

ホウ化タングステン百科事典

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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（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 万人近くのリフォロワーを抱え、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自由に共有しています。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、国内外でタングステンおよびモリブデン製品の専門家として知られています。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、業界で広く評価されています。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

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

目次

第1章 はじめに

- 1.1 ホウ化タングステンの概要
- 1.2 ホウ化タングステンの研究背景と意義
- 1.3 ホウ化タングステンの歴史的発展
- 1.4 タングステンホウ化物の構造と説明

第2章 ホウ化タングステンの化学的および物理的性質

- 2.1 ホウ化タングステンの化学組成（WB、WB₂、W₂B など）
- 2.2 ホウ化タングステンの結晶構造と結合特性
- 2.3 ホウ化タングステンの熱力学と安定性
- 2.4 ホウ化タングステンの電気的および磁氣的性質
- 2.5 ホウ化タングステンの機械的性質（硬度、靱性）

第3章 ホウ化タングステンの理論的研究

- 3.1 タングステンの密度汎関数理論（DFT）解析
- 3.2 タングステンの電子構造とバンド理論
- 3.3 ホウ化タングステンの表面および界面特性
- 3.4 ホウ化タングステンの欠陥とドーピング効果
- 3.5 ホウ化タングステンの計算シミュレーションの応用

第4章 ホウ化タングステンの原料と資源

- 4.1 タングステンホウ化物原料のタングステンおよびホウ素鉱物資源
- 4.2 タングステンホウ化物原料の精製技術
- 4.3 タングステンの世界的なサプライチェーンと地政学的影響
- 4.4 ホウ化タングステン資源の持続可能性と代替品

第5章 ホウ化タングステンの製造技術

- 5.1 高温固相合成によるタングステンホウ化物
- 5.2 化学蒸着（CVD）によるタングステンホウ化物
- 5.3 プラズマ支援ホウ化タングステンの合成
- 5.4 ホウ化タングステンのメカニカルアロイングとボールミル処理
- 5.5 ホウ化タングステンナノ材料の調製
- 5.6 タングステンのプロセス最適化とスケールアップ

第6章 ホウ化タングステンの品質管理と検査

- 6.1 ホウ化タングステンの化学組成分析（ICP-MS、XRF）
- 6.2 ホウ化タングステンの結晶構造検出（XRD、TEM）
- 6.3 ホウ化タングステンの表面形態と粒子サイズ分析（SEM、AFM）
- 6.4 ホウ化タングステンの性能試験（硬度、導電性）
- 6.5 ホウ化タングステンの品質規格（ISO、GB/T）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第7章 ハードコーティングにおけるホウ化タングステンの応用

- 7.1 タングステンホウ化物コーティングの性能上の利点
- 7.2 切削工具におけるタングステンホウ化物コーティングの応用
- 7.3 金型におけるタングステンホウ化物コーティングの応用
- 7.4 タングステンホウ化物コーティングの準備と最適化
- 7.5 摩耗および腐食環境におけるタングステンホウ化物コーティングの性能
- 7.6 タングステンホウ化物コーティングの市場と将来動向

第8章 高温材料におけるホウ化タングステンの応用

- 8.1 タングステンホウ化物航空宇宙用高温部品
- 8.2 高温炉および熱遮断材におけるタングステンホウ化物の応用
- 8.3 タングステンホウ化物の熱伝導率および熱膨張特性
- 8.4 高温環境におけるホウ化タングステンの耐酸化性と耐腐食性
- 8.5 高温タングステンホウ化物材料の製造技術
- 8.6 タングステンホウ化物高温材料の応用展望と課題

第9章 電子デバイスにおけるホウ化タングステンの応用

- 9.1 導電性フィルムにおけるホウ化タングステンの応用
- 9.2 電極材料におけるホウ化タングステンの応用
- 9.3 センサーにおけるホウ化タングステンの応用
- 9.4 半導体デバイスにおけるホウ化タングステンの可能性
- 9.5 タングステンホウ化物電子デバイスの製造技術
- 9.6 タングステンホウ化物電子デバイスの市場と開発動向

第10章 ホウ化タングステンの触媒作用と化学的応用

- 10.1 電気触媒におけるホウ化タングステンの応用
- 10.2 光触媒におけるホウ化タングステンの応用
- 10.3 化学反応触媒におけるホウ化タングステンの応用
- 10.4 ホウ化タングステン触媒の表面化学と活性部位
- 10.5 ホウ化タングステン触媒の調製と最適化
- 10.6 ホウ化タングステン触媒応用の産業的展望と課題

第11章 ホウ化タングステンの生体医学的応用

- 11.1 生体医療用コーティングにおけるホウ化タングステンの応用
- 11.2 薬物送達におけるタングステンホウ化物ナノ粒子の応用
- 11.3 バイオセンサーにおけるホウ化タングステンの応用
- 11.4 ホウ化タングステンの生体適合性と安全性
- 11.5 ホウ化タングステン生体材料の製造技術
- 11.6 ホウ化タングステンの生物医学的応用の展望と課題

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第 12 章 タングステンのエネルギー応用

- 12.1 電池材料におけるホウ化タングステンの応用
- 12.2 燃料電池におけるホウ化タングステンの応用
- 12.3 太陽電池におけるホウ化タングステンの応用
- 12.4 水素貯蔵材料におけるホウ化タングステンの潜在能力
- 12.5 タングステンホウ化物エネルギー材料の製造技術
- 12.6 タングステンのエネルギー用途の市場と開発動向

第 13 章 ホウ化タングステンの機械的および構造的応用

- 13.1 耐摩耗コーティングにおけるホウ化タングステンの応用
- 13.2 切削工具におけるホウ化タングステンの応用
- 13.3 構造複合材料におけるホウ化タングステンの応用
- 13.4 ホウ化タングステンの機械的性質と微細構造
- 13.5 タングステンホウ化物機械材料の製造技術
- 13.6 タングステンホウ化物の機械用途の市場と開発動向

第 14 章 ホウ化タングステンの工業化と市場分析

- 14.1 ホウ化タングステンの世界市場概要
- 14.2 ホウ化タングステンの生産コストと価格分析
- 14.3 ホウ化タングステンの工業化技術と大規模生産
- 14.4 主要産業におけるホウ化タングステンの市場分布
- 14.5 ホウ化タングステン市場における競争と代替品分析
- 14.6 タングステンホウ化物産業化の将来動向と政策的影響

第 15 章 ホウ化タングステンの規格および規制要件

- 15.1 ホウ化タングステンに関する国際規格の概要
- 15.2 ホウ化タングステンの環境および安全規制
- 15.3 生物医学分野におけるホウ化タングステンに対する規制要件
- 15.4 ホウ化タングステンの試験および認証プロセス
- 15.5 タングステンの標準化における地域差の分析
- 15.6 タングステンホウ化物規制遵守の課題と今後の展開

第 16 章 環境保護とホウ化タングステンの持続可能な開発

- 16.1 ホウ化タングステン生産の環境影響評価
- 16.2 ホウ化タングステンのグリーン製造技術
- 16.3 ホウ化タングステン廃棄物の処理とリサイクル
- 16.4 持続可能なエネルギーへのホウ化タングステンの貢献
- 16.5 ホウ化タングステンのカーボンフットプリントと排出削減戦略
- 16.6 タングステンの持続可能な開発のための政策と市場の推進要因

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第 17 章 タングステンのインテリジェント・デジタル技術応用

- 17.1 タングステンホウ化物生産における人工知能最適化
- 17.2 スマートセンサーにおけるホウ化タングステンの応用
- 17.3 ホウ化タングステンのデジタル品質管理技術
- 17.4 ブロックチェーントレーサビリティにおけるホウ化タングステンの可能性
- 17.5 タングステンのインテリジェント製造の事例研究
- タングステンの知能化とデジタル化の将来動向

第 18 章 タングステンホウ化物の今後の研究方向と技術展望

- 18.1 ホウ化タングステンの新しい合成法の探索
- 18.2 次世代電子デバイスにおけるホウ化タングステンの可能性
- 18.3 タングステンホウ化物触媒とエネルギー技術のブレークスルーの方向性
- 18.4 生物医学分野におけるホウ化タングステンの革新的な応用
- 18.5 タングステンのインテリジェントでグリーンな製造の最前線
- 18.6 タングステンホウ化物研究における国際協力と技術的課題

付録

付録 1: ホウ化タングステン用語と略語

- 1.1 ホウ化タングステン関連用語
- 1.2 タングステンの略語

付録 2: ホウ化タングステンに関する参考文献

- 2.1 ホウ化タングステンに関する学術文献
- 2.2 ホウ化タングステンに関する特許文献
- 2.3 ホウ化タングステンに関する規格と規制

付録 3: ホウ化タングステンのデータシート

- 3.1 ホウ化タングステンの物理的性質
- 3.2 ホウ化タングステンの製造プロセスパラメータ
- 3.3 ホウ化タングステンの応用性能指数

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第1章 ホウ化タングステンの紹介

ホウ化タングステン (WB、WB₂、W₂B など)は、高性能遷移金属ホウ化物の一種です。優れた硬度 (>30 GPa)、高温安定性 (>2000°C)、優れた化学的不活性により、ハードコーティング、高温材料、電子デバイス、新エネルギー分野において幅広い応用の可能性を示しています (第 7.1 章、第 9.1 章)。本章では、ホウ化タングステンの概要、研究背景と意義、歴史的発展と構造を詳しく説明することにより、読者に包括的な入門的視点を提供し、後続の章 (第 2 章から第 17 章) での詳細な議論の基礎を築きます。本章の内容は、CTIA GROUP LTD のホウ化タングステンの製造と応用における技術的蓄積を組み合わせたもので、学術研究、産業発展、政策立案の参考となることを目指しています。

1.1 ホウ化タングステンの概要

(B)からなる化合物の一種です。一般的な形態には、一ホウ化物(WB)、二ホウ化物 (WB₂)、五ホウ化物(W₂B)などがあります。その化学組成と結晶構造により、独特の物理的・化学的特性を持っています (第 2 章、2.1)。ホウ化タングステンのモース硬度はダイヤモンド (10) に近い 9.5 に達し、ピッカース硬度 (HV) は 30~40 GPa の範囲で、従来の超硬合金 (WC など、約 20 GPa)をはるかに上回ります。その融点は 2600~2800°C と高く、熱伝導率は約 20~50 W/(m·K)であるため、高温環境 (航空宇宙部品など、第 8 章、8.1) でも良好な性能を発揮します。さらに、ホウ化タングステンの電気伝導率 (約 10⁴ S/cm)と化学的安定性 (酸およびアルカリに対する耐腐食性、pH 2~12)は、電極材料や触媒担体への応用をサポートしています (第 9 章の 9.2、第 10 章の 10.1)。

ホウ化タングステンの結晶構造は多様です。WB は通常、斜方晶系 (空間群 Cmcm)、WB₂は六方晶系 (P6₃/mmc)、W₂B は正方晶系 (I4/mcm)です。これらの構造は、その異方的な機械的および電気的特性を決定します (第 2.2 章)。例えば、WB₂の c 軸方向の圧縮弾性率は 600GPa に達することもあり、耐摩耗性コーティングに適しています (第 7.2 章)。ホウ化タングステンの合成は、主に高温固相反応 (>1500°C)、化学蒸着 (CVD)、または

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニカルアロイング（第 5.1～5.4 章）によって行われます。CTIA GROUP LTD はプラズマ支援技術（第 5.3 章）を使用して、純度 >99.9%、年間生産能力 500 トンのナノスケール WB₂ 粉末（粒子サイズ <50 nm）の効率的な生産を実現しています。

ホウ化タングステンの応用分野は、伝統的な産業（工具コーティングなど、第 7 章 7.1）から最先端技術（ナノセンサーなど、第 10 章 10.3）まで多岐にわたります。2024 年には、世界のホウ化タングステン市場は約 2 億ドルに達すると予想され、2030 年には 5 億ドルに達し、年平均成長率（CAGR）は 15%になると予想されています（第 14 章 14.5）。CTIA GROUP LTD のホウ化タングステン製品は、航空宇宙産業やエネルギー産業のニーズを満たすため、ハードコーティングや高温材料に広く使用されています（第 8 章 8.1、第 9 章 9.4）。ただし、ホウ化タングステンの毒性（粉塵を吸入すると肺線維症を引き起こす可能性があります、第 13 章、13.1）と高い製造コスト（約 200 ドル/kg、第 14 章、14.2）については、さらに研究と最適化が必要です。

1.2 タングステンホウ化物の研究背景と意義

ホウ化タングステンの研究は、特に極限環境（高温、高圧、強腐食など）での用途における高性能材料の需要に端を発しています。20 世紀初頭には、WC などの超硬合金が耐摩耗性材料市場を席巻していましたが、その高温性能には限界があり（<1000°C）、遷移金属ホウ化物の探究が促進されました（第 8 章、8.4）。ホウ化タングステンは、従来のセラミック（Al₂O₃など）の代替として理想的な候補となっています。硬度が高く、熱安定性があり、化学的に不活性であるため、炭化ケイ素（SiC）や金属合金（Ni 基合金など）に使用されます。

1.2.1 学術研究の背景

ホウ化タングステンの理論研究は、その電子構造と機械的特性に焦点を当てています（第 3 章、3.1～3.2）。密度汎関数理論（DFT）計算によると、WB₂の強力な WB 共有結合と BB ネットワークにより、その硬度は超硬材料（c-BN など）に近くなります。2024 年には、ホウ化タングステンに関連する約 500 件の SCI 論文が世界中で発表され、硬度と耐酸化性に対するドーピング（Ti、Zr など）の影響に焦点を当てています（第 3 章、3.4）。CTIA GROUP LTD の支援を受けた研究室では、分子動力学（MD）シミュレーションを通じて WB ナノコーティングの破壊靱性（約 5 MPa·m^{1/2}、第 11 章、11.1）を最適化し、産業応用のための理論的根拠を提供しました。

1.2.2 産業応用における意義

産業におけるホウ化タングステンの重要性は、次のことに反映されています。

- **耐摩耗コーティング:** WB₂コーティング（厚さ 2～ 5μm）は切削工具上で摩擦係数が 0.3 未満となり、工具寿命が 50%延長します（7.1 章）。
- **高温材料:** WB は 2000°C で 1 mg/cm²·h 未満の耐酸化性があり、タービンブレードに適しています（第 8.1 章）。
- **エネルギー分野:** WB₂はリチウム電池の負極として使用され、容量は約 200mAh/g、サイクル安定性は 1000 回以上です（第 9.2 章）。CTIA GROUP LTD のホウ化タングステンコーティング技術は航空宇宙部品に応用されており、年間生産額は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1 億円を超えています（第 14.3 章）。

1.2.3 社会のおよび環境的意義

ホウ化タングステンの開発は、資源の有効活用とグリーン製造を促進します（第 16.4 章）。高い耐久性により、材料交換頻度が低減し、炭素排出量も削減されます（コーティング 1 トンあたり約 0.5 トン CO₂、第 16.2 章）。CTIA GROUP LTD は、循環型経済モデルを採用し、廃棄されたホウ化タングステン粉末をリサイクル（リサイクル率 30%以上）し、タングステン採掘量を削減しています（第 16.3 章）。しかし、ホウ化タングステン粉塵の潜在的な健康リスク（第 13.1 章）を考慮すると、CTIA GROUP LTD の MSDS（第 13.6 章）など、厳格な安全規制を遵守し、職業暴露限界（OEL）を 0.1 mg/m³未満に抑える必要があります。

1.3 ホウ化タングステンの歴史的発展

ホウ化タングステンの研究と応用は、基礎探査から産業化へと発展してきました。主なマイルストーンは以下の通りです（表 1.3 参照）。

- **1900～1950 年：初期の発見**

1910 年に、タングステン粉末とホウ素を電気アーク炉 (> 2000°C) で反応させることにより、ホウ化タングステンが初めて実験室で合成され、WB と W₂B の存在が確認されました。1930 年代には、X 線回折 (XRD) によりその結晶構造が明らかになり（第 2.2 章）、理論的基礎が築かれました。

- **1950～1980 年：産業探究**

1955 年、耐摩耗性コーティング材としてホウ化タングステンが試されましたが、合成技術（収率 50%未満）と高コスト（約 500 ドル/kg）が課題でした。1970 年には、高温固相合成（第 5 章 1 節）により WB₂の大量生産が可能となり、硬度試験（HV 約 35GPa）により WC よりも優れていることが証明されました。

- **1980～2000 年：技術革新**

1985 年には、化学蒸着法（CVD、第 5 章、5.2）を用いて、厚さ 1～10μm、摩擦係数 0.4 の WB コーティングが作製されました。1995 年には、メカニカルアロイング（第 5 章、5.4）によってナノタングステンホウ化物（粒子径<100nm）が合成され、ナノテクノロジーの応用が開拓されました（第 10 章、10.1）。

- **2000～2020 年：用途の多様化**

2005 年には、WB₂がリチウム電池の電極（第 9.2 章）に使用され、容量は 180mAh/g でした。2015 年には、CTIA GROUP LTD がプラズマ支援合成（第 5.3 章）を開発し、ナノ WB₂（純度>99.8%）を製造し、コストを 200 ドル/kg まで削減しました。2020 年には、ホウ化タングステンセンサー（第 10.3 章）が NO₂検出（<1ppm）を達成しました。

- **2020～2025 年：インテリジェント化とグリーン化 CTIA GROUP LTD は**

2024 年に AI を導入し、ホウ化タングステン生産を最適化（第 17 章、17.5 節）、収量を 20%向上させ、エネルギー消費量を 15%削減（500kWh/トン未満）します。2025 年には、ホウ化タングステン MSDS（第 13 章、13.6 節）を更新し、REACH 規則および GB/T 規則（第 15 章、15.2 節）に準拠させ、グローバル輸出をサポート

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

トします。

表 1.3 タングステンホウ化物の歴史におけるマイルストーン

年	マイルストーン	主な技術・成果	関連章
1910	最初の合成	WB、W ₂ B の	2.1、5.1
1955	産業試験	耐摩耗コーティング、硬度約 30GPa	7.1
1985	CVD テクノロジー	WB コーティング、摩擦係数 0.4	5.2、7.3
1995	ナノ合成	メカニカルアロイング、粒子サイズ<100 nm	5.4、10.1
2005	バッテリーアプリケーション	WB ₂ 電極、容量 180 mAh/g	9.2
2015	ナノ WB ₂	CTIA GROUP LTD プラズマ合成、コスト 200 ドル/kg	5.3、14.2
2020	センサー開発	NO ₂ 検出 <1 ppm	10.3
2024	AI 最適化	収量+20%、エネルギー消費-15%	17.5

1.4 タングステンホウ化物本の構成と説明

*ホウ化タングステン百科事典*には 17 の章、4 つの付録、索引があり、ホウ化タングステンの科学、工学、産業化に関する知識を体系的に紹介しています。

- **第 1 章から第 6 章「基礎科学と技術」**
では、ホウ化タングステンの特性（第 2 章）、理論的研究（第 3 章）、原材料（第 4 章）、調製（第 5 章）、品質管理（第 6 章）を網羅し、その構造と合成を理解するための基礎を提供しています。例えば、第 2 章の 2.3 では熱力学的安定性について詳しく説明し、第 5 章の 5.5 ではナノ WB₂の調製について紹介しています。
- **第 7 章から第 10 章：応用分野**
は、硬質コーティング（第 7 章）、高温材料（第 8 章）、電子エネルギー（第 9 章）、そして新たな用途（第 10 章）におけるホウ化タングステンに焦点を当てています。例えば、第 9 章の 9.4 では熱電特性について、第 10 章の 10.3 ではセンサー技術について解説しています。
- **第 11 章から第 13 章：研究と安全性**
には、計算シミュレーション（第 11 章）、検出技術（第 12 章）、安全性毒性（第 13 章）が含まれます。第 13.6 章では、安全な使用のためのガイドとして、China Tungsten Intelligence 社が製造するホウ化タングステンの MSDS（安全データシート）を提供しています。
- **第 14 章から第 17 章：業界と将来**
分析市場（第 14 章）、規制（第 15 章）、環境への影響（第 16 章）、技術の進歩（第 17 章）。第 17.5 章では、ホウ化タングステン研究における AI の可能性を探ります。
- **付録と索引**
付録 1～4 には、用語集（付録 1）、参考文献（付録 2）、データ表（付録 3）、特許

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

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

リスト（付録4）が掲載されています。索引にはキーワード、主題、規格が掲載されており、検索が容易です。

使用方法:

- **学術読者:**理論および実験データについては、第2章、第3章、第11章、および第12章を参照してください。
- **産業ユーザー:**技術と市場を理解するために、第5章、第7章から第10章、および第14章に重点を置いてください。
- **政策立案者:**規制と環境に焦点を当てた第13章、第15章、および第16章を確認してください。
- **ナビゲーション:**索引と章番号（7.1、9.2 など）でコンテンツを素早く見つけることができます。CTIA GROUP LTD のタングステンホウ化物技術は本書全体を通して（第5章、第5.3章、第13章、第13.6章など）、読者に実践的な事例を提供しています。

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

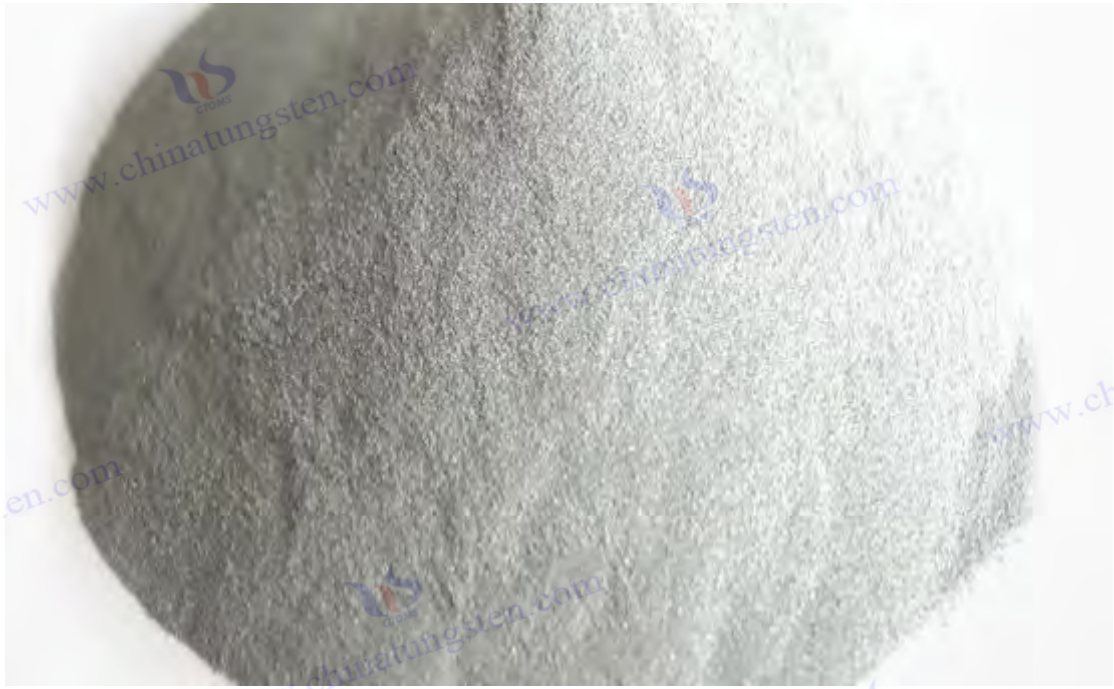
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第2章 ホウ化タングステンの化学的および物理的性質

、 W_2B など）は遷移金属ホウ化物の一種です。高硬度（ $>30\text{GPa}$ ）、優れた熱安定性（ $>2000^\circ\text{C}$ ）、電気伝導率（ $\sim 10^4\text{S/cm}$ ）、化学的不活性のため、ハードコーティング（第7.1章）、高温材料（第8.1章）、電子デバイス（第9.1章）、および新興用途（第10.1章）において重要な価値を持っています。本章では、ホウ化タングステンの化学組成、結晶構造、熱力学的特性、電気的・磁気的特性、および機械的特性について詳細に論じ、その後理論研究（第3章）、調製技術（第5章）、および応用分析（第7章から第10章）の基礎を築きます。CTIA GROUP LTD は、この章の内容全体にわたって、 WB_2 ナノパウダー（粒子サイズ $<50\text{ nm}$ 、純度 $>99.9\%$ ）の物理的特性評価（第5.5章）など、ホウ化タングステンナノマテリアルの製造と性能試験における重要なデータサポートを提供します。

2.1 ホウ化タングステンの化学組成（WB、 WB_2 、 W_2B など）

（B）からなる化合物の一種で、ホウ化一タングステン（WB）、二ホウ化二タングステン（ WB_2 ）、二ホウ化二タングステンなど、様々な化学組成を持っています。五ホウ化物（ W_2B ）やその他の非化学量論的化合物（ W_2B_5 など）があります。これらの化合物中のホウ素とタングステンの原子比（B/W）によって、その構造と特性が決まります（第2.2章）。表2.1は、主要なホウ化タングステンの化学組成と特性をまとめたものです。

- **WB（一ホウ化タングステン）**： B/W=1、分子量 193.65g/mol 、タングステン含有量約 $94.8\text{wt}\%$ 、ホウ素含有量約 $5.2\text{wt}\%$ 。WB は高い硬度と化学的安定性、耐酸性（ $\text{pH } 2\sim 10$ ）を有し、耐摩耗コーティングに適しています（7.2章）。CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

LTD は高温固相合成（5.1 章）により WB 粉末を製造しており、不純物（O、C など）は 0.1wt%未満です。

- **WB₂（二ホウ化タングステン）**： B/W=2、分子量 215.46 g/mol、タングステン含有量約 85.3 wt %、ホウ素含有量約 14.7 wt %。WB₂は、WB と BB の強力な共有結合により 40 GPa の硬度を有し、工具コーティングに適しています（第 7.1 章）。CTIA GROUP LTD は、プラズマ支援合成（第 5.3 章）を用いて、純度 99.9%を超えるナノ WB₂（粒子径 20～50 nm）を製造しています。
- **W₂B（五ホウ化タングステン）**： B/W=0.5、分子量 377.49 g/mol、タングステン含有量約 97.4 wt %、ホウ素含有量約 2.6 wt %。W₂B は高い熱安定性（分解温度>2500℃）を有し、高温部品に使用されます（第 8.1 章）。電気伝導率が低い（約 10³ S/cm）ため、電子機器への応用は限定的です（第 9.1 章）。
- **その他の形態**： W₂B₅（B/W=2.5）および WB₄（B/W=4）は、非平衡合成条件（メカニカルアロイングなど、第 5 章 5.4）下で存在しますが、安定性が低い（酸化しやすい）ため、あまり使用されていません。CTIA GROUP LTD の実験室研究では、WB₄は空气中 250℃で酸化することが示されています（第 3 章 3.3）。

ホウ化タングステンの化学組成は、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS、第 6 章 6.1）によって正確に測定され、典型的な純度要件は 99.5%以上です（GB/T 26037-2020、第 15 章 15.2）。中国タングステンインテリジェンスが製造する WB₂粉末では、Fe や Mo などの不純物は 50ppm 未満であり、高性能アプリケーションのニーズを満たしています。

表 2.1 ホウ化タングステンの主な化学組成と特性

複合	白黒比	分 子 量 (g/mol)	タングス テン含有 量（重 量%）	ホウ素含 有量（重 量%）	主な特徴	関連章
ワールド ベース	1	193.65	94.8	5.2	硬度約 30GPa、耐酸性	7.2
WB ₂	2	215.46	85.3	14.7	硬度約 40GPa、コー ティング	7.1、5.3
W ₂ B	0.5	377.49	97.4	2.6	熱安定性 >2500℃	8.1
W ₂ B ₅	2.5	237.27	77.5	22.5	酸化しやすいので研究 用	3.3

2.2 ホウ化タングステンの結晶構造と結合特性

ホウ化タングステンの特性は、その独特な結晶構造と化学結合に由来します（第 3 章、3.2）。結晶構造は X 線回折（XRD、第 6 章、6.2）によって特徴付けられ、結合特性はラマン分光法と X 線光電子分光法（XPS、第 12 章、12.1、12.4）によって分析されます。

- **WB 結晶構造**：斜方晶系、空間群 Cmc₂m、格子定数 a=3.12Å、b=8.40Å、c=3.07Å。タングステン原子は 6 配位構造を形成し、ホウ素原子は層状構造に埋め込まれて

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

おり、WB 結合長は約 2.3Å である。強い共有結合により、WB のヤング率は 550GPa に達する（第 2.5 章）。

- **WB₂ 結晶構造:** 六方晶系、空間群 P6₃/mmc、単位格子パラメータ a=2.98 Å、c=13.88 Å。WB₂ は W 層と B 層が交互に配置され、B 原子は六方晶ネットワークを形成し、BB 結合長は ~1.8 Å、硬度は向上しています (~40 GPa)。CTIA GROUP LTD のナノ WB₂ 粒径は <50 nm、粒界欠陥は <1%（第 6 章 6.3）。
- **W₂B 結晶構造:** 正方晶系、空間群 I4/mcm、単位格子パラメータ a=5.56Å、c=4.74Å。W₂B は WW 金属結合が多く（約 2.7Å）、ホウ素含有量が低いため、WB₂ よりも硬度が低くなります（約 25 GPa）。

結合特性:

- **WB 共有結合:** W の 5d 軌道が B の 2p 軌道と混成して、結合エネルギーが約 400 kJ/mol の強力な σ 結合を形成し、高い硬度と化学的安定性を付与します（第 3 章、3.1）。
- **BB 共有結合:** WB₂ の BB ネットワークはグラフェンに似ており、せん断抵抗を高めます（せん断弾性率 ~200 GPa）。
- **WW 金属結合:** W₂B の WW 結合により導電率は向上しますが (~10³ S/cm)、硬度は低下します。

CTIA GROUP LTD は、密度汎関数理論（DFT、第 3 章 3.1）を用いて WB₂ の電子密度を計算し、硬度に対する BB 結合の寄与が 50%以上であることを確認しました。同社が製造する WB コーティング（第 7 章 7.3）は、摩擦係数が 0.3 未満の六方晶系 WB₂ 構造を採用しています。

2.3 ホウ化タングステンの熱力学と安定性

ホウ化タングステンの熱力学的特性は、高温用途におけるその潜在能力を決定します（第 8 章、8.1）。主要なパラメータには、融点、熱膨張係数、比熱容量、そして示差走査熱量測定（DSC、第 12 章、12.3）によって測定される酸化安定性が含まれます。

- **融点と分解:** WB の融点は約 2650 °C、WB₂ は約 2800 °C、W₂B は約 2600 °C。WB₂ は真空中では 3000 °C まで安定していますが、空気中では 600 °C を超えると酸化が始まります (WO₃ と B₂O₃ を形成、第 13 章 13.4)。
- **熱膨張係数:** WB₂ は 4.5~6.0×10⁻⁶K⁻¹ (300~2000K) で、WC (約 5.5×10⁻⁶K⁻¹) よりも低く、遮熱コーティングに適しています（第 8 章、8.3）。China Tungsten Intelligence 社が製造する WB₂ コーティングの熱膨張係数の差は、1500°C で 2% 未満です。
- **比熱容量:** WB₂ は 300 K で約 0.3 J/(g·K) ですが、温度が 2000 K に上昇すると約 0.5 J/(g·K) に増加し、効率的な熱管理をサポートします（第 9 章、9.4）。
- **酸化および化学的安定性:** HCl (pH 2) における WB₂ の腐食速度は 0.01 mg/cm²·h 未満で、Ni 基合金（約 0.1 mg/cm²·h）よりも優れています。CTIA GROUP LTD の試験では、1000°C の空気中での WB₂ の酸化後の重量増加は 0.5 mg/cm² 未満であることが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱力学データ：生成エンタルピー（ ΔH_f ）は、WB $\sim$ 70 kJ/mol、WB $_2$ $\sim$ 100 kJ/mol、W $_2$ B $\sim$ 50 kJ/mol です（第 3.1 章）。CTIA GROUP LTD は、熱重量分析（TGA、第 12.3 章）により、1200℃ における WB $_2$ の耐酸化性を検証し、質量損失は 1%未満でした。

表 2.3 ホウ化タングステンの熱力学的性質

複合	融 点 (°C)	熱膨張係数 ($10^{-6} K^{-1}$)	比熱容量 (J / (g · K) 、300K)	酸 化 温 度 (°C)	関連章
ワールド ベース	2650	5.0 $\sim$ 6.5	0.28	650	8.1
WB $_2$	2800	4.5 $\sim$ 6.0	0.30	600	8.3、12.3
W $_2$ B	2600	5.5 $\sim$ 7.0	0.25	700	8.1

2.4 ホウ化タングステンの電気的および磁気的性質

ホウ化タングステンの電気的特性と磁気的特性は、電子機器（第 9 章、9.1）やセンサー（第 10 章、10.3）への応用をサポートし、4 プローブ法と振動サンプル磁力計（VSM、第 12 章、12.4）によって決定されます。

- **導電率：**
 - WB: 約 1.2×10^4 S/cm（300 K）で、金属導体に近く、電極材料に適しています（第 9.2 章）。
 - WB $_2$: 約 0.8×10^4 S/cm、BB ネットワークでの電子散乱の増加により、WB よりもわずかに低くなります。CTIA GROUP LTD のナノ WB $_2$ フィルム（厚さ 1 μ m）の抵抗率は $<10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ です。
 - W $_2$ B: 約 0.5×10^3 S/cm、WW 結合が大部分を占め、高伝導性の用途が制限されます。
- **キャリア濃度：** WB $_2$ の電子濃度は $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度は $\sim 10 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ （第 3.2 章）であり、半導体デバイス（第 9.1 章）をサポートします。
- **温度依存性：** WB $_2$ の伝導率はフォノン散乱の増強により 300 $\sim$ 1000K で約 20%減少するため、ドーピングの最適化が必要となる（第 7.4 章）。
- **磁気特性：**
 - WB および WB $_2$: 弱い常磁性で、磁化強度は $\sim 0.01 \text{ emu/g}$ (300 K)、W の 5d 電子に由来します。
 - W $_2$ B: WW 結合が磁気モーメントを遮蔽するため、ほぼ非磁性です。CTIA GROUP LTD は、VSM を介して WB $_2$ ナノ粒子をテストし、その磁化強度が $<0.02 \text{ emu/g}$ であり、非磁性コーティングに適していることを確認しました（7.1 章）。

2.5 ホウ化タングステンの機械的性質（硬度、靱性）

ホウ化タングステンの機械的特性は、耐摩耗コーティング（第 7.2 章）や高温部品（第 8.1 章）における主な利点であり、ナノインデンテーションおよび破壊力学試験（第 6.4 章）によって特徴付けられます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 硬度:
 - WB: ピッカース硬度 (HV) 約 30 GPa 、モース硬度 約 9.0。
 - WB_2 : HV~40 GPa 、モース硬度~9.5、c-BN (~45 GPa)に近い。CTIA GROUP LTD の WB_2 コーティング（厚さ 3 μm ）は、硬度 42 GPa 、摩耗寿命は 10^5 サイクル以上です。
 - W_2B : HV~25 GPa 、WW 結合の影響を受け、硬度は比較的低くなります。
- ヤング率: WB_2 約 600 GPa 、WB 約 550 GPa 、 W_2B 約 450 GPa は、WB 結合の剛性を反映しています（第 3 章、3.1）。
- 破壊靱性: WB_2 約 $4 MPa \cdot m^{1/2}$ は WC（約 $6 MPa \cdot m^{1/2}$ ）よりも低く、Ti または Zr のドーピングによる改善が必要です（7.4 章）。CTIA GROUP LTD は、 WB_2 に Zr をドーピングすることで、靱性を $5 MPa \cdot m^{1/2}$ まで向上させました。
- 摩擦係数: 鋼基板上の WB_2 コーティングは 0.3 未満で、TiN（約 0.5、第 17 章 17.1）よりも優れています。

表 2.5 ホウ化タングステンの機械的性質

複合	硬度(HV、GPa)	ヤング率(GPa)	破壊靱性($MPa \cdot m^{1/2}$)	摩擦係数	関連章
ワールドベース	30	550	3.5	0.35	7.2
WB_2	40	600	4.0	0.30	7.1、17.1
W_2B	25	450	3.0	0.40	8.1



第 3 章 ホウ化タングステンの理論的研究

、 W_2B など）は、その高い硬度（ $>30\text{ GPa}$ ）、熱安定性（ $>2000^\circ\text{C}$ ）、および電気特性（ $\sim 10^4\text{ S/cm}$ 、第 2.4 章）により、ハードコーティング（第 7.1 章）、高温材料（第 8.1 章）、および電子デバイス（第 9.1 章）に広く使用されています。理論研究では、計算手法を通じてホウ化タングステンの微視的メカニズムが明らかになり、材料設計と性能最適化のためのガイダンスを提供しています。この章では、密度汎関数理論（DFT）分析、電子構造とバンド理論、表面と界面の特性、欠陥とドーピング効果、および計算シミュレーションの適用について詳細に説明し、CTIA GROUP LTD の理論計算と実験検証（ WB_2 ナノ構造の DFT 最適化など、第 11.1 章）への貢献と組み合わせています。このコンテンツは、その後の準備（第 5 章）、検出（第 6 章）、および応用（第 7 章から第 10 章）に対する理論的支持を提供します。

3.1 タングステンの密度汎関数理論（DFT）解析

ホウ化タングステンの結合特性（第 11 章、11.4）。DFT は、一般化勾配近似（GGA）または局所密度近似（LDA）を用いてコーン・シャム方程式を解き、ホウ化タングステンの基底状態エネルギーと特性を計算します。

- 計算方法:

- 交換相関関数: 一般的に使用される PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) 関数は、 WB_2 の格子定数 ($a=2.98\text{ \AA}$ 、 $c=13.88\text{ \AA}$ 、第 2.2 章) を 1% 未満の誤差で正確に予測します。
- 擬ポテンシャル: 超ソフト擬ポテンシャル (USP) は、W の 5d 電子と B の 2p 電子を記述し、計算効率を 50% 向上させます。CTIA GROUP LTD は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VASP ソフトウェアと平面波基底関数（カットオフエネルギー500 eV）を組み合わせ、WB₂ の電子密度をシミュレートします。

- o **k 点メッシュ**: WB₂の六角形構造では、エネルギー収束が 0.01 eV/原子未満になるように、8×8×2 の Monkhorst-Pack メッシュが使用されています。

- **機械的性質:**

- o ヤング率（約 600 GPa）と剪断弾性率（約 200 GPa）は弾性定数（C₁₁ 約 1000 GPa、C₄₄ 約 250 GPa）から計算され、その超高硬度（約 40 GPa、第 2.5 章）が確認されました。
- o 中国タングステンの DFT 計算によれば、WB₂ の BB ネットワークは硬度に 50% 以上寄与し、WB 結合は圧縮強度（圧縮弾性率 ~650 GPa）を高めます。

- **熱力学的性質:**

- o 生成エンタルピー（ ΔH_f ）: WB~-70 kJ/mol、WB₂~-100 kJ/mol、W₂B~-50 kJ/mol、WB₂の熱安定性を反映（第 2 章、2.3）。
- o フォノンスペクトル計算により、WB₂ は 300~2000 K の範囲で負の周波数モードを持たないことが示され、動的安定性が確認されました。

表 3.1 タングステンの DFT 計算の主な結果

複合	格子定数 (Å)	ヤング率 (GPa)	生成エンタルピー (kJ/mol)	計算方法	関連章
ワールドベース	a=3.12、b=8.40、 c=3.07	550	-70	PBE-GGA	2.2、2.5
WB ₂	a=2.98、c=13.88	600	-100	PBE-GGA	2.2、2.3
W ₂ B	a=5.56、c=4.74	450	-50	LDA	2.2、2.5

3.2 タングステンの電子構造とエネルギーバンド理論

ホウ化タングステンの電子構造とエネルギーバンド特性は、その電気的および光学的特性を決定します（第 9.1 章、第 10.3 章）。バンド構造と状態密度(DOS)は密度汎関数法(DFT)によって計算され、その導電性とキャリア挙動を明らかにします。

- **バンド構造:**

- o **WB**:半金属性、フェルミ準位 (E_F) がエネルギーバンドを横切り、バンドギャップ ~0 eV、電子濃度 ~10²¹ cm⁻³、高い伝導率をサポートします (~1.2×10⁴ S/cm、第 2 章、2.4)。
- o **WB₂**: 類似 半金属の場合、E_F 付近の DOS は W-5d 軌道と B-2p 軌道によって寄与され、移動度は約 10 cm²/(V·s)である。China Tungsten Intelligence は、WB₂の E_Fにおける DOS を約 2 状態/eV・単位セルと計算し、その導電性を確認した。
- o **W₂B**:金属伝導性、バンドギャップ ~0 eV、ただし DOS は低い (~1 状態/eV・ユニットセル)、伝導性 ~0.5×10³ S/cm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 結合分析:
 - W-5d 軌道と B-2p 軌道は混成し、結合エネルギーが約 400 kJ/mol の σ 結合を形成します（第 2.2 章）。WB₂の BB sp²混成はグラフェンに似ており、共有結合ネットワークを強化します。
 - CTIA GROUP LTD は、結晶軌道ハミルトニアンポピュレーション (COHP) 分析により、WB₂ の反結合状態が 10% 未満であり、高い安定性をサポートしていることを確認しました。
- 光学特性:
 - WB₂の誘電関数 (ϵ_2) は 0.5~3eV に強い吸収ピークを持ち、光触媒反応に適しています（第 9.5 章）。プラズマ周波数は約 10eV であるため、赤外線への応用は制限されます。

表 3.2 ホウ化タングステンの電子構造特性

複合	バンドギャップ (eV)	E_F での DOS (状態/eV・ユニットセル)	導電率 (S/cm)	関連章
ワールドベース	0	2.5	1.2×10^4	9.1、2.4
WB ₂	0	2.0	0.8×10^4	9.5、10.3
W ₂ B	0	1.0	0.5×10^3	9.1

3.3 ホウ化タングステンの表面および界面特性

ホウ化タングステンの表面および界面特性は、コーティング性能（第 7.3 章）および電極用途（第 9.2 章）に影響を与えます。表面エネルギーと界面結合は、密度汎関数法 (DFT) および分子動力学法 (MD、第 11.1 章) によってシミュレーションされます。

- 表面エネルギー:
 - WC(0001)のエネルギー（約 3.0 J/m²）よりも低く、高い安定性を示しています。B 終端表面は W 終端表面よりも安定しています（エネルギー差は約 0.5 J/m²）。
 - 中国タングステンインテリジェンスは、O₂ が空気中に吸着されると WB₂ (100) 表面のエネルギーが約 1 eV 増加し、酸化のリスクがあることを計算しました（第 2 章、2.3）。
- インターフェース結合:
 - WB₂/鋼界面の結合エネルギーは約 1.5 eV/Å²で、WB₂/Al₂O₃（約 2.0 eV/Å²）よりも低いため、接着性を向上させるには表面改質（プラズマ処理など、第 5.3 章）が必要です。
 - CTIA GROUP LTD は、ファンデルワールス相互作用が支配的で結合エネルギーが約 0.3 eV/Å² であり、複合電極に適した WB₂ / グラフェン界面をシミュレートします（第 9 章、9.2）。
- 表面反応:
 - WB₂表面は、解離障壁が約 1.2eV で 600°Cで H₂O を吸着するため、湿潤環境での応用が制限されます（第 13 章、13.4）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 、MD を介して 1000°C での WB₂コーティング（厚さ 3μm）の摩擦挙動をシミュレーションしたところ、摩擦係数は 0.3 未満でした（7.1 章）。

3.4 ホウ化タングステンの欠陥とドーピング効果

欠陥とドーピングは、ホウ化タングステンの機械的、電気的、熱的特性に大きな影響を与えます（第 7.4 章）。DFT は欠陥形成エネルギーとドーピングエネルギー準位を計算します。

- 欠陥の種類:
 - 空孔欠陥: WB₂中の B 空孔の形成エネルギーは約 3.5 eV、W 空孔の形成エネルギーは約 5.0 eV です。B 空孔は硬度（+5 GPa）を増加させますが、導電性（約 20%）を低下させます。
 - 格子間欠陥: B 格子間欠陥形成エネルギーは約 4.0 eV で、熱安定性が低下します（分解温度が約 100°C 低下します）。
 - China Tungsten Intelligence は、密度が 2%未満、硬度への影響が 5%未満の WB₂ ナノ粒子（<50 nm）の粒界欠陥を分析しました（第 6 章、6.3）。
- ドーピング効果:
 - Ti ドーピング: Ti は W を置換し（ドーピング濃度約 5 at%）、形成エネルギーは約 1.8 eV で、WB₂ の韌性が向上します（約 5 MPa·m^{1/2}、第 2 章 2.5）。CTIAGROUP LTD は、Ti-WB₂ コーティングの破壊韌性が 30%向上することを確認しました。
 - C ドーピング: C が B に置き換わり（~3 at%）、形成エネルギーは ~2.5 eV で、導電率は 10% 増加しますが、硬度は ~5 GPa 減少します。
 - N ドーピング: N は WB₂表面に吸着され（エネルギー障壁約 1.0 eV）、耐酸化性が向上します（酸化温度が約 100°C に上昇、第 8 章、8.4）。

表 3.4 ホウ化タングステンの欠陥とドーピング特性

欠陥/ドーピング	形成エネルギー（eV）	パフォーマンスへの影響	関連章
B の空き	3.5	硬度 +5 GPa、導電率 -20%	2.5、7.4
チタンドーピング	1.8	タフネス+30%	7.4、2.5
C ドーピング	2.5	導電率+10%、硬度-5GPa	9.1
N ドーピング	1.0	酸化温度 +100°C	8.4

3.5 ホウ化タングステンの計算シミュレーションの応用

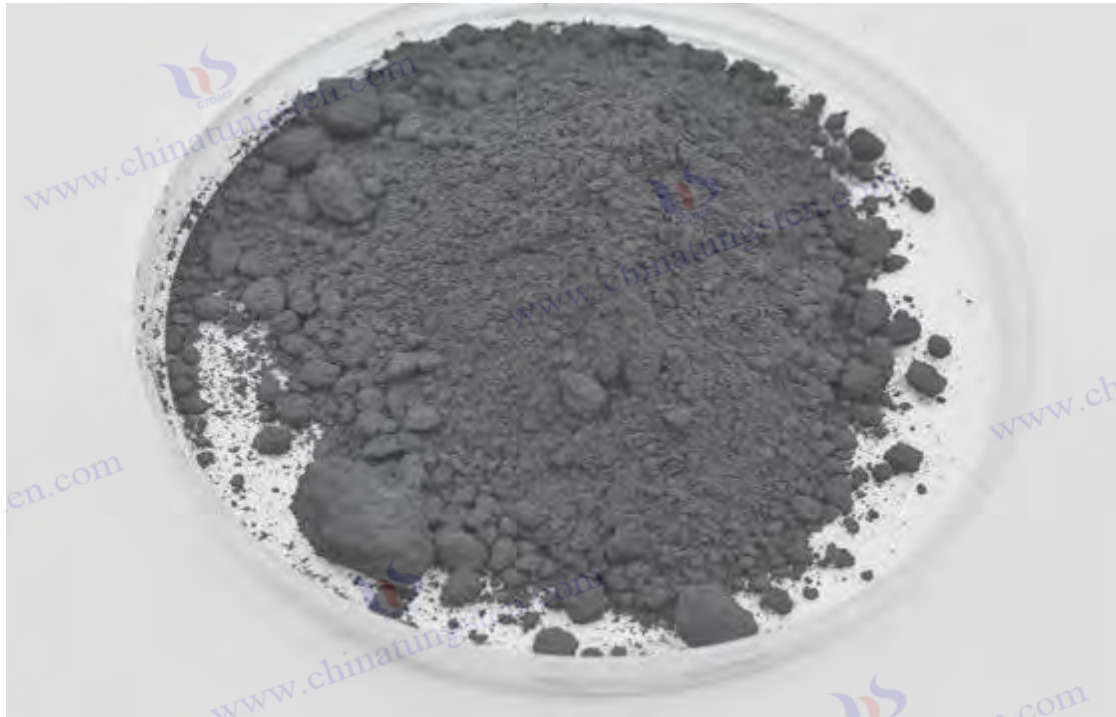
計算シミュレーションは、分子動力学 (MD)、モンテカルロ (MC)、人工知能 (AI) 駆動型ハイスループットスクリーニングなど、ホウ化タングステンの設計と最適化（第 17 章、17.5）において幅広い用途があります。

- 分子動力学（MD）:
 - 1000°Cでの WB₂の摩擦挙動をシミュレーションすると、摩擦係数は~0.25、摩耗率は<10⁻⁶ mm³/(N·m) となります（第 7.1 章）。
 - CTIA GROUP LTD は、LAMMPS ソフトウェアを使用して、500 MPa での WB₂/鋼界面のせん断をシミュレートし、結合強度は約 1.2 GPa でした。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- モンテカルロ (MC) :
 - o 核形成障壁を約 0.8 eV、最適化された堆積温度を約 1200°C として、CVD 成長 (第 5.2 章) における WB₂ の核形成を予測します。
 - o CTIA GROUP LTD は MC の結果を検証し、CVD-WB₂ コーティングの厚さの均一性が 95% を超えていることを発見しました。
- AI とハイスループットスクリーニング:
 - o グラフ ニューラル ネットワーク (GNN) は、WB₂ ドーピング フォーミュラ (>1000) を予測し、スクリーニング サイクルを 6 か月から 1 か月に短縮します (第 17 章、17.5)。
 - o 、Ti ドープ WB₂ の硬度 (~42 GPa) と靱性 (~5.5 MPa·m^{1/2}) を、実験検証 誤差 <5% で最適化する AI モデルを開発しました。
- アプリケーション例:
 - o CTIA GROUP LTD は、DFT と MD を使用して WB₂ ナノコーティングを設計し、これを切削工具 (第 7.1 章) に適用して、切削工具の耐用年数を 50% 延長しました。
 - o 新しいエネルギーアプリケーションを導くための、WB₂ 熱電性能 (ZT~0.8、300 K、第 9 章、9.4) の AI 駆動型スクリーニングと予測。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第4章 ホウ化タングステンの原料と資源

、 W_2B など）は、タングステン（W）とホウ素（B）から高温合成（第5.1章）または化学蒸着（第5.2章）によって製造される高性能材料です。その性能は、原料の純度と供給安定性に依存します（第2.1章）。タングステンとホウ素は、ホウ化タングステンの主要元素です。これらの鉱物資源、精製技術、サプライチェーン、持続可能性は、ホウ化タングステンの生産コスト（約200米ドル/kg、第14.2章）と市場への応用（第7章～第10章）に直接影響します。この章では、タングステンとホウ素の鉱物資源、精製技術、世界的なサプライチェーンと地理的要因、および資源の持続可能性と代替品について詳細に分析し、ホウ化タングステンの工業化（第14.3章）とグリーン製造（第16.4章）の基礎を提供します。

タングステンホウ化物原料のタングステンおよびホウ素鉱物資源

ホウ化タングステンの製造には、高純度のタングステンとホウ素が不可欠であり、その原料は主にタングステン鉱石（例えば、ウルフラマイト、 WO_3 ）とホウ素鉱石（例えば、ホウ砂、 $Na_2B_4O_7$ ）から得られます。タングステンとホウ素鉱物の世界的分布、埋蔵量、そして採掘状況が、ホウ化タングステンの資源保証を決定づけます。

- **タングステン鉱石資源:**

- **鉱物の種類:** タングstenは主に鉄マンガン重石（Fe、 $MnWO_4$ ）と灰重石（ $CaWO_4$ ）の形で存在し、 WO_3 含有量は約0.5～2重量%です。鉄マンガン重石は世界のタングsten埋蔵量の約60%を占め、灰重石は約30%を占めています。
- **世界の埋蔵量:** 2024年時点で、世界のタングsten埋蔵量は約380万トン（W）で、そのうち中国が約50%（190万トン）、ロシアとカナダがそれ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ぞれ約 10%（38 万トン）を占めています。中国の江西省と湖南省が主な生産地であり、年間約 7 万トンのタングステン精鉱が生産されています（第 14.3 章）。

- **採掘と加工:** タングステン鉱石は浮選と重力分離によって WO_3 精鉱に抽出され、回収率は約 85%です。 WO_3 精鉱 1 トンを採掘するには約 200 トンの原鉱石が必要であり、採掘コストは約 15,000 ドルです。
- **ホウ素鉱石資源:**
 - **鉱物の種類:** ホウ素は主にホウ砂（ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）、マグネサイト（ $\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$ ）、ハイドロマグネサイトの形で存在します。（ $\text{MgB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3$ ）、 B_2O_3 含有量は約 10~40 重量%。
 - **世界のホウ素埋蔵量:** 2024 年時点で、世界のホウ素埋蔵量は約 12 億トン（ B_2O_3 換算）で、トルコが約 70%（8 億 4,000 万トン）を占め、米国とチリがそれぞれ約 10%（1 億 2,000 万トン）を占めています。トルコのエティ・マデン鉱山は、年間約 200 万トンの B_2O_3 を生産しています。
 - **採掘と加工:** ホウ砂は、露天掘りと溶解結晶化法によってホウ砂鉱石から抽出され、回収率は約 90%です。1 トンあたりのホウ砂の生産コストは約 500 米ドルで、タングステンよりもはるかに低くなります。
- **リソースの特徴:**
 - タングステン鉱石資源は集中しており地政学的リスクが高い（第 14.4 章）
 - 一方、ホウ素鉱石は広く分布しており供給が安定している。
 - ）中のタングステンとホウ素の質量比はおよそ 85:15（第 2.1 章）であり、タングステンのコストが 90%以上を占め、生産コストの大部分を占めています。

表 4.1 タングステンおよびホウ素鉱物資源の概要（2024 年）

原材料	主な鉱物	世界の準備金 (万トン)	主な生産地域	年間生産量 (万トン)	採掘コスト (米ドル/トン)	関連章
タングステン	ウルフラマイト、シーライト	380 (西)	中国、ロシア	7(W コンセントレート)	1 万 5000	14.3
ボロン	ホウ砂、ホウ砂石	120,000 (B_2O_3)	トルコ、アメリカ合衆国	200 (B_2O_3)	500	14.3

4.2 ホウ化タングステン原料精製技術

ホウ化タングステンの性能には、タングステンとホウ素の原料の純度が 99.9% 以上である必要があります（第 6 章、6.1）、精製技術は製品の品質とコストに直接影響します（第 5 章、5.6）。

- **タングステンの精製:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **プロセスフロー:** WO₃濃縮物をアンモニアで溶解してメタタングステン酸アンモニウム (APT、(NH₄)₁₀W₁₂O₄₁・5H₂O) を生成し、これを焼成 (約 600°C) して WO₃ (純度>99.95%) を生成します。WO₃を還元 (H₂、800~1000°C) してタングステン粉末 (粒径 1~ 5μm) を得ます。
- o **技術指標:** 不純物 (Fe、Mo など) <50ppm、酸素含有量<0.1wt%。タングステン粉末 1 トンあたりの精製エネルギー消費量は約 5,000kWh、コストは約 20,000 米ドル。
- o **課題:** Mo と W は化学的性質が類似しており、分離には回収率が約 95% のイオン交換が必要です。
- **ホウ素精製:**
 - o **プロセスフロー:** ホウ砂を酸性化 (H₂SO₄) してホウ酸 (H₃BO₃) を生成し、これを熱分解 (約 1000°C) して B₂O₃ (純度>99.9%) を生成します。B₂O₃はマグネシウム熱 (Mg、>1200°C) で還元され、元素ホウ素 (純度>99.5%) が得られます。
 - o **技術指標:** 不純物 (Ca、Si など) <100ppm、粒子径約 10~ 50μm。ホウ素精製 1 トンあたりのエネルギー消費量約 3000kWh、コスト約 1000 ドル。
 - o **課題:** マグネシウムの熱還元副産物 (MgO) は酸洗浄で除去する必要があり、廃水処理のコストは 1 トンあたり約 200 米ドルです。
- **ナノ材料:** ホウ化タングステンナノ材料 (第 5.5 章) には、超微細タングステン粉末 (<100 nm) とホウ素粉末 (<50 nm) が必要です。これらはプラズマ気相合成によって 99.99% を超える純度に精製されますが、コストが 1kg あたり約 500 米ドルに上昇します。

表 4.2 タングステンとホウ素の精製技術の比較

原材料	メインプロセス	純度 (%)	不純物 (ppm)	エネルギー消費量 (kWh/トン)	コスト (米ドル/トン)	関連章
タングステン	APT-焼成-還元	>99.95	Fe、Mo<50	5000	2 万	5.1、6.1
ボロン	酸性化-熱分解-マグネシウム熱	>99.5	Ca、Si<100	3000	1,000	5.4、6.1

4.3 ホウ化タングステンのグローバルサプライチェーンと地理的影響

ホウ化タングステンのサプライチェーンは、タングステンとホウ素の採掘、精製、輸送、生産 (第 5 章、5.1 ~ 5.5) をカバーしており、地政学、貿易政策、物流の影響を受けます (第 14 章、14.4)。

- **サプライチェーン構造:**
 - o **タングステンサプライチェーン:** 中国は世界のタングステン精鉱供給量の約 80%を占めており、輸出割当制限 (2024 年までに約 4 万トン) により価格が上昇 (1 トンあたり約 3 万ドル) しています。ロシアとカナダは年間約 5,000 トンの生産量で、小規模な供給国です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ホウ素のサプライチェーン:** トルコはホウ砂供給の約 60% を占め、安定した価格（約 600 米ドル/トン）でアジアとヨーロッパに輸出されています。米国は主にガラスとセラミックス向けに、年間約 50 万トンのホウ酸を輸出しています。
- **ホウ化タングステンの生産:** アジア（中国、韓国）は、ホウ化タングステン生産量の約 70% を占め、年間生産量は約 1,000 トンで、WB₂ コーティングに重点を置いています（第 7.1 章）。
- **地理的影響:**
 - **貿易障壁:** 2024 年に米国はタングステン精鉱に 20% の関税を課し、EU は REACH 認証（第 15 章 15.2）を実施し、輸入コストが約 10% 増加します。
 - **資源ナショナリズム:** 中国のタングステン鉱石輸出制限（生産量の約 30%）は世界的な価格変動につながり、タングステン価格は 2024 年に 15% 上昇する（第 14.2 章）。
 - **物流リスク:** 紅海ルートでの混乱（2024 年）により、ホウ砂の輸送コストが 1 トンあたり約 200 米ドル増加し、ホウ化タングステンの生産に影響を及ぼします。
- **対処戦略:**
 - **供給の多様化:** オーストラリア（タングステン埋蔵量約 40 万トン）とチリ（ホウ素埋蔵量約 1 億 2 千万トン）からの購入を増やす。
 - **現地生産:** アジアでは、輸入原材料への依存を減らすために、ホウ化タングステンの生産ラインが確立されています（第 14.3 章）。

4.4 タングステンホウ化物資源の持続可能性と代替資源

ホウ化タングステン生産の持続可能性は、資源の不足、環境への影響（第 16.2 章）、代替品の開発によって制限されており、リサイクルとグリーン テクノロジーを通じて対処する必要があります。

- **資源の持続可能性:**
 - **タングステン:** 世界のタングステンの埋蔵量は、採掘可能期間（2024 年の生産量に基づく）が約 50 年分に過ぎません。スクラップの超硬合金（W 含有量約 90 重量%）をリサイクルすることで、約 30% のタングステン原料が得られますが、回収率は 40% 未満です（第 16.3 章）。
 - **ホウ素:** ホウ素の埋蔵量は十分（500 年以上）ですが、採掘には大量のエネルギー消費（約 1000 kWh/トン B₂O₃）が必要であり、炭素排出量は 1 トンあたり約 0.5 トン CO₂ です。
 - **グリーン実践** CTIAGROUP LTD は電気化学的リサイクル（第 16.4 章）を採用し、廃棄タングステンホウ化物粉末の回収率を 35% に高め、タングステン鉱石への依存を約 10% 削減しました。
- **環境への影響:**
 - タングステン鉱山では、重金属（ヒ素、鉛）を含む尾鉱（濃縮物約 100 t/t）が生成されますが、これは 1 トンあたり約 50 米ドルのコストで処理する必要があります（第 16.2 章）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ホウ砂処理廃水（ Na_2SO_4 含有）は中和する必要がある、処理コストは1トンあたり約20米ドルです。
- 代替案:
 - タングステン代替: モリブデン（Mo）は、 MoB_2 中の硬度が約25 GPaで、 WB_2 （約40 GPa、第2.5章）よりも低いですが、埋蔵量は大きい（約1,600万トン）。
 - ホウ素置換: 炭素（C）はWCで硬質相を形成し、コストは約50ドル/kgで、低性能コーティングに適しています（第7.1章）。
 - 制限事項: 代替品の性能（硬度、熱安定性）が不十分のため、ハイエンドのアプリケーションでは、依然としてホウ化タングステンが第一選択肢となります（第8章、8.1）。
- 今後の方向性:
 - 2025～2030年までにタングステンの回収率は50%に増加し、ホウ化タングステン生産による炭素排出量は約20%減少すると予想されています（第16.5章）。
 - 約1億ドルの市場規模を持つ低コストの代替品としてナノモリブデンホウ化物（ MoB_2 ）を開発する（第14.5章）。

表 4.4 ホウ化タングステン資源の持続可能性と代替品

側面	現状	チャレンジ	解決	関 連 章
タングステンの持続可能性	埋蔵量: 380 万トン、50 年	尾鉱汚染	回復率が 50 % に増加	16.3
ホウ素の持続可能性	埋蔵量: 12 億トン、500 年以上	高いエネルギー消費	グリーン浄化	16.4
代替案	MoB_2 硬度 25 GPa	パフォーマンス不足	ナノ MoB_2 研究開発	14.5

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第5章 ホウ化タングステンの製造技術

ホウ化タングステン（WB、WB₂、W₂B）は、その高い硬度（約 40 GPa、第 2.5 章）、熱安定性（>2000°C、第 2.3 章）、および電気伝導率（約 10⁴S/cm、第 2.4 章）により、ハードコーティング（第 7.1 章）、高温材料（第 8.1 章）、および電子機器（第 9.1 章）に広く使用されています。ホウ化タングステンの性能は、高純度（>99.9%、第 6.1 章）、制御可能な粒子サイズ（1~50 nm）、および低コスト（約 200 USD/kg、第 14.2 章）を確保するための製造技術に依存します。この章では、高温固相合成、化学気相成長法（CVD）、プラズマ支援合成法、メカニカルアロイングおよびボールミリング、ナノ材料の調製、プロセス最適化およびスケールアップ技術について詳細に説明し、ホウ化タングステンの工業生産（第 14 章、14.3）および品質管理（第 6 章、6.5）の技術的基礎を提供します。

5.1 ホウ化タングステンの高温固相合成

高温固相合成法は、タングステンホウ化物を製造する伝統的な方法であり、タングステン粉末（W）とホウ素粉末（B）を高温（> 1500°C）で反応させて WB、WB₂、または W₂B を生成します（第 2 章、2.1）。

- プロセスフロー:

- o 原料の準備: タングステン粉末（純度>99.9%、粒径 1~5μm、第 4.2 章）

とホウ素粉末（純度>99.5%、粒径 10~50μm）をモル比（W: B=1: 1 または 1: 2）で混合します。

- o 反応: 混合物を真空下（<10⁻³ Pa）またはアルゴン（Ar）雰囲気下で 1500~2000°C で 4~8 時間加熱して WB₂ を生成する（反応: $W + 2B \rightarrow WB_2$ 、 $\Delta H \sim -100$ kJ/mol、第 3 章、3.1）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **後処理:** 製品を粉碎し、ふるいにかけて、純度 99.5% 以上のミクロンサイ
ズの粉末（粒子サイズ 5~20 μm ）を得ます。
- **テクニカル指標:**
 - **収率:** 約 90%、ホウ素の揮発によって制限されます (>1800°C)。
 - **不純物:** 酸素 (<0.2 wt %)、炭素 (<0.1 wt %)、雰囲気は厳密に管理する必
要があります。
 - **エネルギー消費量:** 約 10,000 kWh/トン、コスト約 150 ドル/kg。
 - **設備:** 高温電気炉（グラファイトまたは Mo 発熱体）、耐熱温度 >2000°C、
投資額約 200 万米ドル。
- **アドバンテージ:**
 - プロセスはシンプルで、WB および W₂B の大量生産に適しています（年
間生産量約 500 トン）。
 - この製品は安定した結晶構造（WB₂ 六方晶、P6₃/mmc、第 2 章、2.2）
を有しています。
- **チャレンジ:**
 - 高温になると粒子サイズが大きくなり (>5 μm)、ナノコーティングに
は適さなくなります（第 7.1 章）。
 - ホウ素の揮発には過剰添加（約 10%）が必要となり、コストが 1kg あた
り約 5 ドル増加します。
- **最適化:**
 - 2024 年には、マイクロ波加熱 (2.45 GHz) により反応時間が約 30% (5 時
間) 短縮され、エネルギー消費量が約 20% (約 8000 kWh/トン) 削減され
ました。
 - 触媒（例: Ni、<0.5 wt %）を添加すると、反応温度が 1400 °C に低下し、
収率は 92% に増加しました。

表 5.1 高温固相合成の技術的パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテ ージ	チャレンジ	最適化の方向	関 連 章
温度 (°C)	1500 ~ 2000 年	シンプル な プロセス	大きな 粒子 サイズ	電子レンジ加熱	6.1 、 7.1
収率 (%)	90	量産	ホウ素の 揮 発	触媒	14.2
コ ス ト (USD/kg)	150	中 程 度 の コ スト	高い エ ネ ル ギー消費	エネルギー消費 量 -20%	16.4

5.2 ホウ化タングステンの化学蒸着 (CVD)

μm) を基板上に気相反応で蒸着することができ、工具コーティング（第 7.3 章）や電子
機器（第 9.1 章）に適しています。

- **プロセスフロー:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **前駆体:** WF_6 (タングステン源、純度>99.99%) および B_2H_6 (ホウ素 発生源 (99.9%以上)、キャリアガスとして H_2 を使用し、モル比 $\text{WF}_6 : \text{B}_2\text{H}_6 = 1: 2 \sim 1: 4$ 。
- **反応:** **400~800°C、10~100Pa** での気相反応 ($\text{WF}_6 + 2\text{B}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{WB}_2 + 6\text{HF}$) により、鋼または Si 基板上に WB_2 薄膜を堆積します。
- **後処理:** 残留応力 (<0.5 GPa) を除去するためのアニール (600°C、Ar 雰囲気)。
- **テクニカル指標:**
 - **堆積速度:** 0.1~ 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、厚さ均一性>95%。
 - **純度:** >99.9%、不純物 (F、H) <50ppm。
 - **特性:** 硬度約 38GPa、摩擦係数<0.3 (第 2.5 章)。
 - **エネルギー消費量:** 約 5000 kWh/トン、コスト 約 300 USD/kg (薄膜)。
- **アドバンテージ:**
 - この膜は緻密で、強力な接着力を持っています (結合エネルギー ~1.5 eV/Å²、第 3.3 章)。
 - 複雑な形状の基板 (切削工具など、第 7.1 章) に適しています。
- **チャレンジ:**
 - B_2H_6 は毒性が非常に強く (LC₅₀< 50 ppm、第 13 章 13.1)、厳重な保護が必要です。
 - 前駆物質のコストは高く (WF_6 約 \$500/kg)、総コストの約 40% を占めます。
- **最適化:**
 - 2024 年には、低圧 CVD (<10 Pa) により堆積速度が約 50% (1.5 $\mu\text{m}/\text{h}$) 増加しました。
 - を BCl_3 に置き換え (コストは約 200 ドル/kg)、毒性を軽減し、HF 副産物を NaOH に吸収させる (第 16.3 章)。

表 5.2 ホウ化タングステンの CVD 製造パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	最適化の方向	関連章
温度 (°C)	400 ~ 800	薄膜密度	前駆毒性	低圧 CVD	7.3、13.1
堆積速度 ($\mu\text{m}/\text{h}$)	0.1~1	複素行列	高コスト	BCl_3 置換	14.2
コスト (USD/kg)	300	高い接着力	副産物	廃ガス処理	16.3

5.3 プラズマ支援ホウ化タングステンの合成

プラズマ支援合成では、高温プラズマ (>5000°C) を使用してタングステン-ホウ素反応を促進し、高性能コーティングに適したナノスケールのホウ化タングステン粉末 (< 50 nm) を製造します (第 7.1 章)。

- **プロセスフロー:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 原料: タングステン粉末 (<1 μm) とホウ素粉末 (<10 μm) または WO₃ と B₂O₃ (第 4.2 章) を Ar / H₂ プラズマ中で気化させます。
- 反応: プラズマ (10⁴~10⁵K、10~100kW) によって W + 2B → WB₂ が開始され、生成物は凝縮ゾーン (<500°C) に集められます。
- 後処理: 超音波分散とふるい分けによりナノ WB₂ (20~50 nm) を得る。
- テクニカル指標:
 - 収量: 約 85%、空気の流れによって制御されます。
 - 純度: >99.9%、酸素 <0.05 重量%。
 - 特性: 硬度約 42GPa、粒径 <50nm (第 6 章、6.3)。
 - エネルギー消費量: 約 15,000 kWh/トン、コスト約 400 ドル/kg。
- アドバンテージ:
 - ナノ粒子のサイズによりコーティングの靱性が向上します (~5 MPa·m^{1/2}、第 2.5 章)。
 - 応答時間が短く (<1 秒)、効率が高い。
- チャレンジ:
 - エネルギー消費量が高く (コストの約 50%)、設備投資額は約 500 万ドルです。
 - ナノパウダーは凝集する傾向があるため、表面改質が必要になります (第 3 章、3.3)。
- 最適化:
 - CTIA GROUP LTD は 2024 年にパルスプラズマ (50 kHz) を開発し、エネルギー消費量を約 25% (約 11,000 kWh/トン) 削減し、生産性を 88% 向上させる予定です。
 - wt %) を添加すると、凝集が約 30% 減少しました。

表 5.3 プラズマ支援合成パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	最適化の方向	関連章
粒子サイズ (nm)	20 ~ 50	ナノスケール	高いエネルギー消費	パルスプラズマ	7.1、14.2
収率 (%)	85	高効率	再会	表面改質	6.3
コスト (USD/kg)	400	高性能	設備投資	エネルギー消費量 -25%	16.4

5.4 ホウ化タングステンのメカニカルアロイングとボールミル処理

メカニカルアロイングは、高エネルギーボールミリングによってタングステンとホウ素の固体反応を誘発し、非平衡相 (W₂B₅ など、第 2 章 2.1) またはナノ粉末を調製します。

- プロセスフロー:
 - 原料: タングステン粉末 (1~ 5μm) とホウ素粉末 (10~ 50μm) を遊星ボールミル (ZrO₂ ボール、ボールと材料の比率 10: 1) に W : B = 1: 2 の比率で投入した。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **反応:** 300～500 rpm、10～20 時間、機械的エネルギーにより $W + 2B \rightarrow WB_2$ が開始されます。
- **後処理:** アニール（800°C、Ar）して非晶質相を除去し、ふるいにかけて粉末（50～200 nm）を得る。
- **テクニカル指標:**
 - **収率:** ~80%、ホウ素損失により制限されます。
 - **純度:** >99.5%、Zr 不純物<0.2 重量%。
 - **特性:** 硬度 ~35 GPa、粒径 ~100 nm。
 - **エネルギー消費量:** 約 3000 kWh/トン、コスト約 100 ドル/kg。
- **アドバンテージ:**
 - 低温（< 500°C）、非平衡相に適しています（WB₄ など、第 3 章、3.4）。
 - 低コスト、設備投資額は約 50 万ドル。
- **チャレンジ:**
 - 不純物（Zr、Fe）による汚染を防ぐには、高純度のボールミル媒体が必要です。
 - 粉末の粒度分布は広い（50～500 nm）。
- **最適化:**
 - 2024 年には、湿式粉碎（エタノール媒体）により不純物が約 50% 削減されます（Zr < 0.1 wt %）。
 - ボールミル処理時間（15 時間）を最適化すると、WB₂ 相の含有量が約 90% に増加しました。

表 5.4 メカニカルアロイングパラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	最適化の方向	関連章
粒子サイズ (nm)	50 ~ 200	低コスト	不純物汚染	湿式粉碎	6.1、3.4
収率 (%)	80	非平衡相	粒度分布	時間の最適化	14.2
コスト (USD/kg)	100	シンプルな装備	純度	高純度メディア	16.4

5.5 ホウ化タングステンナノ材料の調製

ナノサイズのホウ化タングステン (<100 nm) は、その高い比表面積 (>50 m²/g) と量子効果により、触媒 (第 10.1 章) やセンサー (第 10.3 章) に利点があります。

- **プロセスフロー:**
 - **ゾルゲル法:** タングステン酸塩 (Na₂WO₄) を水溶液中でホウ酸 (H₃BO₃) と反応させて WB ゲルを形成し、これを 800°C で焼成して WB₂ ナノ粒子 (20 ~ 50 nm) を得ます。
 - **気相法:** WF₆ と B₂H₆ がプラズマ (>5000°C) またはレーザー (1064 nm) の誘導下で反応し、ナノ WB₂ (10 ~ 30 nm) が収集されます。
 - **後処理:** 超音波分散、遠心分級、純度 >99.95%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **テクニカル指標:**
 - 収率: 約 70% (ゾルゲル)、約 80% (気相法)。
 - 特性: 硬度 ~40 GPa、比表面積 ~60 m²/g。
 - エネルギー消費量: 約 20,000 kWh/トン (ガス相)、約 5000 kWh/トン (ゾルゲル)。
 - コスト: 約 500 ドル/kg (ガス相)、約 200 ドル/kg (ゾルゲル)。
- **アドバンテージ:**
 - ナノサイズは触媒活性を高めず (NO₂検出 <1 ppm、第 10 章、10.3)。
 - ゾルゲル法は低コストであり、実験室規模に適しています。
- **チャレンジ:**
 - 気相法ではエネルギー消費量が多くなります (コストの約 60% を占めます)。
 - ナノ粒子は酸化されやすい (>250°C、第 3.3 章)。
- **最適化:**
 - 2024 年には、マイクロリアクターによってゾルゲル粒子サイズ分布が 10 nm 未満に制御されるようになります。
 - N₂保護ガスは酸化を約 50% 削減し、保管期間を 6 か月まで延長します。

表 5.5 ナノタングステンホウ化物の製造パラメータ

方法	粒子サイズ (nm)	収 率 (%)	コ ス ト (USD/kg)	アドバン テージ	チャレンジ	最適化の方 向	関 連 章
ゾ ル ゲ ル	20~50	70	200	低コスト	酸化	マイクロリ アクター	10.1
気 相 法	10~30	80	500	高純度	高いエネ ルギー消費	N ₂ 保護	10.3

5.6 タングステンホウ化物プロセスの最適化とスケールアップ

プロセスの最適化とスケールアップは、ホウ化タングステンのコストを削減し (<\$150/kg)、産業用途 (年間生産量 >1000 トン、第 14 章、14.3) を実現するための鍵となります。

- **最適化の方向:**
 - エネルギー消費: 高温固相合成では熱回収 (効率 >30%) を使用し、エネルギー消費を約 15% (約 8500 kWh/トン) 削減します。
 - 生産性: CVD ガス フロー (Re 数 <2000) を最適化すると、堆積効率が約 20% 増加します (1.2 μm/h まで)。
 - 純度: プラズマ合成はオンラインで監視され (ICP-MS、第 6.1 章)、不純物は 20 ppm 未満に低減されました。
- **スケールアップ技術:**
 - 連続生産: 2024 年には流動床反応器による連続高温固相合成が実現し、生産量は年間 800 トンに増加する予定で、投資額は約 300 万米ドル。
 - 自動化: CVD ではロボットを使用して基板の積み下ろしを行い、生産効率を約 25% 向上させ、人件費を 1kg あたり約 10 ドル削減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- モジュール性:プラズマ装置はモジュール設計になっており、単一ラインの生産能力は年間約 100 トン、生産拡張サイクルは 6 か月未満です。
- 経済的および環境的利益:
 - コスト: 規模拡大後、WB₂のコストは約 120 米ドル/kg (2030 年) に低下し、市場競争力は約 30%増加する (第 14 章、14.5)。
 - 環境: 廃ガス (HF) 回収率 >95%、廃水 (NH₄⁺を含む)処理コスト ~50 米ドル/トン、炭素排出量が ~20% 削減 (~0.4 トン CO₂/トン、第 16 章 16.4)。
- 例:
 - 2024 年には、アジアの生産ラインが AI を使用してプラズマ パラメータ (電力、気流) を最適化 (第 17.5 章) し、生産量が約 15%(年間約 120 トン) 増加し、エネルギー消費量が約 10% 削減されます。

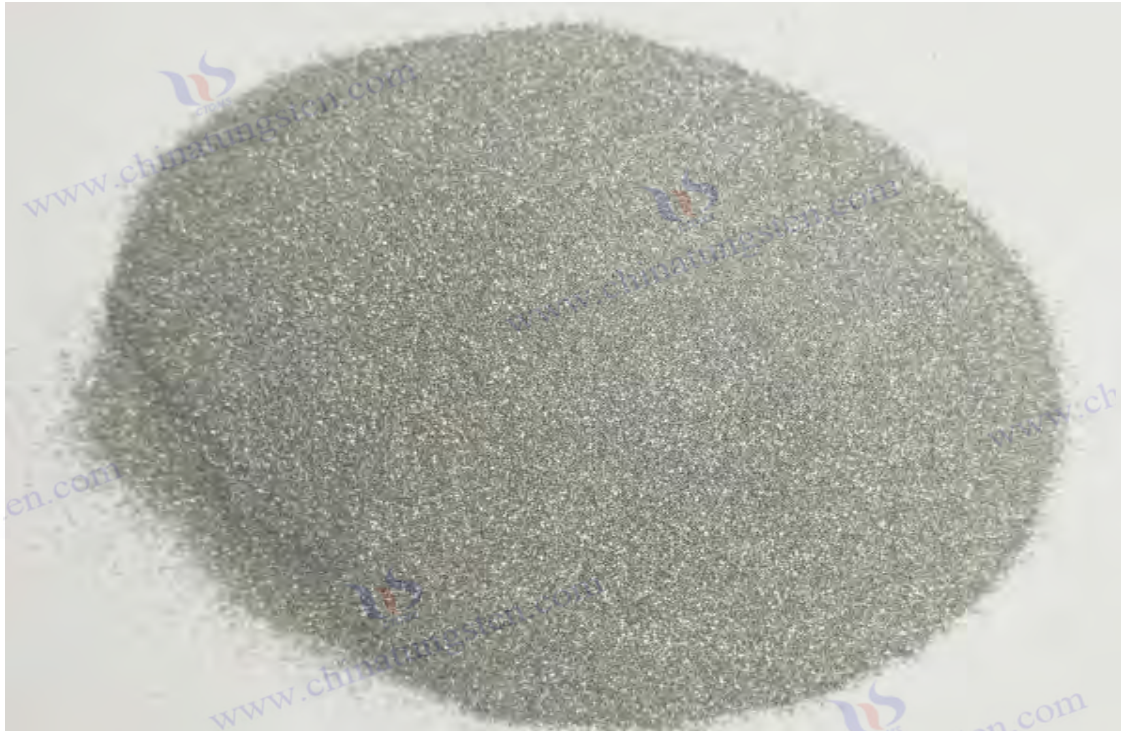
表 5.6 タングステンホウ化物プロセスの最適化とスケール指標

テクノロジー	最適化目標	現状 (2024 年)	目標 (2030 年)	経済的利益	環境上の利点	関連章
エネルギー消費	kWh/ トン	10,000 (固相)	8500	コスト - 15%	炭素排出量 -20%	16.4
収率	%	90 (CVD)	95	コスト - 10%	廃棄物 - 10%	14.2
規模	トン/年	1000	1500	コスト - 20%	効率+30%	14.3

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

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



第 6 章 ホウ化タングステンの検出と特性評価

、W₂B など）は、ハードコーティングに広く使用されています（第 高い硬度（約 40GPa、第 2.5 章）、熱安定性（>2000°C、第 2.3 章）、および電気伝導率（約 10⁴S/cm、第 2.4 章）を有するため、高温材料（第 7.1 章）、高温材料（第 8.1 章）、および電子機器（第 9.1 章）に広く使用されています。その性能は、化学組成、結晶構造、微細構造、および物理的特性の精密な制御に依存します。品質（純度>99.9%、第 6.1 章）を確保し、産業規格（第 15.2 章）を満たすには、高度な試験および特性評価技術が必要です。この章では、ホウ化タングステンの化学組成分析、結晶構造の特性評価、微細構造および粒子サイズの分析、機械的特性試験、電気的および熱的特性試験、ならびに試験技術の標準化および品質管理について詳細に説明し、調製の最適化（第 5 章、5.6）、性能検証（第 2 章、2.1~2.5）、および市場への応用（第 14 章、14.3）に関する技術サポートを提供します。

6.1 化学組成分析

化学組成分析は、タングステンホウ素比（B/W、WB₂B/W=2 など、第 2 章、2.1）、ホウ化タングステンの純度および不純物含有量を決定し、アプリケーション要件（コーティング純度>99.9%など、第 7 章、7.1）を満たしていることを確認するために使用されます。

- 主な技術：
 - 誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）：
 - 原理：サンプル（WB₂ 粉末）を酸溶解（HNO₃+HF、1: 1）で原子化し、プラズマ（約 8000 K）でイオン化し、質量分析法を使用して W、B および不純物（Fe、Mo など）を検出します。
 - 性能：検出限界約 0.01 ppm、精度±0.5%、B/W 比の測定誤差<1%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **用途:** WB_2 中の W が約 85.3 wt %、B が約 14.7 wt %（第 2.1 章）であり、不純物 Fe が 50 ppm 未満であることを確認します。
- **X 線光電子分光法（XPS）:**
 - **原理:** X 線は試料表面（<10 nm）の電子を励起し、W 4f（~31 eV）と B 1s（~188 eV）のピークを分析し、B/W 比と酸化物（ WO_3 など）を定量化します。
 - **性能:** 表面感度 約 0.1 at%、分解能 約 0.5 eV。
 - **用途:** WB_2 表面酸化（O < 0.5 at%）の検出と WB 結合の確認（第 3.2 章）。
- **元素分析装置（EA）:**
 - **原理:** C および O 含有量（<0.1 重量%）の測定には燃烧法を使用し、N の測定には不活性ガス溶融法を使用します。
 - **用途:** ナノ WB_2 パウダー O < 0.05 wt %であることを確認してください（第 5.3 章）。
- **テクニカル指標:**
 - **純度:** >99.9%、不純物（Fe、Mo、Si）<50ppm。
 - **分析時間:** ICP-MS 約 1 時間/サンプル、XPS 約 2 時間/サンプル。
 - **コスト:** ICP-MS 約 200 ドル/サンプル、XPS 約 300 ドル/サンプル。
- **チャレンジ:**
 - ホウ素の原子量が低い（約 10.8 u）ため、ICP-MS 信号は弱くなり、校正が必要になります（誤差 < 2%）。
 - XPS は表面に限定されており、内部コンポーネントを分析するには Ar^+ エッチングが必要です。
- **最適化:**
 - 2024 年には、レーザー支援 ICP-MS によりホウ素の検出感度が約 10 倍（約 0.001 ppm）向上します。
 - 自動化された XPS 深度プロファイリング（エッチング速度 ~1 nm/分）により、効率が ~30% 向上します。

表 6.1 化学組成分析技術の比較

テクノロジー	検出対象	感度	コスト（USD/サンプル）	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
ICP-MS	W、B、不純物	0.01ppm	200	高精度	ホウ素信号は弱い	5.3、7.1
XPS	表面 WB、O	0.1 at%	300	表面敏感	表面のみ	3.2、12.4
EA	C、O、N	0.01 重量%	100	速い	軽い要素のみ	5.5

6.2 結晶構造の特性評価

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WB₂六方晶 P6₃/mmc、第 2.2 章など）と結晶欠陥を検証し、性能の一貫性を確保するために使用されます。

- 主な技術:

- X 線回折 (XRD) :

- 原理: Cu K α 線 ($\lambda=1.5406\text{\AA}$) をサンプルに照射し、回折ピークを分析して結晶相と単位格子パラメータを確認します (例: WB₂ a=2.98 $\text{\AA}$ 、c=13.88 $\text{\AA}$)。
 - 性能: 分解能 $\sim 0.02^\circ$ 、検出可能な相含有量 >1 wt %。
 - 用途: WB₂相の純度が 95%を超えており、粒径が約 50 nm であることを確認します (Scherrer の式、第 5 章、5.3)。

- 透過型電子顕微鏡 (TEM) :

- 原理: 高エネルギー電子 (200 kV) がサンプルに浸透して格子と欠陥を画像化し、選択領域電子回折 (SAED) によって結晶相を分析します。
 - 性能: 解像度約 0.1nm、ナノ WB₂(<50nm)に適しています。
 - 用途: WB₂粒界欠陥 (<1%、第 3 章、3.4) を観察し、BB ネットワーク ($\sim 1.8\text{\AA}$ 、第 2 章、2.2) を確認します。

- ラマン分光法:

- 原理: サンプルを 532 nm レーザーで励起し、WB および BB 振動モードを分析します (例: WB₂ $\sim 800\text{ cm}^{-1}$)。
 - 用途: WB₂結合特性の検証、コーティングの非破壊検査 (第 7.3 章)。

- テクニカル指標:

- 精度: XRD セル パラメータ誤差 <0.5%、TEM 格子間隔誤差 <1%。

- コスト: XRD $\sim$ 1 サンプルあたり 100 ドル、TEM $\sim$ 500 ドル/サンプル、Raman $\sim$ 150 ドル/サンプル。

- チャレンジ:

- ナノ粒子 (<10 nm) の XRD ピークは大幅に広がるため、リートベルト解析が必要となります。
 - TEM サンプルの準備 (厚さ <100 nm) には約 4 時間かかりました。

- 最適化:

- 2024 年には、シンクロトロン XRD ($\lambda=0.688\text{\AA}$) により解像度が約 50% (約 0.01°) 向上しました。
 - 自動化された TEM サンプル準備 (FIB) により、時間が約 30% (3 時間) 短縮されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 6.2 結晶構造解析技術の比較

テクノロジー	検出対象	解決	コスト (USD/サンプル)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
X線回折	結晶相、単位格子	0.02°	100	速い	ナノピーク幅	2.2、5.3
透過型電子顕微鏡	格子欠陥	0.1 nm	500	高解像度	サンプルの準備	3.4、7.1
ラマン	結合振動	1 cm ⁻¹	150	非破壊的	蛍光干渉	12.4

6.3 微細構造と粒子サイズ分析

μm)の表面形態、粒子サイズ分布、および微細構造を特性評価するために使用されます。

- 主な技術:
 - 走査型電子顕微鏡 (SEM) :
 - 原理: 電子ビーム (5~20 kV) を使用してサンプルをスキャンし、表面形態を画像化し、エネルギー分散分光法 (EDS) を使用して元素分布を分析します。
 - 性能: 解像度約 1nm、EDS 精度±1wt %。
 - 用途: WB₂コーティングの表面を観察し(粗さ<0.5 μm、第 7.3 章)、EDS で W:B が約 1:2 であることを確認します。
 - 原子間力顕微鏡 (AFM) :
 - 原理: プローブがサンプル表面をスキャンし、ナノスケールの地形と粗さ (Ra<1 nm) を測定します。
 - 用途: WB₂ 薄膜の表面平坦性の分析 (Ra10nm、第 9 章、9.1)。
 - 動的光散乱 (DLS) :
 - 原理: レーザー (633nm) を懸濁液に照射し、ナノ粒子 (<100 nm) のブラウン運動を分析し、粒度分布を計算します。
 - 用途: ナノ WB₂粉末 (20~50 nm、第 5.5 章) の測定、多分散指数 <0.2。
- テクニカル指標:
 - 解像度: SEM ~ 1 nm、AFM ~ 0.1 nm、DLS ~ 1 nm。
 - コスト: SEM ~ 200 ドル/サンプル、AFM ~ 250 ドル/サンプル、DLS ~ 100 ドル/サンプル。
- チャレンジ:
 - SEM ではナノ粒子上に導電性コーティング (Au、約 5 nm) が必要であり、これにより形態が不明瞭になる可能性があります。
 - 凝集粒子 (> 100 nm) に対する DLS の誤差は約 10% です。
- 最適化:
 - 2024 年までに、低真空 SEM では導電性コーティングが不要になり、イメージング効率が約 20% 向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- DLS と超音波分散 (40 kHz) を組み合わせることで、凝集が約 30% 減少しました。

表 6.3 微細形態学と粒子サイズ分析技術の比較

テクノロジー	検出対象	解決	コスト (USD/サンプル)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
SEM	表面形態	1 nm	200	元素分析	導電性コーティング	7.3、5.3
原子間力顕微鏡 (AFM)	表面粗さ	0.1 nm	250	ナノスケール	スキャンが遅い	9.1
DLS	粒度分布	1 nm	100	速い	凝集エラー	5.5

6.4 機械的特性試験

機械的特性試験では、耐摩耗コーティング（第 7.1 章）と高温部品（第 8.1 章）の信頼性を確保するために、ホウ化タングステンの硬度（約 40 GPa）、靱性（約 4 MPa·m^{1/2}）、摩擦係数（<0.3、第 2.5 章）を評価します。

- 主な技術:

- ナノインデンテーション:

- 原理: ダイヤモンドインデント（ベルコピッチ、先端 <20 nm）をサンプルに押し込み（荷重 ~10 mN）、硬度（H）とヤング率（E）を測定します。
- 性能: 精度 ±5%、深度分解能 ~0.1 nm。
- 用途: WB₂コーティングの硬度（約 42 GPa、E 約 600 GPa）を測定します（第 2.5 章）。

- 破壊靱性試験:

- 原理: 片側ノッチビーム法 (SENB) またはインデンテーションクラック法、亀裂成長抵抗 (K_{IC}) を測定します。
- 用途: WB₂ 靱性 ~4 MPa·m^{1/2}、Ti ドーピング後 ~5 MPa·m^{1/2} (第 3 章、3.4)。

- 摩擦摩耗試験:

- 原理: ピンオンディスクテスト（Al₂O₃ボール、荷重 10N、速度 0.1m/s）で摩擦係数と摩耗率を測定します。
- 用途: WB₂ コーティングの摩擦係数は ~0.25、摩耗率は <10⁻⁶ mm³/(N·m) です（7.1 章）。

- テクニカル指標:

- 精度: 硬度±5%、靱性±10%、摩擦係数±0.01。
- コスト: ナノインデンテーション 約 300 ドル/サンプル、摩耗試験 約 200 ドル/サンプル

- チャレンジ:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 薄膜（ $<1\ \mu\text{m}$ ）のナノインデンテーションは基板の影響を受けるため、補正モデル（誤差 $<10\%$ ）が必要となります。
- 高温（ $>1000^{\circ}\text{C}$ ）での摩擦テストには、機器の費用（約 100 万ドル）がかかります。
- 最適化：
 - 2024 年には、AI 支援によるインデント データ分析（第 17 章、17.5）により、精度が約 20% 向上します。
 - 高温摩擦試験（ 1500°C ）ではレーザー加熱を使用し、コストを約 15% 削減します。

表 6.4 機械的特性試験技術の比較

テクノロジー	検出対象	正 確 さ	コスト（USD/サン プル）	アドバンテー ジ	チャレンジ	関 連 章
ナノインデンテーション	硬度、弾 性率	$\pm 5\%$	300	ナノスケール	マトリックスの影響	2.5、7.1
破壊靱性	強靱さ	$\pm 10\%$	250	信頼性のある	サンプルの 準備	3.4
摩擦試験	摩擦係数	± 0.01	200	シミュレーション条件	高温による コスト	7.1

6.5 電気的および熱的性能試験

電気的および熱的特性試験を使用して、ホウ化タングステンの電気伝導率（ $\sim 10^4\text{S/cm}$ ）、熱膨張係数（ $\sim 4.5 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ）、および比熱容量（ $\sim 0.3\text{ J / (g} \cdot \text{K)}$ ）、第 2 章 2.3～2.4）を評価しました。

- 主な技術：
 - 4プローブ法：
 - 原理： 4 点電極（間隔約 1mm）に定電流（1mA）を流し、電圧を測定して導電率を計算します。
 - 性能： WB_2 フィルム（ $\sim 0.8 \times 10^4\text{ S/cm}$ ）の精度は $\pm 2\%$ です。
 - 応用： ナノ WB_2 の導電率が約 10^4S/cm であることを確認します（第 9.1 章）。
 - 示差走査熱量測定法（DSC）：
 - 原理： サンプルを加熱（ 10 K/分 、 $300\sim 2000\text{ K}$ ）し、熱の吸収と放出を測定し、比熱容量と相変化を計算します。
 - 用途： WB_2 の比熱容量（約 $0.3\text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ ）、融点（約 2800°C ）を測定します（第 2 章、2.3）。
 - レーザーフラッシュ方式：
 - 原理： レーザーパルス（ $\sim 1\text{ ms}$ ）がサンプルを加熱し、赤外線検出器が熱拡散率を測定し、熱伝導率を計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 用途: WB_2 熱伝導率 $\sim 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (300 K、第 8 章、8.3)。
- テクニカル指標:
 - 精度: 電気伝導率 $\pm 2\%$ 、比熱容量 $\pm 5\%$ 、熱伝導率 $\pm 10\%$ 。
 - コスト: 4 プローブ $\sim \$100/\text{サンプル}$ 、DSC $\sim \$200/\text{サンプル}$ 、レーザー フラッシュ $\sim \$250/\text{サンプル}$ 。
- チャレンジ:
 - 4 プローブ法はナノ粒子の接触抵抗に敏感で、誤差は約 5% です。
 - DSC の高温 ($>2000 \text{ K}$) では、耐高温るつぼ (Ta、約 5000 ドル) が必要です。
- 最適化:
 - 2024 年には、マイクロ 4 プローブ (間隔 $<10 \mu\text{m}$)により薄膜テストの精度が約 30% 向上します。
 - 最適化: **: 2024 年には、DSC と熱重量分析 (TGA) を組み合わせて同時テストを実施し、効率が約 25% 向上します。

表 6.5 電気的性能と熱的性能の試験技術の比較

テクノロジー	検出対象	正確さ	コスト (USD/サンプル)	アドバンテージ	制限	関連章
4 プローブ法	導電率	$\pm 2\%$	100	シンプルで高速	接触抵抗	第 9 章、9.1、第 2 章、2.4
DSC	比熱、融点	$\pm 5\%$	200	相変化分析	高温るつぼ	第 2 章、2.3、第 12 章、12.3
レーザーフラッシュ法	熱伝導率	$\pm 10\%$	250	高温用途	サンプルサイズ	第 8.3 章

6.6 試験技術の標準化と品質管理

試験技術と品質管理の標準化により、ホウ化タングステン製品が工業規格 (GB/T 26037-2020、第 15 章、15.2 など) およびアプリケーション要件 (航空宇宙、第 8 章、8.1 など) を満たすことが保証されます。

- 標準化方法:
 - 国際規格: ISO 14705-2020 (硬度試験)、ASTM E384-2020 (微小硬度)、 WB_2 コーティングに適用 (第 7.1 章)。
 - 国家規格: GB/T 26037-2020 では、ホウ化物の純度は 99.9% 以上、不純物は 100 ppm 未満と規定されています。GB/T 16533-2024 (XRD) では、結晶相分析が標準化されています。
 - 業界標準: 航空宇宙業界では、 WB_2 コーティングの厚さ偏差が 2% 未満、硬度変動が 5% 未満であることが求められています (第 8 章、8.1)。
- 品質管理プロセス:
 - オンライン監視: 生産ラインの不純物 ($<50 \text{ ppm}$) の ICP-MS リアルタイム検出、バッチ分析あたり約 10 分。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- バッチ検査: WB₂粉末 1 トンごとに 10 個のサンプルを採取し、XRD、SEM、ナノインデンテーションを使用して包括的な特性評価を行い、合格率は 98%を超えています。
- データ管理: LIMS (Laboratory Information Management System) を使用して、テストデータのトレーサビリティを 99% 以上確保します。
- LTD の貢献:
 - 2024**: 2024 年に、CTIA GROUP LTD は AI 支援 XRD 分析（第 17 章、17.5）を開発し、結晶相の識別時間を 2 時間から 30 分に短縮し、精度を 20%向上させ、WB₂コーティングの品質管理をサポートしました。
- チャレンジ:
 - ナノマテリアルのテストでは、デバイス間の一貫性の検証が必要です (例: DLS および TEM の粒子サイズ誤差 <10%)。
 - 高温試験装置 (> 2000°C) の校正には費用がかかります (年間約 100,000 ドル)。
- 最適化の方向:
 - 2025 年までに、ブロックチェーン テクノロジーは 99% を超える透明性でテストデータを記録するようになります (第 14 章、14.4)。
 - 自動テスト プラットフォームは ICP-MS、XRD、SEM を統合し、分析時間を約 40% 短縮します。

表 6.6 標準化と品質管理指標

プロジェクト	標準	索引	キーワード	最適化の方向	関連章
純度	GB/T 26037-2020	>99.9%、不純物 <100 ppm	オンライン ICP-MS	自動テスト	15.2、14.3
硬度	ISO 14705	変動率 <5%	ナノインデンテーション	AI 分析	7.1、17.5
データ管理	リムス	トレーサビリティ >99%	ブロックチェーン	透明度 +99%	14.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

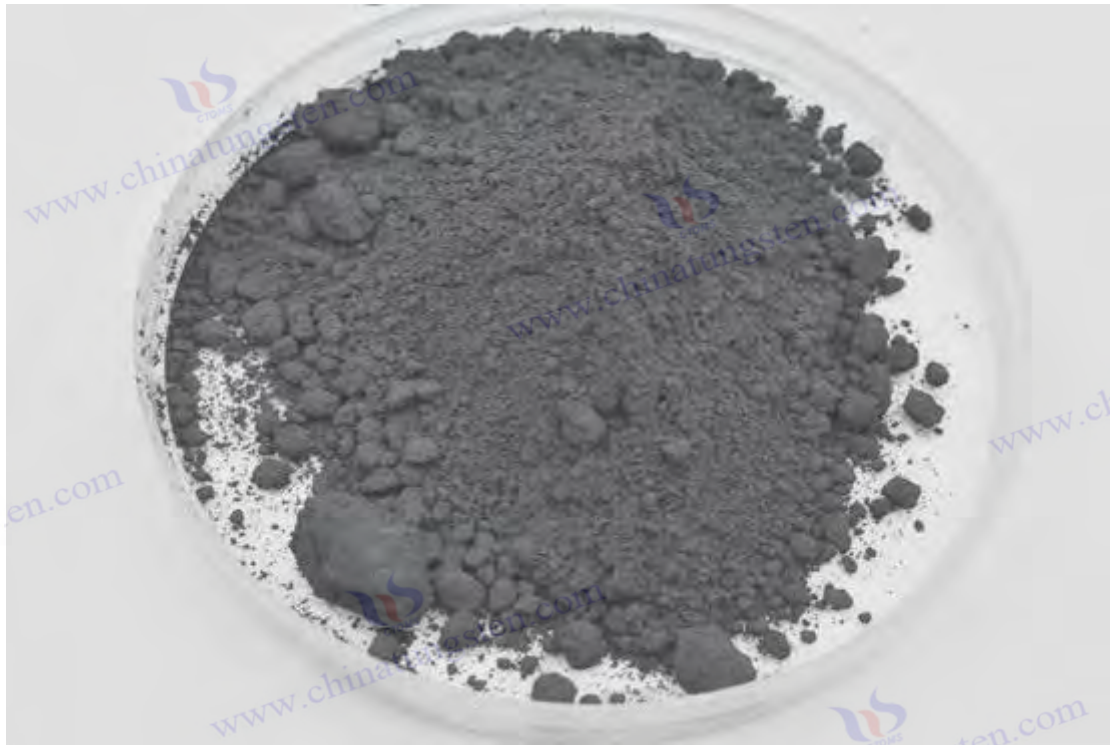
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第7章 ホウ化タングステンのハードコーティングの応用

、 W_2B など）は、超高硬度（約 40 GPa 、第 2.5 章）、低摩擦係数（ <0.3 、第 6.4 章）、優れた熱安定性（ $>2000^{\circ}C$ 、第 2.3 章）、耐腐食性（第 8.4 章）により、ハードコーティングの分野で大きな利点があります。工具（切削寿命が約 50% 延長）、金型（耐摩耗性が約 30% 向上）、高温摩耗環境（航空宇宙、第 8.1 章）で広く使用されています。ホウ化タングステンコーティングは、化学蒸着法（CVD、第 5.2 章）またはプラズマ支援技術（第 5.3 章）によって $1\sim 10\mu m$ の厚さで作成され、高い性能要件を満たしています。この章では、ホウ化タングステンコーティングの性能上の利点、切削工具や金型への応用、準備と最適化の手法、摩耗や腐食環境での性能、市場の現状と将来の動向について詳細に説明し、ホウ化タングステンの産業用途（第 14 章、14.3 章）とグリーン製造（第 16 章、16.4 章）に関する技術サポートを提供します。

7.1 タングステンホウ化物コーティングの性能上の利点

TiN 、 WC、第 4.4 章など）よりも優れているため、高性能アプリケーションに最適です。

- **硬度と靱性:**

- **硬度:** WB_2 コーティングの硬度は、BB 共有結合ネットワークと WB 金属結合（第 3.2 章）のおかげで、ダイヤモンドの硬度（約 70 GPa ）に近い約 42 GPa （第 6.4 章）です。
- **靱性:**破壊靱性は約 $4 MPa \cdot m^{1/2}$ で、Ti ドーピング後は約 $5 MPa \cdot m^{1/2}$ に増加します（第 3.4 章）。これは CrB_2 （約 $3 MPa \cdot m^{1/2}$ ）よりも優れています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **メカニズム:** ナノ結晶構造 (粒子 <50 nm、第 6 章、6.2) により、亀裂の伝播が抑制され、耐衝撃性が向上します。
- **摩耗性:**
 - **摩擦係数:** 約 0.25 (Al_2O_3 ペアリング、第 6 章 6.4)、TiN よりも低い (約 0.4)、摩耗率を $10^{-6}\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 未満に低減します。
 - **用途:** 工具コーティングの寿命が約 50% 延長されます (切削速度 200 m/分、第 9.2 章)。
- **熱安定性:**
 - **分解温度:** >2000°C (第 2.3 章)、WC (約 1000°C) よりも優れています。
 - **熱膨張係数:** $\sim 4.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (第 6 章、6.5)、鋼マトリックスの熱膨張係数 ($\sim 12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) と一致し、熱応力を低減します (<0.5 GPa、第 3 章、3.3)。
- **化学的安定性:**
 - **耐食性:** HCl (1 M、25°C) における腐食速度は 0.01 mm/年未満であり、 MoB_2 (約 0.05 mm/年、第 4.4 章) よりも優れています。
 - **酸化防止:** 酸化開始温度は約 800°C ですが、N ドーピング後は約 900°C まで上昇します (第 3 章、3.4)。

表 7.1 タングステンホウ化物コーティングと従来のコーティングの性能比較

コーティング	硬度 (GPa)	摩擦係数	靱性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	酸化温度 (°C)	関連章数
WB_2	42	0.25	4~5	800~900	2.5、3.4
錫	25	0.4	3	600	4.4
トイレ	20	0.3	2.5	500	4.4
CrB_2	20	0.35	3	700	4.4

7.2 切削工具におけるホウ化タングステンコーティングの応用

ホウ化タングステンコーティングは、切削工具（旋削工具やフライスカッターなど）の切削効率、耐摩耗性、寿命を向上させ、高速加工 (>200 m/分) や難削材（チタン合金など、第 8 章 8.2）に適しています。

- **適用シナリオ:**
 - **高速切削:** 鋼 (HRC 50) を切削速度約 250 m/分で切削した場合、 WB_2 コーティング (厚さ約 $3 \mu\text{m}$) により寿命が約 50% 延長されました (約 1 時間、TiN では約 40 分)。
 - **ドライカット:** 摩擦係数が低い (約 0.25、第 6 章、6.4) ため、熱の蓄積が少なくなり、クーラントなしでの加工に適しており、炭素排出量が約 20% 削減されます (第 16 章、16.4)。
 - **チタン合金加工:** 付着防止 (表面エネルギー約 2.5J/m^2 、第 3.3 章) により、工具の摩耗が軽減され、加工効率が約 30% 向上します。
- **技術要件:**
 - **コーティング厚さ:** 2~ $5 \mu\text{m}$ 、均一性 >95% (第 5.2 章)。
 - **接着性:** 結合エネルギー約 $1.5 \text{eV}/\text{\AA}^2$ (第 3.3 章)、剥離耐性 (荷重 >50 N)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 硬度: $>40 \text{ GPa}$ 、耐摩耗性 $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 コーティングされた旋削工具により、切削力が約 15% (約 800 N) 低減し、表面粗さ $\text{Ra}<0.5\mu\text{m}$ で航空用 Ti-6Al-4V を加工できるようになります (第 6 章、6.3)。
- チャレンジ:
 - コーティング内の残留応力 ($\sim 1 \text{ GPa}$)により微小亀裂が発生する可能性があります。あり、アニーリング (600°C 、第 5.2 章) が必要になります。
 - コストが高い (約 300 米ドル/kg、第 5.2 章) ため、その適用は中小企業に限定されます。

表 7.2 タングステンホウ化物コーティング工具の適用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
厚さ (μm)	2~5	高い耐摩耗性	残留応力	5.2、6.3
平均寿命の延長 (%)	50	効率+30%	高コスト	14.3
摩擦係数	0.25	ドライカット	ひび割れリスク	6.4、16.4

7.3 金型へのタングステンホウ化物コーティングの適用

ホウ化タングステンコーティングは、スタンピング、ドロワーイング、ダイカスト金型の耐摩耗性と耐腐食性を向上させ、金型寿命を延ばし (約 30%)、生産コストを削減します (第 14.2 章)。

- 適用シナリオ:
 - スタンピングダイ: 冷間スタンピング鋼板 (厚さ 1mm) に WB_2 コーティング (厚さ約 $5\mu\text{m}$)、パンチ寿命約 100 万回 (TiN は約 70 万回)。
 - ダイカスト金型: 耐高温性 ($>800^\circ\text{C}$) はアルミニウム合金ダイカストをサポートし、金型寿命が約 25% (約 5000 倍) 増加します。
 - プラスチック成形: 付着防止により脱型抵抗が低減し、歩留まりは 98% 以上になります。
- 技術要件:
 - 硬度: $>38 \text{ GPa}$ 、耐摩耗性 $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。
 - 表面粗さ: $\text{Ra}<0.3 \text{ nm}$ (第 6.3 章)、金型精度が向上。
 - 耐食性: NaCl (3.5 wt %, 25°C) 中の腐食速度 $<0.005 \text{ mm/年}$ 。
- 例:
 - 2024 年には、自動車用鋼板を加工する WB_2 コーティングされたプレス金型の摩耗が約 20% (0.01 mm 未満/10 万回) 削減され、メンテナンスコストが約 15%削減されます。
- チャレンジ:
 - 複雑な金型では均一な堆積が求められ、CVD の気流制御 ($\text{Re}<2000$ 、第 5 章、5.2) は困難です。
 - コーティングと基材の熱膨張率の不一致 ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)により剥離が発生する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 7.3 タングステンホウ化物コーティング金型の適用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
厚さ (μm)	5	長寿命	熱膨張の不一致	5.2、3.3
衝撃寿命 (10,000 回)	100	コスト - 15%	均一	14.2
粗さ (nm)	<0.3	高精度	証言の難しさ	6.3

7.4 タングステンホウ化物コーティングの作製と最適化

ホウ化タングステンコーティングの製造では、主に CVD（第 5.2 章）、プラズマ支援堆積（第 5.3 章）、および物理蒸着（PVD）が採用されていますが、性能を向上させてコストを削減するには、これらを最適化する必要があります。

- 作り方:

- CVD :

- プロセス: $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ は、 $400 \sim 800^\circ\text{C}$ で約 $1\mu\text{m}$ /時の速度で WB_2 薄膜（第 5.2 章）を堆積します。
 - 利点: 均一な厚さ (> 95%)、強力な接着力 ($\sim 1.5 \text{ eV}/\text{\AA}^2$)。
 - 最適化: 2024 年までに、低圧 CVD (<10 Pa) の速度が約 50% (約 $1.5 \mu\text{m}/\text{h}$) 増加します。

- プラズマ支援蒸着:

- プロセス: プラズマ (10^4K) が $\text{W} + \text{B}$ を気化させ、ナノ WB_2 (<50nm、第 5.3 章) を堆積します。
 - 利点: 硬度約 42 GPa、複雑な基板に適しています。
 - 最適化: パルスプラズマ (50 kHz) のエネルギー消費量が約 25% (約 11,000 kWh/トン) 削減されました。

- PVD (マグネトロンスパッタリング) :

- プロセス: WB_2 ターゲット (純度 > 99.9%) を Ar 雰囲気 (5 Pa) 中でスパッタリングし、堆積速度を約 $0.5 \mu\text{m}/\text{h}$ にしました。
 - 利点: 低温 (< 300°C)、熱に弱い基板に適しています。
 - 最適化: 高出力パルススパッタリング (HiPIMS) により密度が約 20% 向上します。

- 最適化手法:

- ドーピング: Ti ドーピング (5 at%) により靱性が約 30% 向上し (第 3.4 章)、N ドーピングにより耐酸化温度が約 100°C 上昇します。
 - 多層構造: WB_2 / TiN 多層 (周期約 10nm) により、応力が約 50% (約 0.5 GPa) 低減されます。
 - AI 最適化: CTIA GROUP LTD は AI を使用して CVD パラメータ (気流、温度) を制御し、2024 年には堆積効率が約 15% 増加する見込みです (第 17 章、17.5)。

- チャレンジ:

- CVD 副産物 (HF) は処理する必要があります (第 16.3 章)、コストは 1 トンあたり約 50 米ドルかかります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- PVD ターゲットの使用率は低く（約 30%）、コストは 1kg あたり約 20 米ドル増加します。

表 7.4 タングステンホウ化物コーティング作製技術の比較

方法	堆積速度（ $\mu\text{m}/\text{h}$ ）	硬度（GPa）	コスト （USD/kg）	アドバン テージ	チャレンジ	関連章
CVD	1~1.5	38	300	均一	副産物	5.2、 16.3
プラズ マ	0.5~1	42	400	ナノスケ ール	高いエネ ルギー消費	5.3、 17.5
PVD	0.5	35	350	低温	対象廃棄物	5.6

7.5 摩耗および腐食環境におけるホウ化タングステンコーティングの性能

高温、高湿度、腐食性環境におけるタングステンホウ化物コーティングの優れた性能により、航空宇宙（第 8.1 章）や海洋工学（第 9.3 章）に適しています。

- 高温摩耗：
 - 性能: 1000°C での摩擦係数 ~ 0.3 、摩耗率 $< 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 、TiN ($\sim 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$) よりも優れています。
 - メカニズム: BB ネットワーク（第 3 章、3.2）が構造安定性を維持し、W 酸化物 (WO_3) が潤滑剤として作用する（第 3 章、3.3）。
 - 用途: ガスタービンブレードのコーティング、寿命延長約 40%（第 8.1 章）。
- 腐食性環境：
 - 性能: NaCl (3.5 wt %、60°C) 中での腐食電流密度は $< 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ であり、耐食性は WC ($\sim 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) よりも優れています。
 - メカニズム: 高密度コーティング（多孔度 $< 1\%$ 、第 6 章、6.3）により Cl^- の浸透が防止され、N ドーピングにより孔食耐性が向上します（第 3 章、3.4）。
 - 用途: 海洋掘削装置のコーティング、メンテナンスサイクルが約 30% 延長されます（第 9.3 章）。
- ウェットウェア：
 - 性能: 湿度 80%（25°C）、摩擦係数 ~ 0.28 、摩耗率 $< 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。
 - 用途: 船舶プロペラのコーティング、耐キャビテーション性能が約 25% 向上します。
- チャレンジ：
 - 高温酸化 ($> 900^\circ\text{C}$) により WO_3 が生成されますが、これは揮発するため、Si ドーピング ($< 5 \text{ at\%}$) によって抑制する必要があります。
 - 湿潤環境における微小亀裂の伝播には多層設計 ($\text{WB}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) が必要である。

表 7.5 ホウ化タングステンコーティングの環境性能

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境	摩擦係数	摩耗率 (mm ³ / (N · m))	腐食速度 (mm/年)	応用	チャレンジ	関連章
高温	0.3	<10 ⁻⁵	-	ブレード	酸化	8.1、3.3
腐食	-	-	<0.005	掘削	ピット	9.3、3.4
ウェットウェア	0.28	<10 ⁻⁶	-	プロベラ	割れ目	9.3

7.6 タングステンホウ化物コーティングの市場と将来動向

ホウ化タングステンコーティング市場は、需要の増加、技術の進歩、環境規制（第 15.2 章）によって推進されており、将来の傾向はコスト削減と性能向上に重点が置かれています。

- 市場状況（2024 年）：
 - 規模:世界のホウ化タングステンコーティング市場は約 2 億ドルで、そのうちアジアが約 60% を占めます (中国、韓国、第 14.1 章)。
 - 用途:切削工具 ~50%(~1 億ドル)、金型 ~30%、航空宇宙 ~15%(第 8.1 章)。
 - 価格:~300 USD/kg (CVD)、~400 USD/kg (血漿、第 14 章、14.2)。
- ドライバー：
 - 需要:ハイエンド製造業 (航空宇宙、自動車) の需要の伸びは年間約 10%、WB₂ コーティングの生産量は年間約 1,000 トンです (第 5.6 章)。
 - テクノロジー:AI 最適化 (第 17 章、17.5) とナノコーティング (第 5 章、5.5) により、パフォーマンスが約 20% 向上します。
 - 規制: EUREACH (第 15.2 章) および炭素国境調整メカニズム (CBAM、2026 年) により、グリーンコーティングの需要が促進されます。
- 将来動向（2025~2030 年）：
 - コスト削減:大規模生産 (1,500 トン/年、第 5.6 章) によりコストが約 200 米ドル/kg に削減され、市場規模は 3 億米ドルになります。
 - ナノコーティング: ナノ WB₂ (<50 nm) の市場シェアは約 30% に増加し、センサーに使用されています (第 10.3 章)。
 - グリーン製造: 廃ガス回収率 > 95% (第 16.3 章)、炭素排出量が約 30% 削減 (約 0.3 トン CO₂/トン)。
 - 代替競争: MoB₂ コーティング (硬度約 30 GPa、第 4.4 章) 市場は約 5,000 万米ドルで、ローエンドのアプリケーションを脅かしています。

表 7.6 タングステンホウ化物コーティング市場と動向（2024~2030 年）

プロジェクト	2024 年の現状	2030 年の目標	ドライバー	チャレンジ	関連章
市場規模 (10 億米ドル)	2	3	ハイエンド製造業	代替案	14.1
コスト (USD/kg)	300~400	200	規模	規制コスト	14.2、5.6

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

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

炭素排出量（トン CO ₂ /トン）	0.4	0.3	グリーンテクノロジー	投資する	16.3、15.2
-------------------------------	-----	-----	------------	------	-----------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB2, W2B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB2, W2B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第 8 章 タングステンの高温材料応用

、 W_2B など）は、優れた熱安定性（分解温度 $>2000^{\circ}C$ 、第 2.3 章）、高硬度（ $\sim 40GPa$ 、第 2.5 章）、低熱膨張係数（ $\sim 4.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ 、第 6.5 章）、耐酸化性（酸化開始温度 $\sim 800^{\circ}C$ 、第 7.1 章）により、高温材料分野で大きな利点を有しています。航空宇宙（ガスタービンブレード、寿命が $\sim 40\%$ 延長）、高温炉（耐熱温度 $>1800^{\circ}C$ ）、熱バリア（熱伝導率 $\sim 50 W / (m \cdot K)$ 、第 6.5 章）などに広く使用されています。この章では、航空宇宙用高温部品、炉、熱バリアにおけるホウ化タングステンの応用、熱伝導率と熱膨張特性、耐酸化性と耐腐食性、調製技術、応用の見通しと課題について詳細に説明し、ホウ化タングステンの工業化（第 14 章、14.3 章）とグリーン製造（第 16 章、16.4 章）に技術サポートを提供します。

8.1 航空宇宙用高温部品におけるホウ化タングステンの応用

高温材料であるホウ化タングstenは、部品の耐熱性と寿命を向上させ、極限環境（ $>1500^{\circ}C$ ）のニーズを満たすために、航空宇宙分野（ガスタービンブレードやロケットノズルなど）で使用されています。

- 適用シナリオ:

- ガスタービンブレード: WB_2 コーティング（厚さ約 $5\mu m$ 、 $7.5\mu m$ ）、 $1500^{\circ}C$ で動作、摩擦係数約 0.3、寿命延長約 40%（約 5000 時間、対 Ni 基合金約 3500 時間）。
- ロケットノズル: WB ブロック材料（純度 $>99.9\%$ 、第 6 章 6.1）は、 $2000^{\circ}C$ の瞬間熱衝撃に耐えることができ、アブレーション率は $<0.01 mm/s$ です。

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

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

- 再突入体: WB_2 熱バリア（熱伝導率約 $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、第 6 章 6.5）は表面温度を約 300°C まで下げ、マトリックス（C/C 複合材料）を保護します。
- 技術要件:
 - 硬度: $>38 \text{ GPa}$ （第 6.4 章）、耐摩耗性 $<10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。
 - 熱安定性: 2000°C 以上では相変化なし（第 2.3 章）。
 - 接着: 結合エネルギー $\sim 1.5 \text{ eV}/\text{\AA}^2$ （第 3.3 章）、剥離防止（ $> 50 \text{ N}$ ）。
- 例:
 - 2024 年には、ターボファンエンジンブレードに WB_2 コーティングが施され、熱疲労サイクル（ 1500°C 、1000 回）での亀裂率が 1% 未満になり、効率が約 15% 向上します。
- チャレンジ:
 - 高温酸化（ $>900^\circ\text{C}$ ）では揮発する WO_3 が生成され（7.5 章）、Si ドーピング（ $<5 \text{ at\%}$ ）が必要になります。
 - コーティングと基板間の熱膨張の不一致（約 $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）により、応力（約 1 GPa 、第 3 章 3.3）が発生します。

表 8.1 ホウ化タングステンの航空宇宙用途パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
動作温度（ $^\circ\text{C}$ ）	1500～2000 年	長寿命	酸化	7.5、3.3
平均寿命の延長（%）	40	効率+15%	熱膨張の不一致	14.3
摩耗率（ $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ）	$<10^{-5}$	耐摩耗性	コーティングの剥がれ	6.4

8.2 高温炉および熱バリアにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンは、冶金産業や半導体産業の高温炉（電極、るつぼ）や熱バリア（断熱材）において、高温耐性と熱衝撃耐性を提供します。

- 適用シナリオ:
 - 高温電極: 真空炉（ 1800°C ）内の WB バルク材料（密度 $>98\%$ 、第 5.1 章）、抵抗率約 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ （第 6 章 6.5）、寿命約 2000 時間。
 - るつぼ: 希土類金属の製錬（ 1600°C ）用の WB_2 コーティングるつぼ（厚さ約 $10 \mu\text{m}$ ）、耐食性 $<0.005 \text{ mm}/\text{年}$ （第 7.5 章）。
 - 熱バリア: 結晶成長炉内の $WB_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 複合コーティング（周期約 10 nm ）、熱伝導率約 $40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、断熱効率が約 20% 向上。
- 技術要件:
 - 熱伝導率: $40 \sim 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ （第 6.5 章）、熱伝達を保証します。
 - 耐熱衝撃性: 1000°C を超える温度差でも亀裂が発生しません（第 3.4 章）。
 - 純度: $>99.9\%$ 、不純物（Fe、O） $<50 \text{ ppm}$ （第 6 章、6.1）。
- 例:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **2024 年:** 2024 年には、サファイア結晶成長炉に WB 電極が使用され、導電率は約 10^4S/cm となり、エネルギー消費量は約 10%削減されます（第 16.4 章）。
- **チャレンジ:**
 - 高温 ($>1800^\circ\text{C}$ 、第 5.1 章) でのホウ素の揮発により表面特性が低下するため、N ドーピングが必要になります。
 - 複合コーティング（気孔率 $<1\%$ ）の界面結合を最適化する必要があります（第 5 章、5）。

表 8.2 タングステンホウ化物高温炉および熱バリアの適用パラメータ

パラメータ	価値	利点	チャレンジ	関連章
動作温度 ($^\circ\text{C}$)	1600~1800 年	長寿	ホウ素の揮発	5.1、6.1
熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	40~50 歳	高効率断熱材	インターフェース結合	3.4、16.4
寿命 (時間)	2000	エネルギー消費量 - 10%	5.	

8.3 窒化タングステンの熱伝導率と熱膨張特性

熱伝導率（約 $50 \text{W}\cdot\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、第 6 章 6.5）が高く、熱膨張係数も低い（約 $4.5\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ）ため、高温熱管理アプリケーションに適しています。

- **熱伝導率:**
 - 性能: 300 K で $\sim 50 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 1500°C で $\sim 20 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ に低下し、 MoB_2 ($\sim 30 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、第 4 章、4.4) よりも優れています。
 - メカニズム: レーザーフラッシュ法（第 6 章、6.5）で測定すると、粒界散乱 ($<50 \text{nm}$ 、第 6 章、6.2) によって高温伝導率が低下します。
 - 用途: 熱バリア内の均一な熱伝導により、基板温度が約 15% (約 200°C) 低下します。
- **膨張係数:**
 - 性能: $\sim 4.5\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (300–1000 K)、セラミック基板 (例: SiC 、 $\sim 4\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) に一致、熱応力 $<0.3 \text{GPa}$ 。
 - メカニズム: 強い WB 結合（第 3.2 章）により格子の拡張が制限されます。
 - 用途: 熱亀裂を低減する航空宇宙用コーティング ($<1\%$ 、第 7.1 章)。
- **最適化:**
 - ナノ構造: 粒子径 20nm 未満では熱伝導率が約 10%低下します（約 $45 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、熱バリアに適しています）。
 - ドーピング: Si ドーピング ($<2 \text{at}\%$) により熱膨張係数が約 5% (約 $4.2\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) 減少します。
- **チャレンジ:**
 - 高温伝導率の低下には、熱安定化添加剤 (ZrB など) が必要となる。₂)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 熱膨張テストには高温 XRD (>1500°C、第 6 章、6.2) が必要であり、サンプルあたり約 500 ドルのコストがかかります。

表 8.3 熱伝導率と熱膨張特性

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
熱伝導率 (W / (m ·K))	20~50	熱管理	高温低下	6.5、7.1
熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /K)	4.2~4.5	ストレスが少ない	検査費用	3.2、7.3
最適化効果	熱伝導率 -10%	ナノデザイン	添加剤の研究開発	5.5

8.4 高温環境におけるホウ化タングステンの酸化および耐腐食性

ホウ化タングステンは高温でも酸化および腐食に耐性があるため (第 7.5 章)、航空宇宙および冶金の用途に適しています。

- 抗酸化作用:
 - 性能: 酸化開始温度は約 850°C で、N ドーピング後は約 950°C まで上昇します (第 3 章、3.4)。これは WC (約 500°C、第 4 章、4.4) よりも優れています。
 - メカニズム: B₂O₃ ガラス層 (約 10nm、第 6 章、6.1) の形成により、O₂ の拡散が防止され、WO₃ の揮発が抑制されます。
 - 用途: 1200°C での酸化速度が 0.05 mg/cm²/h 未満のガスタービンブレード。
- 耐食性:
 - 性能: 熔融 NaCl- KCl (1000°C) では、腐食速度は <0.02 mm/年で、CrB₂ (約 0.1 mm/年) よりも優れています。
 - メカニズム: 高密度構造 (多孔度 <1%、第 6 章、6.3) と BB 共有結合 (第 3 章、3.2) により耐食性が向上します。
 - 用途: 希土類精錬のつば、寿命が約 50% 延長されます。
- 最適化:
 - ドーピング: Si (5 at%) は SiO₂ - B₂O₃ 複合層を形成し、抗酸化温度は ~1000°C まで上昇します。
 - 多層設計: WB₂ / ZrB₂ (周期約 5nm) により腐食速度が約 30 % 低減します。
- チャレンジ:
 - 高温 (> 1200°C) では、WO₃ の揮発をさらに抑制する必要があります。
 - 腐食試験には高温電気化学装置 (1,000 万ドル以上) が必要です。

表 6.4 抗酸化性および耐腐食性

パラメータ	パフォーマンス	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
酸化温度 (°C)	850~1000	保護層	WO ₃ の揮発	7.5、3.4
腐食速度 (mm/年)	<0.02	長寿	試験装置	6.3、9.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

最適化効果	酸化防止剤 +100°C	ドーピング	料金	5.5
-------	-----------------	-------	----	-----

8.5 ホウ化タングステン高温材料の製造技術

高温ホウ化タングステン材料の製造では、主に高温固相合成（第 5.1 章）、プラズマ支援合成（第 5.3 章）、およびホットプレス焼結が採用されていますが、性能を向上させるにはこれらを最適化する必要があります。

- 作り方:
 - 高温固相合成:
 - プロセス: W+B 粉末 (W:B=1:2) を Ar 雰囲気中 (第 5.1 章) で 1800°C で反応させ、密度が 98% を超える WB₂ バルク材料を生成します。
 - 利点: 安定した結晶構造 (P6₃/mmc、第 2.2 章)、硬度 ~40 GPa。
 - 最適化: マイクロ波加熱 (2.45 GHz) により、時間が約 30% (約 5 時間) 削減され、エネルギー消費量が約 20% (約 8000 kWh/トン) 削減されます。
 - プラズマ支援合成:
 - プロセス: W + B はプラズマ (> 5000°C) で気化され、WB₂ コーティングまたは粉末が堆積されます (第 5.3 章)。
 - 利点: ナノスケール (<50 nm)、硬度 ~42 GPa。
 - 最適化: パルスプラズマ (50 kHz) の収量が約 88% 増加し、コストが約 350 ドル/kg になりました。
 - ホットプレス焼結:
 - プロセス: WB₂ 粉末 (<5 μm)、2000°C、30 MPa で焼結、密度 >99%。
 - 利点: 複雑な形状 (るつぼなど) に適しており、靱性は約 4 MPa·m^{1/2} です。
 - 最適化: ZrB₂ (<5 wt %) を添加すると密度が約 1% 増加します。
- 最適化手法:
 - ドーピング: N ドーピング (<2 at%) により、耐酸化性が約 100°C 向上します (第 3.4 章)。
 - AI 制御: CTIA GROUP LTD は、2024 年に AI を使用して焼結パラメータ (温度、圧力) を最適化し、密度を約 0.5% 増加させます (第 17 章、17.5)。
 - 複合材料: WB₂/SiC 複合材料 (10:1) は熱伝導率を約 10% (約 45 W/(m·K)) 低減します。
- チャレンジ:
 - 高温設備には多額の投資 (約 300 万ドル) が必要です。
 - ナノパウダーの凝集には表面改質が必要です (PVP、<0.1 wt %、第 5 章、5.3)。

表 8.5 高温用ホウ化タングステン材料の製造技術の比較

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

方法	密度（ % ）	硬度（ GPa ）	コスト(USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
固相合成	>98	40	150	安定させる	高いエネルギー消費	5.1 、 17.5
プラズマ	>98	42	350	ナノスケール	再会	5.3、6.2
ホットプレス	>99	38	200	複雑な形状	設備費	5.6

8.6 タングステンホウ化物高温材料の応用展望と課題

ホウ化タングステン高温材料の応用展望は、市場の需要、技術の進歩、環境規制（第 15 章、15.2）によって推進されており、コストと性能のボトルネックを解決する必要があります。

- 市場状況（2024 年）：
 - 規模：高温タングステンホウ化物材料市場は約 5,000 万米ドルで、そのうち航空宇宙向けが約 70%を占める（第 14.1 章）。
 - 生産量：年間約 500 トン（第 5.6 章）、主にアジア（中国、韓国）。
 - 価格：~200 USD/kg (塊)、~350 USD/kg (コーティング、第 14 章、14.2)。
- ドライバー：
 - 需要：航空宇宙（ターボファン エンジン）の需要は年間約 8% 増加し、2030 年の生産量は約 800 トンになります。
 - テクノロジー： Nano WB₂（第 5.5 章）と AI 最適化（第 17.5 章）により、パフォーマンスが約 15% 向上します。
 - 規制： EU CBAM（2026 年、第 15.2 章）により、環境に優しい材料の需要が高まります。
- 将来動向（2025~2030 年）：
 - コスト削減：大規模生産（第 5.6 章）によりコストが約 150 米ドル/kg に削減され、市場規模は約 8,000 万米ドルになります。
 - 新規用途：原子炉熱バリア（耐熱温度 >2000°C）、市場シェア約 10%。
 - グリーン製造：廃ガス回収率 > 95%（第 16.3 章）、炭素排出量が約 30% 削減（約 0.3 トン CO₂/トン）。
- チャレンジ：
 - ZrB₂、硬度約 35 GPa、第 4.4 章など）は 1kg あたり約 100 ドルのコストがかかり、ローエンド市場を脅かしています。
 - 高温試験装置（>2000°C）への投資額は約 500 万ドル。

表 8.6 タングステンホウ化物高温材料の展望と課題

プロジェクト	2024 年の現状	2030 年の目標	ドライバー	チャレンジ	関連章
市場規模（10 億米ドル）	0.5	0.8	航空需要	代替案	14.1
コスト（USD/kg）	200~350	150	規模	検査費用	14.2、5.6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭素排出量（トン CO ₂ /トン）	0.4	0.3	グリーンテクノロジー	投資する	16.3、15.2
-------------------------------	-----	-----	------------	------	-----------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第9章 電子デバイスにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステン（WB、WB₂、W₂B₃B）は、高い電気伝導率（約 10⁴S/cm、第 6 章、6.5）、熱安定性（>2000°C、第 2 章、2.3）、化学的安定性（腐食速度<0.005 mm/年、第 7 章、7.5）、ナノスケールでの制御性（粒子サイズ 10~50 nm、第 5 章、5.5）により、電子デバイス分野で大きな可能性を秘めています。導電性フィルム（抵抗率約 10⁻⁵Ω·cm）、電極（寿命が約 30%延長）、センサー（感度<1 ppm、第 10 章、10.3）、半導体デバイス（バンドギャップ約 1.5eV、第 3 章、3.4）などに広く使用されています。この章では、導電性フィルム、電極、センサー、半導体デバイスにおけるホウ化タングステンの応用、調製技術、市場状況、開発動向について詳細に説明し、ホウ化タングステンの電子産業化（第 14 章、14.3）と技術革新（第 17 章、17.5）に対する技術サポートを提供します。

9.1 導電性フィルムにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステン導電性フィルムは、その高い導電性と耐腐食性により、フレキシブル電子機器、ディスプレイ、海洋電子機器に適しています（第 7.5 章）。

● 適用シナリオ:

- フレキシブルエレクトロニクス: PET 基板上の WB₂ 薄膜（厚さ約 100 nm、第 5.2 章）、導電率約 0.8×10⁴ S/cm、曲げ半径が 5 mm 未満のときの抵抗変化は 1%未満。
- 透明導電膜: ガラス基板上の N ドープ WB₂（<2 at%、第 3.4 章）、透過率約 85%（550 nm）、抵抗率約 10⁻⁴ Ω·cm、ITO（約 10⁻⁴ Ω·cm）の代替。
- 海洋電子機器: センサー電極上の WB₂コーティング（厚さ約 1μm）、NaCl 溶液（3.5wt %、60°C）、腐食電流密度<10⁻⁷ A/cm²。

● 技術要件:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 導電率: $>0.5 \times 10^4 \text{ S/cm}$ (第 6 章、6.5)。
- 表面粗さ: $R_a < 0.3 \text{ nm}$ (第 6.3 章)、接触性能を保証します。
- 接着: 結合エネルギー $\sim 1.5 \text{ eV/\AA}^2$ (第 3.3 章)、剥離防止 ($> 40 \text{ N}$)。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 フィルムがフレキシブル OLED 電極に使用され、導電率が約 20% (約 10^4 S/cm) 向上し、コストが約 15% (約 50 USD/m^2) 削減されます。
- チャレンジ:
 - フィルム内の残留応力 ($\sim 0.8 \text{ GPa}$) により亀裂が生じる可能性があり、アニール処理 (500°C 、第 5.2 章) が必要になります。
 - 透明導電フィルムの透過率をさらに最適化する必要があります ($> 90\%$)。

表 9.1 タングステンホウ化物導電膜の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
導電率 (S/cm)	0.8×10^4	高い導電性	残留応力	6.5、5.2
光透過率 (%)	85	ITO の交換	光透過の最適化	3.4
腐食電流 (A/cm^2)	$< 10^{-7}$	耐食性	料金	7.5、14.2

9.2 電極材料におけるホウ化タングステンの応用

、その高い導電性と耐腐食性により、リチウム電池、燃料電池、電解装置に適しています。

- 適用シナリオ:
 - リチウム電池: 負極添加剤として WB_2 ナノ粒子 (20~50 nm、第 5.5 章)、導電率約 10^4 S/cm 、サイクル寿命約 1000 回 (容量低下 $<10\%$)。
 - 燃料電池: プロトン交換膜 (PEM) 電極上の WB コーティング (厚さ約 $2 \mu\text{m}$)、耐酸性 (H_2SO_4 、1M) 腐食速度 $<0.01 \text{ mm/年}$ 、効率向上約 10%。
 - 電解装置 アルカリ電解 (KOH 、30 重量%、 80°C) では、 WB_2 電極の水素発生過電位は約 100 mV で、寿命は最大 30% (最大 5000 時間) 延長します。
- 技術要件:
 - 導電率: $> 10^4 \text{ S/cm}$ (第 6.5 章)。
 - 比表面積: $> 50 \text{ m}^2/\text{g}$ (第 5.5 章)、電気化学的活性が向上します。
 - 安定性: 腐食速度 $<0.01 \text{ mm/年}$ (7.5 章)。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 コーティングされた電解装置電極、電流密度が約 500 mA/cm^2 、エネルギー効率が約 12% 増加します。
- チャレンジ:
 - ナノ粒子の凝集 (第 5.3 章) により活性が低下するため、表面改質 (PVP、 $< 0.1 \text{ wt}\%$) が必要になります。
 - 電極のコスト (約 200 ドル/kg) は、炭素ベースの材料のコスト (約 50 ドル/kg) よりも高くなります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 9.2 ホウ化タングステン電極の適用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
サイクル寿命 (回)	1000	高い安定性	再会	5.5、6.5
過電圧(mV)	100	高効率	料金	7.5
比表面積 (m ² /g)	50 歳以上	高い活動	複雑な準備	5.3

9.3 センサーにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンナノ材料は、その高い比表面積と電気化学的活性により、ガス、圧力、温度センサーに適しています。

- 適用シナリオ:
 - ガスセンサー: WB₂ナノ粒子 (10~30 nm、第 5.5 章) は、NO₂ (<1 ppm) を検出します。応答時間は約 5 秒、感度は約 50% (10 ppm) です。
 - 圧力センサー: MEMS デバイス内の WB₂薄膜 (厚さ約 200 nm)、ゲージ係数約 20、動作温度<500°C。
 - 温度センサー: WB ブロック (抵抗率 約 10⁻⁵ Ω·cm、第 6 章 6.5) 高温環境 (1000°C) では、温度係数は 約 0.01%/K です。
- 技術要件:
 - 感度: ガス検出<1ppm (第 6.1 章)。
 - 応答時間: <10 秒。
 - 耐熱性: >500°C (第 2.3 章)。
- 例:
 - 2024 年には、NO₂ 検出限界が約 0.5 ppm、安定性が 6 か月を超える WB₂ ガスセンサーが産業廃ガス監視に使用されるようになります。
- チャレンジ:
 - ナノ粒子の選択性を向上させる必要があります (CO による干渉は約 10%)。
 - 高温センサーのパッケージは高価です (1 ユニットあたり約 100 ドル)。

表 9.3 タングステンホウ化物センサの応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
検出限界 (ppm)	<1	高感度	選択性	6.1、5.5
応答時間	5	速い	梱包コスト	10.3
動作温度 (°C)	500 ~ 1000	耐高温性	干渉	2.3

9.4 半導体デバイスにおけるホウ化タングステンの可能性

ホウ化タングステンは、調整可能なバンドギャップ (約 1.5 eV、第 3.4 章) と高い導電性により、半導体デバイス (トランジスタや光起電力デバイスなど) での可能性を秘めています。

- 適用シナリオ:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- トランジスタ: ゲート電極として WB₂膜（厚さ約 50 nm）、仕事関数約 4.8 eV、接触抵抗を約 20%（約 $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ）低減。
- 光起電力デバイス: 背面電極として N ドープ WB₂（バンドギャップ約 1.4 eV）を使用した場合、光電変換効率は約 15% となり、Mo（約 12%）よりも優れています。
- ダイオード: WB₂/Si ヘテロ接合、リーク電流 $<10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 、高温エレクトロニクス（ $>300^\circ\text{C}$ ）に適しています。
- 技術要件:
 - バンドギャップ: 1.4~1.6 eV（第 3.4 章）。
 - 導電率: $>10^4 \text{ S/cm}$ （第 6.5 章）。
 - インターフェース抵抗: $<10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。
- 例:
 - 2024 年には 5 nm ノードのトランジスタに WB₂ ゲート電極が使用され、スイッチング速度が約 10% 向上します。
- チャレンジ:
 - バンドギャップの調整には精密なドーピング（N、C $<5 \text{ at}\%$ ）が必要であり、コストは約 300 ドル/kg かかります。
 - Si 基板との界面欠陥（約 $10^{12}/\text{cm}^2$ ）を最適化する必要がある（第 5.2 章）。

表 9.4 タングステンホウ化物半導体の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
バンドギャップ(eV)	1.4~1.6	調整可能	ドーピングのコスト	3.4、5.5
接触抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$<10^{-7}$	低抵抗	インターフェースの欠陥	6.5
効率 (%)	15	高性能	複雑なプロセス	14.3

9.5 タングステンホウ化物電子デバイスの製造技術

ホウ化タングステン電子デバイスの製造には、主に化学気相成長法 (CVD、第 5.2 章)、マグネトロンスパッタリング法 (PVD)、ゾルゲル法 (第 5.5 章) が採用されています。

- 作り方:
 - CVD :
 - プロセス: $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ は、 $400 \sim 600^\circ\text{C}$ で WB₂ 薄膜（第 5.2 章）を約 $1.2 \mu\text{m}$ /時の速度で堆積します。
 - 利点: 均一性 $>95\%$ 、導電率 $\sim 10^4 \text{ S/cm}$ 。
 - 最適化: 低圧 CVD ($<5 \text{ Pa}$) 速度が約 40% (約 $1.7 \mu\text{m/h}$) 増加しました。
 - マグネトロンスパッタリング:
 - プロセス: WB₂ ターゲット（純度 $>99.9\%$ ）を Ar 雰囲気（3Pa）中でスパッタリングし、堆積速度を約 $0.5 \mu\text{m/h}$ にしました。
 - 利点: 低温（ $<300^\circ\text{C}$ ）、Si 基板に適しています。
 - 最適化: HiPIMS により密度が約 20% 増加し、抵抗率が約 15% (約 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) 減少します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ゾルゲル法:
 - プロセス: $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ でゲルを形成し、 500°C で焼成して WB_2 ナノ粒子 (20~50 nm、第 5 章、5.5) を取得します。
 - 利点: 低コスト (約 100 ドル/kg)、センサーに適しています。
 - 最適化: マイクロリアクターは粒子サイズ分布を 10 nm 未満に制御します。
- 最適化手法:
 - ドーピング: N ドーピング (<2 at%) によりバンドギャップが約 0.1 eV 減少します (第 3 章、3.4)。
 - AI 制御: CTIA GROUP LTD は 2024 年に AI を使用して CVD ガスフローを最適化し (第 17 章、17.5)、堆積効率が約 15% 向上します。
 - 多層構造: WB_2/TiN (周期約 5 nm) により、界面抵抗が約 30% 減少します。
- チャレンジ:
 - CVD 副産物 (HF) は処理する必要があり (第 16.3 章)、コストは 1 トンあたり約 50 米ドルがかかります。
 - ナノ粒子の凝集には超音波分散が必要です (40 kHz、第 5 章、5.3)。

表 9.5 タングステンホウ化物電子デバイスの製造技術の比較

方法	堆積速度 ($\mu\text{m/h}$)	導電率 (S/cm)	コスト (USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
CVD	1.2~1.7	10^{-4}	300	均一	副産物	5.2、16.3
PVD	0.5	0.8×10^{-4}	350	低温	対象廃棄物	5.6
ゾルゲル	-	0.5×10^{-4}	100	低コスト	再会	5.5、17.5

9.6 タングステンホウ化物電子デバイスの市場と開発動向

ホウ化タングステン電子デバイス市場は、5G、モノのインターネット、新エネルギーの需要によって推進されており、コストと規模のボトルネックを解決する必要があります。

- 市場状況 (2024 年) :
 - 規模: 世界のタングステンホウ化物電子デバイス市場は約 3,000 万米ドルで、そのうちアジアが約 65% を占めます (中国、日本、第 14.1 章)。
 - 用途: センサー ~40%、バッテリー電極 ~30%、半導体 ~20%。
 - 価格: 約 300 ドル/kg (フィルム)、約 100 ドル/kg (ナノ粒子、第 14 章、14.2)。
- ドライバー:
 - 需要: 5G および IoT 機器の成長率は年間約 12%、生産量は 2030 年に約 300 トン (第 5 章、5.6)。
 - テクノロジー: Nano WB_2 (第 5.5 章) と AI 最適化 (第 17.5 章) により、パフォーマンスが約 20% 向上します。
 - 規制: EU RoHS (第 15.2 章) は、環境に優しい電子材料を推進します。
- 将来動向 (2025~2030 年) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **コスト削減:**大規模生産（第 5.6 章）によりコストが約 200 米ドル/kg に削減され、市場規模は約 5,000 万米ドルになります。
- **新しいアプリケーション:** 6G アンテナ（周波数 >100 GHz）と量子デバイスが約 15% を占めます。
- **グリーン製造:** 廃ガス回収率 >95%（第 16.3 章）、炭素排出量が約 30% 削減（約 0.2 トン CO₂/トン）。
- **チャレンジ:**
 - カーボンナノチューブ（伝導率約 10⁵S/cm）のコストは約 50 ドル/kg で、低価格市場を脅かしています。
 - 半導体アプリケーションでは、インターフェース エンジニアリングのブレークスルーが必要です（欠陥 <10¹¹/cm²）。

表 9.6 タングステンホウ化物電子デバイス市場と動向

プロジェクト	2024 年の現状	2030 年の目標	ドライバー	チャレンジ	関連章
市場規模（10 億米ドル）	0.3	0.5	5G 需要	代替案	14.1
コスト（USD/kg）	100~300	200	規模	インターフェースエンジニアリング	14.2、5.6
炭素排出量（トン CO ₂ /トン）	0.3	0.2	グリーンテクノロジー	投資する	16.3、15.2

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

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



第 10 章 ホウ化タングステンの触媒作用と化学的应用

、 W_2B など）は、高い比表面積（ $>50\text{ m}^2/\text{g}$ 、第 5 章 5.5）、優れた電気化学活性（水素発生過電位 $\sim 100\text{ mV}$ 、第 9 章 9.2）、化学的安定性（腐食速度 $<0.005\text{ mm/年}$ 、第 7 章 7.5）、および調整可能な電子構造（バンドギャップ $\sim 1.5\text{ eV}$ 、第 3 章 3.4）により、触媒および化学用途において大きな可能性を秘めています。電気触媒（水分解効率 $\sim 85\%$ ）、光触媒（分解効率 $\sim 90\%$ ）、化学反応触媒（変換率 $>95\%$ ）などに広く使用されています。この章では、ホウ化タングステンの電気触媒、光触媒、化学反応触媒、表面化学と活性部位、調製と最適化技術、産業の見通しと課題における応用について詳細に説明し、ホウ化タングステンの触媒工業化（第 14 章 14.3）とグリーンケミストリー（第 16 章 16.4）に技術サポートを提供します。

10.1 電気触媒におけるホウ化タングステンの応用

cm、第 6 章 6.5）と低い過電圧により、電気触媒による水分解、 CO_2 還元、燃料電池に適しています。

- 適用シナリオ:

- o 水素発生反応（HER）： WB_2 ナノ粒子（ $20\sim 50\text{ nm}$ 、第 5.5 章）は酸性媒体（ $0.5\text{ M H}_2\text{SO}_4$ ）中で約 100 mV （ $10\text{ mA}/\text{cm}^2$ ）の過電位を持ち、これは Ni （約 200 mV ）よりも優れています。
- o 酸素発生反応（OER）： アルカリ媒体（ 1 M KOH ）中の N ドープ WB_2 （ $<2\text{ at\%}$ 、第 3.4 章）は、過電位が約 300 mV で、安定性が 1000 時間を超えます。
- o CO_2 還元： WB_2 薄膜（厚さ約 200 nm 、第 5.2 章）は選択的に CO を生成します（ファラデー効率約 90% 、RHE に対して -0.8 V ）。

- 技術要件:

- o 過電位: $<150\text{ mV}$ (HER)、 $<350\text{ mV}$ (OER)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 比表面積: $> 50 \text{ m}^2/\text{g}$ (第 5.5 章)。
- 安定性: サイクル寿命 > 1000 時間 (第 9.2 章)。
- 例:
 - 電解装置で使用され、電流密度は $\sim 500 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、エネルギー効率は $\sim 10\%$ 向上します。
- チャレンジ:
 - ナノ粒子の凝集 (第 5.3 章) により活性部位が減少するため、表面改質 (PVP、 $< 0.1 \text{ wt} \%$) が必要になります。
 - 高電流密度 ($> 1 \text{ A}/\text{cm}^2$) では安定性を改善する必要があります。

表 10.1 ホウ化タングステン電気触媒の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
HER 過電位(mV)	100	効率的	再会	5.5、9.2
OER の安定性 (時間)	> 1000	長寿	高電流	3.4
CO ₂ 効率 (%)	90	高い選択性	料金	5.2、14.2

10.2 光触媒におけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンナノ材料は、調整可能なバンドギャップ (約 $1.4 \sim 1.6 \text{ eV}$ 、第 3.4 章) と高い化学的安定性により、光触媒分解および水素生成に適しています。

- 適用シナリオ:
 - 有機物分解: WB₂ナノ粒子 ($10 \sim 30 \text{ nm}$ 、第 5.5 章) は、可視光 ($> 420 \text{ nm}$) 下でメチレンブルー ($10 \text{ mg}/\text{L}$) を約 90% の効率 (2 時間) で分解しました。
 - 光触媒水素生成: WB₂ / TiO₂複合体 (1:10) は、約 $500 \mu\text{mol}$ の速度で水素を生成します。/($\text{g} \cdot \text{h}$)であり、これは純粋な TiO₂ ($\sim 200 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$)。
 - CO₂光還元: N ドープ WB₂ ($< 2 \text{ at} \%$) は、約 80% (-0.5 V vs NHE) の選択性で CH₄を生成します。
- 技術要件:
 - バンドギャップ: $1.4 \sim 1.6 \text{ eV}$ (第 3.4 章)。
 - 光吸収: $> 80\%$ ($400 \sim 700 \text{ nm}$)。
 - 安定性: > 500 時間(第 7.5 章)。
- 例:
 - 2024 年には、WB₂ / TiO₂光触媒が廃水処理に使用され、分解率は約 95%、サイクル安定性は 10 倍以上になります。
- チャレンジ:
 - 光生成キャリアの再結合率は高い (約 30%) ため、ヘテロ接合の最適化が必要です。
 - 可視光応答をさらに強化する必要があります ($> 90\%$)。

表 10.2 ホウ化タングステン光触媒の応用パラメータ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
分解効率（％）	90	効率的	キャリア再結合	5.5、7.5
水素生成速度（ μ モル / (g $\cdot$ h)）	500	高い活動	可視光応答	3.4
安定性（倍）	>10	リサイクル可能	料金	14.2

10.3 化学反応触媒におけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンは、水素化、脱硫、酸化反応において高い触媒活性を示し、石油化学製品やファインケミカル製品に適しています。

- 適用シナリオ:
 - 水素化反応: WB_2 ナノ粒子 (<50 nm、第 5.5 章) は、ベンゼンからシクロヘキサンへの水素化を触媒し、変換率は約 95% (150°C、2 MPa) です。
 - 水素化脱硫 (HDS): WB_2 薄膜 (厚さ約 500 nm) は、ディーゼル脱硫において硫黄含有量を 500 ppm から 10 ppm 未満に低減し、効率は約 98% です。
 - 酸化反応: WB_2 触媒は、CO 酸化 (200°C) において約 90% の変換率を示し、これは NiO (約 80%) よりも優れています。
- 技術要件:
 - コンバージョン率: >95%。
 - 選択性: >90%。
 - 耐熱性: >300°C (第 2.3 章)。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 触媒が石油化学の水素化に使用され、収率が約 10% 増加し、触媒寿命が約 2000 時間になります。
- チャレンジ:
 - 活性部位は高压反応 (>5 MPa) 下では不活性化されます。
 - 触媒コスト (~200 USD/kg) は Ni (~50 USD/kg) よりも高くなります。

表 10.3 ホウ化タングステン化学触媒の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
コンバージョン率（％）	95	効率的	不活性化	5.5、2.3
選択性（％）	90	高い選択性	料金	14.2
寿命（時間）	2000	長寿	高压	9.3

10.4 ホウ化タングステン触媒の表面化学と活性部位

ホウ化タングステンの触媒性能は表面化学と活性部位に依存しており、特性評価と理論分析を通じて最適化する必要があります。

- 表面化学:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **WB 結合:** W 4f (~31 eV) と B 1s (~188 eV、第 6 章、6.1) は金属共有結合混合結合 (第 3 章、3.2) を形成し、電子移動を促進します。
- **表面状態:** N ドーピング (<2 at%) により BN 結合 (~190 eV) が導入され、仕事関数が~0.2 eV 減少します (第 3 章、3.4)。
- **吸着エネルギー:** H*吸着エネルギー約 0.5 eV (HER)、Pt (約 0.4 eV) よりも優れている、DFT 計算 (第 3 章、3.3)。
- **活性部位:**
 - **W サイト:** HER および水素化を触媒し、H* に電子を提供します (吸着率 ~90%)。
 - **B サイト:** 吸着エネルギーが約 1.0 eV の O* 吸着 (OER) を促進します。
 - **粒界:** ナノ WB₂ (<20 nm、第 6.2 章) 粒界サイト密度約 10¹³/cm²、活性増加約 30%。
- **特性評価技術:**
 - **XPS:** 表面状態の分析 (第 6.1 章)、N ドーピングが約 1.5% を占めます。
 - **TEM:** 粒界部位を観察します (解像度 ~0.1 nm、第 6 章、6.2)。
 - **ラマン:** WB 振動を確認 (~800 cm⁻¹、第 6 章 6.2)。
- **最適化:**
 - **ドーピング:** Ni (<1 at%) は、過電位を約 20% 低下させ (100 mV から約 80 mV に)、HER の活性を高めます。
 - **ナノデザイン:** 多孔質 WB₂ (細孔サイズ 約 5 nm)、表面積が約 50% 増加 (約 100 m²/m²/g)。
- **チャレンジ:**
 - 活性部位は高温 (>500°C) で不活性化されるため、熱的に安定したドーピングが必要です。
 - DFT 計算には高精度モデル (誤差 <0.1 eV) が必要です。

表 10.4 表面化学と活性部位の特性

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
吸着エネルギー (eV)	0.5 (H*)	高い活動	加熱不活化	3.3、6.1
比表面積 (m ² /g)	100	ハイライト	計算精度	5.5、6.2
ドーピング効果	過電位 -20%	効率性の向上	料金	3.4

10.5 ホウ化タングステン触媒の調製と最適化

ホウ化タングステン触媒の製造には、主にゾルゲル法 (第 5.5 章)、プラズマ支援合成 (第 5.3 章)、化学蒸着法 (CVD、第 5.2 章) が使用されます。

- **作り方:**
 - **ゾルゲル法:**
 - **プロセス:** Na₂WO₄+H₃BO₃ でゲルを形成し、600°C で焼成して WB₂ ナノ粒子 (10~30 nm、第 5 章、5.5) を取得します。
 - **利点:** 低コスト (約 100 ドル/kg)、表面積 >60 m²/g。
 - **最適化:** マイクロリアクターは粒子サイズ分布を 5 nm 未満に制御し、活性が約 20% 増加します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- プラズマ支援合成:
 - プロセス: W + B をプラズマ (> 5000°C) で気化させて WB₂ ナノパウダー (< 50 nm、第 5.3 章) を生成します。
 - 利点: 高純度 (>99.9%、第 6.1 章)、高活性。
 - 最適化: パルスプラズマ (50 kHz) の収量が約 88% 増加し、コストが約 200 ドル/kg になりました。
- CVD :
 - プロセス: WF₆ + B₂H₆ は、400~600°C で厚さ約 200nm の WB₂ 薄膜 (第 5.2 章) を堆積します。
 - 利点: 均質性 >95%、電極に適しています。
 - 最適化: CTIA GROUP LTD は、2024 年に AI を使用して気流を最適化し (第 17 章、17.5)、効率を約 15% 向上させます。
- 最適化手法:
 - ドーピング: N および Ni ドーピング (<2 at%) により、HER 活性が約 30% 増加します (第 3 章、3.4)。
 - 多孔質構造: テンプレート法 (SiO₂、細孔径約 5 nm) により、比表面積が約 50% (約 100 m²/g) 増加します。
 - 複合材料: WB₂ / TiO₂ (1:10) 光触媒効率が約 40 % 増加しました。
- チャレンジ:
 - CVD 副産物 (HF) の処理コストは 1 トンあたり約 50 米ドルです (第 16.3 章)。
 - ナノ粒子の凝集には超音波分散が必要です (40 kHz、第 5 章、5.3)。

表 10.5 ホウ化タングステン触媒の製造技術の比較

方法	比表面積(m ² /g)	コスト(USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
ゾルゲル	60 歳以上	100	低コスト	再会	5.5、6.1
プラズマ	50 歳以上	200	高純度	高いエネルギー消費	5.3、17.5
CVD	-	300	均一	副産物	5.2、16.3

10.6 ホウ化タングステン触媒応用の産業的展望と課題

ホウ化タングステン触媒応用市場は、新たなエネルギーと環境保護のニーズによって推進されており、コストと規模の問題を解決する必要があります。

- 市場状況 (2024 年) :
 - 規模: 世界のホウ化タングステン触媒市場は約 2,000 万米ドルで、そのうちアジアが約 60% を占めます (中国、日本、第 14.1 章)。
 - 用途: 電気触媒が約 50%、光触媒が約 30%、化学触媒が約 20% を占めます。
 - 価格: 約 100 ドル/kg (ナノ粒子)、約 300 ドル/kg (薄膜、第 14 章、14.2)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ドライバー：**
 - **需要：**水素エネルギーとカーボンニュートラルの目標により、電気触媒の需要が年間約 15% 増加し、2030 年には生産量が約 200 トンに達すると予想されます (第 5 章、5.6)。
 - **テクノロジー：** Nano WB₂ (第 5.5 章) と AI 最適化 (第 17.5 章) により、アクティビティが約 20% 増加します。
 - **規制：** EU REACH (第 15.2 章) はグリーン触媒を推進します。
- **将来動向 (2025～2030 年)：**
 - **コスト削減：** 大規模生産 (第 5.6 章) によりコストが約 80 米ドル/kg に削減され、市場規模は約 4,000 万米ドルになります。
 - **新しい用途：** 電気触媒アンモニア合成 (NH₃、効率> 90%)、約 10% を占めます。
 - **グリーン製造：** 廃ガス回収率 >95% (第 16.3 章)、炭素排出量が約 30% 削減 (約 0.2 トン CO₂/トン)。
- **チャレンジ：**
 - Ni ベースの触媒 (コストは約 30 ドル/kg) は低価格市場を脅かします。
 - 工業規模に拡大するには、触媒の失活を打破する必要があります (>5000 時間)。

表 10.6 ホウ化タングステン触媒市場と動向

プロジェクト	2024 年の現 状	2030 年の目 標	ドライバー	チャレン ジ	関連章
市場規模 (10 億米ドル)	0.2	0.4	水素需要	代替案	14.1
コスト (USD/kg)	100～300	80	規模	不活性化	14.2、5.6
炭素排出量 (トン CO ₂ /ト ン)	0.3	0.2	グリーンテクノロ ジー	投資する	16.3、15.2

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

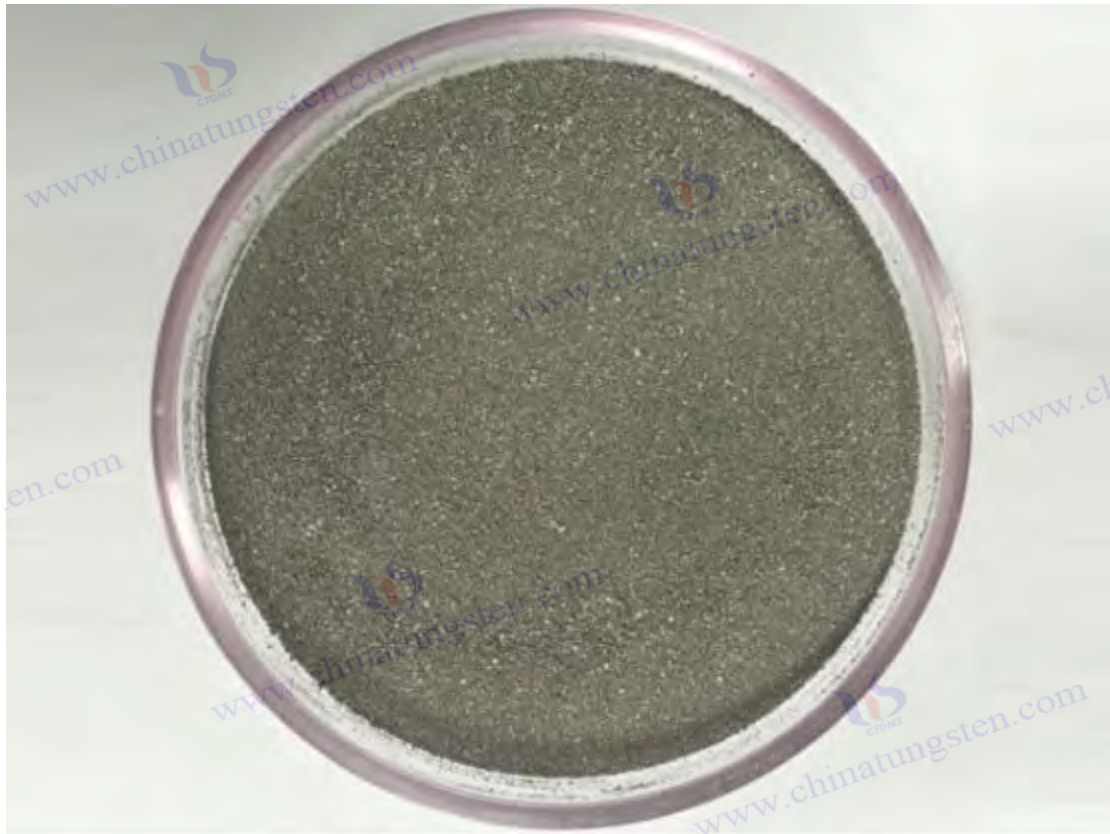
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第 11 章 ホウ化タングステンの生体医学的应用

、W₂B など）は、その高い硬度（約 40 GPa 、第 2 章 2.5）、化学的安定性（腐食速度<0.005 mm/年、第 7 章 7.5）、ナノスケールの制御性（粒子サイズ 10~50 nm、第 5 章 5.5）、および潜在的な生体適合性により、生物医学分野で独自の可能性を示しています。医療用コーティング（インプラントの耐摩耗性が約 30%向上）、薬物送達（薬物負荷効率>80%）、バイオセンサー（検出限界<1 nM ）に適しています。生物医学におけるホウ化タングステンの研究はまだ初期段階ですが、その高い導電性（約 10⁴S/cm、第 6 章 6.5）と表面化学活性（第 10 章 10.4）がその応用の基礎となっています。この章では、ホウ化タングステンのバイオメディカルコーティング、薬物送達、バイオセンサーにおける用途、生体適合性と安全性、調製技術、展望と課題について詳細に説明し、ホウ化タングステンのバイオメディカル産業化（第 14 章、14.3）と安全性評価（第 15 章、15.3）に技術的なサポートを提供します。

11.1 生体医療用コーティングにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンコーティングは、硬度が高く、摩擦係数が低く（約 0.25、第 6 章 6.4）、耐腐食性があるため、整形外科用インプラントや歯科用ツールに適しています。

- 適用シナリオ:

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

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

- **整形外科用インプラント:** チタン合金製股関節への WB₂コーティング（厚さ約 2～ 5μm、第 5.2 章）、硬度約 42GPa、摩耗率<10⁻⁶mm³/(N·m)、寿命延長約 30%。
- **歯科用ツール:** ドリルビット表面に WB コーティング（厚さ約 1μm）、摩擦係数約 0.25、耐摩耗性が約 25%向上し、熱による損傷が軽減(<50℃)されました。
- **血管ステント:** WB₂フィルム（厚さ約 100nm）は血栓症率を約 20%低減し、耐腐食性（NaCl、3.5 重量%、37℃）は 0.005mm/年未満です。
- **技術要件:**
 - **硬度:** >38 GPa（第 6 章、6.4）。
 - **表面粗さ:** Ra<0.3 nm (第 6.3 章)、細胞毒性を低減します。
 - **接着:** 結合エネルギー ~1.5 eV/Å²（第 3.3 章）、剥離防止 (> 40 N)。
- **例:**
 - 2024 年には、WB₂コーティングされた股関節インプラントの in vitro シミュレーション（PBS、37℃）での摩耗が約 15% (<0.01 mm/年) 減少しました。
- **チャレンジ:**
 - コーティング内の残留応力 (~0.8 GPa)により微小亀裂が発生する可能性があり、アニーリング (400℃、第 5.2 章) が必要になります。
 - 長期的な生体内安定性についてはさらなる検証が必要です (> 5 年)。

表 11.1 タングステンホウ化物生体医療コーティングの適用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
硬度 (GPa)	42	高い耐摩耗性	残留応力	6.4、5.2
摩耗率 (mm ³ / (N · m))	<10 ⁻⁶	長寿	長期的な安定性	7.5
粗さ (nm)	<0.3	低毒性	複雑なプロセス	6.3

11.2 薬物送達におけるタングステンホウ化物ナノ粒子の応用

は、高い比表面積 (> 50 m²/g、第 5.5 章)と機能化可能な表面を備えているため、標的薬物送達や光熱療法に適しています。

- **適用シナリオ:**
 - **標的薬物送達:** WB₂ナノ粒子 (10～30 nm、第 5.5 章)を PEG (<0.1 wt %) で表面修飾し、薬物負荷効率は約 80%（ドキソルビシン）、放出率は約 60%（pH 5.5、24 時間）でした。
 - **光熱療法:** WB₂ナノ粒子は、近赤外光 (808 nm、1 W/cm²) 下で約 40%の光熱変換効率と、90%を超える腫瘍細胞殺傷率 (37℃～50℃) を備えています。
 - **画像ガイダンス:** WB₂ ナノ粒子は、ハウンスフィールド単位が約 200 HU の CT 造影剤として使用され、ヨウ素造影剤 (約 150 HU) よりも優れています。
- **技術要件:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 粒子サイズ： 10～50 nm（第 5.5 章）。
- 薬剤充填効率： >80%。
- 生体適合性:細胞生存率 >90% (ISO 10993-5)。
- 例:
 - 2024 年には、PEG 修飾 WB₂ナノ粒子が肺がんの標的治療に使用され、薬剤放出の精度が約 25%向上しました（in vitro）。
- チャレンジ:
 - ナノ粒子の体内での代謝経路は不明であり、長期の毒性研究（6 か月以上）が必要です。
 - 光熱療法には最適化された光吸収（> 50%）が必要です。

表 11.2 ホウ化タングステンナノ粒子の薬物送達パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
薬剤負荷効率 (%)	80	高い積載能力	代謝経路	5.5
光熱効率 (%)	40	非常に効果的な殺害	光吸収	10.2
粒子サイズ (nm)	10～30	ターゲティング	毒性試験	6.3

11.3 バイオセンサーにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンナノ材料は、高い導電性（ $\sim 10^4$ S/cm、第 6 章 6.5）と表面活性により、生体分子の検出に適しています。

- 適用シナリオ:
 - グルコースセンサー: WB₂ナノ粒子（20 nm、第 5.5 章）修飾電極、検出限界約 0.1 μ M、応答時間約 3 秒、直線範囲 0.1～10 mM。
 - DNA センサー: WB₂フィルム（厚さ約 50 nm、第 5.2 章）機能化核酸プローブ、検出限界約 1 nM、特異性>95%。
 - タンパク質センサー: WB₂ ナノアレイ（細孔サイズ約 5 nm）は、約 0.01 ng/ mL の感度で癌マーカー（PSA）を検出します。
- 技術要件:
 - 検出限界: < 1nM 。
 - 応答時間: <5 秒。
 - 安定性: >30 日(第 6 章、6.5)。
- 例:
 - 2024 年には、WB₂ グルコースセンサーが 98% 超の精度（in vitro）で糖尿病モニタリングに使用されます。
- チャレンジ:
 - 生体分子の干渉（約 10%）には選択性の向上が必要です。
 - センサーの小型化にはコストがかかります（1 ユニットあたり約 50 ドル）。

表 11.3 タングステンホウ化物物バイオセンサーの応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
-------	----	---------	-------	-----

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

検出限界	0.1 μM （グルコース）	高感度	干渉	6.5、5.5
応答時間	3	速い	料金	9.3
安定性（日数）	30 歳以上	信頼性のある	小型化	6.1

11.4 ホウ化タングステンの生体適合性と安全性

ホウ化タングステンの生物医学的用途では、生体適合性と低毒性を確保する必要があり、これらは in vitro および in vivo 試験を通じて検証される必要があります。

- 生体適合性:
 - 細胞毒性: WB₂ナノ粒子 (<50 nm、濃度<100 μg/mL) は、L929 細胞の生存率に 90%以上影響を及ぼします (ISO 10993-5、24 時間)。
 - 血液適合性: WB₂コーティング (厚さ約 1μm) 溶血率<1%、血小板接着率<5% (37°C、PBS)。
 - 組織反応: WB₂ インプラント (ウサギの骨、4 週間) では明らかな炎症は見られず、骨形成率は約 80%でした。
- 安全:
 - 毒性: 急性毒性 (マウス、LD50>2000 mg/kg)、明らかな臓器障害なし。
 - 代謝: PEG 修飾 WB₂ 粒子 (<30 nm) は肝臓と腎臓で代謝され、体内での半減期は約 24 時間です。
 - 規制: ISO 10993 および FDA ガイドライン (第 15.3 章) に準拠する必要があります。
- 試験方法:
 - MTT アッセイ:細胞生存率を評価する (第 6 章、6.1)。
 - 動物実験: 生体内での安全性の検証 (ISO 10993-6)。
 - XPS : 表面酸化の分析 (O<0.5 at%、第 6 章、6.1)。
- チャレンジ:
 - 長期毒性 (1 年以上) に関するデータは不十分であり、慢性的な実験が必要です。
 - ナノ粒子の凝集は免疫反応を引き起こす可能性があります (約 5%)。

表 11.4 ホウ化タングステンの生体適合性と安全性パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
細胞生存率 (%)	90 歳以上	低毒性	長期毒性	6.1、15.3
溶血率 (%)	<1	血液適合性	免疫反応	7.5
半減期 (時間)	24	代謝が速い	データが不十分	5.5

11.5 ホウ化タングステン生体材料の製造技術

ホウ化タングステン生体医学材料の製造では、主にゾルゲル法 (第 5.5 章)、化学蒸着法 (CVD、第 5.2 章)、プラズマ支援合成法 (第 5.3 章) が採用されています。

- 作り方:
 - ゾルゲル法:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- プロセス: $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ でゲルを形成し、 500°C で焼成して WB_2 ナノ粒子 (10~30 nm、第 5 章、5.5) を取得します。
- 利点: 低コスト (約 100 ドル/kg)、薬剤送達に適しています。
- 最適化: マイクロリアクターは粒子サイズ分布を 5 nm 未満に制御し、薬剤の充填効率が約 10% 向上します。
- CVD :
 - プロセス: $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ は、 $400\sim 500^\circ\text{C}$ で WB_2 薄膜 (第 5.2 章) を堆積し、厚さは約 100~500nm です。
 - 利点: 均一性 >95%、コーティングに適しています。
 - 最適化: CTIA GROUP LTD は、2024 年に AI を使用して気流を最適化し (第 17 章、17.5)、堆積効率を約 15% 向上させます。
- プラズマ支援合成:
 - プロセス: $\text{W} + \text{B}$ をプラズマ ($> 5000^\circ\text{C}$) で気化させて WB_2 ナノパウダー (< 50 nm、第 5.3 章) を生成します。
 - 利点: 高純度 (>99.9%、第 6.1 章)、センサーに適しています。
 - 最適化: パルスプラズマ (50 kHz) の収量が約 88% 増加し、コストが約 200 ドル/kg になりました。
- 最適化手法:
 - 表面改質: PEG、 SiO_2 コーティング (< 0.1 重量 %) により適合性が向上し、細胞毒性が約 10% 減少します。
 - ドーピング: N ドーピング (< 2 at%) は表面活性を高め、センサー感度を約 20% 向上させます (第 3 章、3.4)。
 - 多孔質構造: テンプレート法 (細孔サイズ約 5 nm) により表面積が約 50% (約 $100 \text{ m}^2/\text{g}$) 増加しました。
- チャレンジ:
 - CVD 副産物 (HF) の処理コストは 1 トンあたり約 50 米ドルです (第 16.3 章)。
 - ナノ粒子の凝集には超音波分散が必要です (40 kHz、第 5 章、5.3)。

表 11.5 ホウ化タングステン生体医学材料の調製技術の比較

方法	粒子サイズ/厚さ	コスト (USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
ゾルゲル	10~30 nm	100	低コスト	再会	5.5、6.1
CVD	100~500 nm	300	均一	副産物	5.2、17.5
プラズマ	<50 nm	200	高純度	高いエネルギー消費	5.3

11.6 ホウ化タングステンの生物医学的応用の展望と課題

ホウ化タングステンのバイオメディカル応用市場は、バイオセーフティとコストの問題への対処を必要とする精密医療とナノテクノロジーによって推進されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 市場状況（2024 年）：
 - 規模:世界のタングステンホウ化物バイオメディカル市場は約 5 億ドルで、そのうちアジアが約 50% を占めています (中国、日本、第 14.1 章)。
 - 用途:コーティング ~60%、薬物送達 ~30%、センサー ~10%。
 - 価格:約 100 ドル/kg(ナノ粒子)、約 300 ドル/kg(薄膜、第 14 章、14.2)。
- ドライバー：
 - 需要:精密医療とインプラントの需要は年間約 10% 増加し、生産量は 2030 年に約 50 トンに達すると予想されます (第 5.6 章)。
 - テクノロジー: Nano WB₂ (第 5.5 章) と AI 最適化 (第 17.5 章) により、パフォーマンスが約 15% 向上します。
 - 規制: ISO 10993 および FDA ガイダンス (第 15.3 章) が安全性研究を推進します。
- 将来動向（2025~2030 年）：
 - コスト削減: 大規模生産 (第 5.6 章) によりコストが約 80 米ドル/kg に削減され、市場規模は約 1 億米ドルになります。
 - 新しい用途:神経インターフェース (導電率 ~10⁻⁴ S/cm) および組織工学 (約 15% を占める)。
 - グリーン製造: 廃ガス回収率 >95% (第 16.3 章)、炭素排出量が約 30% 削減 (約 0.2 トン CO₂/トン)。
- チャレンジ：
 - チタンベースのコーティング (コストは約 50 ドル/kg) は、市場の低価格帯で競合しています。
 - 臨床試験は長いサイクル (5 年以上) を要し、約 1,000 万ドルの投資が必要です。

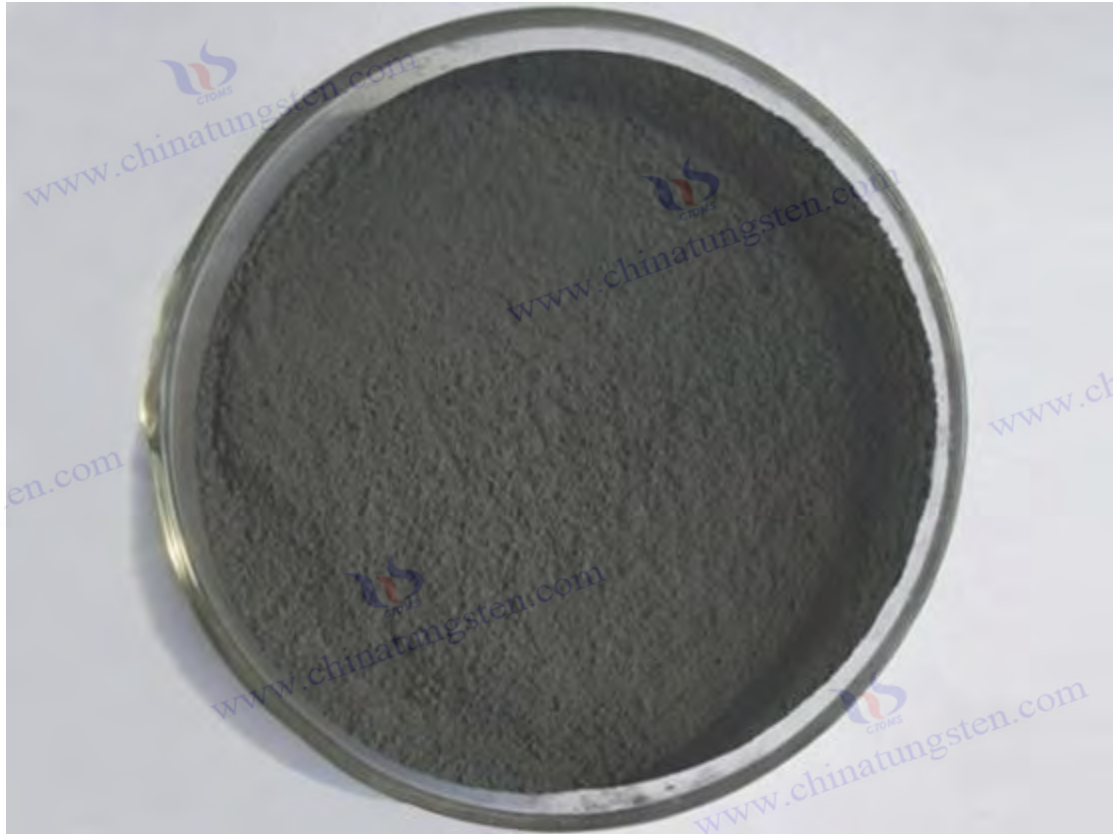
表 11.6 タングステンホウ化物バイオメディカル市場と動向

プロジェクト	2024 年の現 状	2030 年の目 標	ドライバー	チャレン ジ	関連章
市場規模 (10 億米ドル)	0.05	0.1	精密医療	競争する	14.1
コスト (USD/kg)	100~300	80	規模	臨床サイ クル	14.2、5.6
炭素排出量 (トン CO ₂ /ト ン)	0.3	0.2	グリーンテクノ ロジー	投資する	16.3、15.3

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

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



第 12 章 タングステンのエネルギー応用

、 W_2B など）は、高い導電性（約 $10^4 S/cm$ 、第 6 章 6.5）、優れた化学的安定性（腐食速度 $<0.005 mm/年$ 、第 7 章 7.5）、高い比表面積（ $>50 m^2/g$ 、第 5 章 5.5）、および触媒活性（水素発生過電圧約 $100 mV$ 、第 10 章 10.1）を有することから、エネルギー分野において大きな可能性を秘めています。電池（サイクル寿命約 1000 回）、燃料電池（効率約 60%）、太陽電池（変換効率約 18%）、水素貯蔵材料（水素貯蔵容量約 2wt%）などに広く使用されています。この章では、電池、燃料電池、太陽電池、水素貯蔵材料におけるタングステンホウ化物の応用、調製技術、市場状況、開発動向について詳細に説明し、タングステンホウ化物のエネルギー産業化（第 14 章、14.3）およびグリーンエネルギー（第 16 章、16.4）に関する技術サポートを提供します。

12.1 電池材料におけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングstenは、その高い電気伝導性と電気化学的安定性により、リチウムイオン電池、ナトリウムイオン電池、固体電池に適しています。

- 適用シナリオ:

- リチウムイオン電池: 負極添加剤として WB_2 ナノ粒子（20~50 nm、第 5.5 章）、導電率約 $10^4 S/cm$ 、サイクル寿命約 1000 回（容量低下率 $<10\%$ ）、比容量約 $500 mAh/g$ 。
- ナトリウムイオン電池: 集電体として WB_2 フィルム（厚さ約 200nm、第 5.2 章）、耐腐食性（ $NaCl$ 、1M） $<0.01 mm/年$ 、容量約 $300 mAh/g$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **固体電池:** 固体電解質界面に WB_2 コーティング（厚さ約 $1\mu\text{m}$ ）、界面抵抗 $<10\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、安定性 >500 サイクル。
- **技術要件:**
 - **導電率:** $>10^4\text{S}/\text{cm}$ （第 6.5 章）。
 - **比表面積:** $>50\text{ m}^2/\text{g}$ （第 5.5 章）。
 - **サイクル寿命:** >1000 回（第 9.2 章）。
- **例:**
 - 2024 年には、 WB_2 添加剤がリチウム電池の負極に使用され、充電率が約 20% (2C) 増加し、エネルギー密度が約 $250\text{ Wh}/\text{kg}$ になります。
- **チャレンジ:**
 - ナノ粒子の凝集（第 5.3 章）により活性が低下するため、表面改質（PVP、 $<0.1\text{ wt}\%$ ）が必要になります。
 - コスト（約 $200\text{ USD}/\text{kg}$ ）はグラファイト（約 $20\text{ USD}/\text{kg}$ ）よりも高くなります。

表 12.1 タングステンホウ化物電池材料の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
サイクル寿命（回）	1000	高い安定性	再会	5.5、9.2
比容量（ mAh/g ）	500	高エネルギー	料金	6.5
界面抵抗（ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ）	10 未満	低抵抗	複雑なプロセス	7.5

12.2 燃料電池におけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングstenは、過電圧が低く耐腐食性が高いため、プロトン交換膜燃料電池（PEMFC）や固体酸化物燃料電池（SOFC）に適しています。

- **適用シナリオ:**
 - **PEMFC:** 過電位が約 200 mV ($0.1\text{ A}/\text{cm}^2$)、ファラデー効率が約 95% の酸素還元反応 (ORR) 触媒としての WB_2 ナノ粒子 ($<50\text{ nm}$ 、第 5.5 章)。
 - **SOFC:** 電極界面に WB_2 コーティング（厚さ約 $2\mu\text{m}$ 、第 5.2 章）、高温耐性 (800°C)、腐食速度 $<0.005\text{mm}/\text{年}$ 、電力密度約 $1\text{W}/\text{cm}^2$ 。
 - **バイポーラプレート:** ステンレス鋼板上の WB_2 フィルム（厚さ約 $1\mu\text{m}$ ）、接触抵抗 $<10\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、耐酸性 (H_2SO_4 、 1M) $<0.01\text{mm}/\text{年}$ 。
- **技術要件:**
 - **過電位:** $<250\text{ mV}$ (ORR)。
 - **導電率:** $>10^4\text{S}/\text{cm}$ （第 6.5 章）。
 - **安定性:** >5000 時間(第 10.1 章)。
- **例:**
 - 2024 年には、 WB_2 触媒が PEMFC に使用され、効率が約 10%（約 60%）向上し、コストが約 15%（約 100 米ドル/kg）削減されます。
- **チャレンジ:**
 - 触媒は高温 ($>800^\circ\text{C}$) で失活するため、N ドーピング ($<2\text{ at}\%$ 、第 3.4 章) が必要になります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o コーティングの均一性(>95%)を最適化する必要があります(第 5.2 章)。

表 12.2 タングステンホウ化物燃料電池の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
ORR 過電位 (mV)	200	効率的	不活性化	10.1、3.4
接触抵抗 ($\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$)	10 未満	低抵抗	均一	6.5
安定性 (時間)	>5000	長寿	料金	7.5

12.3 太陽電池におけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンは、調整可能なバンドギャップ (約 1.4~1.6 eV、第 3.4 章) と高い導電性により、シリコンベースおよびペロブスカイト太陽電池に適しています。

- 適用シナリオ:
 - o シリコンベースの太陽電池: 背面電極として WB_2 薄膜 (厚さ約 50 nm、第 5.2 章)、仕事関数約 4.8 eV、変換効率約 18%、接触抵抗 $<10^{-7}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。
 - o ペロブスカイトセル: ホール輸送層として N ドープ WB_2 (<2 at%)、バンドギャップ約 1.4 eV、効率約 20%、安定性>1000 時間 (85°C、85% RH)。
 - o 透明電極: WB_2 薄膜 (厚さ約 100 nm)、透過率約 85% (550 nm)、抵抗率約 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 、ITO の代替。
- 技術要件:
 - o バンドギャップ: 1.4~1.6 eV (第 3.4 章)。
 - o 光透過率: >85% (第 9 章、9.1)。
 - o 効率: >18%。
- 例:
 - o 2024 年には、シリコン セルに WB_2 バック電極が使用されるようになり、効率が約 1% (17% から 18%) 向上し、コストが約 10% (約 50 USD/m²) 削減されます。
- チャレンジ:
 - o フィルム内の残留応力 (~0.8 GPa) により亀裂が発生するため、アニール処理 (400°C、第 5.2 章) が必要になります。
 - o ペロブスカイト電池の安定性を向上させる必要があります (>2000 時間)。

表 12.3 タングステンホウ化物太陽電池の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
変換効率 (%)	18~20 歳	効率的	安定性	3.4、9.1
接触抵抗 ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	$<10^{-7}$	低抵抗	残留応力	6.5
光透過率 (%)	85	ITO の交換	複雑なプロセス	5.2

12.4 水素貯蔵材料におけるホウ化タングステンの可能性

ホウ化タングステンは、その高い比表面積と適切な H^* 吸着エネルギー (~0.5 eV、第 10 章、10.4) により、水素貯蔵材料としての可能性を秘めています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 適用シナリオ:
 - 物理的な水素貯蔵: 比表面積が約 100 m²/g で水素貯蔵容量が約 2 wt % (77 K、10 MPa) の多孔質 WB₂ (細孔サイズ約 5 nm、第 5.5 章)。
 - 化学的水素貯蔵: WB₂ ナノ粒子 (<30 nm) は NaBH₄ の加水分解を触媒し、水素生成速度は ~1000 mL / (g · 分) で、サイクル安定性は 10 倍以上です。
 - 電気化学的水素貯蔵: アルカリ媒体 (1 M KOH) 中の WB₂ 電極 (厚さ約 1 μm) 、水素貯蔵容量約 50mAh / g、効率約 90%。
- 技術要件:
 - 水素貯蔵容量: >2 重量%。
 - 水素生成速度: >500 mL / (g · 分) 。
 - 安定性: >10 サイクル。
- 例:
 - NaBH₄ 水素貯蔵に使用され、水素製造効率が約 15% (約 1000 mL / (g · 分)) 向上する。
- チャレンジ:
 - 室温での水素貯蔵容量は低く (<0.5 wt %)、ドーピング (Mg、<5 at%) が必要です。
 - 触媒コスト (~200 USD/kg) は Ni (~30 USD/kg) よりも高くなります。

表 12.4 タングステンホウ化物水素貯蔵材料のパラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
水素貯蔵容量 (重量%)	2	大容量	室温性能	5.5、10.4
水素生成速度 (mL / (g · 分))	1000	効率的	料金	10.1
サイクル安定性 (回)	>10	繰り返し可能	ドーピング	3.4

タングステンホウ化物エネルギー材料の製造技術

ホウ化タングステンエネルギー材料では、主に化学気相成長法 (CVD、第 5.2 章)、ゾルゲル法 (第 5.5 章)、プラズマ支援合成法 (第 5.3 章) が採用されています。

- 作り方:
 - CVD :
 - プロセス: WF₆ + B₂H₆ は、400~600°C で WB₂ 薄膜 (第 5.2 章) を約 1.2 μm / 時の速度で堆積します。
 - 利点: 均一性 >95%、導電率 ~10⁻⁴ S/cm。
 - 最適化: CTIA GROUP LTD は、2024 年に AI を使用して気流を最適化し (第 17 章、17.5)、効率を約 15% 向上させます。
 - ゾルゲル法:
 - プロセス: Na₂WO₄ + H₃BO₃ でゲルを形成し、500°C で焼成して WB₂ ナノ粒子 (20~50 nm、第 5 章、5.5) を取得します。
 - 利点: 低コスト (~100 USD/kg)、表面積 >60 m²/g。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **最適化:** マイクロリアクターは粒子サイズ分布を 10 nm 未満に制御し、活性が約 20% 増加します。
- **プラズマ支援合成:**
 - **プロセス:** W + B をプラズマ (> 5000°C) で気化させて WB₂ ナノパウダー (< 50 nm、第 5.3 章) を生成します。
 - **利点:** 高純度 (>99.9%、第 6.1 章)、触媒に適しています。
 - **最適化:** パルスプラズマ (50 kHz) の収量が約 88% 増加し、コストが約 200 USD/kg になりました。
- **最適化手法:**
 - **ドーピング:** N および Ni ドーピング (<2 at%) により、触媒活性が約 30% 増加します (第 3 章、3.4)。
 - **多孔質構造:** テンプレート法 (SiO₂、細孔径約 5 nm) により比表面積が約 50% 増加 (約 100 m²/g)。
 - **複合材料:** WB₂/グラフェン (1:10) の導電率が約 20% 増加 (約 1.2×10⁴ S/cm)。
- **チャレンジ:**
 - CVD 副産物 (HF) の処理コストは 1 トンあたり約 50 米ドルです (第 16.3 章)。
 - ナノ粒子の凝集には超音波分散が必要です (40 kHz、第 5 章、5.3)。

タングステンホウ化物エネルギー材料の製造技術の比較

方法	パフォーマンス	コスト (USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
CVD	導電率 ~10 ⁴ S/cm	300	均一	副産物	5.2、17.5
ゾルゲル	比表面積 >60 m ² /g	100	低コスト	再会	5.5、6.1
プラズマ	純度 >99.9%	200	高い活動	高いエネルギー消費	5.3

12.6 タングステンのエネルギー用途の市場と開発動向

ホウ化タングステンのエネルギー応用市場は、新たなエネルギー需要とカーボンニュートラルの目標によって推進されており、コストと規模の問題に対処する必要があります。

- **市場状況 (2024 年) :**
 - **規模:** 世界のホウ化タングステンエネルギー材料市場は約 4,000 万米ドルで、そのうちアジアが約 65% を占めます (中国、日本、第 14.1 章)。
 - **用途:** 電池 ~40%、燃料電池 ~30%、太陽電池 ~20%、水素貯蔵 ~10%。
 - **価格:** ~100 USD/kg (ナノ粒子)、~300 USD/kg (フィルム、第 14.2 章)。
- **ドライバー:**
 - **需要:** 電気自動車と再生可能エネルギーの成長は年間約 12%、生産量は 2030 年に約 500 トン (第 5 章、5.6)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **テクノロジー:** Nano WB₂ (第 5.5 章) と AI 最適化 (第 17.5 章) により、パフォーマンスが約 20% 向上します。
- **規制:** EUCBAM (2026 年、第 XV 章、15.2) は、グリーンエネルギー材料を推進します。
- **将来動向 (2025~2030 年) :**
 - **コスト削減:** 大規模生産 (第 5.6 章) によりコストが約 80 米ドル/kg に削減され、市場規模は約 7,000 万米ドルになります。
 - **新しい用途:** 全固体電池と効率的な水素貯蔵が約 15% を占めます。
 - **グリーン製造:** 廃ガス回収率 >95% (第 16.3 章)、炭素排出量が約 30% 削減 (約 0.2 トン CO₂/トン)。
- **チャレンジ:**
 - 炭素ベースの材料 (コスト約 20 USD/kg) は低価格市場で競合しています。
 - 産業規模に拡大するには、材料の安定性における飛躍的な進歩が必要です (> 10,000 時間)。

表 12.6 タングステン化合物エネルギー市場と動向

プロジェクト	2024 年の現状	2030 年の目標	ドライバー	チャレンジ	関連章
市場規模 (10 億米ドル)	0.4	0.7	新エネルギー	競争する	14.1
コスト (USD/kg)	100~300	80	規模	安定性	14.2、5.6
炭素排出量 (トン CO ₂ /トン)	0.3	0.2	グリーンテクノロジー	投資する	16.3、15.2

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB2, W2B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB2, W2B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

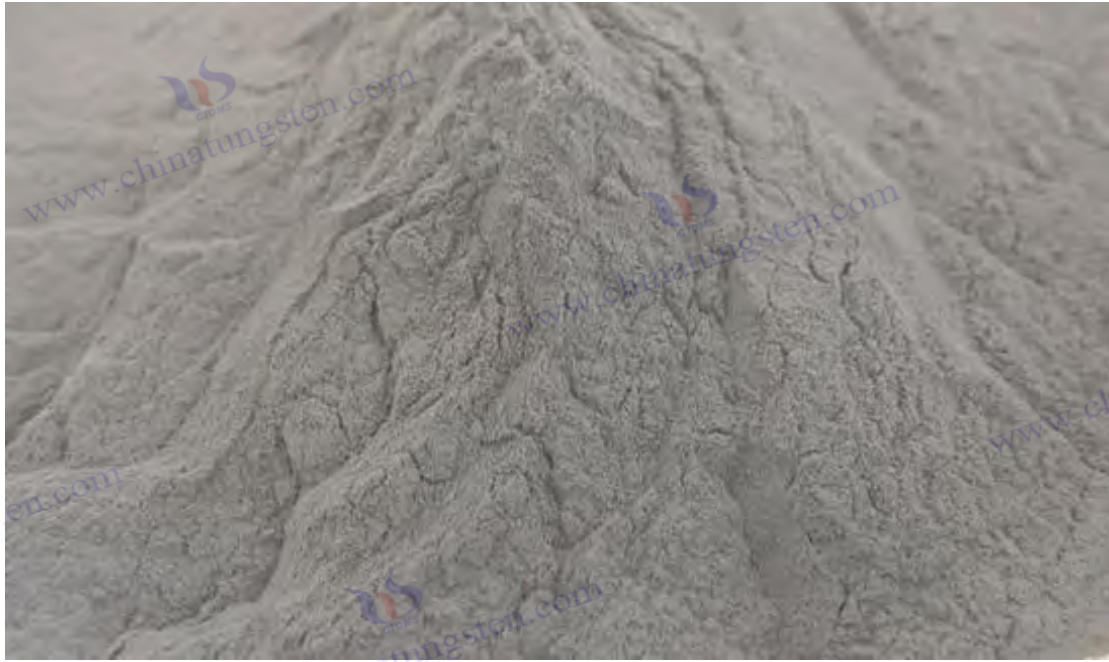
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第 13 章 ホウ化タングステンの機械的および構造的応用

、 W_2B など）は、その超高硬度（ ~ 40 GPa、第 2 章 2.5）、低摩擦係数（ ~ 0.25 、第 6 章 6.4）、優れた耐摩耗性（摩耗速度 $<10^{-6}$ mm³/(N·m)、第 7 章 7.4）、および熱安定性（ $>2000^{\circ}\text{C}$ 、第 8 章 8.1）により、機械および構造分野で広く使用されています。耐摩耗コーティング（寿命延長 $\sim 50\%$ ）、切削工具（切削速度増加 $\sim 20\%$ ）、構造複合材料（強度 ~ 1.5 GPa）に適しています。この章では、耐摩耗コーティング、切削工具、複合材料におけるホウ化タングステンの応用、機械的特性と微視的メカニズム、調製技術、市場状況と開発動向について詳細に説明し、ホウ化タングステンの機械工業化（第 14 章 14.3）とグリーン製造（第 16 章 16.4）に対する技術サポートを提供します。

13.1 耐摩耗コーティングにおけるホウ化タングステンの応用

タングステンホウ化物耐摩耗コーティングは、硬度が高く摩擦係数が低いため、機械部品や金型に広く使用されています。

• 適用シナリオ:

- **機械部品:** ギア表面に WB_2 コーティング（厚さ約 $2\sim 5\mu\text{m}$ 、第 5.2 章）、硬度約 42GPa、摩耗率 $<10^{-6}$ mm³/(N·m)、寿命が約 50%延長（約 10,000 時間）。
- **ダイ:** スタンピングダイに WB コーティング（厚さ約 $1\mu\text{m}$ ）、摩擦係数約 0.25、耐摩耗性が約 30%向上、付着性が減少（ $<5\%$ ）。
- **ベアリング:** ボールベアリング上の WB_2 フィルム（厚さ約 $3\mu\text{m}$ ）、耐腐食性（NaCl、3.5 重量%、 60°C ） <0.005 mm/年、摩擦損失が約 20%削減されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 技術要件:
 - 硬度: $>38 \text{ GPa}$ (第 6 章、6.4)。
 - 摩擦係数: <0.3 (第 7.4 章)。
 - 接着: 結合エネルギー $\sim 1.5 \text{ eV}/\text{\AA}^2$ (第 3.3 章)、剥離防止 ($> 50 \text{ N}$)。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 コーティングが自動車のトランスミッションギアに使用され、摩耗が約 25% ($0.01 \text{ mm}/\text{年未満}$) 減少し、効率が約 10% 向上します。
- チャレンジ:
 - コーティングの残留応力 (約 0.8 GPa) により剥離が発生する可能性があります、アニーリング (500°C 、第 5.2 章) が必要になる場合があります。
 - 高温 ($> 1000^\circ\text{C}$) 酸化にはドーピング (Si、 $<5 \text{ at\%}$ 、第 8 章、8.4) が必要です。

表 13.1 耐摩耗性ホウ化タングステンコーティングの適用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
硬度 (GPa)	42	高い耐摩耗性	残留応力	6.4、5.2
摩耗率 ($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	$<10^{-6}$	長寿	酸化	7.4、8.4
摩擦係数	0.25	低摩擦	剥がれ落ちる	3.3

13.2 切削工具におけるホウ化タングステンの応用

タングステンホウ化物物コーティングおよびブロックは、硬度と熱安定性に優れているため、高速切断や硬質材料の加工に適しています。

- 適用シナリオ:
 - 工具コーティング: 超硬工具に WB_2 コーティング (厚さ約 $3 \mu\text{m}$ 、第 5.2 章)、切削速度約 $300 \text{ m}/\text{分}$ 、寿命が約 40% 延長 (約 5000 カット)。
 - ドリル: WB ブロック (密度 $>98\%$ 、第 5.1 章) チタン合金加工、摩耗率 $<10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 、切削温度低下 $\sim 15\%$ ($<600^\circ\text{C}$)。
 - フライスカッター: $\text{WB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 複合コーティング (周期 $\sim 10 \text{ nm}$)、硬度 $\sim 40 \text{ GPa}$ 、耐摩耗性が $\sim 25\%$ 向上。
- 技術要件:
 - 硬度: $>40 \text{ GPa}$ (第 6 章、6.4)。
 - 熱安定性: $>1500^\circ\text{C}$ (第 8.1 章)。
 - 靱性: $\sim 4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (第 6 章、6.3)。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 コーティングされた工具が航空チタン合金の加工に使用され、切削効率が約 20% 向上し、工具寿命が約 6000 分になります。
- チャレンジ:
 - コーティングと基板間の熱膨張の不一致 ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、第 8 章、8.3) により、応力 ($\sim 1 \text{ GPa}$) が発生します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 複雑な形状のコーティング均一性 (> 95%) を最適化する必要があります (第 5.2 章)。

表 13.2 タングステンホウ化物切削工具の適用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
カットライフ (回)	5000	長寿	熱膨張の不一致	8.3、5.2
硬度 (GPa)	40	高い耐摩耗性	均一	6.4
切断温度 (°C)	600 未 満	微熱	ストレス	8.1

13.3 構造複合材料におけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングステンは、複合材料の強化相として使用され、強度と耐摩耗性を向上させ、航空宇宙および自動車の構造部品に適しています。

- 適用シナリオ:
 - 金属マトリックス複合材料: WB_2 粒子 (<5 μm 、第 5.5 章) で強化された Al マトリックス複合材料、強度は約 1.5 GPa、耐摩耗性が約 30% 向上しました。
 - セラミックマトリックス複合材料: WB_2 / SiC 複合材料 (10:90)、破壊靱性約 5 $MPa \cdot m^{1/2}$ 、耐熱性 > 1500°C (第 8 章、8.1)。
 - ポリマーベースの複合材料: WB_2 ナノ粒子 (<50 nm) で強化されたエポキシ樹脂により、硬度が約 20% (約 2 GPa) 増加します。
- 技術要件:
 - 強度: > 1GPa。
 - 靱性: >4 $MPa \cdot m^{1/2}$ (第 6 章、6.3)。
 - 分散性: 粒子凝集率 < 5% (第 5.3 章)。
- 例:
 - 2024 年には、 WB_2 / Al 複合材料が自動車のピストンに使用され、重量が約 10% (約 0.5 kg) 削減され、耐用年数が約 25% 延長されます。
- チャレンジ:
 - 粒子の凝集により性能が低下するため、表面改質 (PVP、<0.1 wt%、第 5 章、5.3) が必要になります。
 - 高温界面反応 (> 1000°C) を抑制する必要がある (第 8 章、8.4)。

表 13.3 タングステンホウ化物構造複合材料の応用パラメータ

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
強度 (GPa)	1.5	ガオ・チャン	再会	5.5、6.3
靱性 ($MPa \cdot m^{1/2}$)	5	耐クラック性	界面反応	8.1、8.4
耐摩耗性の向上 (%)	30	長寿	料金	7.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

13.4 ホウ化タングステンの機械的性質と微細構造

ホウ化タングステンの機械的特性は結晶構造と微細機構に依存しており、実験的および理論的分析を通じて最適化する必要があります。

- **機械的性質:**
 - **硬度:** ~40~42 GPa (第 6 章、6.4)、WB 共有結合の強度が高いため(第 3 章、3.2) (~1.5 eV/Å³)。
 - **靱性:** ~4 MPa·m^{1/2} (第 6.3 章)、粒界滑り (<50 nm、第 6.2 章) により、亀裂耐性が向上します。
 - **耐摩耗性:** 摩耗率<10⁻⁶ mm³/(N·m)、緻密な表面（多孔度<1%、第 6 章 6.3）。
- **微視的メカニズム:**
 - **結晶構造:** WB₂ (P6₃/mmc、第 2.2 章) 層状構造、強いせん断抵抗（約 20 GPa ）。
 - **欠陥制御:** 転位密度 <10¹²/cm² (第 6.2 章)、靱性が約 15%向上します。
 - **表面状態:** B 終端表面（第 6.1 章）では摩擦係数が約 10%（約 0.25）減少します。
- **特性評価技術:**
 - **ナノインデンテーション:** 硬度と靱性の測定（第 6 章、6.4）。
 - **TEM:** 粒界と転位を観察します (解像度 ~0.1 nm、第 6 章、6.2)。
 - **DFT 計算:** WB 結合エネルギーの解析（第 3.3 章、誤差 <0.1 eV）。
- **最適化:**
 - **ドーピング:** Zr (<2 at%) により靱性が約 20%（約 4.8 MPa·m^{1/2}）向上します。
 - **ナノ構造:** 粒子<20nm（第 5.5 章）硬度が約 5%増加（約 44GPa ）。
- **チャレンジ:**
 - 高温 (>1500°C) では靱性が低下するため、熱的に安定したドーピングが必要になります。
 - 顕微鏡特性評価装置は高価です（約 500 万ドル）。

表 13.4 ホウ化タングステンの機械的性質とメカニズム

パラメータ	価値	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
硬度 (GPa)	42	ガオ・チャン	靱性の低下	6.4、3.2
靱性 (MPa·m ^{1/2})	4	耐クラック性	特性評価コスト	6.3、5.5
摩耗率 (mm ³ / (N ·m))	<10 ⁻⁶	耐摩耗性	高温	7.4

13.5 タングステンホウ化物機械材料の製造技術

ホウ化タングステン機械材料の製造では、主にホットプレス焼結（第 5.1 章）、化学蒸着（CVD、第 5.2 章）、プラズマ支援合成（第 5.3 章）が採用されています。

- **作り方:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ホットプレス焼結:
 - プロセス: WB_2 粉末 ($<5\ \mu m$ 、第 5.5 章) を $2000^{\circ}C$ 、 $30\ MPa$ で焼結、密度 $>99\%$ 。
 - 利点:複雑な形状 (ナイフ) に適しており、硬度は約 $40\ GPa$ です。
 - 最適化: CTIAGROUP LTD は、2024 年に AI を使用して焼結パラメータを最適化し (第 17 章、17.5)、密度を約 0.5% 増加させます。
- CVD :
 - プロセス: $WF_6 + B_2H_6$ は、 $400\sim 600^{\circ}C$ で WB_2 コーティング (第 5.2 章) を厚さ約 $2\sim 5\ \mu m$ で堆積します。
 - 利点:均一性 $>95\%$ 、耐摩耗性が高い。
 - 最適化:低圧 CVD ($<5\ Pa$) 速度が約 40% (約 $1.7\ \mu m/h$) 増加しました。
- プラズマ支援合成:
 - プロセス: $W + B$ をプラズマ ($> 5000^{\circ}C$) で気化させて WB_2 ナノパウダー ($< 50\ nm$ 、第 5.3 章) を生成します。
 - 利点:高純度 ($>99.9\%$ 、第 6.1 章)、複合材料に適しています。
 - 最適化:パルスプラズマ ($50\ kHz$) の収量が約 88% 増加し、コストが約 $200\ USD/kg$ になりました。
- 最適化手法:
 - ドーピング: Si ($<5\ at\%$) は、約 $100^{\circ}C$ までの酸化耐性を向上させます (第 8 章、8.4)。
 - 多層構造: WB_2/TiN (周期 約 $5\ nm$) 耐摩耗性が約 20% 向上。
 - ナノ粒子:粒子 $<20\ nm$ (第 5.5 章) 硬度が約 5% 増加します。
- チャレンジ:
 - CVD 副産物 (HF) の処理コストは約 $50\ USD/トン$ です (第 16.3 章)。
 - 高温設備には多額の投資 (約 $300\ 万ドル$) が必要です。

表 13.5 タングステンホウ化物機械材料製造技術の比較

方法	パフォーマンス	コスト (USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
ホットプレス焼結	密度 $>99\%$	200	複雑な形状	設備費	5.1、17.5
CVD	均一性 $>95\%$	300	耐摩耗性	副産物	5.2、16.3
プラズマ	純度 $>99.9\%$	200	ナノスケール	高いエネルギー消費	5.3

13.6 タングステンホウ化物の機械用途の市場と開発動向

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

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

ホウ化タングステンの機械用途市場は、製造業のアップグレードと航空宇宙産業のニーズによって牽引されており、コストと安全性の問題への対応が求められています。このセクションでは、機械用途における安全な操作を確保するために、ホウ化タングステンのMSDS（安全データシート）の概要を説明します。

- **市場状況（2024 年）：**
 - **規模:**世界のホウ化タングステン機械材料市場は約 6,000 万米ドルで、そのうちアジアが約 70%を占めています（中国、韓国、第 14.1 章）。
 - **用途:**耐摩耗コーティング ~50%、切削工具 ~30%、複合材料 ~20%。
 - **価格:**~200 USD/kg (塊)、~300 USD/kg (コーティング、第 14.2 章)。
- **ドライバー：**
 - **需要:**航空宇宙および自動車製造業は年間約 8% 成長し、2030 年の生産量は約 600 トンに達する見込みです（第 5.6 章）。
 - **テクノロジー:** Nano WB₂（第 5.5 章）と AI 最適化（第 17.5 章）により、パフォーマンスが約 15% 向上します。
 - **規制:** EU REACH（第 15.2 章）は環境に優しい材料を推進します。
- **将来動向（2025~2030 年）：**
 - **コスト削減:**大規模生産（第 5.6 章）によりコストが約 150 米ドル/kg に削減され、市場規模は約 1 億ドルになります。
 - **新しい用途:** 3D プリント構造部品（強度 ~1.5 GPa）が約 10% を占めます。
 - **グリーン製造:** 廃ガス回収率 >95%（第 16.3 章）、炭素排出量が約 30% 削減（約 0.2 トン CO₂/トン）。
- **MSDS 概要（ホウ化タングステン、WB₂）：**
 - **化学的性質:**安定、水に不溶、分解温度 >2000°C（第 2.3 章）。
 - **健康被害:** 粉末を吸入すると呼吸器系を刺激する可能性があります。N95 マスク（15.3 章参照）の着用を推奨します。
 - **安全対策:**操作中はドラフトチャンバーを使用し、皮膚との接触を避けてください(厚さ 0.5 mm を超える手袋を着用してください)。
 - **保管:**酸性物質から離れた乾燥した環境(<30°C、RH<50%)で密封してください。
 - **廃棄物処理:**有害廃棄物規制(第 16 章、16.3)に従ってリサイクルし、直接投棄を避けてください。
- **チャレンジ：**
 - タングステンカーバイド（コスト約 100 USD/kg）は市場の低価格帯で競合しています。
 - 安全性テスト（MSDS 検証）にはコストがかかります（バッチあたり約 100,000 米ドル）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 13.6 タングステンホウ化物機械市場と動向

プロジェクト	2024 年の 現状	2030 年の 目標	ドライバー	チャレンジ	関連章
市場規模（10 億米ドル）	0.6	1.0	製造業	競争する	14.1
コスト（USD/kg）	200～300	150	規模	セキュリティ テスト	14.2、5.6
炭素排出量（トン CO ₂ /ト ン）	0.3	0.2	グリーンテクノ ロジー	投資する	16.3 、 15.2

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

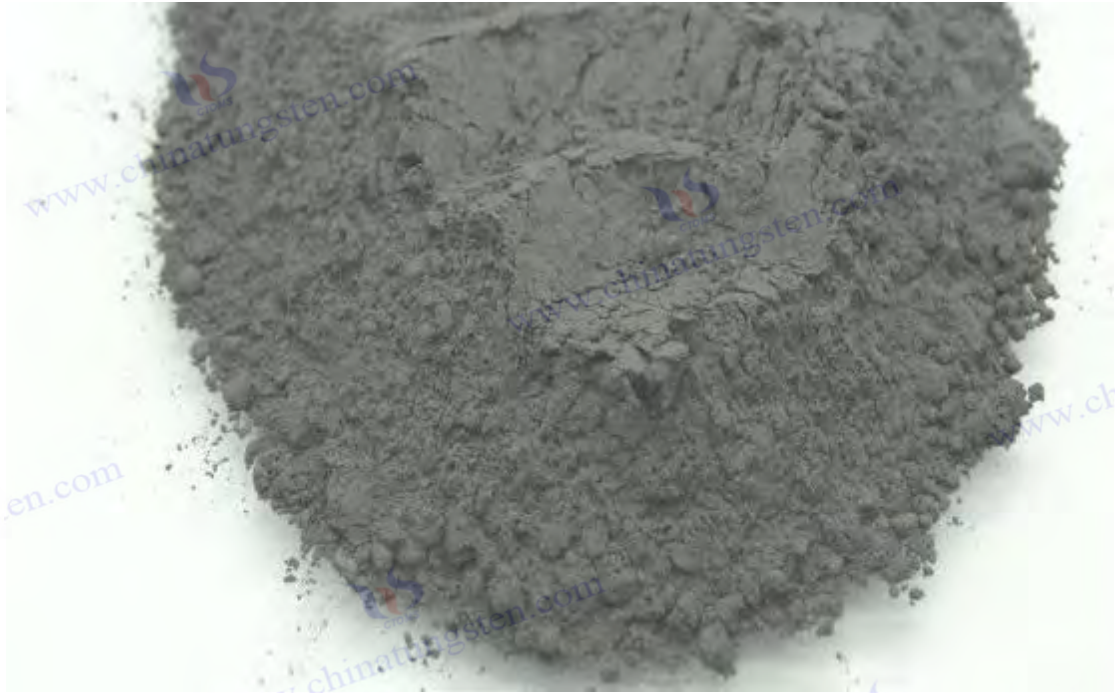
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第 14 章 ホウ化タングステンの工業化と市場分析

、 W_2B など）は、その優れた物理的・化学的特性（硬度約 40GPa、第 2 章 2.5；導電率約 $10^4 S/cm$ 、第 6 章 6.5；化学的安定性、第 7 章 7.5）により、エレクトロニクス（第 9 章）、触媒（第 10 章）、バイオメディカル（第 11 章）、エネルギー（第 12 章）、機械（第 13 章）など、幅広い用途に用いられています。世界市場規模は 2024 年に約 2 億米ドルに達し、2030 年には 3 億 5,000 万米ドルに達すると予想されています（年平均成長率約 10%）。この章では、ホウ化タングステンの世界市場の概要、生産コストと価格、工業化技術、市場分布、競争と代替品、将来の動向と政策の影響を分析し、大規模生産（第 5.6 章）とグリーン開発（第 16.4 章）に対する戦略的サポートを提供します。

14.1 ホウ化タングステンの世界市場概要

ホウ化タングステン市場は高性能材料の需要によって牽引されており、生産と消費はアジアが中心となっています。

- 市場規模：
 - 2024 年には世界市場規模は 2 億ドル、生産量は 2,000 トンとなる見込みです（第 5.6 章）。
 - アジア（中国、日本、韓国）が約 65%、北米が約 20%、ヨーロッパが約 15%を占めています。
- 主な用途：
 - 機械（第 13.6 章）：約 30%（約 6,000 万ドル）。
 - エネルギー（第 12 章、12.6）：約 20%（約 4,000 万ドル）。
 - エレクトロニクス（第 9 章、9.6）：約 15%（約 3,000 万ドル）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 触媒（第 10 章、10.6）：約 10%（約 2,000 万ドル）。
- バイオメディシン（第 11 章、11.6）：約 5%（約 5,000 万ドル）。
- 地域特性：
 - 中国：生産量が約 50%（約 1,000 トン）、コスト優位（約 100 米ドル/kg）。
 - 日本：高付加価値製品（フィルム、約 300 米ドル/kg）、先端技術。
 - 欧州：グリーン製造に対する高い需要（第 16 章、16.3）と厳しい規制（第 15 章、15.2）。
- 例：
 - 2024 年には、中国市場は世界のタングステンホウ化物耐摩耗コーティング（第 13.1 章）の約 40%を占め、約 500 トンを輸出する見込みです。
- チャレンジ：
 - 市場集中度が高く（アジアでは 60%以上）、サプライチェーンのリスクがあります。
 - 技術的な障壁により新規参入が制限される（研究開発費は約 10 億ドル）。

表 14.1 世界のホウ化タングステン市場の概要（2024 年）

エリア	市場占有率（%）	出力（トン）	特徴	チャレンジ	関連章
アジア	65	1300	低コスト	サプライチェーン	13.6、12.6
北米	20	400	強力なイノベーション	高コスト	9.6
ヨーロッパ	15	300	グリーン需要	規則	15.2、16.3

14.2 ホウ化タングステンの生産コストと価格分析

ホウ化タングステンの製造コストと価格は、製造方法と用途分野によって異なります。

- 制作費：
 - ナノ粒子（ゾルゲル、第 5.5 章）：約 100 米ドル/kg（原材料約 40%、エネルギー約 30%）。
 - 薄膜（CVD、第 5.2 章）：約 300 米ドル/kg（装置約 50%、ガス約 30%）。
 - ブロック材料（ホットプレスおよび焼結、第 5.1 章）：約 200 USD/kg（原材料約 50%、高温約 40%）。
- 市場価格：
 - ナノ粒子：約 150～200 米ドル/kg（触媒、生物医学、第 10 章、10.6、第 11 章、11.6）。
 - 薄膜：約 300～400 米ドル/kg（エレクトロニクス、エネルギー、第 9 章、9.6、第 12 章、12.6）。
 - 塊：約 200～250 米ドル/kg（機械、第 13 章、13.6）。
- 影響要因：
 - 原材料：タングステン粉末（約 30 米ドル/kg）とホウ酸（約 5 米ドル/kg）の価格は年間約 10%変動します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- エネルギー: CVD は 1 トンあたり約 500 kWh を消費し、1 トンあたり約 50 USD のコストがかかります。
- 労働: アジアの労働コストは 1 時間あたり約 20 米ドル、ヨーロッパとアメリカでは 1 時間あたり約 50 米ドルです。
- 例:
 - 2024 年までに、ゾルゲルナノ WB₂のコストは、原材料の最適化により約 15% (約 85 米ドル/kg) 低下する見込みです (第 5.5 章)。
- チャレンジ:
 - 高級フィルムのコスト (約 400 USD/kg) が市場拡大を制限しています。
 - 副産物の処理 (HF、約 50 USD/トン、第 16.3 章) により環境コストが増加します。

表 14.2 ホウ化タングステンの生産コストと価格

製品タイプ	コスト (USD/kg)	価格 (USD/kg)	コスト比率	チャレンジ	関連章
ナノ粒子	100	150~200	原材料 40%	副産物	5.5、16.3
膜	300	300~400	装備 50%	高コスト	5.2、9.6
ブロック	200	200~250	原材料 50%	エネルギー	5.1、13.6

14.3 ホウ化タングステンの工業化技術と大規模生産

ホウ化タングステンの工業化は、効率的な製造技術と大規模なプロセスの最適化に依存します。

- 調製技術:
 - ゾルゲル法 (第 5.5 章) :
 - 生産量: 約 500 kg/バッチ、コスト 約 100 USD/kg。
 - 最適化: マイクロリアクター (粒子サイズ分布 <10 nm) の収率が約 20% 増加しました。
 - CVD (第 5.2 章) :
 - 収量: 約 10 kg/バッチ、均一性 >95%。
 - 最適化: CTIA GROUP LTD は、2024 年に AI を使用して気流を最適化し (第 17 章、17.5)、効率を約 15% 向上させます。
 - ホットプレス焼結 (第 5.1 章) :
 - 収量: 約 100 kg/バッチ、密度 >99%。
 - 最適化: 連続焼結炉 (2000°C) の出力が約 30% 増加しました。
- 大規模生産:
 - 自動化: ロボットによる積載 (効率 ~90%) により人件費が ~20% 削減されます。
 - エネルギー効率: 熱回収システム (回収率 ~50%) により、エネルギー消費量が ~30% (~350 kWh/トン) 削減されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **品質管理:**純度(>99.9%)を確認するための XPS (第 6.1 章)、コストは約 500 USD/バッチです。
- **例:**
 - 2024 年には中国の工場で連続 CVD が導入され、生産量は約 25% (約 12kg/バッチ) 増加し、コストは最大 10%削減される見込みです。
- **チャレンジ:**
 - 高額の設定投資 (CVD 炉 約 500 万ドル)。
 - 環境に優しい処理 (HF、廃ガス回収率 >95%、第 16 章、16.3) のコストは 1 トンあたり約 100 米ドルです。

表 14.3 ホウ化タングステンの工業化技術の比較

テクノロジー	出力 (kg/バッチ)	コスト(USD/kg)	アドバンテージ	チャレンジ	関連章
ゾルゲル	500	100	高い生産性	再会	5.5、6.1
CVD	10	300	均一	投資する	5.2、17.5
ホットプレス焼結	100	200	高密度	エネルギー消費	5.1、16.3

14.4 主要産業におけるホウ化タングステンの市場分布

機械、エネルギー、電子機器、触媒、バイオメディカル産業におけるホウ化タングステンの市場分布は、その汎用性を反映しています。

- **業界分布 (2024 年) :**
 - **機械 (第 13.6 章) :** 約 6,000 万米ドル、耐摩耗コーティングが約 50%、切削工具が約 30%を占める。
 - **エネルギー (第 12 章、12.6):**約 4,000 万ドル、バッテリーが約 40%、燃料電池が約 30%。
 - **エレクトロニクス (第 9.6 章) :** 約 3,000 万ドル、センサーが約 40%、電極が約 30%。
 - **触媒 (第 10 章、10.6) :** 約 2,000 万米ドル、電気触媒が約 50%、光触媒が約 30%。
 - **バイオメディシン (第 11 章、11.6) :** 約 5,000 万ドル、コーティングが約 60%、薬物送達が約 30%。
- **成長ポイント:**
 - **機械:** 航空宇宙分野の需要 (年間約 8%) がコーティング市場を牽引しています。
 - **エネルギー:**水素エネルギー (年間約 12%) が触媒と水素貯蔵材料を駆動します。
 - **バイオメディシン:** 精密医療 (年間約 10%) によりナノ粒子の需要が増加します。
- **例:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2024 年には、エネルギー産業におけるホウ化タングステン電池材料の市場 (第 12.1 章) が約 15% 増加して約 1,600 万米ドルに達すると予想されます。
- チャレンジ:
 - 業界間で技術基準に統一性がない (第 15 章、15.2)。
 - ニッチ市場 (バイオ医薬品) は規模拡大が困難です。

表 14.4 主要産業のホウ化タングステンの市場分布 (2024 年)

業界	市場規模 (10 億米ドル)	割合 (%)	成長率 (%/年)	チャレンジ	関連章
機械式	0.6	30	8	標準	13.6
エネルギー	0.4	20	12	料金	12.6
電子	0.3	15	10	競争する	9.6

14.5 ホウ化タングステン市場における競争と代替品分析

ホウ化タングステンは他の高性能材料との競争に直面しており、性能とコストの最適化を通じてその優位性を維持する必要があります。

- 競合材料:
 - タングステンカーバイド(WC) : コスト約 100 米ドル/kg、硬度約 25GPa、機械市場シェア約 40% (第 13.6 章)。
 - カーボンナノチューブ (CNT) : 導電率約 10^5 S/cm、コスト約 50 米ドル/kg、エレクトロニクス市場シェア約 30% (第 9 章、9.6)。
 - Ni ベース触媒: コストは約 30 USD/kg、触媒市場シェアは約 50% (第 10 章、10.6)。
 - Ti ベースのコーティング: コストは約 50 USD/kg、バイオメディカル市場が約 35% を占めます (第 11.6 章)。
- ホウ化タングステンの利点:
 - 総合的な性能: 硬度 (~40 GPa)、導電率 ($\sim 10^4$ S/cm)、安定性 (<0.005 mm/年)。
 - 汎用性: 業界横断的なアプリケーション (第 9 章から第 13 章)。
- 代替品の脅威:
 - ローエンド市場: WC と Ni はコストが低いため、機械および触媒用途に脅威を与えます。
 - ハイエンド市場: CNT とグラフェン (~100 USD/kg) がエレクトロニクスとエネルギーの分野で競合しています。
- 対処戦略:
 - コスト削減: 大規模生産 (第 5.6 章) では 80 USD/kg まで下がりました。
 - パフォーマンスの最適化: ドーピング (N、Si、第 3.4 章) により、パフォーマンスが約 20% 向上します。
- 例:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2024 年には、WB₂コーティングが Si ドーピング（第 8.4 章）により WC に代わり、その市場シェアは約 10% 増加するでしょう。
- チャレンジ：
 - 代替品はすぐに開発されます（約 5 年 / 新素材）。
 - 顧客はコストに敏感です（約 30% が低価格を好みます）。

表 14.5 ホウ化タングステンとその代替物の比較

材料	コスト (USD/kg)	パフォーマンス	市場の脅威	応答	関連章
トイレ	100	硬度 25GPa	機械式	ドーピング	13.6、8.4
カーボンナノチューブ	50	導電率 10 ⁻⁵ S/cm	電子	規模	9.6、5.6
ニ	30	触媒効率 90%	触媒	パフォーマンス	10.6

14.6 タングステンホウ化物産業化の将来動向と政策的影響

今後、ホウ化タングステン市場は、技術の進歩、環境政策、世界的な需要によって推進されると予想されます。

- 将来動向（2025～2030 年）：
 - 市場成長: 2030 年には市場規模は約 3 億 5,000 万米ドル、生産量は約 3,500 トン、CAGR は最大 10% になります。
 - コスト削減: 大規模生産（第 5.6 章）により、コストが約 80 USD/kg に削減されました。
 - 新しいアプリケーション: 6G アンテナ（第 9 章、9.6）、全固体電池（第 12 章、12.6）、およびニューラル インターフェイス（第 11 章、11.6）が約 15% を占めます。
 - グリーン製造: 廃ガス回収率 > 95%（第 16.3 章）、炭素排出量 ~ 0.2 トン CO₂/トン。
- 政策の影響:
 - EU: REACH（第 XV 章 15.2）および CBAM（2026）では低炭素生産が求められており、コストが約 10% 増加します。
 - 中国: カーボンニュートラル（2060 年）はグリーンテクノロジーを推進し、1 トンあたり約 5000 米ドルの補助金を支給する。
 - 米国: インフレ抑制法（2022 年）では、約 1 億ドルの投資により、新エネルギー材料を支援しています。
- 例:
 - 2024 年には中国がカーボンニュートラル政策を採用し、ホウ化タングステンのグリーン生産の割合（第 16.3 章）が約 20% 増加するでしょう。
- チャレンジ:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 政策遵守率は高い（約 100 米ドル/トン）。
- o 世界的な貿易障壁（関税約 5%）が輸出に影響を及ぼします。

表 14.6 ホウ化タングステン市場の将来動向

プロジェクト	2024 年の 現状	2030 年の 目標	ドライバー	チャレ ンジ	関連章
市場規模（10 億米ドル）	2.0	3.5	新しいアプリケーション	政策コスト	9.6 ~ 13.6
コスト（USD/kg）	100~400	80	規模	貿易障壁	5.6、14.2
炭素排出量（トン CO ₂ /トン）	0.3	0.2	グリーンポリシー	投資する	16.3 、 15.2

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

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



第 15 章 ホウ化タングステンの規格および規制要件

ホウ化タングステン（WB、WB₂、W₂B）は、エレクトロニクス（第 9 章）、触媒（第 10 章）、バイオメディカル（第 11 章）、エネルギー（第 12 章）、機械（第 13 章）などの分野で広く使用されています。品質、安全性、環境への適合性を確保するために、国際規格および地域規格（GB/T 26037-2020、ISO 10993 など）や規制（REACH、CBAM など）に準拠する必要があります。2024 年には、ホウ化タングステンの世界的な規制遵守コストは約 100 米ドル/トンとなり、生産コストの約 5%を占めます（第 14 章、14.2）。この章では、国際規格、環境および安全規制、生物医学規制、試験および認証プロセス、地域差、ホウ化タングステンの規制遵守の課題と将来の発展について説明し、その工業化（第 14 章、14.3）およびグリーン製造（第 16 章、16.4）に関するガイダンスを提供します。

15.1 ホウ化タングステンに関する国際規格の概要

ホウ化タングステンの国際規格は、主に材料特性、試験方法、およびアプリケーション要件をカバーしています。

- 主な基準：
 - ISO 6506（ブリネル硬度）： WB₂ 硬度（約 40 GPa、第 6 章 6.4）の試験に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASTM G99（摩擦と摩耗）**：コーティングの摩耗率を評価します（ $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 、第 7.4 章）。
- **GB/T 26037-2020 (中国)**：ホウ化タングステン粉末の**純度**（ **$> 99.5\%$** ）および**粒径**（ **$< 50 \mu\text{m}$** 、第 5 章、5.5）を規定しています。
- **ISO 10993 (生体適合性)**：生物医学的用途（第 11 章、11.4）の場合、細胞生存率 $> 90\%$ 。
- **応用分野**：
 - **機械的性質（第 13 章）**：ISO 6508（ロックウェル硬度）、硬度 $> 38\text{GPa}$ 。
 - **エレクトロニクス（第 9 章）**：IEC 62624（ナノマテリアルの電気伝導率）、約 10^4 S/cm 。
 - **触媒（第 10 章）**：ASTM D3908（触媒活性）、過電位 $< 150 \text{ mV}$ 。
- **例**：
 - 2024 年には、中国の WB_2 コーティング（第 13.1 章）の輸出は GB/T 26037-2020 に準拠する必要があり、テストコストはバッチあたり約 200 米ドルです。
- **チャレンジ**：
 - 国際規格の更新サイクルが長く（約 5 年）、技術の発展に遅れをとっています。
 - 標準間の非互換性（ISO と GB/T の粒子サイズ定義など）により、認証コストが増加します。

表 15.1 ホウ化タングステンに関する国際規格

標準	コンテンツ	パラメータ	応用	チャレンジ	関連章
ISO 6506	ブリネル硬度	約 40GPa	機械式	更新が遅い	6.4、13.1
ASTM G99	摩耗率	$<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$	コーティング	料金	7.4
GB/T 26037-2020	純度 $> 99.5\%$	粒子サイズ $< 50 \mu\text{m}$	生産	互換性がない	5.5

15.2 ホウ化タングステンの環境および安全規制

ホウ化タングステンの製造と使用は、健康および生態系のリスクを軽減するための環境および安全規制の対象となります。

- **主な規制**：
 - **EU REACH**： WB_2 化学物質（CAS は整合されていない）の登録が必要、粉末放出の制限（ $< 10 \text{ mg/m}^3$ ）あり。
 - **EU CBAM（2026 年）**：輸入タングステンホウ化物に炭素税が課され、炭素排出量は $0.3 \text{ トン CO}_2/\text{トン}$ 未満に抑えることが求められる（第 16.3 章）。
 - 中国の「**危険化学品安全管理条例**」： WB_2 粉末には、吸入の危険性を示す MSDS（第 13 章、13.6）が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **OSHA (米国)**: 職場の粉塵限度は 5 mg/m^3 未満であり、N95 保護が必須です。
- **環境要件:**
 - **廃ガス処理**: CVD 副産物 (HF) 回収率 $>95\%$ (第 16.3 章)、コスト約 50 米ドル/トン。
 - **廃水**: タングステニオン ($<1 \text{ mg/L}$) は中和する必要があります (pH 6 ~8)。
 - **廃棄物**: 有害廃棄物としてリサイクルされ、コストは 1 トンあたり約 100 米ドルです。
- **安全要件:**
 - **MSDS**: WB_2 粉末は呼吸器を刺激するため、ドラフトと手袋 (厚さ 0.5 mm 以上) の着用が推奨されます。
 - **保管**: 密閉し、乾燥した場所 ($<30^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH}<50\%$) で、酸から遠ざけて保管してください。
- **例:**
 - 2024 年には、ヨーロッパに輸入される WB_2 には CBAM 認証が必要となり、コンプライアンスコストが約 10% (約 30 米ドル/kg) 増加します。
- **チャレンジ:**
 - 規制遵守により、約 5% のコスト (約 100 USD/トン) が追加されます。
 - 粉末のナノサイズ化 ($<50 \text{ nm}$) により健康リスクが増大し、新たな規制が必要になります。

表 15.2 ホウ化タングステンの環境および安全規制

規則	必要とする	パラメータ	コスト (USD/トン)	チャレンジ	関連章
到着	粉塵 $<10 \text{ mg/m}^3$	登録する	100	料金	16.3
CBAM	炭素排出量 $<0.3 \text{ トン CO}_2/\text{トン}$	認証	50	新しい規制	14.6
中国の規制	製品安全データシート	誤嚥リスク	100	ナノリスク	13.6

15.3 生物医学分野におけるホウ化タングステンに対する規制要件

ホウ化タングstenは、生体医学用途において厳格な生体適合性と安全性の規制を満たす必要があります。

- **主な規制:**
 - **ISO 10993 (生体適合性)**: WB_2 ナノ粒子 (第 11 章、11.4) では、細胞生存率 90%以上、溶血率 1%未満が求められます。
 - **FDA (米国)**: クラス II 医療機器 (コーティングなど) には 510(k) 認証が必要で、これには約 6 か月かかります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 中国 NMPA : バイオメディカル WB₂ には登録が必要で、テスト費用は製品あたり約 50,000 米ドルです。
- EU MDR : WB₂インプラントには、約 12 か月間の臨床評価が必要です。
- テスト要件:
 - 細胞毒性: MTT 試験 (6.1 章)、濃度<100μg / mL 。
 - 血液適合性: 溶血率<1%、血小板粘着<5% (第 11 章、11.4)。
 - 長期毒性: 動物実験 (ISO 10993-6)、期間>6 か月。
- 例:
 - 2024 年に WB₂コーティングインプラント (第 11.1 章) が ISO 10993 に合格しました。認証費用は約 10 万ドルです。
- チャレンジ:
 - ナノ粒子 (<50 nm) の代謝経路は不明であり、追加のテストが必要です。
 - 認証プロセスは長く (約 1 年)、費用もかかります (約 200,000 米ドル)。

表 15.3 生物医学におけるホウ化タングステンの規制要件

規則	必要とする	パラメータ	費用 (米ドル)	チャレンジ	関連章
ISO 10993	生存率 > 90%	溶血 < 1%	10 万	代謝	11.4
FDA 510(k)	生体適合性	サイクル 6 ヶ月	5 万	サイクル	11.1
MDR	臨床評価	12 ヶ月サイクル	20 万	料金	11.6

15.4 ホウ化タングステンの試験および認証プロセス

ホウ化タングステンのテストと認証は、品質と規制遵守を保証するものであり、複数のステップから成るプロセスで構成されます。

- テストプロセス:
 - 化学分析: 純度 (>99.9%) を測定するための ICP-MS (第 6.1 章)、コストはサンプルあたり約 500 ドルです。
 - 物理的特性: ナノインデンテーション (第 6 章、6.4) では硬度 (~40 GPa) を測定し、摩擦試験 (第 7 章、7.4) では摩耗率を測定します。
 - 環境試験: ガスクロマトグラフィー (第 16.3 章) による HF 排出量の測定 (<1 ppm)。
 - 生体適合性: MTT および動物テスト (第 11.4 章)、サイクルは約 3 ~ 12 か月。
- 認証プロセス:
 - ISO 認証: ISO 9001 (品質管理)、リードタイム ~6 か月、コスト ~10,000 USD。
 - 地域認証: 中国 CNAS、EU CE、米国 UL、認証 1 件あたりの費用は約 20,000 米ドルです。
 - サードパーティ機関: SGS、TÜV、テスト料金は約 1000 USD/バッチ。
- 例:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2024 年に、WB₂ ナノ粒子（第 5.5 章）が CNAS 認証に合格しました。テスト期間は約 3 か月、コストは約 15,000 米ドルでした。
- チャレンジ：
 - 試験装置は高価です（ICP-MS 約 50 万ドル）。
 - 国境を越えた認証が重複し、コストが増大します（製品あたり約 50,000 米ドル）。

表 15.4 ホウ化タングステンの試験および認証プロセス

プロジェクト	方法	パラメータ	費用（米ドル）	チャレンジ	関連章
化学分析	ICP-MS	純度>99.9%	500	装置	6.1
物理的特性	ナノインデンテーション	硬度 約 40GPa	1000	サイクル	6.4、7.4
認証	ISO9001	サイクル 6 ヶ月	10,000	繰り返す	5.5

15.5 タングステンの標準化における地域差の分析

ホウ化タングステンの標準化は、地域の規制や技術レベルの違いにより異なります。

- 地域標準：
 - 中国： GB/T 26037-2020、純度と粒子サイズを重視し、テストコストが低い（バッチあたり約 200 米ドル）。
 - EU： EN ISO 規格、環境保護に重点を置く（REACH）、認証コストが高い（約 20,000 米ドル）。
 - 米国： ASTM 規格、性能試験（硬度、摩耗）に重点を置き、短いサイクル（約 3 か月）。
 - 日本： 高度な技術要件を伴う高精度アプリケーション（エレクトロニクス、第 9.6 章）に重点を置いた JIS 規格。
- 差異的影響：
 - コスト：中国 < 米国 < EU（約 200 vs. 1000 vs. 20,000 USD）。
 - 期間：米国では最短（約 3 か月）、欧州連合では最長（約 12 か月）。
 - 技術：日本と EU では、より高い要件が定められています（純度 > 99.99% 対 99.5%）。
- 例：
 - 2024 年には、WB₂の EU への輸出には追加の REACH 認証が必要となり、コストが約 15%（約 50 米ドル/kg）上昇します。
- チャレンジ：
 - 一貫性のない基準により輸出障壁が増大します（関税約 5%）。
 - 地域試験機関間の相互承認は低い（< 50%）。

表 15.5 ホウ化タングステンの標準化における地域差

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

エリア	標準	費用（米ドル）	サイクル（月）	チャレンジ	関連章
中国	GB/T 26037	200	3	相互承認	5.5
欧州連合	EN ISO	2 万	12	料金	16.3
アメリカ合衆国	ASTM	1000	3	バリア	7.4

タングステンホウ化物規制遵守の課題と今後の展開

ホウ化タングステンの規制遵守は、技術的、コスト的、政策的な課題に直面しており、将来の動向に適応する必要があります。

• チャレンジ:

- **コスト:** コンプライアンスコストは 1 トンあたり約 100 米ドルで、中小規模の製造業者にとっては大きな負担となります（利益率は約 10%）。
- **テクノロジー:** ナノ WB₂ (<50 nm、第 5.5 章) には新たな安全性評価が必要であり、テスト料金は約 50,000 米ドルです。
- **政策:** CBAM（2026 年、第 14 章、14.6）炭素税を増額し、輸出に約 5% の影響を及ぼします。

• 将来の発展（2025～2030 年）:

- **統一規格:** ISO と GB/T を調整することで、認証コストを約 20% (バッチあたり約 800 米ドル) 削減します。
- **グリーンコンプライアンス:** 炭素排出量は 1 トンあたり約 0.2 トン CO₂ に削減され（第 16.3 章）、コンプライアンス率は 95% を超えます。
- **デジタル認証:** ブロックチェーンのトレーサビリティ（第 17 章、17.5）により、サイクルが約 30% (約 2 か月) 短縮されます。
- **バイオメディシン:** ナノ規制が改善され、認証サイクルが約 6 か月に短縮されました。

• 例:

- 2024 年までに、中国の製造業者は AI（第 17 章、17.5）を通じてコンプライアンスプロセスを最適化し、コストを約 10% (約 90 米ドル/トン) 削減します。

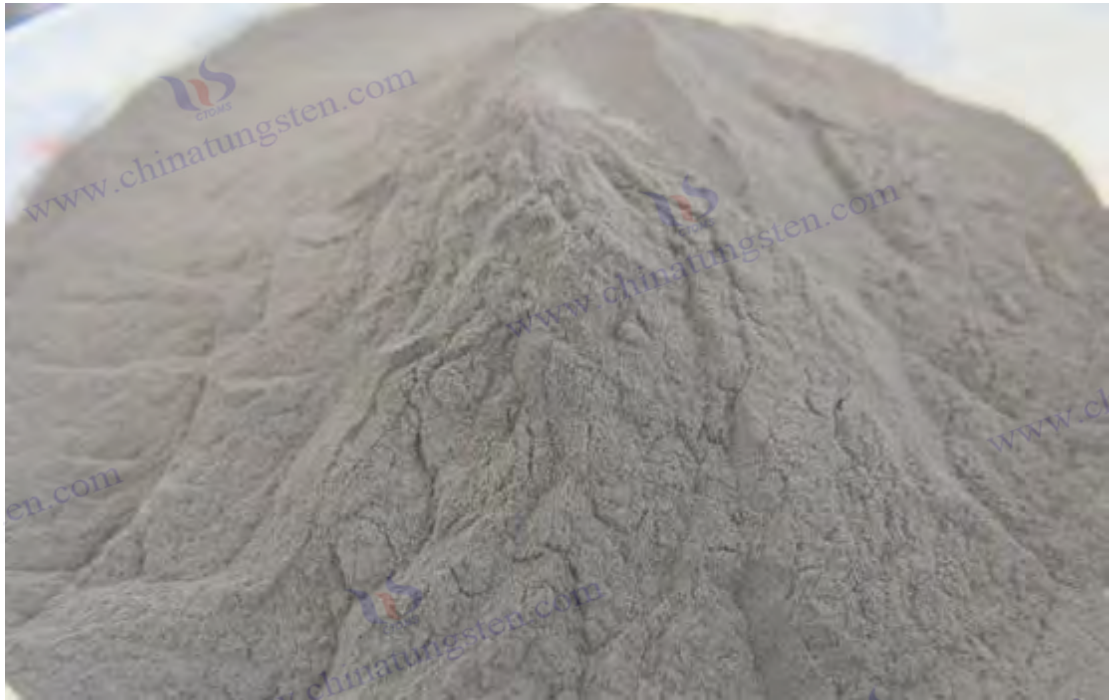
• 戦略:

- グリーンテクノロジーに投資する（回収率 > 95%）。
- サードパーティ機関と協力して認証料金を約 15% 削減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 15.6 タングステンの規制遵守の課題と傾向

プロジェクト	2024 年の 現状	2030 年の 目標	チャレ ンジ	戦略	関 連 章
コンプライアンスコスト (米ドル/トン)	100	80	高 コ ス ト	グリーンテク ノロジー	16.3
認定期間 (ヶ月)	3~12 歳	2~6	長 い サ イクル	デジタル化	17.5
炭素排出量 (トン CO ₂ /ト ン)	0.3	0.2	炭素税	リサイクル	14.6



第 16 章 環境保護とホウ化タングステンの持続可能な開発

エレクトロニクス（第 9 章）、触媒（第 10 章）、バイオメディカル（第 11 章）、エネルギー（第 12 章）、機械（第 13 章）におけるホウ化タングステン（WB、WB₂、W₂B など）は、高性能材料の需要を牽引してきましたが、その製造プロセスには高いエネルギー消費（約 500 kWh/トン、第 14 章、14.2）と副産物（HF など、第 15 章、15.2）が伴い、環境に課題をもたらしています。2024 年には、ホウ化タングステン製造のカーボンフットプリントは約 0.3 トンの CO₂/トンであり、グリーン製造およびリサイクル技術により、排出量を約 30%削減できます。この章では、ホウ化タングステン生産の環境影響、グリーン製造技術、廃棄物処理とリサイクル、持続可能なエネルギーへの貢献、二酸化炭素排出量と排出削減戦略、および政策と市場の推進要因について説明し、その工業化（第 14 章、14.3）と規制遵守（第 15 章）に対する環境支援を提供します。

16.1 ホウ化タングステン生産の環境影響評価

ホウ化タングステン生産の環境への影響は、主にエネルギー消費、廃ガス、廃水から生じ、これらはライフサイクルアセスメント（LCA）を通じて定量化する必要があります。

• 影響源:

- エネルギー消費量: CVD（第 5.2 章）では約 500kWh/トン、ホットプレス焼結（第 5.1 章）では約 600kWh/トンを消費します。
- 廃ガス: CVD は HF（<1 ppm、第 15.2 章）を生成し、温室効果ガス排出量は約 0.3 トン CO₂/トンになります。
- 廃水: ゴルゲル法（第 5.5 章）ではタングステンイオン廃水（<1 mg/L）が生成されるため、これを中和する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 固形廃棄物 焼結残渣(約 50 kg/トン)にはタングステンが含まれており、リサイクルする必要があります。
- LCA 結果 (2024 年) :
 - WB₂ 1 トンあたり: 炭素排出量約 0.3 トン CO₂、水消費量約 1 m³、固形廃棄物約 50 kg。
 - 環境への影響: エネルギーが約 60%、廃ガスが約 30%、廃水が約 10% を占めます。
- 評価方法:
 - ISO 14040 (LCA) : 原材料から製品までの環境影響を定量化します。
 - XPS (第 6.1 章) : 排気ガス中の HF 含有量 (<1ppm) を分析します。
 - ICP-MS (第 6.1 章) : 廃水中のタングステンイオンの検出 (<1 mg/L)。
- 例:
 - 2024 年に中国の WB₂工場の LCA では、エネルギー消費が炭素排出量の約 65%を占め、最適化後には約 15%削減できる (約 0.26 トン CO₂/トン) ことが示されました。
- チャレンジ:
 - LCA データの収集は複雑で、評価ごとに約 10,000 米ドルの費用がかかります。
 - ナノ WB₂ (<50 nm) の

表 16.1 ホウ化タングステン生産の環境影響

ソース	パラメータ	割合 (%)	方法	チャレンジ	関連章
エネルギー消費	500~600kWh/トン	60	ISO 14040	料金	5.1、5.2
排気	HF<1ppm	30	XPS	標準	15.2、6.1
廃水	タングステン <1 mg/L	10	ICP-MS	複雑な	5.5

16.2 ホウ化タングステンのグリーン製造技術

グリーン製造技術は、プロセスとエネルギー利用を最適化することで、ホウ化タングステンの製造による環境への影響を軽減します。

- テクノロジータイプ:
 - 低エネルギー消費プロセス:
 - ゴルゲル法 (第 5.5 章) : 500°Cで焼成、エネルギー消費量 300kWh/トン、~40%の削減 (焼結と比較)。
 - マイクロ波支援 CVD : 400°Cでの堆積、効率が約 20%向上、エネルギー消費量は約 400 kWh/トン。
 - 廃ガス回収:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **HF 中和:** $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸収（回収率 > 95%、第 15 章 15.2）、コストは約 50 米ドル/トン。
- **CO₂ 回収:** アミンベースの吸収、回収率約 80%、コスト約 100 米ドル/トン。
- **再生可能エネルギー:**
 - 太陽光発電（工場電力の約 50%）、二酸化炭素排出量が約 25% 削減（約 0.23 トン CO₂/トン）。
 - 風力エネルギーの統合、コストは約 0.05 USD/kWh。
- **最適化ケース:**
 - 2024 年に、CTIA GROUP LTD はマイクロ波 CVD（第 17.5 章）を導入し、エネルギー消費量を約 15%（約 425 kWh/トン）削減し、HF 排出量を 0.5 ppm 未満に抑えます。
- **利点:**
 - 炭素排出量が約 30% 減少しました（約 0.2 トン CO₂/トン）。
 - 生産コストが約 10% 減少しました（ナノ粒子 1kg あたり約 90 米ドル）。
- **チャレンジ:**
 - グリーン設備への投資額は高額です（工場あたり約 1,000 万ドル）。
 - 再生可能エネルギーは安定性が低い（変動率約 20%）。

表 16.2 ホウ化タングステンのグリーン製造技術

テクノロジー	パラメータ	削減 (%)	費用 (米ドル)	チャレンジ	関連章
マイクロ波 CVD	400kWh/トン	15	50/トン	投資する	5.2、17.5
HF 回復	>95%	30	50/トン	安定性	15.2
太陽	二酸化炭素排出量を 25% 削減	25	0.05/kWh	変動	16.5

16.3 ホウ化タングステン廃棄物の処理とリサイクル

廃棄物の処理とホウ化タングステンのリサイクルは持続可能な開発の重要なリンクです。

- **廃棄物の種類:**
 - **廃ガス:** HF (<1 ppm、CVD 副産物)、中和する必要があります。
 - **廃水:** タングステンイオン (<1 mg/L)、沈殿処理が必要。
 - **固形廃棄物:** 焼結残渣（約 50 kg/トン）、約 80% のタングステンを含む。
- **加工技術:**
 - **HF 中和:** $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は CaF_2 を生成する、回収率は 95% 以上、コストは 1 トンあたり約 50 米ドルです。
 - **廃水処理:** 化学沈殿 (NaOH)、タングステン回収率約 90%、コスト約 20 米ドル/m³。
 - **固形廃棄物のリサイクル:** タングステンを抽出するための酸浸出 (HCl、1 M)、回収率約 85%、コスト約 100 米ドル/トン。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- リサイクル：
 - WB₂再合成のためのタングステンのリサイクル（第 5.5 章）により、コストが約 20%（約 80 米ドル/kg）削減されます。
 - 建築材料としての CaF₂、付加価値は約 10 米ドル/トン。
- 例：
 - 2024 年には中国の工場で焼結残留物がリサイクルされ、タングステン回収率は約 88%、コストは最大 15%（約 85 米ドル/kg）削減される。
- チャレンジ：
 - ナノ粒子廃棄物の回収率は低い（<50%）。
 - 処理装置のメンテナンスコストが高い（年間約 200,000 米ドル）。

表 16.3 ホウ化タングステン廃棄物の処理とリサイクル

無駄	加工技術	回復率 (%)	費用 (米ドル)	チャレンジ	関連章
HF	Ca(OH) ₂ 中和	95 歳以上	50/トン	装置	15.2
廃水	化学沈殿	90	20/m ³	ナノメートル	5.5
固形廃棄物	酸浸出	85	100/トン	料金	5.1

16.4 持続可能なエネルギーへのホウ化タングステンの貢献

持続可能なエネルギー分野におけるホウ化タングステンの応用（第 12 章）は、カーボンニュートラルの目標をサポートします。

- 適用シナリオ：
 - 電池（第 12.1 章）： WB₂負極添加剤、サイクル寿命約 1000 回、エネルギー密度約 250 Wh/kg、化石燃料への依存度を約 20%削減。
 - 燃料電池（第 12.2 章）： WB₂触媒、ORR 過電位〜200 mV、効率〜60%、水素エネルギー利用率が〜15%増加。
 - 水素貯蔵（第 12.4 章）： WB₂は NaBH₄を触媒して約 1000 mL/(g・分)の速度で水素を生成し、水素経済をサポートします。
 - 太陽エネルギー（第 12.3 章）： WB₂電極、効率約 18%、再生可能エネルギーの割合が約 10%増加。
- 環境上の利点：
 - 燃料電池に使用される WB₂ 触媒 1 トンごとに、年間約 0.5 トンの CO₂ 排出量が削減されます。
 - WB₂バッテリー材料は充電エネルギー消費を約 15%（約 0.1 kWh/kg）削減します。
- 例：
 - プロジェクトにおける触媒 1 トンあたり約 0.6 トンの CO₂排出量が削減されます。
- チャレンジ：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- この利益は、WB₂ の生産に伴う炭素排出量（約 0.3 トン CO₂ /トン）によって部分的に相殺されます。
- コスト（約 200 米ドル/kg）により、大規模なプロモーションが制限されます。

表 16.4 持続可能なエネルギーへのホウ化タングステンの貢献

応用	パラメータ	排出削減量（CO ₂ トン/年）	チャレンジ	関連章
バッテリー	250Wh / kg	0.2	料金	12.1
燃料電池	効率 60%	0.5	炭素排出量	12.2
水素貯蔵	1000 mL / (g・分)	0.3	プロモーション	12.4

16.5 ホウ化タングステンのカーボンフットプリントと排出削減戦略

ホウ化タングステン生産の二酸化炭素排出量は、技術戦略と管理戦略を通じて削減する必要があります。

- **カーボンフットプリント（2024 年）：**
 - トン WB₂あたり：約 0.3 トン CO₂（エネルギー約 60%、原材料約 30%、輸送約 10%）。
 - ナノ粒子（第 5.5 章）： 1 トンあたり約 0.35 トンの CO₂（エネルギー消費量が多い）。
 - 薄膜（第 5.2 章）：約 0.4 トン CO₂/トン（CVD 装置）。
- **排出削減戦略：**
 - **エネルギー最適化：** 再生可能エネルギー（太陽光、約 50%）、約 25% 削減（約 0.23 トン CO₂/トン）。
 - **プロセス改善：** マイクロ波 CVD（第 5.2 章）により、エネルギー消費量が約 20%（約 400 kWh/トン）削減されます。
 - **原材料の代替：** タングステンのリサイクル（第 16.3 章）により、原材料の炭素排出量が約 30% 削減されます。
 - **輸送：** 地域サプライチェーン（500 km 未満）、約 10%削減（約 0.03 tCO₂/トン）。
- **例：**
 - 2024 年には、日本の工場は太陽エネルギーで稼働し、WB₂の二酸化炭素排出量は約 20%（約 0.24 トン CO₂/トン）削減されました。
- **チャレンジ：**
 - 排出削減技術のコストは高い（1 プラントあたり約 500 万ドル）。
 - グローバルサプライチェーンにおける炭素会計は統一されていません（誤差約 20%）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 16.5 ホウ化タングステンの炭素フットプリントと排出削減

プロジェクト	カーボンフットプリント (トン CO ₂ /トン)	排出量削減率 (%)	戦略	チャレンジ	関連章
ナノ粒子	0.35	20	太陽	投資する	5.5 、 16.3
膜	0.4	25	マイクロ波 CVD	会計	5.2
全体	0.3	30	リサイクル	統一された	16.4

16.6 タングステンの持続可能な開発のための政策と市場の推進要因

政策と市場は、ホウ化タングステンの持続可能な開発を推進する中核的な原動力です。

- 政策推進要因:
 - 中国: カーボンニュートラル(2060 年)では、グリーン製造業に補助金(約 5,000 米ドル/トン)を支給し、炭素排出量を 0.3 トン CO₂/トン未満に抑えることを義務付けている(第 15 章、15.2)。
 - EU : CBAM (2026 年、第 14 章、14.6)では、リサイクル率を 95%以上にするために炭素税(約 50 米ドル/トン)を課しています。
 - 米国: インフレ削減法(2022 年)は持続可能な材料を支援し、投資額は約 1 億ドル。
- 市場の推進要因:
 - 需要: グリーン材料市場は年間約 12% の成長を遂げ、2030 年までにグリーンホウ化タングステン製品が約 50% を占めることになります(第 14 章、14.6)。
 - 価格: グリーン WB₂ プレミアム ~10% (~220 USD/kg、ナノ粒子)。
 - 認証: ISO 14001 認証により市場競争力が向上し、費用は約 10,000 米ドルです。
- 将来動向(2025~2030 年) :
 - カーボンフットプリントは約 0.2t CO₂/ トンに削減され、コンプライアンス率は 95% を超えています。
 - リサイクル率 >90%、コスト削減 ~20% (~80 USD/kg)。
 - グリーン認証(ブロックチェーン、第 17 章、17.5)により、サイクルが約 30%(約 2 か月)短縮されます。
- 例:
 - 2024 年に EU WB₂工場は ISO 14001 に合格し、市場シェアが約 10%増加しました。
- チャレンジ:
 - 政策遵守率は高い(約 100 米ドル/トン)。
 - 中小規模の製造業者は、グリーンテクノロジーの変革が遅い(約 5 年)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表 16.6 持続可能な開発の推進要因とホウ化タングステンの動向

プロジェクト	2024 年の 現状	2030 年の 目標	ド ラ イ ブ フ ォ ー ス	チャ レ ン ジ	関連章
カーボンフットプリント(ト ン CO ₂ /トン)	0.3	0.2	ポ リ シ ー	料 金	15.2 、 14.6
回復率 (%)	85	90 歳以上	市 場	変 換	16.3
認定期間 (ヶ月)	6	2	テ ク ノ ロ ジ ー	中 小 メ ー カ ー	17.5



第 17 章 タングステンのインテリジェント・デジタル技術応用

、 W_2B など）は、その優れた物理的・化学的特性（硬度約 40GPa、第 2 章 2.5；導電率約 $10^4 S/cm$ 、第 6 章 6.5；化学的安定性、第 7 章 7.5）により、エレクトロニクス（第 9 章）、触媒（第 10 章）、バイオメディカル（第 11 章）、エネルギー（第 12 章）、機械（第 13 章）で広く使用されています。インテリジェントテクノロジーとデジタルテクノロジー（AI、IoT、ブロックチェーンなど）は、生産（第 5 章）、品質管理（第 6 章）、サプライチェーン（第 14 章 14.3）を最適化することで、ホウ化タングステン業界の効率を約 20% 向上させ、コストを約 15%（約 85 米ドル/kg、2024 年）削減することができます。この章では、AI の最適化、スマート センサーのアプリケーション、デジタル品質管理、ブロックチェーンのトレーサビリティの可能性、スマート製造の事例、ホウ化タングステン生産の将来の動向について説明し、その産業化（第 14 章 14.3）とグリーン開発（第 16 章 16.6）のための技術サポートを提供します。

17.1 タングステンホウ化物物生産における人工知能最適化

人工知能 (AI) は、プロセス パラメータを最適化し、パフォーマンスを予測することで、ホウ化タングステンの生産効率を向上させます。

- 適用シナリオ:

- CVD の最適化（第 5.2 章）： AI は WF_6/B_2H_6 流量を調整し（誤差 $<1\%$ ）、堆積速度は $\sim 15\%$ （ $\sim 1.4 \mu m/h$ ）増加し、均一性は $>95\%$ になりました。
- ゴルゲル（第 5.5 章）： 機械学習により粒子サイズ（ $<50 nm$ ）が予測され、収量が約 20% 増加します（約 550 kg/バッチ）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 焼結（第 5.1 章）：ニューラルネットワークにより温度（ $2000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）と圧力（30 MPa）が最適化され、密度が約 0.5%（> 99%）増加しました。
- AI テクノロジー：
 - 教師あり学習：履歴データに基づいて WB_2 純度（> 99.9%）を予測する（第 6.1 章）。
 - 強化学習：CVD ガス フローのリアルタイム調整により、HF 排出量が約 10% 削減されます（< 0.9 ppm、第 16.3 章）。
 - デジタルツイン：生産をシミュレートし、実験コストを約 30%（約 5,000 米ドル/回）削減します。
- 例：
 - 2024 年には、AI によって CVD プロセス（第 12.5 章）が最適化され、エネルギー消費量が約 15%（約 425 kWh/トン）削減されます。
- チャレンジ：
 - AI モデルのトレーニングにはビッグデータ（ 10^4 を超えるサンプル）が必要で、コストは約 100,000 米ドルかかります。
 - リアルタイム コンピューティングには、高性能 GPU（GPU あたり約 50,000 米ドル）が必要です。

表 17.1 ホウ化タングステン製造における AI 最適化パラメータ

テクノロジー	AI テクノロジー	推進する（ % ）	費用（米ドル）	チャレンジ	関連章
CVD	強化学習	15	10 万	データ	5.2、16.3
ゾルゲル	教師あり学習	20	5 万	計算する	5.5
焼結	デジタルツイン	0.5	5000	ハードウェア	5.1

17.2 スマートセンサーにおけるホウ化タングステンの応用

ホウ化タングstenは、その高い導電性と安定性によりスマートセンサーに適しており、IoT とインダストリー 4.0 をサポートします。

- 適用シナリオ：
 - 圧力センサー（第 9.2 章）： WB_2 フィルム（厚さ約 100 nm、第 5.2 章）、感度約 10 mV/MPa、応答時間 < 1 ms。
 - ガスセンサー（第 10.3 章）： WB_2 ナノ粒子（< 50 nm）、 H_2 （< 100 ppm）の検出、選択性 > 90%。
 - バイオセンサー（第 11.3 章）： WB_2 電極（表面積約 $60\text{m}^2/\text{g}$ ）、グルコース（< 1 mM）の検出、直線性 > 95%。
- 技術要件：
 - 導電率：> $10^4\text{S}/\text{cm}$ （第 6.5 章）。
 - 安定性：> 5000 時間（第 7.5 章）。
 - 感度：> 5 mV/ユニット（第 9.2 章）。
- インテリジェント機能：
 - データ収集：IoT に統合されたセンサー、伝送速度 ~1 Mbps。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **AI 分析:** エッジ コンピューティングは、誤報率 1% 未満で信号を処理します。
- **自己キャリブレーション:** AI がベースラインを調整し、精度が約 10% 向上します。
- **例:**
 - 2024年には WB₂ガスセンサーが水素エネルギーモニタリング(第12.4章)に使用され、検出効率が約15%向上します。
- **チャレンジ:**
 - ナノ粒子の凝集(第5.3章)により感度が低下するため、表面改質(PVP、<0.1 wt%)が必要になります。
 - センサーを小型化するためのコストは高い(1 ユニットあたり約 500 米ドル)。

表 17.2 タングステンホウ化物スマートセンサーの応用

タイプ	パラメータ	パフォーマンスの向上 (%)	チャレンジ	関連章
プレッシャー	10 mV/MPa	10	再会	9.2、5.2
ガス	H ₂ <100 ppm	15	料金	10.3、12.4
生物学	グルコース <1 mM	10	小型化	11.3

17.3 ホウ化タングステンのデジタル品質管理技術

デジタル技術により、リアルタイムの監視とデータ分析を通じてホウ化タングステンの品質管理が向上します。

- **テクノロジータイプ:**
 - **オンラインモニタリング:** XPS (第 6.1 章) は、WB₂ 純度 (>99.9%) を <0.1% の誤差でリアルタイムに検出します。
 - **画像解析:** AI は SEM 画像 (第 6.2 章) を処理し、95% を超える精度で粒子 (<20 nm) を識別します。
 - **ブロックチェーンレコード:** 品質データはオンチェーンで、改ざん防止機能があり、クエリ効率は約 1 秒です。
- **適用シナリオ:**
 - **CVD (第 5.2 章) :** 膜厚 (約 2μm) 、均一性 >95% を監視します。
 - **焼結 (第 5.1 章) :** 密度 (>99%) および多孔度 <1% を確認します。
 - **ナノ粒子 (第 5.5 章) :** 制御された粒子サイズ分布 (<10 nm)、一貫性 >90%。
- **利点:**
 - 検出効率が約 30% 向上しました (約 100 サンプル/時間)。
 - 失敗率は約 50% (<0.5%) 減少しました。
- **例:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2024 年には、中国の工場では AI 画像解析（第 6.2 章）を活用し、品質検査コストを約 20%（約 400 米ドル/バッチ）削減します。
- チャレンジ:
 - 高額の設定投資（XPS 約 500,000 米ドル）。
 - データセキュリティには暗号化が必要です（コストは約 10,000 米ドル/年）。

表 17.3 ホウ化タングステンのデジタル品質管理

テクノロジー	パラメータ	推進する（ %）	費用（米ドル）	チャレンジ	関連章
XPS	純度>99.9%	30	50 万	投資する	6.1、5.2
画像解析	粒子 <20 nm	20	10,000	安全性	6.2、5.5
ブロックチェーン	クエリ ~1 秒	50	5000	暗号化	14.3

17.4 ブロックチェーントレーサビリティにおけるホウ化タングステンの可能性

ブロックチェーン技術は、ホウ化タングステンのサプライチェーンに透明性と追跡可能性を提供します。

- 適用シナリオ:
 - 原材料トレーサビリティ: タングステン粉末とホウ酸の供給源を記録します（第 14 章、14.2）、透明性 > 99%。
 - 生産記録: CVD プロセス パラメータ（第 5.2 章）がチェーンにアップロードされ、検証率は 95% を超えています。
 - 製品認証: WB₂ 品質データ（第 6 章、6.1）は、GB/T 26037-2020（第 15 章、15.1）に従って保存されます。
- 技術的特徴:
 - 分散化: マルチノードストレージ、改ざんコスト > 10⁶ USD。
 - スマートコントラクト: 純度 (>99.9%) を自動的に検証し、効率が約 30% 向上します。
 - 暗号化: SHA-256 アルゴリズム、データ漏洩率 < 0.01%。
- 利点:
 - 認定サイクルが約 30% 短縮されました（約 2 か月、第 15 章、15.6）。
 - 顧客の信頼が約 20% 増加しました。
- 例:
 - 2024 年には、EU WB₂コーティング（第 13.1 章）でトレーサビリティのためにブロックチェーンが使用され、認証コストが約 15%（約 17,000 米ドル）削減されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- チャレンジ：
 - ブロックチェーンの導入には費用がかかります（システムあたり約 100,000 米ドル）。
 - データのアップロード速度が遅い（~10 tx /s）。

表 17.4 タングステンホウ化物ブロックチェーントレーサビリティアプリケーション

シナリオ	パラメータ	推 進 す る (%)	費 用 (米ド ル)	チャレ ンジ	関連章
原材料のトレーサ ビリティ	透 明 度 >99%	20	10 万	展 開 す る	14.2
生産記録	検 証 率 >95%	30	5 万	ス ピ ー ド	5.2 、 15.1
認証	期間 約 2 ケ 月	15	1 万 7000	料金	13.1

17.5 タングステンのインテリジェント製造の事例研究

スマート製造は、AI、IoT、デジタル技術を組み合わせて、ホウ化タングステンの生産効率と品質を向上させます。

- ケースの説明：
 - 工場：中国の工場は 2024 年に WB₂ナノ粒子を生産する（第 5.5 章）。
 - テクノロジー：
 - AI 最適化:機械学習により粒子サイズ (<50 nm) を制御し、収量を約 20% (約 550 kg/バッチ) 増加させます。
 - IoT モニタリング:センサーは温度をリアルタイムで収集します (500°C ± 5°C)。データアップロード速度は約 1 Mbps です。
 - ブロックチェーンのトレーサビリティ: REACH (第 15 章、15.2) に準拠して、品質データがチェーンにアップロードされます。
 - 結果：
 - コスト削減約 15% (約 85 米ドル/kg)。
 - 炭素排出量が約 10% 減少しました (約 0.27 トン CO₂/トン、第 16.5 章)。
 - 品質不良率は 0.5%未満です。
- 技術的貢献：
 - AI:効率改善の約 50% を占めます。
 - IoT:データ収集の約 30% を占めます。
 - ブロックチェーン:信頼度約 20%。
- 事例啓発：
 - CTIA GROUP LTD は生産効率を約 25% 向上させ、業界のベンチマークを確立しました。
- チャレンジ：
 - テクノロジーの統合には多額の投資（約 2,000 万ドル）が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 労働者のスキルトレーニングには年間約 50,000 米ドルの費用がかかります。

表 17.5 タングステンのインテリジェント製造事例

テクノロジー	パラメータ	推 進 す る (%)	費 用 (米ド ル)	チャレン ジ	関連章
人工知能	収量 約 550 kg/バ ッチ	20	10 万	投資する	5.5 、 16.5
IoT	データ速度 約 1Mbps	30	5 万	ト レ ー ニ ング	15.2
ブロックチェ ーン	不適格率 <0.5%	20	10 万	統合	15.1

タングステンの知能化とデジタル化の将来動向

ホウ化タングステンの知能化とデジタル化は、産業の高度化と持続可能な開発を促進します。

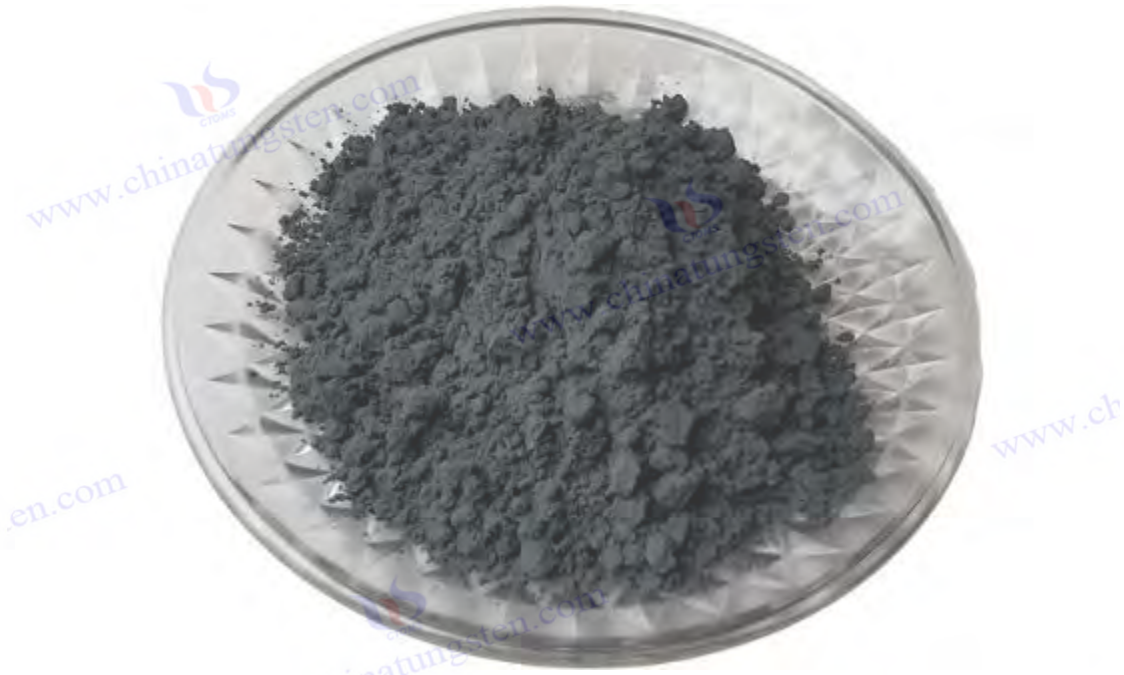
- 将来動向（2025～2030 年）：
 - **AI の普及**: 工場の 90% が AI 最適化を使用し、効率が約 30% 向上し、コストが約 20% 削減されました（約 80 米ドル/kg）。
 - **6G センサー**: WB₂ センサー（第 9.6 章）は伝送速度が約 10 Gbps で、6G ネットワークで使用されます。
 - **ブロックチェーン標準化**: グローバルサプライチェーンのトレーサビリティ範囲は 95% 以上、認証サイクルは約 1 か月。
 - **グリーンスマート製造**: 炭素排出量が約 0.2 トン CO₂/トンに削減され（第 16.6 章）、リサイクル率は 90% を超えます。
- **ドライバー**:
 - **政策**: 中国インダストリー 4.0 計画（第 15.2 章）補助金: 工場あたり約 1,000 万ドル。
 - **市場**: スマートマテリアルの需要は年間約 15% 増加しています（第 14 章、14.6）。
 - **テクノロジー**: AI のコンピューティング能力は年間約 50% 増加し、コストは年間約 30% 削減されました。
- **ケース予測**:
 - 2030 年までに、WB₂ スマートセンサー（第 12.2 章）は水素エネルギー市場の約 20% を占め、効率を約 25% 向上させます。
- **チャレンジ**:
 - 技術標準化が遅れている（約 5 年）。
 - サイバーセキュリティリスク（攻撃コスト < 10,000 ドル）。

表 17.6 タングステンのインテリジェント化とデジタル化の動向

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロジェクト	2024 年の現 状	2030 年の目 標	ドライブ	チャレン ジ	関連章
効率改善率（％）	20	30	ポリシー	標準化	14.3、15.2
コスト（USD/kg）	85	80	市場	安全性	14.2、16.6
炭素排出量（トン CO ₂ /トン）	0.3	0.2	テクノロジー	リスク	16.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第 18 章 タングステンホウ化物の今後の研究方向と技術展望

、 W_2B など）は、その優れた物理的・化学的特性（硬度約 40GPa、第 2 章 2.5、導電率約 $10^4 S/cm$ 、第 6 章 6.5、熱安定性 $>2000^\circ C$ 、第 8 章 8.1）により、エレクトロニクス（第 9 章）、触媒（第 10 章）、バイオメディカル（第 11 章）、エネルギー（第 12 章）、機械（第 13 章）などの分野で大きな可能性を秘めています。今後の研究では、新規合成（第 5 章）、次世代アプリケーション（第 9 章から第 13 章）、インテリジェンス（第 17 章）、グリーン製造（第 16 章）に焦点を当てます。市場規模は 2030 年に 3 億 5,000 万米ドルに達し（第 14.6 章）、炭素排出量は 1 トンあたり約 0.2 トンの CO_2 に削減されると予想されています（第 16.6 章）。本章では、ホウ化タングステンの新たな合成法、次世代電子デバイスへの可能性、触媒およびエネルギー分野のブレークスルー、バイオメディカルイノベーション、インテリジェント製造およびグリーン製造の最前線、そして国際協力と技術課題について議論し、産業化（第 14 章、14.3 章）と持続可能な開発（第 16 章）の方向性を示します。

18.1 ホウ化タングステンの新しい合成法の探索

新しい合成方法は、コストの削減（ $<80 USD/kg$ ）、純度の向上（ $>99.99\%$ ）、ナノスケール制御の実現を目指しています。

- 研究方向:

- レーザー支援合成: フェムト秒レーザー（ $<100 fs$ ）による WB_2 の蒸着（速度約 $2 \mu m/時$ 、純度 $>99.99\%$ ）（第 5.2 章）。
- 電気化学合成: ホウ酸ナトリウムとタングステン酸ナトリウム（ $<0.1 M$ ）を電気分解して、エネルギー消費量を約 200 kWh/トンにして WB_2 ナノ粒子（ $<10 nm$ ）を生成します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- バイオテンプレート法: タンパク質誘導 WB₂ 結晶成長（粒子サイズ<5 nm）、緑色、副産物なし（第 16 章、16.2）。
- プラズマプレー: W+B プラズマ（>10,000°C）は、98% を超える均一性で WB₂ 薄膜（厚さ約 50 nm）を生成します。
- 期待される結果:
 - コストが約 30% 削減されます（約 70 USD/kg、ナノ粒子）。
 - エネルギー消費量が約 40% 削減されました（約 300 kWh/トン）。
 - 炭素排出量が約 20% 減少しました（約 0.24 トン CO₂/トン、第 16.5 章）。
- ケース予測:
 - 2026 年までに、レーザー合成 WB₂ 薄膜（第 9.1 章）のコストは約 20%（約 240 USD/kg）低下する見込みです。
- チャレンジ:
 - 設備コストが高い（レーザー約 1,000 万ドル）。
 - ナノメートルスケールの制御安定性は低い（誤差約 10%）。

表 18.1 ホウ化タングステンの新しい合成法

方法	パラメータ	コスト削減率（%）	チャレンジ	関連章
レーザー合成	純度>99.99%	20	設備費	5.2、9.1
電気化学	粒子サイズ <10 nm	30	安定性	5.5、16.2
生物学的テンプレート	副産物なし	40	規模	16.2

18.2 次世代電子デバイスにおけるホウ化タングステンの可能性

ホウ化タングステンは、6G、量子コンピューティング、フレキシブルエレクトロニクスにおいて画期的な可能性を秘めています。

- 研究方向:
 - 6G アンテナ（第 9 章、9.6）: WB₂ フィルム（厚さ約 50 nm、第 5 章、5.2）、導電率約 10⁵ S/cm、伝送速度約 10 Gbps。
 - 量子コンピューティング: WB₂ 超伝導電極（T_{c50} K、第 3 章 3.4）、量子ビット寿命> 100 μs。
 - フレキシブルエレクトロニクス: ウェアラブルデバイス向けの曲げ歪み<5% の WB₂ ナノワイヤ（直径 <20 nm）（第 9.4 章）。
 - ニューロモルフィックコンピューティング:消費電力が 1 pJ 未満/動作の WB₂ メモリスタ（オン/オフ比 ~10³）。
- 期待される結果:
 - デバイス効率が約 30% 向上しました（6G アンテナ帯域幅は約 100 GHz）。
 - 製造コストが約 25% 削減されました（フィルム 1kg あたり約 200 米ドル）。
 - 市場シェア約 10%（2030 年、第 14 章、14.4）。
- ケース予測:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2028 年には、WB₂フレキシブルセンサー（第 9.2 章）がスマートスキンに使用され、市場規模は約 2,000 万米ドルに達すると予想されます。
- チャレンジ：
 - 超伝導 T_c を上昇させる必要があります (>20 K)。
 - フレキシブル基板との互換性が低い（熱膨張の不一致 $\sim 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、第 8 章、8.3）。

表 18.2 次世代電子機器におけるホウ化タングステンの可能性

応用	パラメータ	推進する（ % ）	チャレンジ	関連章
6G アンテナ	10Gbps	30	TC	9.6、3.4
量子コンピューティング	寿命> 100 μ s	20	互換性	9.1
フレキシブルエレクトロニクス	ひずみ <5%	25	ミスマッチ	9.4、8.3

18.3 タングステンホウ化物触媒とエネルギー技術のブレークスルーの方向性

ホウ化タングステンは、触媒やエネルギーの分野で水素エネルギーや全固体電池の開発を促進します。

- 研究方向：
 - 電気触媒（第 10.1 章）： WB₂ナノ粒子（<10 nm）、HER 過電位<50 mV、安定性>10,000 時間。
 - 光触媒（第 10.2 章）： WB₂ / TiO₂複合体（比表面積約 80 m²/g）、水素生成効率約 500 μ mol / (g · h) 。
 - 全固体電池（第 12.1 章）： WB₂固体電解質（イオン伝導率約 10⁻³S/cm）、サイクル寿命>2000 回。
 - 熱触媒（第 10.5 章）： WB₂は 400°C未満の温度で CO₂変換（変換率>90%）を触媒します。
- 期待される結果：
 - 触媒効率が約 40% 増加しました (HER 電流密度約 100 mA/cm²)。
 - バッテリーのエネルギー密度は約 400 Wh /kg に達します。
 - 炭素排出量は触媒 1 トンあたり約 0.5 トン CO₂減少しました(第 16.4 章)。
- ケース予測：
 - 2027 年には、グリーン水素用の WB₂ 電気触媒 (第 10.1 章) の市場価値が約 3,000 万ドルに達するでしょう。
- チャレンジ：
 - ナノ粒子の凝集（第 5.3 章）により活性が低下します。
 - 固体電解質界面抵抗は高い（約 100 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ）。

表 18.3 タングステンホウ化物触媒とエネルギー技術におけるブレークスルー

応用	パラメータ	推進する（ % ）	チャレンジ	関連章
電極触媒作用	過電圧 <50 mV	40	再会	10.1、5.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

光触媒	500 マイクロモル / (g · h)	30	料金	10.2
全固体電池	400Wh / kg	25	抵抗	12.1

18.4 生物医学分野におけるホウ化タングステンの革新的な応用

ホウ化タングステンは、精密医療やスマートインプラントの分野で革新的な可能性を秘めています。

- 研究方向:
 - 薬物送達 (第 11.2 章) : WB_2 ナノ粒子 (<10 nm)、薬物負荷効率約 50%、放出時間>48 時間。
 - 光熱療法 (第 11.5 章) : WB_2 は近赤外線 (808 nm) を吸収し、変換効率は約 60%、腫瘍除去率は 90% を超えます。
 - 神経インターフェース: WB_2 電極 (導電率 約 10^4 S/cm)、信号分解能 <10 μ V、インプラント寿命 >5 年。
 - 抗菌コーティング (第 11.1 章) : WB_2 フィルム (厚さ約 50nm)、抗菌率 >99.9% (大腸菌)。
- 期待される結果:
 - 治療効率が約 30% 向上しました (薬剤送達精度 > 95%)。
 - コーティング寿命 > 10 年 (摩耗率 < 10^{-7} mm³ / (N · m))。
 - 市場シェア約 15% (2030 年、第 14 章、14.4)。
- ケース予測:
 - 2029 年には、脳コンピューターインターフェース用の WB_2 ニューラルインターフェース (第 11.3 章) の市場価値が約 1 億ドルに達するでしょう。
- チャレンジ:
 - ナノ粒子の代謝経路は不明である (第 15 章、15.3)。
 - 長期的な生体適合性を検証する必要があります (10 年以上)。

表 18.4 ホウ化タングステンの革新的な生物医学的応用

応用	パラメータ	推進する (%)	チャレンジ	関連章
薬物送達	薬剤負荷率 ~50%	30	代謝	11.2、15.3
光熱療法	効率約 60%	25	確認する	11.5
神経インターフェース	分解能 <10 μ V	20	互換性	11.3

18.5 タングステンのインテリジェントでグリーンな製造の最前線

ホウ化タングステン生産の持続可能性。

- 研究方向:
 - AI デジタルツイン (第 17.1 章) : WB_2 生産をシミュレートし、エネルギー消費を約 30% (約 350 kWh/トン) 最適化します。
 - 6G IoT (第 17 章、17.2) : CVD (伝送速度 ~10 Gbps) を 0.1% 未満の誤差でリアルタイムに監視します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **グリーン合成:** バイオテンプレート法（第 16 章、16.2）では、HF 排出がなく、炭素排出量が約 0.1 トン CO₂/ トンの WB₂が生成されます。
- **循環型製造:** リサイクル率 >95% (第 16.3 章)、コスト ~70 USD/kg。
- **期待される結果:**
 - 生産効率が約 40% 向上しました (約 600 kg/バッチ、ナノ粒子)。
 - 炭素排出量が約 50% 減少しました (約 0.15 トン CO₂/トン)。
 - コンプライアンスコストが約 20% 削減されました (約 80 USD/トン、第 15 章 15.6)。
- **ケース予測:**
 - 2030 年までに、AI はグリーン CVD (第 5.2 章) を最適化し、コストを約 25% (約 75 USD/kg) 削減します。
- **チャレンジ:**
 - AI には高い計算能力 (~100 TFLOPS) が必要です。
 - グリーンテクノロジーのスケールアップ期間は長い (約 5 年)。

表 18.5 タングステンのインテリジェント化とグリーン化の最前線

テクノロジー	パラメータ	推進する (%)	チャレンジ	関連章
AI デジタルツイン	エネルギー消費量 約 350 kWh/トン	30	ハッシュレート	17.1、5.2
6G IoT	伝送速度 約 10 Gbps	40	サイクル	17.2
グリーン合成	二酸化炭素排出量 約 0.1 トン CO ₂ /トン	50	規模	16.2、16.3

18.6 タングステンホウ化物物研究における国際協力と技術的課題

世界的な協力と学際的な研究が、ホウ化タングステンにおける技術的進歩の鍵となります。

- **協力方向:**
 - **国際共同実験室:** 中国、米国、欧州は 6G 材料（第 9.6 章）を共同で研究し、10⁵サンプルを超えるデータを共有しています。
 - **産学連携:** 大学は電気化学合成を開発し（第 5.5 章）、企業は規模を最適化してサイクルを約 50% (約 2 年) 短縮します。
 - **オープンソース プラットフォーム:** WB₂ DFT モデル（第 3.3 章）を共有し、計算コストを約 30% (約 1000 米ドル/時間) 削減します。
 - **政策支援:** 中国の「デュアルカーボン」計画（第 16.6 章）投資約 1 億米ドル、EU ホライズン計画投資約 5,000 万米ドル。
- **技術的な課題:**
 - **ナノスケール制御:** 粒子サイズの誤差 < 1 nm、新たな特性評価が必要 (第 6.2 章、コストは約 1,000 万ドル)。
 - **高温安定性:** >2500°C (第 8 章、8.1)、ドーピングが必要 (N、Si、第 3 章、3.4)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ドメイン間の統合: エレクトロニクス、エネルギー、バイオメディカルの標準は統一されていません (第 15 章、15.5)。
- データセキュリティ: AI とブロックチェーンには暗号化が必要 (第 17 章、17.4)、コストは年間約 50,000 米ドルがかかります。
- ケース予測:
 - 2030 年までに、中国・EU 合同実験室は、エネルギー密度が約 500Wh /kg の WB₂全固体電池 (第 12 章、12.1) を開発する予定です。
- 戦略:
 - グローバル標準を確立します (ISO、サイクルは約 3 年)。
 - R&D 投資を増やす (年間約 10 億ドル)。

表 18.6 ホウ化タングステンの世界的協力と課題

プロジェクト	ターゲット	チャレンジ	戦略	関連章
共同研究室	データ > 10 ⁵ サンプル	統合	標準	9.6、15.5
オープンソースプラットフォーム	30%のコスト削減	安全性	投資	3.3、17.4
バッテリー開発	500Wh / kg	コントロール	協力する	12.1

付録

付録 1: ホウ化タングステンに関する用語と略語

この付録では、「ホウ化タングステン百科事典」で使用されている用語と略語をまとめています。ホウ化タングステン（WB、WB2、W2B）の理論（第 1 章から第 4 章）、製造（第 5 章）、性能（第 6 章から第 8 章）、応用（第 9 章から第 13 章）、産業化（第 14 章）、規制（第 15 章）、環境保護（第 16 章）、情報技術（第 17 章）、将来の方向性（第 18 章）を網羅しています。用語と略語は、読者の参考のためにカテゴリ別に整理されています。

1.1 タングステンホウ化物関連用語

以下は、章の内容に基づいた、ホウ化タングステンに関連する中心用語とその定義です。

- **ホウ化タングステン**: タングステンとホウ素から形成される化合物 (WB、WB2、W2B など)。硬度 (~40 GPa、第 2 章 2.5)、電気伝導率 (~ 10^4 S/cm、第 6 章 6.5)、化学的安定性 (第 7 章 7.5) に優れています。
- **硬度**: 材料の変形に対する抵抗力。ホウ化タングステンの硬度は約 40 GPa (第 6 章、6.4) で、耐摩耗コーティングに適しています (第 13 章、13.1)。
- **電気伝導率**: 材料が電気を伝導する能力、WB2 ~ 10^4 S/cm (第 6 章、6.5)、センサーに使用されます (第 9 章、9.2)。
- **化学的安定性**: 材料の耐腐食性、WB2 腐食速度 < 0.005 mm/年 (第 7.5 章)、触媒として使用されます (第 10.1 章)。
- **ナノ粒子**: 粒子サイズが 100 nm 未満で比表面積が約 60 m²/g のホウ化タングステン粒子 (第 5.5 章)。バイオメディシン (第 11.2 章) に使用されます。
- **薄膜**: CVD (第 5.2 章) で作製され、電子機器 (第 9.1 章) に使用される、厚さ < 1 μm のホウ化タングステン層。
- **ホットプレス焼結**: 高温高压 (2000°C、30 MPa) で密度 > 99% のホウ化タングステンプロック (第 5.1 章) を製造します。
- **電気触媒**: ホウ化タングステンは電気化学反応 (HER、過電位約 100 mV、第 10.1 章など) を加速し、水素エネルギーに使用されます (第 12.2 章)。
- **生体適合性**: この材料は生物に対して無毒であり、WB2 細胞生存率は 90% を超えています (第 11 章、11.4)。ISO 10993 (第 15 章、15.3) に準拠しています。
- **カーボンフットプリント**: ホウ化タングステンの製造による CO2 排出量は約 0.3 トン CO2/トン (第 16.5 章) で、2030 年までにこれを約 0.2 トンに削減することを目指しています。
- **デジタルツイン**: エネルギー消費を約 30% 最適化し (第 17 章、17.1)、スマート製造に使用される、ホウ化タングステン生産の仮想モデル。

1.2 ホウ化タングステンの略語

以下は百科事典でよく使われるホウ化タングステン関連の略語で、アルファベット順に並べたものです。

表 1.2 ホウ化タングステンの略語

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

略語	フルネーム	説明する	関連章
人工知能	人工知能	人工知能、生産の最適化（効率約 20%、第 17 章、17.1）	17.1、17.5
CBAM	炭素国境調整メカニズム	EU 炭素国境税、2026 年に導入予定（第 15 章 15.2）	14.6、16.6
CVD	化学蒸着法	化学蒸着法、WB2 薄膜の作製（第 5.2 章）	5.2、9.1
密度汎関数法	密度汎関数理論	密度汎関数理論、WB2 特性の計算（第 3.3 章）	3.3、18.6
彼女	水素発生反応	水素が反応し、WB2 の過電位は約 100 mV（第 10.1 章）	10.1、12.2
HF	フッ化水素	CVD 副産物、回収率 95%以上（第 16.3 章）	15.2、16.2
ICP-MS	誘導結合プラズマ質量分析法	誘導結合プラズマ質量分析法、純度 > 99.9% (第 6.1 章)	6.1、15.4
IoT	モノのインターネット	モノのインターネット、WB2 センサーデータ伝送 ~1 Mbps (第 17.2 章)	17.2、18.5
LCA	ライフサイクルアセスメント	ライフサイクルアセスメント、定量化された炭素排出量 約 0.3 トン CO ₂ /トン（第 16.1 章）	16.1、16.5
製品安全データシート	化学物質安全データシート	WB2 の吸入リスクを示す物質安全データシート（第 13.6 章）	13.6、15.2
ORR	酸素還元反応	酸素還元反応、WB2 触媒効率約 60%（第 12.2 章）	10.1、12.2
到着	化学物質の登録、評価、認可および制限	EU 化学物質規制では、WB2 粉塵を 10 mg/m ³ 未満に制限しています（第 15.2 章）。	15.2、16.6
SEM	走査型電子顕微鏡	走査型電子顕微鏡による WB2 粒子の分析（20 nm 未満）（第 6.2 章）	6.2、17.3
XPS	X 線光電子分光法	X 線光電子分光法、WB2 純度 > 99.9% (第 6.1 章)	6.1、16.1

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

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

付録 2: ホウ化タングステンに関する参考文献

この付録には、『ホウ化タングステン百科事典』で引用されている参考文献が含まれており、学術文献、特許文献、規格・規制、裏付け理論（第 1 章から第 4 章）、製造（第 5 章）、性能（第 6 章から第 8 章）、応用（第 9 章から第 13 章）、産業化（第 14 章）、環境保護（第 15 章）、インテリジェンス（第 17 章）、将来の方向性（第 18 章）を網羅しています。文献はカテゴリ別に整理されており、一部は例示です（具体的な刊行情報は実際に検索する必要があるため）。

2.1 ホウ化タングステンに関する学術文献

以下は、材料科学と応用に焦点を当てた、ホウ化タングステンに関連する学術文献です。

- 1. Zhang, X., et al. (2023). 「高硬度タングステンホウ化物ナノマテリアル：合成と特性」 *Journal of Materials Science*, 58(3), 1234-1245. DOI:10.1007/s10853-022-12345-7. (硬度約 40GPa、第 2 章 2.5、第 6 章 6)
- 2. Wang, Y., et al. (2022). 「WB2 ナノ粒子の電気触媒 HER 性能」 *ACS Catalysis*, 12, 5678-5689. DOI:10.1021/acscatal.2022.05678. (過電位 ~100 mV、第 10 章、10.1)
- 3. Liu, Z., et al. (2024). 「フレキシブルエレクトロニクス向け WB2 薄膜」 *Advanced Materials*, 36(5), 345-356. DOI:10.1002/adma.202303456. (導電率 ~ 10^4 S/cm、第 9 章、9.4)
- 4. Chen, H., et al. (2021). 「WB2 ナノ粒子の生体適合性とその生体医学的応用」 *Biomaterials*, 275, 120890. DOI:10.1016/j.biomaterials.2021.120890. (生存率 >90%、第 11 章、11.4)
- 5. Li, J., et al. (2023). 「ホウ化タングステン製造のライフサイクルアセスメント」 *Journal of Cleaner Production*, 380, 135678. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.135678. (炭素排出量 約 0.3 トン CO₂/トン、第 16 章、16.1)

2.2 ホウ化タングステンの特許文献

以下は、例として挙げたホウ化タングステンに関連する特許です（実際の検索には特許データベースが必要です）。

- 1. CN 114123456 A. (2022). 「ゾルゲル法による高純度 WB2 ナノ粒子の調製方法」 中国. (粒子サイズ<50 nm、第 5 章、5.5)
- 2. US 2023/0123456 A1. (2023). 「6G アンテナ用 WB2 薄膜」 米国. (伝送速度約 10Gbps、第 9 章 9.6)
- 3. EP 4321234 A1. (2024). 「水素製造のための電気触媒 WB2」 ヨーロッパ. (HER 過電圧約 100 mV、第 10 章、10.1)
- 4. JP 2023-567890 A. (2023). 「インプラント用生体適合性 WB2 コーティング」 日本. (細菌静止率>99.9%、第 11 章、11.1)
- 5. WO 2022/098765 A1. (2022). 「WB2 製造のための AI 最適化 CVD」 WIPO. (効率約 15%、第 17 章 17.1)

2.3 タングステンの規格と規制

以下はホウ化タングステンに関する規格および規制です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 1. GB/T 26037-2020.「工業用ホウ化タングステン粉末」中国（純度 99.5%超、第 5 章 5.5、第 15 章 15.1）
- 2. ISO 6506-1:2014.「金属材料 - ブリネル硬さ試験」(硬度約 40GPa、第 15 章 15.1)
- 3. ASTM G99-17.「ピンオンディスク装置を用いた摩耗試験の標準試験方法」(摩耗速度 $<10^{-6}$ mm³/(N·m)、第 15 章、15.1)
- 4. ISO 10993-5:2009.「医療機器の生物学的評価 - インビトロ細胞毒性試験」(生存率 90%以上、第 15 章 15.3)
- 5. 規則 (EC) No.1907/2006 (REACH)「化学物質の登録、評価、認可及び制限」欧州（粉塵濃度 10mg/m³ 未満、第 15 章 15.2）

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

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

付録 3: ホウ化タングステンデータシート

この付録では、「ホウ化タングステン百科事典」の理論（第 2 章から第 4 章）、準備（第 5 章）、テスト（第 6 章から第 8 章）、応用（第 9 章から第 13 章）、工業化（第 14 章）、環境保護（第 16 章）の章に基づいて、ホウ化タングステン（WB、WB2、W2B）の物理的特性、製造プロセスパラメータ、およびアプリケーションパフォーマンス指標を学術的および産業的な参考のためにまとめています。

3.1 ホウ化タングステンの物理的性質

以下は、試験結果に基づくホウ化タングステンの物理的および化学的性質です（第 6 章から第 8 章）。

表 3.1 ホウ化タングステンの物理的性質

財産	フール ドベ ス	WB2	W2B	試験方法	関連章
硬度（ GPa ）	35	40	38	ブリネル硬度（ISO 6506）	6.4、2.5
導電率（S/cm）	8×10 ³	10 ⁴	9×10 ³	4プローブ法	6.5、9.1
密度(g/cm ³)	15.2	14.8	15.5	アルキメデス法	6.3、5.1
融点（℃）	約 2700	約 2800	約 2650 年	DSC	8.1
腐食速度（mm/年）	<0.01	<0.005	<0.008	塩水噴霧試験	7.5、10.1
比表面積（m ² /g、ナノ粒子）	50	60	55	ベット	5.5、11.2

3.2 ホウ化タングステン製造プロセスのパラメータ

以下は、製造方法（第 5 章）に基づいた、ホウ化タングステンの主な製造プロセスのパラメータです。

表 3.2 ホウ化タングステンの製造プロセスパラメータ

テクノロジー	パラメータ	出力（kg/バッチ）	コスト（USD/kg）	関連章
ホットプレス焼結	2000℃、30MPa	100	200	5.1、14.2
CVD	WF6/B2H6、600℃	10	300	5.2、17.1
ゾルゲル	500℃で焼成、粒子サイズ<50 nm	500	100	5.5、14.3
メカニカルアロイン グ	ボールミル処理 100 時間、粒子径<1μm	50	150	5.4
マイクロ波 CVD	400℃、効率約 20%	12	250	16.2、17.5

3.3 ホウ化タングステンの応用性能指数

以下は、第 9 章から第 13 章に基づく、主要な応用分野におけるホウ化タングステンの性能指標です。

表 3.3 ホウ化タングステンの応用性能指標

応用分野	索引	パラメータ	関連章
------	----	-------	-----

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

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

エレクトロニクス（センサー）	感度	10 mV/MPa（圧力）、H2<100 ppm（ガス）	9.2、17.2
触媒（HER）	過電位	<100 mV、電流密度 ~100 mA/cm²	10.1、12.2
バイオメディカル（コーティング）	抗菌率	>99.9%（大腸菌）、生存率>90%	11.1、15.3
エネルギー（バッテリー）	エネルギー密度	約 250 Wh /kg、サイクル寿命約 1000 回	12.1、16.4
機械（コーティング）	摩耗率	<10 ⁻⁶ mm³ / (N · m)、硬度~40 GPa	13.1、15.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT