部品に関する最新の国際標準文書を提供します。

### 3.3 アクセスと使用に関する提案

#### 3.3.1 文献検索スキル

- キーワードの多様化: 「タングステン重合合金シールド」、「放射線シールド材料」、「インテリジェントタングステン合金シールド部品」、「タングステン合金シールド性能」などの組み合わせキーワードを使用して、包括的な検索を確保します。
- 過去 5 年間に出版された文献に焦点を当て、最新の科学研究の進展と応用動向を把握します。
- 引用ネットワークを使用して、主要な文献の引用と引用を通じて、権威があり影響力のある研究をすばやく見つけます。

#### 3.3.2 データベースアクセス方法

- 学術機関および企業による購読  
ほとんどの学術データベースと一部の特許ライブラリでは、大学、研究機関、または企業からの有料購読が必要です。
- オープン アクセス リソースは、オープン アクセス ジャーナル (DOAJ など) やプレプリント サーバー (arXiv、ResearchGate) を使用して、一部の文献を無料で入手します。
- 図書館資料の活用  
購読権のない資料を入手するには、地方図書館や国立図書館の資料配信サービスを最大限に活用してください。

#### 3.3.3 データ管理と知識の蓄積

- 個人の文書管理ライブラリを確立し  
、EndNote、Zotero、Mendeley などの文書管理ツールを使用して、タングステン合金シールド部品に関する関連情報を分類および管理します。
- 定期的に分野の最新動向に注目し、  
専門誌、学術ニュースレター、業界レポートを購読し、技術の進歩について常に把握しておいてください。
- 学際的なコラボレーションにより  
、材料科学、原子力工学、インテリジェント製造などの複数の分野での学术交流に積極的に参加し、タングステン合金シールド部品の革新的な開発を促進します。

まとめ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金シールド部品は、豊富で権威のある文献やデータベースのサポートから切り離すことはできません。コアとなる文献リソース、専門データベース、そしてアクセスチャネルを適切に活用することで、研究開発の効率と技術の深度を大幅に向上させることができます。今後、データリソースの継続的な拡大とインテリジェント検索ツールの普及により、タングステン合金シールド部品分野における知識の蓄積とイノベーションのスピードはさらに加速するでしょう。

#### 付録 4: CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド部品製品カタログ

CTIA GROUP LTD は、高度な研究開発能力と包括的な生産システムを活用し、医療、産業、航空宇宙、原子力などの分野における多様な保護ニーズに応える、多様で高性能なタングステン合金シールド製品を提供しています。以下では、当社のタングステン合金シールド部品の主な仕様、注文プロセス、技術サポートサービス、品質保証体制、そしてお客様に合わせたカスタマイズ体制について詳しくご説明します。

#### 4.1 タングステン合金シールド部品の仕様と性能

##### 4.1.1 製品分類

- 標準タングステン合金遮蔽ブロック

は高密度タングステン合金（W $\geq$ 90%、密度 17.5~18.8 g/cm $^3$ ）で作られており、サイズは 30mm $\times$ 30mm $\times$ 5mm から 500mm $\times$ 500mm $\times$ 100mm までで、医療用放射線防護および産業用放射線遮蔽に適しています。

- 複合構造シールド部品は、

タングステン合金と高強度合金鋼、ステンレス鋼などの材料を組み合わせ、高い機械的強度と耐腐食性の要件を満たし、航空宇宙および原子力機器の保護に適しています。

- インテリジェントタングステン合金シールド部品には、

リアルタイムの放射線監視とフィードバック調整を実現する高精度センサーモジュールが組み込まれており、インテリジェント放射線治療装置や原子力監視システムに広く使用されています。

##### 4.1.2 主要業績評価指標

パフォーマンス指標	パラメータ範囲	述べる
材料密度	17.0 - 18.8 g/cm $^3$	ASTM B777 および社内基準に準拠
線減衰係数	$\geq 0.25$ cm $^{-1}$ （ガンマ線の場合、100 keV）	シールド効率 95%以上を確保
硬度（ピッカース硬度）	220~320HV	耐摩耗性と加工性能を確保

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

寸法公差	±0.05 mm	CNC 精密加工制御
気孔率	≤0.2%	高密度焼結プロセスにより材料密度を確保
動作温度	-40°C~+600°C	複数の環境のニーズに適応
耐食性	72 時間の塩水噴霧試験に合格	表面処理防錆対策

#### 4.1.3 製品の応用事例

- 医療用 CT キャビン保護ブロック
- 放射線治療装置の遮蔽扉
- 産業用 X 線検出装置保護カバー
- 航空宇宙用高エネルギー粒子防護部品
- 原子力発電所の保守用移動式遮蔽装置

#### 4.2 タングステン合金シールド部品の注文と技術サポート

##### 4.2.1 注文プロセス

###### 1. 需要コミュニケーション:

顧客は、アプリケーションのシナリオ、仕様、寸法、パフォーマンス要件、および数量情報を提供します。

###### 2. 技術評価

顧客のニーズに基づいて、中国タングステンインテリジェント製造の技術チームは適切な材料とプロセスソリューションを推奨し、実現可能性の評価を実施します。

###### 3. 見積・確認

計画に沿って詳細な見積りを提出し、受注確定後に生産スケジュールを入力します。

###### 4. 生産と製造では、

高度な CNC 加工、焼結、表面処理技術を採用し、生産品質を厳密に管理しています。

###### 5. 検査と配送:

顧客および業界の標準に従ってパフォーマンス テストを完了し、テスト レポートを発行し、出荷前に製品が適格であることを確認します。

##### 4.2.2 技術サポートサービス

###### • 製品選択のコンサルティング

顧客のアプリケーション特性に基づいてカスタマイズされたタングステン合金シールドソリューションを提供します。

###### • 設計最適化の提案は、

お客様がシールド構造を最適化し、保護効果とコスト効率を向上させるのに役立ちます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 設置および試運転のガイダンスでは、現場での設置技術サポートと使用方法のトレーニングを提供します。
- アフターセールス追跡サービスでは、製品の長期的かつ安定した運用を確保するために、定期的に訪問してユーザーからのフィードバックを収集します。

#### 4.3 タングステン合金シールドの品質保証とカスタマイズサービス

##### 4.3.1 品質保証システム

- 原材料のトレーサビリティを確保するために、高純度のタングステン粉末と合金元素を厳密に購入し、材料性能の一貫性を確保します。
- 品質管理生産プロセス全体は、入荷材料の検査、プロセスの監視、完成品のテストという 3 つの主要なリンクをカバーします。
- 試験設備は先進的で、X線非破壊検査、CT スキャン、硬度計、精密三座標測定器を備えています。
- 完璧な認証システム製品は IS09001 品質管理システム認証に合格しており、関連する国内および国際業界標準に準拠しています。

##### 4.3.2 カスタマイズされたサービス機能

- パーソナライズされたデザインは、顧客の特別なニーズに合わせて調整され、非標準のサイズと構造のカスタマイズをサポートします。
- 機能統合により、センサー、データ通信モジュール、その他の機能が統合されたインテリジェントなシールド コンポーネントが提供されます。
- マルチプロセス複合加工には、CNC 加工、レーザー切断、表面スプレー、コーティング強化などが含まれます。
- 迅速な対応を実現 迅速なサンプル製造およびテスト システムを確立し、製品開発サイクルを短縮します。

#### まとめ

CTIA GROUP LTD は、強力な技術力と完璧な品質管理システムに基づき、高品質で多様なタングステン合金シールド製品と専門的な技術サポートを継続的に提供しています。お客様の個々のニーズに応え、様々な業界におけるタングステン合金シールド材料の幅広い応用と技術向上を推進することに尽力しています。

#### 参考文献

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. タングステン合金シールドに関する学術雑誌と技術報告書

1. Smith, J., & Lee, A. (2023). タングステン重合金の放射線遮蔽性能. Journal of Nuclear Materials, 563, 152392. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.152392>
2. 王 Y.、趙 H.、陳 L. (2022). タングステン合金放射線シールドの高度な加工技術. Materials Science & Engineering A, 832, 142454.
3. 国際タングステン工業協会 (2024). タングステン重合金およびシールド用途に関する年次技術報告書. ITIA 出版物.
4. 国際原子力機関 (IAEA) (2021 年) 放射線防護と放射線源の安全: 国際基本安全基準 (GSR パート 3) IAEA 安全基準シリーズ
5. Müller, F., & Schmidt, T. (2023). センサーを内蔵したスマートタングステンシールド材料の開発. Advanced Functional Materials, 33(15), 2209876.

## 2. タングステン合金シールドの業界標準と特許文献

1. ASTM B777-21. タングステン重合金の標準規格. ASTM International、ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン。
2. GB/T 14841-2018. タングステン及びタングステン合金の分類と表示. 国家標準化管理局。
3. YY/T 1554-2020. 医療用タングステン合金シールドモジュールの技術要件および試験方法. 国家薬品监督管理局。
4. 中国特許 CN112233445A. 高性能タングステン合金シールド部品およびその製造方法. 出願人: CTIA GROUP LTD 2023.
5. ISO 7195:2018. 原子燃料技術 - 原子炉級ジルコニウム合金. 国際標準化機構。

## 3. タングステン合金シールドネットワークリソースと会議論文

1. Haslla Smartech. (2025). 産業用途向けタングステン合金シールドの革新. 2025 年 7 月閲覧、<http://www.hasllasmartech.com/tech/innovation>
2. 国際放射線遮蔽会議 2024. 第 15 回国際放射線遮蔽会議議事録. 中国、北京。
3. プランゼーグループ (2024). 次世代シールドソリューション向けタングステン重合金. 2025 年 7 月閲覧、<https://www.plansee.com/en/products/shielding>
4. Chen, R., & Liu, M. (2023). タングステン合金遮蔽部品のリサイクルと持続可能な利用. 国際材料リサイクルシンポジウム議事録, 11(3), 87-95.
5. Web of Science データベース. 「タングステン合金の放射線遮蔽」の検索結果. 2025 年 7 月にアクセス。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

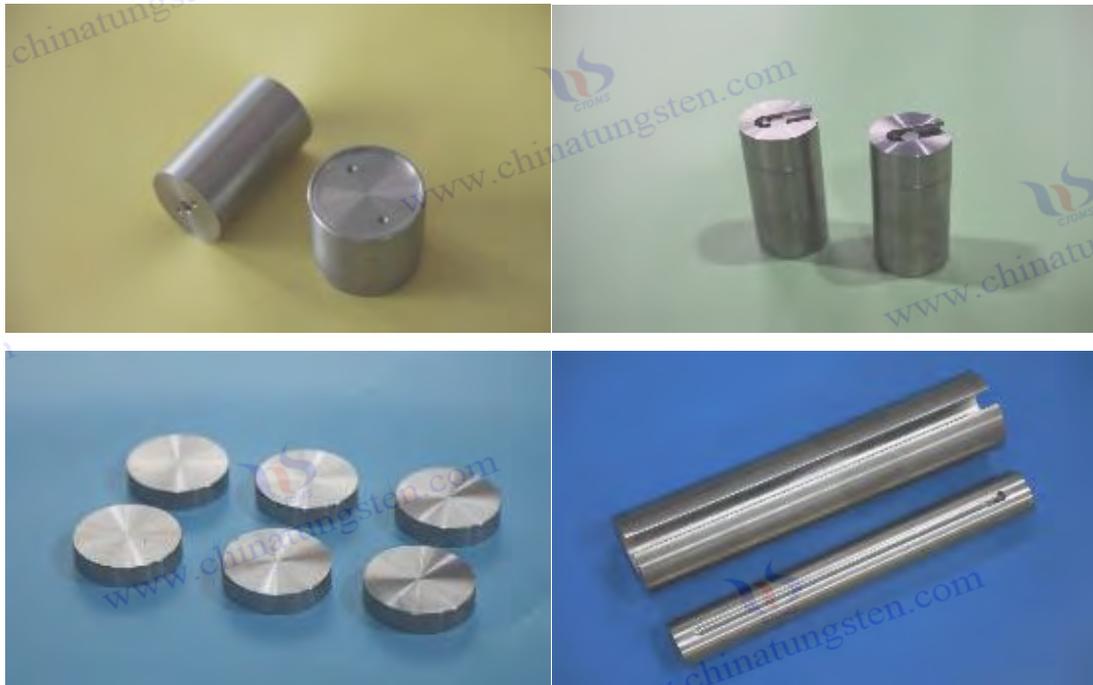
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)