

## タングステン合金シールド缶とは

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP の紹介

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

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

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

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と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](http://www.ctia.com.cn)

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



## 目次

### 第1章 タングステン合金シールド缶の世界へ

- 1.1 タングステン合金シールド缶のコンセプト
  - 1.1.1 タングステン合金シールド缶の定義
  - 1.1.2 タングステン合金シールド缶の基本構成要素
  - 1.1.3 タングステン合金シールド缶の基本特性
- 1.2 タングステン合金シールド缶の材料選択ロジック
  - 1.2.1 タングステン合金と主流のシールド材料の性能比較
  - 1.2.2 タングステン合金シールド缶のシールド性能の主な利点
  - 1.2.3 シーン適応におけるタングステン合金シールド缶の選択ロジック
- 1.3 タングステン合金シールド缶の開発の歴史と産業的価値
  - 1.3.1 タングステン合金シールド缶の技術進化段階
  - 1.3.2 シールド缶用途におけるタングステン合金の技術革新のポイント
  - 1.3.3 産業用端末におけるタングステン合金シールド缶のコア支持価値の反映

### 第2章 タングステン合金シールド缶のシールド機構と性能指標

- 2.1 タングステン合金遮蔽缶の放射線遮蔽の基本原理解析
  - 2.1.1 タングステン合金遮蔽缶による電離放射線の伝播特性の解析
  - 2.1.2 タングステン合金シールド缶のシールド機構（吸収と減衰）
    - 2.1.2.1 タングステン原子構造とタングステン合金シールド缶のシールド性能の相関関係
    - 2.1.2.2 タングステン合金遮蔽缶の各種放射線に対する作用プロセス
    - 2.1.2.3 タングステン合金シールド缶のシールド機構に対する合金組成の最適化効果
  - 2.1.3 タングステン合金シールド缶のシールド効果に影響を与える要因の分析
    - 2.1.3.1 タングステン合金材料の固有特性
    - 2.1.3.2 遮蔽構造設計パラメータの要因
    - 2.1.3.3 放射線源自体の特性
    - 2.1.3.4 サービス環境条件に影響を与える要因
    - 2.1.3.5 製造工程の精度管理の要因
- 2.2 タングステン合金シールド缶の主要性能評価指標システム
  - 2.2.1 タングステン合金シールド缶の密度計
  - 2.2.2 タングステン合金シールド缶の硬度計
  - 2.2.3 タングステン合金シールド缶の引張強度指標
  - 2.2.4 タングステン合金シールド缶の密封性能指標
  - 2.2.5 タングステン合金シールド缶の耐食性指標
  - 2.2.6 タングステン合金シールド缶のシールド効率
  - 2.2.7 タングステン合金シールド缶の延性指標
  - 2.2.8 タングステン合金シールド缶の耐熱性インジケーター
- 2.3 CTIA GROUP LTD 製タングステン合金シールド缶のMSDS

### 第3章 タングステン合金シールド缶の設計ロジックとタイプ分類

- 3.1 タングステン合金シールド缶の構造構成

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1.1 タングステン合金シールド缶の主なシールド構造（缶体、缶蓋）
- 3.1.2 タングステン合金シールド缶の補助機能構造（ライニング、接続部品）
- 3.1.3 タングステン合金シールド缶の構造協調によるシールド原理
- 3.2 遮蔽シナリオ別に分類されるタングステン合金遮蔽缶の主な種類
- 3.2.1 原子力産業向けタングステン合金遮蔽缶
- 3.2.2 医療分野に特化したタングステン合金シールド缶
- 3.2.3 産業試験用タングステン合金シールド缶
- 3.3 構造形式によるタングステン合金シールド缶の一般的な種類
- 3.3.1 固定タングステン合金シールド缶
- 3.3.2 ポータブルタングステン合金シールド缶
- 3.3.3 密閉型タングステン合金シールド缶
- 3.3.4 オープンタングステン合金シールド缶
- 3.3.5 単層タングステン合金シールド缶
- 3.3.6 多層タングステン合金シールド缶
- 3.3.7 一体型タングステン合金シールド缶
- 3.3.8 モジュラータングステン合金シールド缶

#### 第4章 タングステン合金シールド缶の製造工程

- 4.1 タングステン合金シールド缶の原材料の構成と要件
- 4.1.1 タングステン合金シールド缶の主原料比率
- 4.1.2 タングステン合金シールド缶の原材料の純度と粒径の要件
- 4.1.3 タングステン合金シールド缶用補助材料の選択基準と要件
- 4.2 タングステン合金シールド缶の製造工程
- 4.2.1 タングステン合金シールド缶の基本的な粉末冶金プロセス（粉末の準備、混合、プレス）
- 4.2.2 タングステン合金シールド缶の主要焼結プロセスとパラメータ制御
- 4.2.3 タングステン合金シールド缶の機械加工工程
- 4.2.4 タングステン合金シールド缶の表面処理プロセス
- 4.3 タングステン合金シールド缶の製造工程における品質管理ポイント
- 4.3.1 タングステン合金シールド缶原材料の受入検査基準と方法
- 4.3.2 タングステン合金シールド缶の中間工程における品質検査ノード
- 4.3.3 出荷前の完成したタングステン合金シールド缶の全品検査プロセス

#### 第5章 タングステン合金シールド缶の応用分野

- 5.1 原子力産業におけるタングステン合金遮蔽缶の応用
- 5.1.1 使用済み燃料貯蔵・輸送用タングステン合金遮蔽缶
- 5.1.2 放射性廃棄物処理用タングステン合金遮蔽缶
- 5.1.3 核地質探査サンプル用タングステン合金遮蔽缶
- 5.1.4 原子炉補助機器用タングステン合金遮蔽缶
- 5.2 医療・健康分野におけるタングステン合金シールド缶の応用
- 5.2.1 放射性医薬品の保管および輸送用タングステン合金遮蔽缶

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.2.2 放射線治療用線源用タングステン合金遮蔽缶
- 5.2.3 医療用画像機器を支えるタングステン合金シールド缶
- 5.2.4 放射性廃棄物一時貯蔵用タングステン合金遮蔽缶
- 5.2.5 体外診断用試薬保護用タングステン合金シールド缶
- 5.3 工業試験および電子分野におけるタングステン合金シールド缶の応用
  - 5.3.1 工業用放射線検査線源用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.3.2 電子部品の干渉防止用タングステン合金シールド缶
  - 5.3.3 半導体製造試験用タングステン合金シールド缶
  - 5.3.4 非破壊検査装置用タングステン合金シールド缶
  - 5.3.5 精密電子機器保護用タングステン合金シールド缶
- 5.4 航空宇宙分野におけるタングステン合金シールド缶の応用
  - 5.4.1 航空宇宙放射線試験用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.4.2 航空宇宙部品保護用タングステン合金シールド缶
  - 5.4.3 航空宇宙材料試験用タングステン合金シールド缶
- 5.5 科学研究実験分野におけるタングステン合金シールド缶の応用
  - 5.5.1 原子核物理実験サンプル用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.5.2 素粒子物理学実験用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.5.3 環境放射線モニタリング用タングステン合金遮蔽缶
- 5.6 タングステン合金シールド缶のその他の特殊分野への応用
  - 5.6.1 特殊環境向けカスタムタングステン合金シールド缶
  - 5.6.2 国防・軍事産業向けタングステン合金シールド缶
  - 5.6.3 地質探査および採掘用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.6.4 航空宇宙放射線試験用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.6.5 原子核物理実験サンプル用タングステン合金遮蔽缶
  - 5.6.6 特殊環境向けカスタムタングステン合金シールド缶の応用

## 第6章 タングステン合金シールド缶の選択、使用および保守

- 6.1 タングステン合金シールド缶の科学的選定方法
  - 6.1.1 放射線特性に基づくタングステン合金遮蔽缶の選択基準
  - 6.1.2 サービスシナリオに基づくタングステン合金シールド缶の選択ポイント
  - 6.1.3 業界標準に基づくタングステン合金シールド缶の選択検証
- 6.2 タングステン合金シールド缶使用時の安全操作仕様
  - 6.2.1 タングステン合金シールド缶の基本操作手順と仕様
  - 6.2.2 タングステン合金シールド缶の移動および輸送に関する安全要件
  - 6.2.3 タングステン合金遮蔽缶の緊急処分および故障処理
- 6.3 タングステン合金シールド缶の日常メンテナンスと寿命延長技術
  - 6.3.1 タングステン合金シールド缶の日常的な洗浄とメンテナンス方法
  - 6.3.2 タングステン合金シールド缶の定期検査と性能校正
  - 6.3.3 タングステン合金シールド缶の脆弱な部品の交換とメンテナンス

## 第7章 タングステン合金シールド缶と他のシールド缶の比較

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の比較
  - 7.1.1 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の性能比較
  - 7.1.2 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の環境適合性の比較
  - 7.1.3 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の適用シナリオの比較
  - 7.1.4 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶のライフサイクルコスト比較
- 7.2 タングステン合金シールド缶と鋼製シールド缶の比較
  - 7.2.1 タングステン合金シールド缶と鋼製シールド缶のシールド性能比較
  - 7.2.2 タングステン合金シールド缶と鋼製シールド缶の機械的性能比較
  - 7.2.3 タングステン合金シールド缶と鋼製シールド缶の環境適応性の比較
  - 7.2.4 タングステン合金シールド缶と鋼製シールド缶の費用対効果の比較
- 7.3 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶の比較
  - 7.3.1 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶の材料組成の比較
  - 7.3.2 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶のシールド機構の比較
  - 7.3.3 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶の安定性の比較
  - 7.3.4 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶の応用展望の比較

#### 付録:

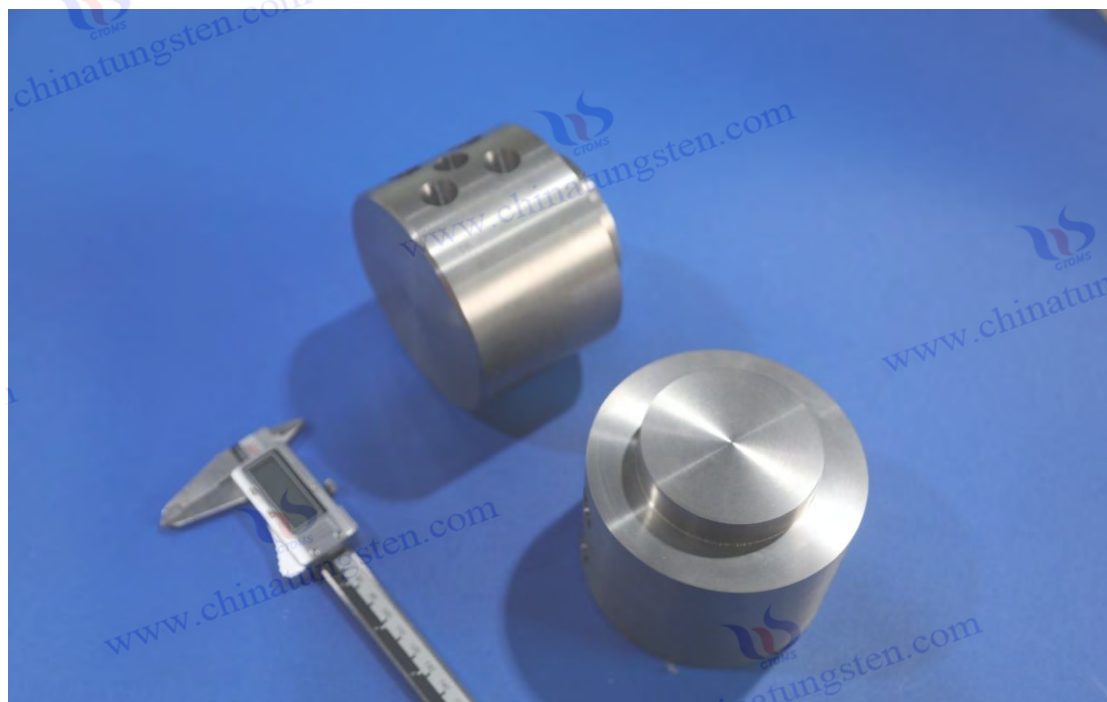
付録 A タングステン合金シールド缶の中国規格

付録 B タングステン合金シールド缶の国際規格

付録 C 欧州、米国、日本、韓国およびその他の国におけるタングステン合金シールド缶の規格

付録 D タングステン合金シールド缶の用語集

参考文献



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

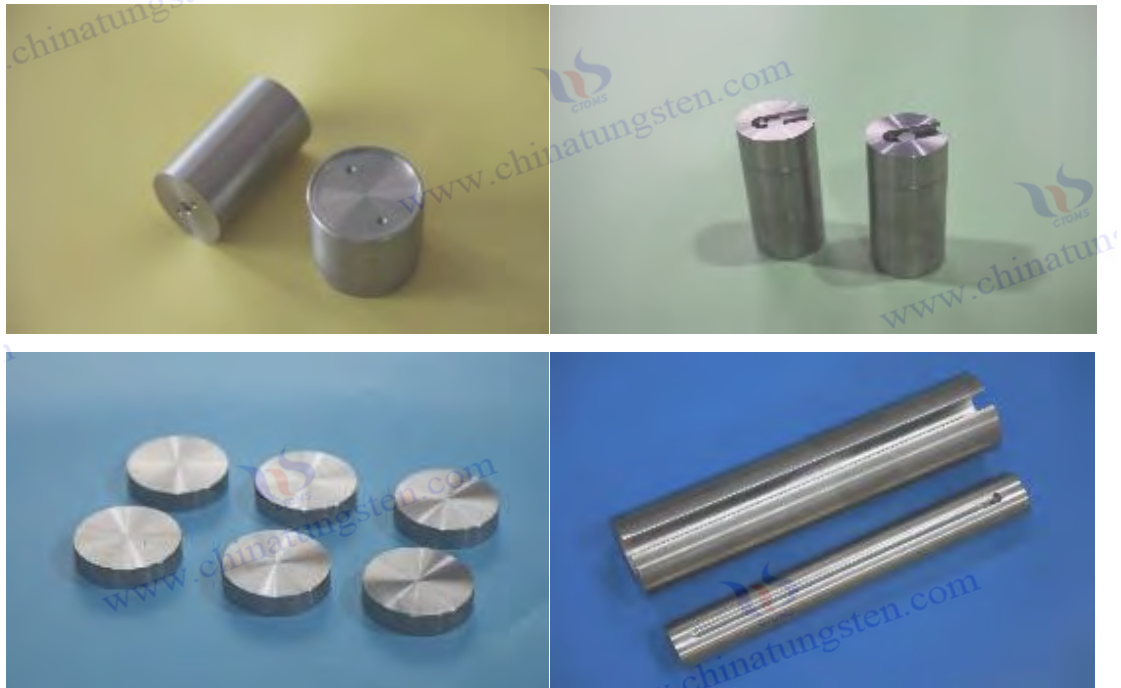
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 第1章 タングステン合金シールド缶の世界へ

### 1.1 タングステン合金シールド缶のコンセプト

タングステン合金遮蔽容器は、現代の放射線防護工学においてタングステンを主材料とする高密度タングステン合金を主材料とし、放射性物質の封じ込めと遮蔽を目的として特別に設計・製造された機能性容器です。鉛、鉄、コンクリートに比べてはるかに高い嵩密度と、ガンマ線、X線、中性子束に対する優れた減衰能を最大限に活用し、非常に限られた空間内で高効率の放射線遮蔽を実現します。同時に、十分な構造強度、熱安定性、化学的不活性性、そして長期的な封じ込め信頼性も備えています。従来の遮蔽方法と比較して、タングステン合金遮蔽容器は「防護性能向上、容積増加、重量増加」という本質的な矛盾を完全に打破し、同等の防護性能を確保しながら総容積と質量を大幅に削減することで、施設の空間利用率、運用柔軟性、そして人員のアクセス性を向上させます。

実用分野において、タングステン合金遮蔽容器は、放射性物質または放射性廃棄物に対する最初の物理的封じ込めバリアとして、また放射線量制御の中核となる工学バリアとして機能します。核医学イメージング装置、同位体製造ホットチャンバー、産業用X線検査暗室、研究炉の照射経路、高エネルギー物理学実験端末、そして放射性廃棄物の一時保管・移送など、幅広く利用されており、「最適な防護」と「線量の最小化」という原則を実現するための重要な物理的構成要素となっています。放射線用途が高放射能化、小型化、移動性へと進化するにつれ、タングステン合金遮蔽容器は従来の鉛容器、鉛ガラス容器、重量コンクリート容器に徐々に取って代わり、今日の放射線防護分野において、ハイエンド、グリーン、長寿命の遮蔽ソリューションの代表として認められています。

#### 1.1.1 タングステン合金シールド缶の定義

タングステン合金遮蔽容器とは、タングステン含有量が90%以上のタングステン-ニッケル-鉄、タングステン-ニッケル-銅、またはタングステン-ニッケル-鉄-銅の高密度合金を素材とし、ニアネットシェイプ成形、焼結、鍛造、または精密機械加工工程を経て製造され、放射性物質の封じ込め機能と放射線遮蔽機能の両方を備えた複合工学容器と厳密に定義されます。その設計は、国際原子力機関（IAEA）の放射性物質輸送容器に対する機械的および熱的要件、各国の原子力安全規制当局の貯蔵・取扱容器に関する型式承認条件、そして医療および産業放射線防護における最も厳しい表面線量率限度を同時に満たす必要があります。

材料科学の観点から見ると、高密度合金は放射線防護における構造と機能の統合応用の典型であり、システム工学の観点から見ると、包括的な遮蔽システムの中核ノードであり、規制および規格の観点から見ると、A型、B型、C型放射性物質輸送容器、産業用線源容器、医療用線源容器、または廃棄物容器の具体的な実装の一つです。まさにこの複数の特性を高度に統合

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



した構造こそが、タングステン合金遮蔽容器を現代の放射線安全システムにおいて不可欠なものにしているのです。

### 1.1.2 タングステン合金シールド缶の基本構成

典型的なタングステン合金シールドタンクは、タンク本体、上蓋または端蓋、シーリング・ロックシステム、昇降・ハンドリングインターフェース、表面機能コーティング、内部空洞洗浄ライニング、および各種補助機能インターフェースで構成されています。タンク本体は通常、一体型焼結ブランクまたは多分割鍛造リング溶接プロセスで製造され、シールド層の厚さが連続し、接合隙間が生じないようにしています。上蓋は、主に埋め込み型または凸型構造を採用し、精密研磨によりミクロンレベルの嵌合精度を実現しています。

シーリングシステムは、一般的に多段ラビリンスシールと耐放射線性弾性シーリングリングまたは波形金属シーリングリングを組み合わせた二重安全設計を採用しています。この設計により、放射性エアロゾルの漏洩を防ぎながら、高温照射後も着脱性を維持します。ロック機構は主にクイックロッククランプ、多ねじジョイント、または油圧ロックリングを採用し、迅速な操作性と長期的な緩み防止性能を両立しています。吊り上げ・ハンドリングインターフェースには、上部に一体型の鍛造吊り上げラグ、側面にフォークリフト用スロット、または下部に標準化されたバレットが装備されており、遮蔽搬送車両、ガントリークレーン、ロボットアームなどの全工程にわたる運用ニーズに対応します。

表面には、耐腐食性と除染効率を向上させるため、無電解ニッケルメッキ、黒色酸化皮膜、または特殊な除染コーティングが施されることが多い。また、鉛ガラス製の観察窓、線量率モニタリングプローブインターフェース、圧力バランスバルブ、内蔵線源操作機構、または交換可能なライナーが組み込まれており、単一のコンテナを監視、操作、輸送などの複数の機能を備えた統合シールドシステムへと変貌させる。これらの要素は、封じ込め、遮蔽、操作性、除染能力というシステム原理に基づいて最初から設計されており、高度に調和された安全冗長性のある全体構造を形成している。

### 1.1.3 タングステン合金遮蔽容器の基本特性

タングステン合金遮蔽容器の最も重要な特徴は、高い遮蔽効果と小型・軽量であることです。

同じ放射線エネルギーと防護要件において、鉛容器よりもはるかに薄い壁厚でありながら、同等、あるいはそれ以上の線量減衰効果を達成できるため、貴重な保温スペースと建物の負荷を大幅に軽減できます。また、優れた総合的な機械特性と高温安定性を備えています。長期照射や温度サイクルにおいても、鉛のクリープ軟化やコンクリートの微小亀裂や漏洩を起こさず、構造とシールの永続的な信頼性を確保します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第三に、優れた耐腐食性と容易な洗浄性を誇ります。タングステン・ニッケル・銅合金は、湿気、酸性、アルカリ性、塩分を含む環境でも安定しています。鏡面仕上げの内空部と組み合わせることで、繰り返しの洗浄作業が簡単かつ効率的になり、二次廃棄物の量を大幅に削減します。第四に、完全に無毒で鉛を含まないため、従来の鉛容器の環境および健康への危険性を根本的に排除し、放射性廃棄物の最終処分とグリーン放射線防護に関する最も厳しい要件を満たしています。最後に、極めて高い設計自由度と製造精度を提供します。壁の厚さ、キャビティの形状、インターフェースの種類は、放射性物質の特定のエネルギースペクトル、放射能、化学形態、および適用シナリオに応じて詳細にカスタマイズでき、小型の医療用線源容器から大型の廃棄物移送容器まで、フルスペクトルをカバーします。

これらの相互に関連した優れた利点により、タングステン合金遮蔽キャニスターは、放射線防護の経済性と操作性を大幅に向上させただけでなく、核医学、同位体生産、産業欠陥検出、科学的照射施設の小型化、モジュール化、グリーン化に向けた大きな進化を促進し、現代の放射線安全工学において最も技術的に進歩した代表的な遮蔽部品の 1 つになりました。

## 1.2 タングステン合金シールド缶の材料選択ロジック

候補の中でも際立っており、ハイエンド遮蔽タンクの構造材料として好まれています。その優れた点は、放射線減衰能力、機械的特性、熱安定性、化学的不活性性、加工性、環境適合性など、複数の側面において最適なバランスを備えていることです。従来の遮蔽設計では、鉛、コンクリート、ホウ素化ポリエチレン、あるいは普通鋼が長年使用されてきましたが、これらの材料にはそれぞれ克服できない欠点があります。鉛は密度が高いものの毒性があり、高温クリープが激しい。コンクリートは遮蔽効率が低く、固定性が低い。ホウ素化ポリエチレンは中性子に対してのみ効果があり、ガンマ線に対してはほとんど無力である。そして普通鋼は、極めて厚い壁でかろうじて要件を満たす程度である。材料選択の根底にある論理は、常に「限られたスペースと重量の範囲内で、最大限の放射線減衰、最長の耐用年数、最低のメンテナンスコスト、そして最高の環境適合性を達成する」という中核目標を中心に展開されてきました。理論密度に近い微細構造、高品質のガンマ線減衰係数、適度な中性子減速能力、そして優れた総合的な機械特性を備えたタングステン合金は、この目標を完璧に満たしています。特に、核医学ホットチャンバー、同位体製造ライン、産業用探傷無響室、高エネルギー物理学実験端末など、空間が極めて敏感で、除染要件が厳しい状況においては、タングステン合金遮蔽容器は、規制、エンジニアリング、そして経済性の制約を同時に満たす、ほぼ唯一の現実的なソリューションとなっています。

### 1.2.1 タングステン合金と主流のシールド材料の性能比較

タングステン合金は鉛と同等かそれ以上のガンマ線遮蔽能力を備えながら、鉛に伴う高い毒性、クリープ軟化、二次汚染のリスクを完全に排除します。鉛容器は、長時間の照射や高温にさらされると不可逆的な変形を起こしやすく、密閉不良や表面線量率の上昇につながります。一方、タングステン合金容器は高温照射下でも形状精度と構造強度を維持し、これらのリスクを完全に回避します。さらに、タングステン合金は無毒であるため、医療分野や同位元素製造

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

分野で規制上の優位性があります。除染後は、鉛容器の場合は環境に配慮した特別な廃棄手順が必要となることが多いのに対し、タングステン合金は除染後、通常の金属廃棄物として直接廃棄できます。

タングステン合金は、通常の鋼やステンレス鋼に比べて嵩密度がはるかに高いため、同等の遮蔽効果を得るために壁を大幅に薄くすることができます。これにより、全体的な重量配分がより合理的になり、頻繁に吊り上げを行う用途や設置スペースが限られている用途に特に適しています。ステンレス鋼は優れた耐食性を備えていますが、高エネルギーガンマ線下で同等の減衰率を得るにはタングステン合金の数倍の厚さが必要となり、容器の重量過多と高温チャンバーの過負荷につながります。一方、タングステン合金は薄壁で必要な線量率を達成できるため、土木工事費と吊り上げ設備の要件を削減できます。

エンジニアリングセラミックやサファイアのような超硬質脆性材料と比較して、タングステン合金は金属靱性を有しながらも極めて高い硬度を維持しており、衝撃や熱衝撃を受けた際にセラミック材料に見られるような壊滅的な亀裂を回避します。セラミックシールド部品は特定の放射線エネルギーに対して高い減衰効率を示しますが、製造が難しく、コストが高く、修理も不可能です。マイクロクラックが発生すると、部品は使用できなくなります。一方、タングステン合金シールド容器は、局所的な損傷に対してレーザー再溶融による修復が可能であるため、ライフサイクル全体の経済性を大幅に向上させます。

ホウ素含有ポリエチレンやその他の中性子遮蔽材料と比較すると、タングステン合金は水素含有材料に比べて熱中性子の減速効果は劣るものの、ガンマ線と高速中性子の複合遮蔽効果ははるかに優れています。さらに重要なのは、タングステン合金はホウ素含有層または水素含有層を局所的に埋め込むことで、同一容器内でガンマ線と高速中性子の複合遮蔽を実現できることです。一方、プラスチック材料は高温で劣化や変形を起こしやすいため、構造用途には適していません。

劣化ウラン遮蔽材と比較すると、タングステン合金は放射能や規制の問題を完全に回避し、優れた機械的特性と加工性を備えているため、民間の核医学、産業欠陥検出、科学研究施設に自由に利用できます。

### 1.2.2 タングステン合金シールド缶のシールド性能における主な利点

タングステン合金遮蔽容器の遮蔽性能における主な利点は、ガンマ線および X 線に対する体積減衰能力が極めて高いことです。タングステンは原子番号が高く、電子雲密度が大きいため、光電効果、コンプトン散乱、電子対効果を組み合わせた断面積が、鉛や鉄などの従来の金属をはるかに上回っています。これにより、同じ質量の遮蔽層でより多くの高エネルギー光子を遮断できるため、同じ線量率制御レベルでの壁厚が大幅に低減し、容器形状がよりコンパクトになり、使用可能な内容積が大幅に増加します。核医学ホットセル、同位体分配室、PET-CT 室など、スペースが限られた場所では、より機能的な機器を設置したり、遮蔽壁の厚さを大幅に低減したりできるため、全体的なエンジニアリング経済の質的な飛躍につながります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第二に、タングステン合金は高速中性子の減速・吸収能力にも優れています。特にタングステン-ニッケル-鉄系では、鉄の高い非弾性散乱断面積とタングステンの高密度弾性散乱が相乗的に作用し、中性子エネルギーを効果的に低減します。外側または内側に水素またはホウ素を含む徐放層を設けることで、鉛容器で必要とされる異種材料層を必要とせずに、ガンマ線-中性子複合遮蔽を実現できます。単一材料で広帯域スペクトル遮蔽を実現できるこの能力は、容器の構造設計を大幅に簡素化し、層間界面の損傷リスクを排除します。

さらに重要なのは、タングステン合金の遮蔽性能は温度上昇によってほとんど低下せず、高温照射下でも完全な微細構造とマクロ形状を維持できることです。一方、鉛は高温で著しいクリープを示し、コンクリートは水分損失により微小亀裂が生じ、ホウ素化ポリエチレンは軟化・劣化します。タングステン合金は熱膨張係数が低く、再結晶温度が高いため、火災事故や長期間の高温照射下でも遮蔽容器は設計された遮蔽厚さを維持し、線量率が限度を超えるのを防ぎ、緊急対応のための貴重な時間を稼ぐことができます。

最後に、タングステン合金の表面は、研磨、メッキ、または化学的不動態化処理によって緻密で安定した酸化膜を形成でき、二次放射性核種の吸着が極めて低く、除染係数が高く、繰り返し汚染されても背景レベルまで回復する能力を備えています。一方、鉛の表面は多孔質であるため不可逆的な汚染を受けやすく、コンクリートは粗さと多孔性のために放射性粉塵を長期にわたって保持します。これらの特性を考慮すると、タングステン合金遮蔽容器は、遮蔽効率、スペクトル適応性、環境耐性、長期除染能力において多面的なリーダーシップを発揮し、現代のハイエンド放射線防護施設に最適な遮蔽媒体となっています。

### 1.2.3 シナリオ適応におけるタングステン合金シールド缶の選択ロジック

実務工学において、タングステン合金遮蔽容器の選択は、「線源、使用状況、規制、寿命、コスト」を統合した体系的なロジックに従います。まず、放射線源の種類、エネルギースペクトル、放射能に基づいて、必要な遮蔽厚さと材質システムを決定します。高エネルギーガンマ線源には中性子遮蔽も兼ね備えたタングステン-ニッケル-鉄系が適しています。磁場に敏感な医療環境における純粋ガンマ線源には、非磁性のタングステン-ニッケル-銅系が選択されます。フッ素含有廃液や強酸性放射性廃液を扱う場合は、耐腐食性ライニング層を内側に追加するか、耐孔食性に優れたタングステン-ニッケル-銅合金を選択する必要があります。

第二に、壁の厚さの分布と構造形式は、使用シナリオのスペースと重量の制約に基づいて決定されます。ホットチャンバー固定式大型タンクは、均一な壁の厚さと全体的な剛性を追求し、一体型焼結または多層スリーブ構造を採用しています。移動式輸送コンテナは、最適な重量と落下抵抗を重視し、多くの場合、外側が薄く内側が厚い勾配設計を採用し、衝撃吸収ベースが追加されています。グローブボックス内蔵型小型ソースタンクは、操作の容易さを重視し、素早く開く蓋と軽量の吊り上げラグを使用しています。さらに、法規制の厳格な遵守が不可欠です。医療廃棄物移送タンクは、国家薬品监督管理局と国家原子力安全局の二重登録に準拠する必要があり、表面線量率、除染係数、生体適合性はすべて型式試験に合格する必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

産業廃棄物移送タンクは、A 型または B 型の輸送容器基準を満たす必要があり、落下、積み重ね、火災のテストが不可欠です。科学研究実験に使用されるタンクでは、インターフェースの多様性と迅速な変更能力がより重視されます。

最後に、ライフサイクル全体のコストとメンテナンス戦略について考えてみましょう。タングステン合金の初期購入コストは鉛よりも高くなりますが、メンテナンスフリー、鉛汚染ゼロ、修理容易性、そして超長寿命により、従来の材料と比較して総所有コスト（TCO）ははるかに低くなります。特に、頻繁な開封、分注、除染を必要とする核医学および同位体製造ラインでは、タングステン合金遮蔽容器は、労力の節約、廃棄物量の削減、ダウンタイム損失の回避により、3 年以内に投資を回収できる場合があります。

上記のロジックの緊密な閉ループにより、タングステン合金遮蔽タンクの選択は、初期の「性能優先」から今日の「シナリオ主導、規制主導、ライフサイクル経済」のシステムエンジニアリングの実践へと進化し、工場から出荷されるすべての遮蔽タンクが放射線安全に対する強固な障壁であるだけでなく、施設の運用効率とグリーンコンプライアンスの最適なキャリアでもあることが保証されます。

### 1.3 タングステン合金シールド缶の開発の歴史と産業的価値

タングステン合金遮蔽容器は、高密度合金材料科学、放射線防護工学のニーズ、そして核医学・同位体産業の急速な発展という 3 つの要素が融合した結果です。当初は鉛容器の「高級代替品」として位置づけられていましたが、現在では核医学ホットチャンバーや同位体製造ラインの標準部品として、そして産業用欠陥検査、科学照射施設、放射性廃棄物管理といったチェーン全体に徐々に浸透し、タングステン合金遮蔽容器は「オプション」から「必須」へと目覚ましい変貌を遂げてきました。この変貌の背景には、タングステン合金冶金・加工技術の継続的な進歩、鉛フリー、長寿命、除染耐性を備えた材料に対する世界的な放射線安全規制の必須要件、そして宇宙資源の高騰と人員被ばく線量制限の厳しさといった切迫した現実があります。その産業的価値は、施設の安全性レベルと運用効率を大幅に向上させるだけでなく、放射線応用産業全体のコンパクト化、グリーン化、インテリジェント化に向けた構造的アップグレードを推進することにあります。

#### 1.3.1 タングステン合金シールド缶の技術進化段階

第一段階（1990 年代以前）は概念実証と小規模な試験使用の期間でした。当時、タングステン合金は主に局所放射線コリメータ用の単純なブロックや板の形で使用され、遮蔽容器は依然として主に鉛鋳物や鉛レンガ造りでした。一部の研究機関や高級医療センターでは、タングステン合金を機械加工して小型の医療用線源容器や注射器保護スリーブを製造しようと試みましたが、タングステン合金のニアネットシェイプ成形技術が未熟で、コストが高く、照射後の性能データが不十分であったため、応用範囲は極めて狭く、実験室でのカスタマイズレベルにとどまっていた。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第2期（1990年代後半から21世紀初頭）には大きな飛躍がありました。真空焼結と熱間静水圧プレス法の工業化により、タングステン合金ブランクのサイズと密度が大幅に向上し、複雑で不規則な形状の容器をワンストップでニアネットシェイプ成形することが可能になりました。同時に、核医学 PET-CT とサイクロトロンの急速な普及により、ホットチャンバーのスペース制約と鉛汚染の問題が顕在化し、タングステン合金遮蔽容器は少量生産の医療用線源容器から中型輸送容器、そしてホットチャンバー固定容器へと用途を拡大しました。非磁性タングステン-ニッケル-銅系の成熟により、MRI 対応環境への適用における障壁がさらに解消され、この時期にタングステン合金遮蔽容器は市場において「ハイエンド代替材料」としての地位を確立しました。

第三段階（21世紀最初の10年間）は、標準化と大規模生産の段階に入りました。国際原子力機関（IAEA）や各国の原子力安全規制機関は、放射性物質の輸送・貯蔵に関する推奨ガイドラインに「鉛フリー」を相次いで盛り込み、タングステン合金製遮蔽容器が初めて A 型および B 型輸送容器のオプション材料リストに正式に追加されました。同時に、大手同位元素生産企業はタングステン合金製ホットチャンバー遮蔽部品をセットで購入するようになり、タングステン合金の大型ピレット鍛造、深穴加工、多層複合溶接技術が成熟しました。容器1個の重量は数キログラムから数トンへと飛躍し、製品範囲は微小サイズから巨大サイズまで網羅的になりました。

第4段階（21世紀10年代から現在まで）は、統合化、インテリジェント化、グリーン化の包括的な飛躍的発展期です。タングステン合金遮蔽容器はもはや単なる「金属容器」ではなく、線量モニタリング、自動線源再配置、圧力バランス調整、遠隔開閉、自己診断機能を統合したインテリジェント遮蔽システムへと進化しました。表面機能コーティング、耐放射線シーリング材、内蔵鉛ガラス観察窓といった主要な支援技術はすべて国産化または独立制御が可能となり、大幅なコスト削減を実現しました。同時に、廃棄されたタングステン合金遮蔽容器をリサイクル・再利用するための閉ループシステムが確立され、真のグリーンなライフサイクル特性を実現しています。現在、タングステン合金遮蔽容器は、当初の「高価な贅沢品」という地位から、核医学センター、同位体工場、産業欠陥検出ワークショップの標準的な「インフラレベル」の部品へと完全に変貌を遂げ、この技術が研究室から産業界の主戦場へと進化を遂げたことを示しました。

### 1.3.2 シールド缶におけるタングステン合金の応用における技術革新

タングステン合金遮蔽容器は、数々の決定的な技術革新を経て、実験室レベルのコンセプトから核医学、同位体製造、産業用照射施設の標準部品へと進化を遂げてきました。これらの革新は、製造の難易度とコストを大幅に低減しただけでなく、スペース、重量、寿命、規制遵守といった面でその応用範囲を根本的に拡大し、最終的には「ハイエンドの代替品」から「唯一の合法的な選択肢」へと変貌を遂げました。最初の重要なマイルストーンは、大型で複雑なブランクのニアネットシェイプ成形技術の成熟でした。初期のタングステン合金シールド容器は、ブランクのサイズと形状によって制限されていたため、モジュール式の機械加工とろう付け

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



組み立てが必要でした。その結果、継ぎ目がシールドの弱点となり、クリーニングのデッドゾーンとなっていました。冷間等方圧プレス、熱間等方圧プレス、超大型金型技術のブレイクスルーにより、一体型焼結ブランクの重量と複雑さは大幅に増加しました。容器本体全体の一体成形と不規則な形状の内部空洞が実現し、継ぎ目が完全になくると同時に、シールドの連続性と構造強度が向上しました。このブレイクスルーは、小型の医療用線源容器から大型の廃棄物移送容器まで、フルスペクトルの製品ラインの開発を直接促進しました。

二つ目のマイルストーンは、非磁性・耐腐食性タングステン・ニッケル・銅（TTC-CCP）システムの設計です。従来の TTC-ニッケル-鉄合金は高い強度を有しますが、MRI 対応核医学環境では許容できない磁気干渉を生じ、耐腐食性も比較的不十分でした。TTC-CCP システムは、銅含有量と焼結プロセスを正確に制御することで、完全な非磁性を実現しながら、湿気の多い環境、塩素系洗剤、酸性廃液に対してほぼ化学的に不活性な状態を維持します。この画期的な進歩により、PET-CT 室、サイクロترونホットチャンバー、高活性分注ラインにおいて、タングステン合金遮蔽容器を初めて大規模に使用できるようになり、医療現場への適用における障害が完全に排除されました。

3 つ目の重要なブレイクスルーは、深穴加工と極厚壁一体成形技術の習得です。遮蔽タンクは、非常に深い内部空洞と局所的に極厚の遮蔽領域を必要とすることが多く、従来の穴あけ加工法では効率が悪く、スクラップ率も高くなります。ガンドリル加工、深穴ホーニング加工、超音波電解加工、そしてアスペクト比の大きいタングステン合金ピレットの鍛造性向上などにより、アスペクト比 20 を超える遮蔽穴を一括成形するという課題を解決しました。これにより、タンク内部の鏡面仕上げが一般的になり、除染効率が大幅に向上し、二次廃棄物の量が削減されました。

4 つ目のマイルストーンは、機能性コーティングと統合設計におけるシステム的なブレイクスルーです。初期のタングステン合金遮蔽容器は、表面が単純な研磨のみで、傷や汚染に対する耐性が限られていました。無電解ニッケルメッキ、耐放射線洗浄コーティング、高温 MoSi<sub>2</sub>酸化防止層、内蔵鉛ガラス観察窓、線量監視インターフェース、圧力バランスバルブなどの機能モジュールの標準化により、遮蔽容器は単なる格納・遮蔽容器から、監視、操作、輸送など多機能を備えたインテリジェントシステムへと変貌を遂げ、全体的な使いやすさと安全性の冗長性が大幅に向上しました。

第 5 段階は、廃棄タングステン合金遮蔽容器を完全にリサイクル・再利用するための閉ループシステムを構築することです。タングステン合金は完全に無毒であり、繰り返し溶解・粉砕できるため、廃棄された遮蔽容器はほぼ 100%のリサイクル率で生産チェーンに再投入することができ、真にグリーンなライフサイクルを実現します。この画期的な進歩により、重金属の蓄積や最終処分に関する顧客の懸念が完全に払拭されるだけでなく、タングステン合金遮蔽

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

容器は最も厳しい放射性廃棄物管理規制の適用除外を永久に受けることになり、真の「グリーン遮蔽材」となります。

これら 5 つの重点分野における相次ぐ画期的な進歩は、段階的に進歩し、相互に連携し、最終的にタングステン合金遮蔽容器を放射線防護工学の最前線へと押し上げました。これらは、材料、成形、加工、表面处理、リサイクルに至るまでの完全な技術チェーンを構成し、タングステン合金遮蔽容器は性能において鉛容器やコンクリート容器を凌駕するだけでなく、経済性、法規制遵守、環境適合性においても圧倒的な総合的優位性を確立し、現代の放射線安全分野における最も典型的かつ成功した材料代替事例の一つとなっています。

### 1.3.3 産業分野におけるタングステン合金シールド缶の核となる価値

タングステン合金遮蔽容器は、もはや単一部品の域を超え、「キーとなる基盤技術+体系的なコスト削減プラットフォーム+グリーンコンプライアンスインフラ」という三位一体の形態で、放射性同位元素および放射線応用産業チェーン全体の運用効率、安全レベル、そして持続可能な発展能力を根本的に変革し、継続的にサポートしてきました。

まず、それが核医学および同位元素産業における空間とコストの革命の真の原動力です。従来の鉛遮蔽システムでは、厚くて重いホットチャンバーの壁、巨大な設置面積、そして高額な土木工事と吊り上げ費用が必要でした。対照的に、タングステン合金遮蔽タンクは鉛よりはるかに薄い壁厚で同等かそれ以上の線量制御を実現し、新しく建設された PET-CT センター、サイクロترون製薬工場、高放射能分配ラインのホットチャンバー面積を 30～50%削減しました。これにより、建物と遮蔽の両方への投資が大幅に減少しました。さらに重要なのは、コンパクトな設計により機器レイアウトの柔軟性が向上し、1 つの建物により多くの生産ラインや加速器を収容できることです。これにより単位面積あたりの出力効率が何倍にも高まり、過去 15 年間にわたる世界の核医学イメージングと放射性医薬品の生産能力の飛躍的な拡大を直接的に支えています。

規制下において、産業チェーンのグリーン化に向けた唯一の現実的な道筋です。世界的に、「鉛フリー」は推奨から義務要件へと引き上げられました。鉛容器の調達、使用、除染、そして最終処分は、ますます高い環境基準と経済的ペナルティに直面しています。しかし、タングステン合金遮蔽タンクは、本質的に最も厳しい規制を満たしており、追加のコンプライアンス変更なしに、直接免除することができます。これにより、製造企業は鉛汚染対策にかかる多額の費用を節約できるだけでなく、鉛容器に起因するプロジェクトの環境影響評価の妨害や生産停止のリスクを回避でき、新規同位体工場や既存工場の改修における標準的な「コンプライアンスパス」となります。

第三に、タングステン合金シールド缶はライフサイクル全体を通じて二次汚染がなく、ほぼ 100%リサイクル可能であるため、「使用時は高価で、廃棄時にはさらに高価」という従来のシールド材の悪循環を完全に断ち切ることができます。廃棄されたタングステン合金シールド缶は、高品質の原料として直接製錬炉に戻すことができますが、鉛缶は有害廃棄物処理プロセスに投入され、処理コストが購入コストの数倍に達することがよくあります。タングステン合

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金シールド缶のこの閉ループ特性により、8～10 年の使用後、総所有コストは鉛缶よりも大幅に低くなり、産業チェーンの長期的な経済的存続可能性を左右する決定的な変数となります。

第四に、高い信頼性と長寿命により、運用保守の負荷と計画外停止のリスクが大幅に低減します。高品質のタングステン合金シールドタンクは、通常の使用条件下では 20 年以上の耐用年数を容易に達成でき、この期間中はメンテナンスがほとんど不要で、定期的なライニング交換や溶接補修も不要です。一方、鉛タンクは約 5 年でクリープ、亀裂、不可逆的な汚染が発生することがよくあります。これは、同じ生産能力であれば、タングステン合金シールドシステムは予備タンクが少なく、ホットチャンバーの開閉頻度が低く、作業員の被ばく線量も低減できることを意味します。全体的な運用効率と労働衛生レベルは、従来のシステムよりも大幅に高くなっています。最後に、タングステン産業チェーンの中で最も付加価値の高い最終製品の一つであるタングステン合金シールドタンクは、タングステン粉末、ピレット、深加工、表面処理など、上流チェーン全体における技術向上と生産能力拡大を牽引し、大きな正のフィードバック効果を生み出しています。高級シールド缶の継続的な受注により、大規模な熱間静水圧プレス、超深穴加工、機能性コーティングなどの一連の戦略的プロセスの継続的な反復が支えられ、中国のタングステン産業はグローバルバリューチェーンの上流と下流の両方で強力な地位を維持することができています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## 第2章 タングステン合金シールド缶のシールド機構と性能指標

### 2.1 タングステン合金遮蔽缶における放射線遮蔽の基本原則

タングステン合金遮蔽容器は、高密度合金による電離放射線の複合減衰機構に基づいています。その核心は、材料の極めて高い電子密度と原子番号により、ガンマ線、X線、および中性子束の急速なエネルギー付与と指数関数的な減衰を実現することです。同時に、構造機能統合設計により、封じ込め遮蔽、操作の容易さ、除染の容易さを統合しています。光電効果のみに依存する従来の鉛遮蔽や、定位減速に依存するコンクリートとは異なり、タングステン合金遮蔽は、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成、そして非弾性および弾性中性子散乱の相乗効果に基づく、広帯域で高効率な遮蔽システムを形成します。これにより、核医学、同位体製造、産業欠陥検出、科学的照射施設において、限られたスペースと重量の予算内で線量率制御、最適化された保護、規制遵守を同時に満たすことができる唯一の技術的アプローチとなります。

#### 2.1.1 タングステン合金遮蔽缶における電離放射線の伝播特性の解析

タングステン合金遮蔽缶は、主にガンマ線、X線、高速中性子、熱中性子、および関連する二次放射線を遮蔽します。これらの放射線の伝播特性とエネルギースペクトル分布が、遮蔽材料と構造設計の基本的な原理を決定します。

ガンマ線と高エネルギーX線は、強い透過力を持つ間接電離放射線です。物質中でのエネルギー損失は、主に光電効果、コンプトン散乱、電子-電子対生成という3つのメカニズムによって起こります。タングステン合金は、原子番号が高く電子雲密度が高いため、広いエネルギー範囲にわたって非常に高い質量減衰係数を維持します。特に、核医学、医療用線形加速器、サイクロトロンで一般的に使用されるコバルト 60 とセシウム 137 が生成するガンマ線エネルギー範囲では、光電効果と電子-電子対生成が支配的であり、鉛、鉄、コンクリートよりもはるかに優れたエネルギー付与効率を実現します。同時に、タングステン合金は高密度であるため、同じ質量の遮蔽層で平均自由行程が短くなります。放射線は容器壁内でより多くの相互作用を受けるため、指数関数的な減衰が速くなり、外部表面線量率が桁違いに減少します。

高速中性子と熱中性子は、主に研究炉の照射経路、ホウ素中性子捕捉療法装置、および一部の同位体製造プロセスで使用されます。高速中性子は非弾性散乱および弾性散乱によって急速にエネルギーを失います。タングステン合金は、その極めて高い核子密度により、優れた高速中性子減速材となります。一方、熱中性子は主に捕捉され、二次ガンマ線を生成します。タングステン-ニッケル-鉄系に鉄と微量の希土類元素を添加することで、熱中性子の吸収断面積を大幅に向上させることができます。また、タングステン-ニッケル-銅系では、外層または内層のホウ化物層によって同様の効果が得られます。実用的な遮蔽容器では、構造強度を維持しながらガンマ線と中性子の複合遮蔽を実現するために、「タングステン合金本体 + 局所複合中性子吸収層」というハイブリッド設計が採用されることが多いです。

二次放射線には、コンプトン散乱光子、消滅光子、特性X線、制動放射線、中性子捕捉ガンマ線が含まれます。これらの二次放射線は通常、一次放射線よりもエネルギーが低いですが、キ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

キャニスターの外表面に近い位置にあるため、線量制御の重要なボトルネックとなります。タングステン合金遮蔽キャニスターは、精密な壁厚勾配設計と内面の低Zライニングにより、二次放射線が外部に漏れる前に再吸収または散乱されることを確実にし、従来の鉛キャニスターによく見られる「二次放射線漏洩」の問題を完全に排除します。

さらに、タングステン合金は長期照射下でも非常に安定した微細構造を示し、放射化生成物やガス膨張がほとんど発生しないため、遮蔽性能の経時劣化は最小限に抑えられます。一方、鉛、コンクリート、ホウ素含有プラスチックなどの材料は、同じ放射線量でも性能劣化の程度は様々です。前述の伝播特性と相互作用メカニズムに対する深い理解と体系的なアプローチこそが、タングステン合金遮蔽容器が複雑な混合放射線場において真に「広帯域、高効率、長寿命」な遮蔽を実現し、現代の放射線防護工学において最も科学的に健全でエンジニアリンググレードの遮蔽ソリューションとなっている理由です。

### 2.1.2 タングステン合金シールド缶のシールド機構（吸収と減衰）

タングステン合金遮蔽缶は、単純な幾何学的閉塞ではなく、高密度複合材料中における高エネルギー光子と中性子の多重相互作用によって引き起こされるエネルギー沈着と強度の指数関数的減衰のプロセスです。その減衰機構は、入射粒子の種類とエネルギーに応じて段階的に顕著な特性を示しますが、常に極めて高い全体効率を維持し、有限の壁厚内で高放射能放射源から外表面の背景レベルまで、線量を大幅に低減します。

ガンマ線と高エネルギー X 線の場合、タングステン合金は低エネルギー範囲で光電効果が優勢になります。タングステン原子の K、L、M 殻電子は直接放出され、ほぼすべてエネルギーが光電子運動エネルギーと特性 X 線に変換されます。これらの特性 X 線は、周囲の原子によって再び光電吸収され、急速な局所エネルギー付与が起こります。中エネルギー範囲では、コンプトン散乱が優勢になります。入射光子は外殻電子と非弾性衝突し、散乱光子のエネルギーと方向がランダム化されます。散乱が繰り返されると、最終的に光子エネルギーが徐々に減少し、光電吸収に至ります。高エネルギー範囲では、電子対形成が優勢になります。入射光子は、原子核の強い電場で電子・陽電子対に変換されます。これらの対は、すべてエネルギーが付与されるまで、電離と制動放射線によってエネルギーを失い続けます。タングステン合金では平均自由行程が非常に短いため、これら 3 つのメカニズムが高度に重複しており、その結果、X 線強度は厳密に指数関数的に減少し、半価層は鉛や鋼よりもはるかに小さくなります。

高速中性子に対して、タングステン合金はまず非弾性散乱によって中性子とタングステン原子核の激しい衝突を引き起こし、大量の運動エネルギーを瞬時に伝達して二次中性子とガンマ線を発生させます。その後、多重の弾性散乱過程を経て中性子のエネルギーはさらに低下し、最終的に熱中性子領域に入り、鉄、希土類元素、または外部のホウ素層によって効率的に捕獲されます。このプロセス全体は、高核子密度物質では非常に速く完了し、高速中性子の透過力が大幅に弱まります。熱中性子捕獲後に発生する瞬間的なガンマ線はエネルギーが低く、その後タングステン合金自体によって光電吸収またはコンプトン散乱され、閉ループ遮蔽を実現します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

二次放射線の制御は、従来の材料と比較したタングステン合金遮蔽容器の重要な利点です。鉛は光電吸収後に高エネルギーの特性X線を発生し、これは外部に放出されやすいのに対し、タングステンは低エネルギーの特性X線を発生し、これは厚い壁によって再び吸収されやすいです。同時に、タングステン合金の極めて高い電子密度は、制動放射線と消滅光子が内表面近くで発生するため、外部への放出確率が非常に低くなります。この「発生と吸収」の局所的な特性により、タングステン合金遮蔽容器の外表面には、従来の鉛容器によく見られる二次放射線の「ホットスポット」がほとんど存在せず、極めて均一な線量分布が得られます。

マルチメカニズムの相乗効果、局所的なエネルギー蓄積、および二次放射線の自己消費というシステム特性こそが、タングステン合金遮蔽容器が複雑な混合放射線場において真に広範囲のスペクトルと効率的な減衰を実現することを可能にし、核医学ホットセル、同位体製造ライン、および産業用照射施設において最も信頼性の高い線量制御バリアとなる理由です。

#### 2.1.2.1 タングステン原子構造とタングステン合金シールド缶のシールド性能との関連

タングステン原子は、その独特な電子配置と核特性により、タングステン合金遮蔽容器の優れた遮蔽性能の微視的基盤を形成しています。タングステン原子は原子番号が大きく、その外殻電子配置は完全な内殻構造を示しています。K殻、L殻、M殻の結合エネルギーは順に増加し、核医学や産業用探傷検査で一般的に用いられるガンマ線のエネルギーと非常によく一致しています。そのため、これらの特性エネルギーにおいて光電吸収断面積が大きく上昇し、自然な「吸収窓」が形成されます。入射光子エネルギーが特定の殻結合エネルギーよりわずかに高い場合、光電効果の確率が急上昇し、ほぼすべてのエネルギーが一回のバーストで光電子に伝達されます。その結果生じる特性X線は、エネルギーが低いため、隣接する原子によって急速に再吸収されます。このカスケード吸収プロセスは、高タングステン合金において原子間距離が極めて小さいため、非常に効率的です。

タングステン原子の重い核質量と強いクーロン場は、高エネルギー光子が核近傍で電子対を生成する閾値効果をより顕著にし、低Z元素をはるかに上回る変換効率をもたらします。同時に、タングステン核の外殻電子の強い結合は、コンプトン散乱電子に大きな反作用エネルギーを与え、原子軌道からの脱出を容易にし、二次電離連鎖を引き起こし、最終的に徹底したエネルギー付与につながります。タングステンは原子半径が小さく、充填密度が高いため、単位体積あたりの相互作用対象が多くなり、平均自由行程が大幅に短縮されます。これは、極めて薄い壁面であっても、巨視的には数桁の崩壊として現れます。

中性子遮蔽において、タングステン原子核は質量が大きく同位体数も豊富であるため、優れた非弾性散乱特性を有し、一回の衝突で中性子から大量の運動エネルギーを奪うことができます。一方、タングステン原子核は極めて高い核子密度を有しており、弾性散乱を頻繁に起こし、急速な減速チャネルを形成します。タングステンは中性子放射化断面積が低いため、長期照射後も新たな放射線源とならず、遮蔽容器の長期封じ込め能力にとって極めて重要です。

タングステン原子は、前述のミクロな利点をマクロなスケールにまで完全に転移させます。バインダー相は、タングステン原子の優位性を弱めることなく、構造を結合させ強化する役割の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



みを果たします。最終的に、これによりタングステン合金遮蔽キャニスターは、低エネルギーX線から高エネルギーガンマ線、高速中性子から熱中性子まで、全スペクトルにおいて顕著な弱点を生じることなく、高効率の減衰特性を発揮します。この「原子構造 → ミクロなメカニズム → マクロな性能」という厳密な因果連鎖こそが、タングステン合金遮蔽キャニスターが従来の材料よりもはるかに薄い壁厚で同等、あるいはそれ以上の遮蔽効果を達成できる根本的な理由であり、現代の放射線遮蔽材料科学における構造機能統合の最も完璧な例となっています。

#### 2.1.2.2 タングステン合金遮蔽容器と各種放射線との相互作用プロセス

タングステン合金遮蔽タンクは、実際の混合放射線場においてさまざまな種類の放射線との相互作用において明確な段階と相乗効果を示し、高エネルギー入射放射線から背景出力までの完全なエネルギー蓄積チェーンを形成します。

高エネルギーガンマ線は、まず容器の内壁付近で、主に光電効果または電子-電子対形成によって発生します。そのエネルギーは、単一段階または段階的に光電子、陽電子、そして消滅光子に変換されます。これらの荷電粒子は、イオン化と制動放射線によって、高電子密度物質内の結晶格子に運動エネルギーを急速に伝達します。その際、熱距離はマイクロメートルオーダーと極めて短いです。生成された二次光子はエネルギーが大幅に減少し、コンプトン散乱または外層でのさらなる光電吸収を受け、「内層での強い吸収と外層での柔らかい散乱」という典型的な勾配減衰モードを形成します。最終的に、高エネルギー光子は外表面からほとんど放出されません。

中エネルギーX線および医療診断グレードのX線は、コンプトン散乱によって支配されています。入射光子は容器壁内で多重方向のランダム化とエネルギー減少を経験します。反射光子と反跳電子は高密度媒質中で平均自由行程が極めて短く、後続の原子によって急速に散乱または再吸収され、最終的には均一に分布した低エネルギー散乱光子と熱エネルギーに変換されます。この多重散乱プロセスにより、X線強度は指数関数的に減衰し、散乱光子が方向性を持って漏れ出す可能性は低くなります。

の外層では、タングステン原子核との非弾性散乱により運動エネルギーの大部分を失い、二次中性子とガンマ線が発生します。その後、内層ではタングステン原子核と鉄原子核との弾性散乱により、熱中性子領域へとさらに減速されます。熱中性子は鉄、微量希土類元素、または添加されたホウ素層によって効率的に捕捉されます。捕捉されたガンマ線は比較的能量が低く、タングステン合金自体によって再び光電吸収されます。このプロセス全体を通して、高エネルギー二次放射線の漏洩はほとんど発生しません。

熱中性子および低エネルギーガンマ線は、主にタングステン合金に直接捕捉または光電吸収されるため、エネルギーの付与は極めて局所的となり、逸出しやすい二次粒子は実質的に発生しません。タングステン合金は放射化断面積が極めて低く、再結晶温度が高いため、長期照射後も新たな放射線源とならず、遮蔽性能は経時的に一定に保たれます。さまざまなエネルギーと粒子の「層化、メカニズム、および段階的な枯渇」のプロセスにより、タングステン合金シ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ールド缶は複雑な混合フィールドで真の「ゼロ漏洩」広帯域シールドを実現し、特定のエネルギー範囲で鉛やコンクリートなどの従来の材料の自然な弱点ウィンドウを完全に上回ります。

### 2.1.2.3 タングステン合金シールド缶のシールド機構に対する合金組成の最適化効果

合金組成の精密な制御は、タングステン合金シールド缶のシールド機構を「タングステン優位性の自然な優位性」から「シナリオカスタマイズのための最適解」へと転換する鍵となります。バインダー相の種類、割合、微量元素を体系的に最適化することで、特定の放射線の種類、化学環境、そして耐用年数への深い適応を実現します。

ニッケルは、コアバインダー相として、タングステン粒子の連続フレームワークの形成を確実にするとともに、純タングステンの脆性破壊を防ぐのに十分な靱性を提供します。また、液相焼結の密度を高め、マクロ的な遮蔽性能を理論限界に近づけます。鉄の添加により、中性子非弾性散乱と熱中性子捕捉能力が大幅に向上し、高温強度と放射線スエリングに対する耐性も向上するため、タングステン-ニッケル-鉄系は $\gamma$ 中性子混合場や高温照射シナリオに最適な選択肢となります。銅の導入により磁性が完全に除去され、酸性洗剤、塩素含有廃液、湿気の多い環境における孔食および均一腐食に対する耐性が大幅に向上するため、タングステン-ニッケル-銅系はMRI 対応の核医学ホットセルおよび液体廃棄物容器の唯一の選択肢となります。

微量希土類元素（ランタン、イットリウムなど）またはホウ素、ガドリニウムを標的に添加することで、熱中性子捕捉断面積と放射線孔スエリングに対する耐性がさらに最適化されるとともに、結晶粒が微細化され、粒界滑りが抑制され、長期使用時の形状安定性が向上します。バインダー相の割合は、合金の強度と靱性のバランスを直接制御します。高タングステン、低バインダー相システムは、強度が高く遮蔽効率も優れていますが、加工が難しく、固定式の厚肉タンクに適しています。バインダー相を適度に増やすと、冷間および熱間加工性と耐衝撃性が大幅に向上し、頻繁に開閉する輸送コンテナやホットチャンバータンクに適しています。

組成最適化の結果、最終的に「シナリオ-放射線スペクトル-化学環境-寿命」を網羅する4次元マッチンググレードシステムが実現しました。純ガンマ線高放射能医療用線源タンクには、高タングステン、タングステン-ニッケル-銅、非磁性、耐腐食グレードが採用されています。研究炉照射チャンネルタンクには、タングステン-ニッケル-鉄+微量ガドリニウム強中性子吸収グレードが採用されています。廃液貯蔵タンクには、高銅、高ニッケル、超耐腐食グレードが採用されています。高温ホットチャンバータンクには、低バインダー相、高強度グレードが採用されています。この組成主導の最適化メカニズムにより、タングステン合金遮蔽タンクは、単一の汎用材料から、精密にカスタマイズされた「遮蔽ソリューションセット」へと変貌を遂げ、遮蔽性能と実際のエンジニアリングニーズのシームレスな統合を実現しました。

### 2.1.3 タングステン合金シールド缶のシールド効果に影響を与える要因の分析

タングステン合金遮蔽キャニスターは、材料の理論特性を単純に線形にマッピングしたものではなく、材料の固有特性、構造形状設計、製造プロセスレベル、表面状態、使用環境条件など、複数の要因の複合効果による体系的な結果です。これらの要因のいずれかがわずかに逸脱

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ただけでも、外部表面線量率が背景レベルから許容できないレベルまで上昇する可能性があります。したがって、エンジニアリングの実践においては、各遮蔽キャニスターが最も過酷な動作条件下でも十分な安全マージンを維持できるように、すべての影響要因をプロセス全体にわたって閉ループ制御システムに組み込む必要があります。

### 2.1.3.1 タングステン合金材料の固有特性

タングステン合金材料の固有の特性は、遮蔽効果を決定する基本的な内部要因であり、主にタングステンの含有量と密度、バインダー相の種類と均一性、微細構造、不純物の制御レベル、および照射安定性の 5 つの主要な側面が含まれます。

タングステンの含有量と密度は、遮蔽効率の主な決定要因であるマクロ的な体積密度と原子数密度を直接決定します。タングステン含有量が高く、焼結密度が高いほど、単位厚さあたりの相互作用ターゲット数が増加し、平均自由行程が短くなり、指数関数的な減衰が速くなります。空隙、介在物、または溶解していないタングステン粒子は、局所的に低密度の弱点となり、X 線による「トンネル効果」を引き起こし、全体的な遮蔽能力を著しく低下させます。

バインダー相の種類と均一性は、高密度を確保する一方で、二次放射線制御と長期的な性能に大きく影響します。ニッケル鉄バインダーは中性子減速と熱中性子捕獲能力を高めますが、不均一な分布は局所的な鉄過剰領域で高エネルギーのガンマ線捕獲につながる可能性があります。ニッケル銅バインダーは非磁性で優れた耐食性を備えていますが、銅含有量が多すぎるとタングステン原子密度がわずかに薄まるため、耐食性と遮蔽性のバランスを取る必要があります。バインダー相の偏析や液相残留物によっても、ミクロンスケールの低密度チャンネルが形成され、高エネルギー光子の逃避経路として好まれる場合があります。微細構造は、動的遮蔽挙動と耐放射線性に極めて重要です。理想的には、タングステン粒子は小さく、球形で均一に分散し、連続的な骨格を形成し、バインダー相が隙間を完全に埋めます。十分な二次塑性変形を受けた微細構造は、放射線スエリングとホールマイグレーションに対する耐性を大幅に向上させ、極めて高い累積線量下でも遮蔽容器の形状精度と遮蔽厚さを維持できます。一方、粗大なタングステン粒子や再結晶化した微細構造は、長期照射下で粒界割れや密度低下を起こしやすく、遮蔽効果が徐々に低下します。

不純物制御レベルは、二次放射線および放射化生成物に直接関係しています。酸素、炭素、硫黄、リンなどの不純物が過剰に存在すると、焼結中に脆い相や気孔が形成される可能性があります。さらに深刻な問題として、これらの不純物は照射下で長寿命放射性核種を生成し、遮蔽容器自体の内部汚染源となる可能性があります。特に、炭素不純物はタングステンと反応して脆い炭化タングステン層を形成し、靱性を低下させるだけでなく、高エネルギー粒子照射下で追加の中性子とガンマ線を発生させます。照射安定性は、材料特性の中でも最も見落とされやすいものの、長期的な遮蔽効果を決定づける最も重要な要因です。高品質のタングステン合金は、高線量照射下でも体積膨張、強度低下、放射化生成物の発生がほとんどありません。一方、低品質の合金では、粒界ボイドの蓄積、バインダー相の析出、マイクロクラックの伝播が起こり、最終的には実効壁厚の減少や線量漏洩につながる可能性があります。これら 5 つの特

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



性が、タングステン合金遮蔽容器の「高度かつ安定した」遮蔽基盤を構成し、鉛やコンクリートなどの従来の材料と比較したライフサイクル性能の根本的な違いを決定づけています。

### 2.1.3.2 シールド構造設計パラメータ

遮蔽構造の設計パラメータは、タングステン合金遮蔽タンクが「材料の優位性」を「システムの遮蔽効果」へと変換するための重要な架け橋です。主に、壁厚分布、キャビティ形状、接合部および界面処理、傾斜層設計、内蔵補助遮蔽部品という5つコア要素で構成されています。

壁厚分布の均一性と最小壁厚は、最弱リンクの減衰能力を直接的に決定します。理想的な設計では、局所的に薄い部分が線量漏洩経路となることを避けるため、すべての放射線経路の最小透過厚さを一定にする必要があります。実際のエンジニアリングでは、外表面における線量率が均一であるという原則がしばしば採用されます。有限要素法による光線追跡によって壁厚を局所的に厚くしたり薄くしたりすることで、外表面における線量場の均一性を高めます。

空洞の形状は、散乱と二次放射線再吸収に大きな影響を与えます。円筒形または球形の空洞は、壁面における放射線の平均経路長を最大化し、直接的な漏洩を低減します。一方、長方形の空洞は角部で散乱光子が蓄積しやすいため、角を丸くしたり、局所的に厚みを増したりして補正する必要があります。深いブラインドホール構造では、底壁の厚さが計算された最小値以上になるようにする必要があります。そうでない場合、典型的な「放射線煙突効果」が発生します。

従来のシールド容器では、継ぎ目、蓋の開口部、インターフェースが最も一般的な弱点でした。タングステン合金シールド容器は、一体成形、迷路状の段付き蓋、埋め込み式シーリングリング、冶金グレードの溶接または電子ビーム溶接により、貫通シールドを完全に排除し、継ぎ目部分の減衰能力は本体と同等、あるいはそれ以上に向上しています。観察窓、プローブ穴、輸液チューブインターフェースなどの機能開口部には、鉛ガラスまたはホウケイ酸ポリエチレンと組み合わせたタングステン合金の段付きシールド構造を採用し、開口部への直接的な光路を遮断します。

勾配層と内蔵補助遮蔽により、広帯域性能がさらに最適化されます。外側の低タングステン遷移層は高エネルギー二次電子の放出を弱め、内側の高ホウ素または高水素複合ライナーは熱中性子を効率的に吸収し、ガンマ線捕獲を抑制します。内蔵のタングステン合金グリッドまたはコリメータは、高濃度ソースタームを持つ医療用線源容器に使用され、精密な方向性遮蔽を実現します。これらの設計パラメータの緻密な組み合わせにより、タングステン合金遮蔽容器は「均一な厚肉容器」から「機能的な分割とインテリジェントな勾配」を備えた第三世代遮蔽システムへと真に進化しました。

### 2.1.3.3 放射線の固有特性

放射線源のエネルギースペクトル、活性、形状、化学形態、および時間分布特性は、タングステン合金遮蔽缶の実際の遮蔽難易度に直接影響を及ぼし、設計マージンと選択戦略を決定します。高エネルギーガンマ線源（コバルト 60 や医療用線形加速器の副産物など）は透過力が

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

極めて強く、最も厚い壁厚が必要となります。同時に、二次制動放射線および消滅光子の割合が大きいため、より厚い外壁とより精密な勾配設計が必要となります。低エネルギーおよび中エネルギーガンマ線源（ヨウ素 125 やイリジウム 192 など）は光電効果が支配的であるため、同じ放射能に対する壁厚要件は大幅に軽減されます。ただし、低エネルギー散乱光子の蓄積を避けるため、より高い材料密度と表面清浄度が必要となります。

放射能レベルは総線量率と熱負荷を決定します。高放射線源には、極めて高い単回通過減衰能力を備えた遮蔽キャニスターが必要です。また、壁面への著しい熱蓄積には、対流換気孔や熱伝導性ライニングの検討が必要です。一方、低放射線源では、長期にわたる累積線量下での物質の放射化と除染の困難さがより懸念されます。

線源項は空洞設計と腐食余裕度に影響します。点線源は、深い空洞と厚い底部構造を用いることで最適な幾何学的減衰を実現できます。一方、体積線源や液体線源は、より大きな空洞と耐腐食性ライニングを必要とし、死角への放射性エアロゾルの沈着を防ぎます。粉末状または気体状の線源は、シール構造と圧力バランスバルブへの要求がより高くなります。

時間分布特性が動的遮蔽要件を決定します。半減期の短い線源（フッ素 18 など）は耐用年数が短く、初期線量率がやや高くても許容できます。一方、半減期の長い線源（セシウム 137 やストロンチウム 90 など）では、遮蔽容器の形状と性能を数十年にわたって一定に保つことが求められるため、材料の放射線安定性が決定的な要因となります。

まさにソース タームの絶え間なく変化する特性により、タングステン合金シールド コンテナは単一の標準製品から「ソース ターム カスタマイズ」モデルに移行せざるを得なくなり、各タイプの放射線源が最も経済的で安全な専用シールド ソリューションを得られるようになりました。

#### 2.1.3.4 環境条件の利用に影響を与える要因

環境条件は、タングステン合金遮蔽缶の遮蔽効果の最終的な「受入テスト」であり、温度場、湿度および腐食性媒体、機械的負荷、累積照射量、予期しない作業条件の 5 つの側面が含まれます。

高温環境はタングステン合金の密度をわずかに低下させ、バインダー相の拡散を加速させる可能性があります。核医学ホットセルの一般的な温度では、高品質タングステン合金の性能劣化はごくわずかです。極度に高い温度（火災事故など）は、材料の再結晶温度と酸化防止コーティングの完全性を試みます。コーティングが破損すると、表面酸化により局所的な密度低下と微量放射線漏洩が発生します。湿度、酸性およびアルカリ性洗剤、海水の飛沫、塩素含有廃液などが、最も一般的な化学的脅威です。タングステン-ニッケル-銅系は安定した表面不動態膜を形成し、これらの環境において実質的に腐食しません。一方、タングステン-ニッケル-鉄系は強度は高いものの、長期曝露により粒界腐食が発生しやすいため、ニッケルメッキまたは特殊な洗浄コーティングを施す必要があります。腐食によって表面が剥離したり孔食が生じたりすると、低密度の放射線が優先的に逃げる経路となります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機械的負荷には、静的負荷（自重、廃棄物の積み重ね）、動的負荷（輸送時の振動、落下）、そして熱応力サイクルが含まれます。タングステン合金は優れた高温強度と低い熱膨張係数を備えているため、これらの負荷下でも形状変形が最小限に抑えられ、遮蔽厚さが一定に保たれます。一方、従来の鉛缶は同様条件下でクリープが発生しやすく、肉厚減少領域が拡大します。

長期にわたる高線量照射は、孔の膨張、ヘリウム脆化、および放射化生成物の蓄積を引き起こす可能性があります。高品質のタングステン合金は、結晶粒の微細化、希土類元素の精製、および事前加工された繊維構造により、膨張と脆化を大幅に抑制し、放射化生成物のレベルを極めて低く抑えます。一方、低品質の合金は、より高い累積線量でマイクロクラックの伝播を引き起こし、遮蔽効果が徐々に低下する可能性があります。

予期せぬ状況（火災、洪水、地震、落下など）は、遮蔽効果の究極の試金石です。タングステン合金は、高い融点、不燃性、そして高い靱性を備えており、火災時にも構造健全性を維持し、落下時にも破損せず、地震時にも転倒しません。鉛タンクの溶融・流出やコンクリートタンクの亀裂・崩壊といった壊滅的な被害を完全に回避します。

これらの厳しい環境要因の組み合わせにより、タングステン合金遮蔽キャニスターは設計段階でマルチフィジックス連成シミュレーションとオーバーデザインマージンを組み込むことが必須となっています。これにより、最も不利な条件下でも外部表面線量率をバックグラウンドレベルに確実に制御することができ、放射性物質の封じ込めと遮蔽のための究極かつ信頼性の高いバリアとなります。

#### 2.1.3.5 製造工程の精度管理に影響を与える要因

製造精度は、タングステン合金シールド缶の遮蔽効果を「理論上の最適性」から実現するための最終段階であり、最も見落とされやすく、かつ最も致命的な変数でもあります。わずかな形状偏差、表面欠陥、あるいは内部残留欠陥は、放射線漏洩経路や二次放射線ホットスポットに直接つながり、缶全体の実際の遮蔽効果が設計値を大幅に下回る原因となります。

ブランク成形段階においては、密度と形状の一貫性が非常に重要です。冷間等方圧プレス、熱間等方圧プレス、あるいは大型金型プレスにおいては、タングステン粉末の均一な充填と圧力伝達を確保し、デッドゾーンの発生を防ぐ必要があります。さもないと、局所的な低密度領域がその後の焼結中に気孔や不均一な収縮を引き起こし、浸透が弱い領域となります。焼結プロセスパラメータ（温度プロファイル、雰囲気純度、保持時間）のわずかな変動は、タングステン粒子の成長ムラやバインダー相の偏析につながり、マイクロシールドの均一性に直接影響を及ぼします。

深い止まり穴や複雑な内部空洞の加工精度は、最小壁厚と表面状態を左右します。ドリルの偏差、ホーニングの真円度の偏差、そして穴底の残留応力集中などにより、実際の最小壁厚は設計値より数パーセント低くなる可能性があり、高エネルギーガンマ線照射場では測定可能な

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



線量サージが発生します。内面の粗さと波状性は鏡面レベルで制御する必要があります。そうでなければ、微細なピットが放射性ダストやエアロゾルの永久吸着点となり、除染の難易度を高め、長期蓄積後に局所的な汚染源を形成します。

蓋と缶の嵌合、そしてラビリンスギャップとシールド面の平行度は、接合部におけるシールドの連続性を直接的に決定します。従来の鉛缶は蓋の変形により嵌合不良に悩まされることが多かったのに対し、タングステン合金缶は高精度 CNC 研削とオンライン光学測定により、蓋と缶開口部の嵌合をミクロンレベルで完全に実現し、貫通隙間を完全に排除しています。溶接部や電子ビーム溶融溶接部における微細組織制御も同様に重要であり、熱影響部の再結晶粗大粒や微小亀裂は、許容できない弱点となります。

表面機能コーティングと最終研磨工程の整合性は、表面腐食と二次電子放出に対する最後の防御線です。無電解ニッケルメッキの厚さの不均一、洗浄コーティングの密着不足、研磨による残留傷などは、長期洗浄と照射によって孔食腐食の開始点や電子放出源となる可能性があります。高級タングステン合金シールドキャニスターは、すべての主要な寸法と表面パラメータを SPC 統計管理の全プロセスに組み込み、X 線 CT 非破壊検査、超音波フェーズドアレイ、ヘリウム質量分析リーク検出を補完することで、工場出荷時の各キャニスターの実際のシールド性能が理論計算値と完全に一致することを保証しています。

## 2.2 タングステン合金シールド缶の主要性能指標システム

タングステン合金シールド缶は、シールド効果、構造安全性、耐用年数、操作性、規制遵守という 5 つの側面を網羅した、包括的で厳密かつ定量化可能な指標システムとして開発されました。これらの指標はもはや独立した材料パラメータではなく、設計・製造から受入れまで、フルチェーンの評価基準を構成する相互に関連したシステム要件となっています。

遮蔽効果の指標は、等価壁厚、外表面線量率、放射線漏洩角度分布、および二次放射線管理レベルを中心としています。これらの指標は、最も不利なソースタームと最長の耐用年数において、外表面のどの点においても線量率が規制限度の数分の 1 未満であり、方向性のある漏洩がないことを要求します。構造安全性の指標には、落下耐性、積み重ね時の静的荷重耐性、火災時の熱衝撃耐性、地震時の転倒耐性などがあり、最も厳しい予期せぬ状況下でも格納容器が失われないことを保証します。耐用年数の指標には、放射線による経年劣化による故障ゼロ、永続的な形状精度、表面除染係数の一定性、そしてシーリングシステムの長期信頼性が含まれ、通常、少なくとも 20 年間のメンテナンスフリー期間が求められます。

操作性指標は、一人での迅速な開閉、ロボットアームとの互換性、適切な重量配分、そして加熱チャンバーまたはグローブボックス内での操作時間を最小限に抑え、作業員の放射線被ばく量を最適化するための標準化されたインターフェースに重点を置いています。規制遵守指標は、無毒性および鉛フリーの免除、直接リサイクル可能、輸送容器の型式承認、拭き取り可能な表面汚染、そして最終処分負担ゼロを網羅し、国際原子力機関（IAEA）、国家原子力安全局（NSA）、そして環境保護当局の最も厳しい要件を完全に満たしています。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

上記の 5 つの指標は、型式試験、加速劣化試験、落下・燃焼複合試験、長期物理追跡試験などを通じて検証され、完全な合格基準を形成しています。これらの基準をすべて同時に満たしたタングステン合金遮蔽容器のみが、核医学ホットセル、同位体製造ライン、廃棄物中継ステーションへの導入が許可され、真に「生涯にわたる信頼性の高い遮蔽ソリューション」となります。このシステムの確立は、タングステン合金遮蔽容器が初期の「材料代替品」から、放射線防護工学における最も成熟した信頼性の高いシステムレベルの製品へと完全に変貌を遂げたことを意味します。

#### 2.2.2.1 タングステン合金遮蔽タンクの密度指数

容器の最も重要かつ基本的な性能指標は、単位厚さあたりの原子番号密度と放射線の平均自由行程を直接決定するものであり、遮蔽効果の「主要パラメータ」です。高級タングステン合金遮蔽容器は、容器のどの部分でも密度の偏差が最小限に抑えられた、安定した極めて高い体積密度を必要とします。これにより、放射線は容器壁内で完全に一貫した指数関数的減衰過程を経ることが保証され、局所的な低密度の脆弱部による線量漏洩を防ぎます。

実際のエンジニアリングでは、密度指標は、理論密度達成率、最小局所密度、密度均一性、長期密度安定性の 4 つのサブ要件に細分されます。理論密度達成率では、焼結ブランクの全体密度がタングステンとバインダー相の理論加重平均の非常に高い比率に近くなる必要があります。気孔、介在物、溶解していないタングステン粒子は致命的な欠陥とみなされます。最小局所密度は、X 線 CT またはガンマ線透過スキャンを使用して層ごとに検証され、穴の底、コーナー、溶接熱影響部など、すべての領域に明らかな低密度領域がないことを確認します。密度均一性では、バッチ全体の密度変動を非常に狭い範囲内に制御して、X 線散乱方向の偏向や密度勾配による二次放射線の非対称な漏れを回避する必要があります。長期的な密度安定性は、加速照射膨張試験および高温真空老化試験によって評価され、設計寿命内での密度低下がほぼゼロであることが求められます。

密度は遮蔽効果に決定的な影響を与えるため、タングステン合金遮蔽容器は、原材料の受入、焼結、熱間静水圧プレス、機械加工、最終検査に至るまで、全工程において厳格な閉ループ密度制御システムを確立しています。このシステムにより、タングステン合金遮蔽容器は業界における「密度第一主義」の企業文化の代表として認められています。密度基準を完全に満たした遮蔽容器のみが、核医学ホットセルおよび高放射能同位体製造ラインへ導入が許可されます。

#### 2.2.2 タングステン合金シールドタンクの硬度指数

硬度は密度のように放射線減衰に直接影響を与えるわけではありませんが、タングステン合金遮蔽容器のライフサイクル全体にわたる信頼性において重要な役割を果たします。硬度は、傷、摩耗、孔食、放射線誘起による表面剥離、そして洗浄の容易さに対する耐性を総合的に反映します。高級タングステン合金遮蔽容器には、「表面硬度、内部靱性、耐久性」という体系的な硬度管理が必要です。表面硬度は、繰り返しの機械的洗浄や偶発的な衝撃に耐えられるほど高くなければなりません。また、コアは脆性割れを防ぐために十分な靱性を維持しなければ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

なりません。そして、長期にわたる放射線照射や熱サイクルを経ても、全体の硬度は実質的に変化しない必要があります。硬度指標は、具体的には、マトリックスの微小硬度、表面強化層の硬度、硬度の均一性、および長期硬度安定性の4つの側面に分けられます。マトリックスの微小硬度は、タングステン粒子とバインダー相界面の強固な結合と軟化帯のないことを必要とし、タンクが落下、振動、または熱衝撃によって微小亀裂を生じないことを保証します。表面強化層の硬度は、ホウ素化处理、イオン窒化处理、ダイヤモンドライクカーボンコーティング、またはナノ結晶層の超音波噴霧によって達成され、最外層はコアよりもはるかに硬くなり、「外側は硬く、内側は強靱」な保護殻を形成します。この保護殻は、鋼製ブラシによる洗浄や酸洗にも耐え、放射線による表面のスパッタリングや剥離を抑制します。

硬度の均一性を確保するには、タンク内外面、穴底、溶接部全体にわたる硬度変動を最小限に抑え、局所的な軟化部が腐食や汚染の起点となるのを防ぐ必要があります。長期的な硬度安定性は、大量照射試験と高温多湿条件下での加速劣化試験によって検証されており、設計寿命期間中、表面硬度の低下が極めて少なく、補強層の剥離や基材の軟化がないことが必要です。硬度指数の真の価値は、「遮蔽効果」を単なる放射線減衰から、「繰り返し除染し、二次汚染ゼロ」という環境に優しい完全なライフサイクルへと拡張することにあります。高い表面硬度と大きな除染係数を持つタングステン合金遮蔽缶は、数十回、あるいは数百回の高活性作業を経ても元の清浄な状態に戻ることができ、「使用すればするほど汚れて、最終的には使えなくなる」という鉛缶の宿命から完全に脱却し、真に持続可能な遮蔽プラットフォームとなっています。

### 2.2.3 タングステン合金遮蔽タンクの引張強度指数

コアとなる機械的保証は、そのライフサイクル全体を通して構造の完全性とシールド形状を維持することです。通常の使用条件下での静荷重、積み重ね、熱応力の要件を満たすだけでなく、落下、地震、火災、輸送中の衝撃といった過酷な事故シナリオにおいてもタンク本体がひび割れ、変形、または真円度の低下を起こさないことを保証する必要があります。これにより、最小シールド厚さの減少やシールド面の歪みが防止されます。

高級タングステン合金シールド容器は、「室温での高強度、高温での軟化なし、照射下でも脆化なし、そして強力な疲労耐性」という包括的なシステムを備えています。吊り上げ、輸送、設置時の急激な引張応力に耐えるため、室温での引張強度は従来の構造用鋼をはるかに上回る必要があります。高温引張強度は、核医学ホットチャンバーや火災事故時の高温下でも鉛容器と同様のクリープ崩壊を回避するために十分な残留強度を維持する必要があります。照射脆化や長期にわたる高注入率による強度低下を防ぐため、照射後の引張強度低下はほぼゼロでなければなりません。繰り返し荷重下での疲労強度は、数万回の開閉、熱サイクル、振動を経ても微小亀裂が発生しないことを保証する必要があります。

上記の目的を達成するために、タングステン合金遮蔽容器は、一般的にタングステン-ニッケル-鉄系またはタングステン-ニッケル-銅系を用いて、大変形を伴う二次塑性加工を施した繊維強化構造を採用しています。これにより、繊維間隙に沿って均一に分散したバインダー相を有する、高度に配向した細長い繊維状タングステン粒子が形成され、天然の「鉄筋コンクリート」複合補強構造を形成します。この構造は、引張方向において極めて高い耐荷重性と亀裂伝

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



播抵抗を示し、微小な欠陥であっても不安定伝播することなく速やかに不活性化されます。実際の性能評価には、室温引張試験、規定の高温引張試験、照射後引張試験、そして一連の高サイクルおよび低サイクル疲労試験が含まれ、これらはすべて不可欠です。すべてのテストに合格したバッチのみが、大型廃棄物移送コンテナ、輸送コンテナ、および恒久的に固定されたホットチャンバーコンテナでの使用が許可され、最も厳しい機械的・熱的・放射線の結合環境下でもシールド形状と封じ込め機能が決して機能しないことが保証されます。

#### 2.2.4 タングステン合金シールドタンクのシール性能指標

シーリングは、タングステン合金遮蔽容器を通常の構造容器と区別する最も重要な機能指標の一つです。放射性粉塵、エアロゾル、揮発性核種が許容できない量で動作環境に漏洩するかどうかを直接決定づけるものであり、「漏洩ゼロ、人員被ばくの最小化」という規制目標の達成における最後の障壁となります。

タングステン合金シールド容器は、静的シール、動的シール、緊急シールの3つのレベルに分けられます。静的シールでは、室温から最高使用温度、および累積照射量の上限までの範囲内で、ヘリウム質量分析計によるリーク検出率が常に極めて低いレベルを維持し、分子レベルのリークを排除する必要があります。動的シールでは、数万回の開閉サイクル、熱サイクル、および軽微な振動の後でも、シール面が永久変形や緩みを生じることなく、初期のフィット精度と弾性回復能力を維持する必要があります。緊急シールでは、規定の高さからの落下、高温火災、外部からの衝撃、さらには部分的な塑性変形といった条件下でも、ラビリンズ+シールリング複合構造が十分な圧縮力を維持し、封じ込めが失われないことが求められます。

実装面では、タングステン合金シールド容器は一般的に「三重保護」設計を採用しています。

- 最初のステップは、タングステン合金の極めて低い熱膨張係数と高い剛性を利用して、硬質金属同士のラビリンズ段差表面を高精度に成熟させることで、ミクロンレベルの接合を実現します。
- 第2層は、放射線、高温、強酸、強アルカリに耐性のあるフッ素ゴム、シリコンゴム、または金属で作られたC字型/Ω字型のシーリングリングで、弾性補償と分子レベルのバリアを提供します。
- 缶蓋自体の重量とクイックロッククランプまたは多条クランプによって圧力が加えられ、長期間にわたって緩まないことが保証されます。

一方、シール面は一般的に鏡面研磨とイオン注入、またはDLCコーティングが施されており、非常に高い表面硬度と強力な化学的不活性性を実現しています。そのため、傷がつきにくく、劣化も極めて遅いのが特徴です。工場出荷前に、各キャニスターは真空、加圧、ヘリウム質量分析を含む段階的なリークテストに加え、10年以上にわたる加速熱老化試験と放射線老化試験を実施し、シールの寿命を検証します。この徹底したシール性能指標システムにより、タングステン合金シールドキャニスターは、世界で最も要求の厳しい核医学ホットセルや高放射

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

能廃棄物一時貯蔵施設において、真の「ゼロリーク」運転記録を達成し、封じ込めシールド容器分野における絶対的なベンチマークとなっています。

#### 2.2.5 タングステン合金シールドタンクの耐食性指標

耐食性は、タングステン合金遮蔽タンクが「繰り返し洗浄、長期メンテナンスフリー、二次汚染ゼロ」を実現するための根本的な保証です。耐食性は、酸性洗剤、アルカリ性洗浄液、塩素系消毒剤、湿潤高温空気、さらには液体放射性廃棄物への長期浸漬下でも、タンクの表面の完全性と形状の正確性を維持できるかどうかを直接決定づけるものであり、孔食、粒界腐食、均一溶解による放射線漏洩経路や放射性粉塵の永久付着点の発生を防ぎます。

高級タングステン合金シールドタンクの耐食性は、非磁性の耐腐食性を持つ一次タングステン-ニッケル-銅系と、コーティングを強化した二次タングステン-ニッケル-鉄系の 2 層構造となっています。タングステン-ニッケル-銅系は、バインダー相の銅が緻密な自己不動態膜を形成するため、pH1~14 の広い範囲、強力な酸化洗剤、海水飛沫環境下において、極めて高い耐食性を示し、化学的に不活性に近い特性を示します。表面には目に見える腐食痕はほとんど見られず、孔食電位が非常に高く、長期間の浸漬後も鏡面のような滑らかさを保ちます。タングステン-ニッケル-鉄系は強度が高いものの、酸性および塩素含有媒体中では粒界腐食がわずかに生じる傾向があります。したがって、タングステン - ニッケル - 銅と同等以上の表面耐腐食性を実現するには、無電解ニッケルメッキ、PVD CrN、または多層複合洗浄コーティングを追加する必要があります。

耐食性に関する具体的な試験には、塩水噴霧老化試験、強酸・強アルカリ浸漬試験、洗剤による繰り返し洗浄試験、電気化学的分極曲線試験、孔食誘発試験、そして実際の放射性廃液との長期接触検証試験などが含まれます。これらの試験は、最も厳しい除染サイクルと廃液保管条件下でも、表面腐食深さがほぼゼロ、質量減少が無視できる程度、除染係数が常に極めて高いレベルを超え、表面粗さが増加しないことが求められます。これらのほぼ厳格な耐食性指標こそが、タングステン合金シールドタンクが数十年にわたる高放射能運転後でも容易に拭き取ることができる、元の状態に戻すことを可能にしているのです。

#### 2.2.6 タングステン合金シールド缶のシールド効率

タングステン合金遮蔽缶の性能を網羅しています。もはや単一の半価層や 10 価層の概念ではなく、「最も不利な線源、最も長い耐用年数、そして最も過酷な環境」下における外表面の任意の地点の線量率を唯一の基準としています。ガンマ線、X 線、中性子、そしてあらゆる二次放射線に対する、広いスペクトル、長寿命、そして包括的な制御能力を網羅しています。

真の遮蔽効率指数は、次の 5 つのサブ指標で構成されています。

- 距離において、一貫して規制限度の一部未満でなければならず、どの方向にもホットスポットがあってはなりません。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 放射線漏洩角度分布：方向性漏洩や「煙突効果」がなく、全方向で均一な線量が必要です。
- 二次放射線管理レベル：制動放射線、消滅光子、特性 X 線、捕捉ガンマ線などはすべてタンク壁によって局所的に吸収され、外表面に検出可能な二次ピークが現れてはなりません。
- 長期遮蔽効果の安定性：設計寿命内で、累積最大フラックス照射、高温高湿での経年劣化、および繰り返しの除染を行った後、遮蔽効率はほぼゼロに低下する必要があります。
- 最悪のシナリオにおける遮蔽の完全性：指定された落下、火災、積み重ね、地震の組み合わせテストの後でも、外表面の線量率は依然として基準を超えてはなりません。

設計段階でモンテカルロ法による全スペクトルシミュレーションとマルチフィジックス連成解析を採用し、最も薄い壁厚、最も複雑な形状、そして最も不利なソースタームの組み合わせにおける線量分布を正確に予測します。製造段階では、ガンマ線イメージング、コバルト 60 実線源照射校正、ホットチャンバー実線源検証を実施し、工場出荷される各キャニスターの実際の遮蔽効率が理論計算と完全に一致することを保証します。

極めて厳格な遮蔽効率要件を満たすタングステン合金遮蔽容器は、世界で最も要求の厳しい核医学センター、最高レベルの放射能同位体工場、そして最も厳しく規制された廃棄物貯蔵施設において、外部表面線量率を長期間にわたって背景レベルに安定的に維持することができます。これはまさに「放射性源を容器内に閉じ込め、人員と環境を完全に解放する」という究極の防護目標を実現しており、現代の放射線遮蔽工学における紛れもない最高峰と言えるでしょう。

### 2.2.7 タングステン合金シールド缶の延性指標

延性は、タングステン合金シールド缶が極限かつ予期せぬ条件下でもその健全性を維持し、脆性破壊を防ぐための生命線です。落下衝撃、地震による横転、輸送中の衝撃、さらには局所的な過負荷を受けた際に、缶体がセラミックのように瞬時に粉砕されるか、それとも高品質の鋼のように制御された塑性変形を起こしてエネルギーを吸収し、壊滅的な割れを回避できるかは、延性によって決まります。タングステン合金シールド缶の延性指数は、従来の耐火金属における「高強度は必然的に脆性につながる」という先入観を遥かに超え、強度と靱性の高度な一体化を実現しています。

高品質のタングステン合金遮蔽容器には、室温で十分に高い伸びが求められます。最も厚肉で結合相が最も少ない高強度グレードであっても、引張試験片は面一破壊ではなく顕著なネッキングを示す必要があります。曲げ試験では割れを生じずに直角に近い曲げ角を達成する必要があります。また、シャルピー衝撃エネルギーは純タングステンやほとんどの耐熱合金よりも大幅に高くなければなりません。高温延性も同様に重要です。核医学ホットセルの常温、さらには火災事故時の温度では、伸びと衝撃靱性は緩やかにしか低下せず、脆性領域への急激な低下は絶対に許容されません。照射後の延性の保持は最も重要です。設計寿命にわたる累積注入量

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



後、照射誘起脆化による遅れ割れのリスクを排除するために、伸びと衝撃エネルギーの減衰は無視できるほど小さくしなければなりません。

この目標を達成するための鍵は、細長い繊維状のタングステン粒子と均一に分散したバインダー相によって形成される自然な複合構造にあります。タングステン粒子は高い強度を持ち、バインダー相は強固な橋渡しとなり、一旦亀裂が発生すると、バインダー相によって繰り返し不動態化、偏向、橋渡しが行われ、最終的に伝播エネルギーが枯渇します。

### 2.2.8 タングステン合金シールド缶の耐熱性インジケータ

耐高温性は、タングステン合金シールド容器が火災事故、高温ホットチャンバー、または長期の熱負荷条件下において、シールド厚さ、密閉性、および構造安定性を維持できる根本的な保証です。タングステン合金シールド容器は、火災時に溶融・流出する鉛容器や、高温で脱水・

ひび割れするコンクリート容器といった致命的な欠陥を完全に排除し、極度の高温下でも「耐えて保護」し続けることができる唯一のシールド容器となっています。

高級タングステン合金遮蔽容器は、核医学サイクロトロンの高温室で一般的に見られるような持続的な高温環境下でも、強度、硬度、延性、寸法精度が経時的にほとんど低下しないことが求められます。短期的な火災温度下では、容器表面にわずかな酸化が生じる可能性があります。内部構造と形状は損なわれず、遮蔽壁の厚さは減少せず、シールド面は反らず、ロック機構も正常に機能します。重要な指標としては、高温瞬間強度、ほぼゼロの高温クリープ速度、耐熱衝撃割れ性、高温酸化後の遮蔽効果維持率などが挙げられます。

タングステン合金は、本質的に極めて高い再結晶温度と極めて低い熱膨張係数を有しています。表面  $\text{MoSi}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  拡散コーティング、または高温不動態化層を有する無電解ニッケルめっきと組み合わせることで、数千℃の短時間の炎加熱で薄く緻密な酸化膜のみを形成し、コアは本来の機械的特性と密度を維持します。長時間の高温下では、微細なタングステン粒子と分散したバインダー相が粒界を効果的に固定し、再結晶粗大化とクリープ滑りを防止し、缶の寸法精度を維持し、シールド面を平坦に保ちます。この並外れた耐高温性（「火にさらされても軟化せず、加熱されても膨張せず、燃焼後も硬さを維持する」）により、タングステン合金シールド缶は、最も恐ろしい火災シナリオにおいても緊急対応のための貴重な時間を稼ぐことができ、放射性物質を封じ込めるための究極の「ファイアウォール」となります。

## 2.3 CTIA GROUP LTD のタングステン合金シールド缶の MSDS

CTIA GROUP LTD Co., Ltd. が製造するタングステン合金シールド容器の安全データシート (MSDS) は、同社のタングステンベース高密度シールド容器向けにカスタマイズされた標準化された化学安全文書です。原材料の調達、製造、輸送、保管から現場での使用、メンテナンス、除染、最終廃棄に至るまで、ライフサイクル全体を通じて、包括的かつ信頼性の高いリスク特定、防護ガイダンス、および緊急対応ソリューションを提供することを目的としています。CTIA GROUP LTD はタングステン材料の世界的大手サプライヤーとして、化学物質の分類およ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

び表示に関する世界調和システム（GHS）および中国国家規格 GB/T 16483 の要件に厳密に準拠しています。基本的な物質情報、潜在的危険分類、応急処置、火災および爆発リスク対応、流出対応、作業上の暴露管理および個人用保護具、物理化学的特性、材料の安定性および反応性、毒性情報、生態毒性影響、廃棄ガイドライン、輸送情報、規制責任声明などのコアモジュールをカバーしています。

基本情報モジュールでは、まずタングステン合金シールド缶の化学的性質を明らかにします。この缶は主にタングステン（CAS 7440-33-7）で構成され、ニッケル（CAS 7440-02-0）、鉄（CAS 7439-89-6）、または銅（CAS 7440-50-8）が添加されており、銀灰色の金属光沢の典型的な外観を持つ高密度金属複合材料の形をしています。

潜在的危険性分類は、職業上曝露リスクに重点を置いています。タングステン合金遮蔽容器は不活性金属製品であり、通常の封じ込めおよび遮蔽使用においては急性毒性、発がん性、生殖毒性を示さない。総合的なリスク評価では、遮蔽容器は「低危険性固体」に分類されています。

物理化学的性質の項では、タングステン合金シールド容器は、水に不溶性の高融点・耐高温金属複合材料であると説明されています。材料安定性の項では、シールド容器は室温では非常に安定していますが、高温では表面酸化が発生する可能性があることが示されています。乾燥した風通しの良い場所に保管し、強酸や強アルカリとの直接接触を避けることをお勧めします。

輸送情報では、タングステン合金シールド容器は非危険物に分類され、通常の金属製品と同様に輸送できます。規制情報には、REACH 規則および RoHS 指令への適合宣言、ならびに中国 GB 30000 シリーズ規格への適合が記載されています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

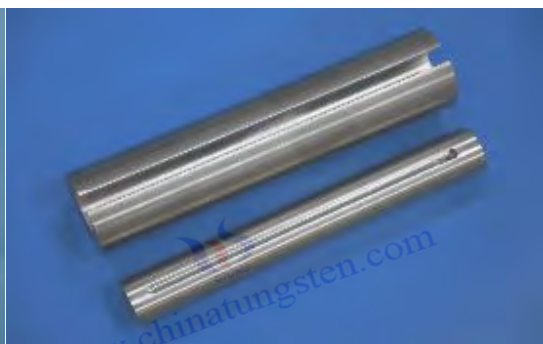
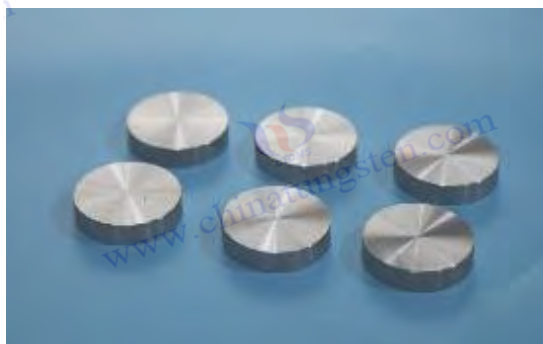
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



### 第3章 タングステン合金シールド缶の設計ロジックとタイプ分類

#### 3.1 タングステン合金シールド缶の構造構成

タングステン合金シールドコンテナは、「筐体・シールド・運用・除染・輸送」という五位一体のシステムエンジニアリング原理を採用しています。各コンポーネントは独立して機能、機械力学、熱力学、放射線、規制の観点から他のコンポーネントと深く連携し、高度な冗長性、安全性、検証可能性、そして予測可能な寿命を備えた全体を構成します。その設計は、従来の「金属缶+鉛ライニング」という単純な積み重ねをはるかに超え、高密度、高強度、無毒性、長寿命といったタングステン合金の利点を最大限に引き出し、マイクロシリンジ保護スリーブから数トンの廃棄物移送コンテナまで、あらゆる用途に対応します。

タンク本体は、構造全体の中核となる荷重支持・遮蔽ユニットです。通常、ほぼネットシェイプの焼結ピレット1枚、または大型の鍛造リングを複数個溶接して構築され、どの方向でも最小壁厚が最も不利な放射線に対する減衰要件を満たします。内部空洞は、放射線源の形状に合わせて精密に設計され、円筒形、長方形、多角形、または複雑な不規則形状の空洞を形成します。すべての内面は鏡面研磨されており、死角や汚染ポイントを完全に排除しています。外面には、吊り上げ要件に応じて、一体型の吊り上げラグ、フォークリフトスロット、または標準化されたパレットインターフェイスが装備されています。また、線量率監視穴、ベントバルブ、除染スプレーインターフェイスも確保されており、タンクを単なる格納容器から、監視機能と操作機能を備えた統合プラットフォームへとアップグレードしています。

缶の蓋と密閉システムは、封じ込めの最後の砦であり、日常業務で最も頻繁に可動する部品でもあります。高級設計では通常、高精度のCNC研削により蓋と缶の開口部が完璧にフィットするように、段付きのラビリンス蓋が組み込まれています。耐放射線フッ素ゴムOリング、金属製Cリング、または二重安全複合シールと組み合わせることで、何万回もの開閉サイクルを経ても静的漏れと動的漏れがゼロになります。ロック機構には、クイックロッククランプ、回転ロックリング、油圧クイックオープン構造が採用されていることが多く、グローブボックス内から1人で数秒で缶を開閉できます。さらに、火災や高温発生後も手動で開けることができ、緊急時の回収時間を稼ぐことができます。

タングステン合金遮蔽容器は、従来の鉛容器とは異なるユーザーフレンドリーな特徴を備えています。内蔵の鉛ガラス観察窓は、タングステン合金フレームと多層勾配遮蔽設計を採用しており、遮蔽全体の連続性を損なうことなく、操作者が線源変位プロセスを直接観察できることを保証します。線量率監視ポート、ベントバルブ、線源操作棒チャネル、廃液入口および出口はすべてラビリンス+タングステン合金の入れ子構造を採用しており、開放方向への直接的な漏洩がないことを保証します。

表面機能層は、耐腐食性と洗浄容易性の最終的な保証です。化学ニッケルメッキ、耐放射線洗浄コーティング、高温酸化防止コーティング、あるいは複合多層システムにより、酸洗浄、ア

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ルカリ洗浄、蒸気パージ、さらには強力な酸化洗剤による洗浄を繰り返しても、タンク表面は清潔で新品同様の状態を保ち、孔食や恒久的な汚染層を完全に除去します。底壁と側壁には、交換可能な犠牲ライニングやステンレス鋼製の内壁防錆ライニングが施されていることが多く、廃液貯蔵タンクの耐用年数をさらに延ばします。

吊り上げ・輸送インターフェースは、構造的な安全性と実際の物流をシームレスに統合します。一体型の鍛造吊り上げラグ、側面衝撃保護プレート、底部衝撃吸収パレット、そして標準化されたコンテナロックにより、シールドコンテナは橋梁クレーンで正確に吊り上げられ、道路、鉄道、海上輸送を通じてその封じ込めとシールドの完全性を維持します。

マルチフィジックス連成シミュレーション（放射線輸送、熱、機械、経年劣化）を通じて開発当初から最適化され、落下、積み重ね、火災、浸漬、放射線経年劣化など、型式試験におけるあらゆる検証試験を経ています。すべてのコンポーネントが連携して最も厳しい基準を満たした場合にのみ、タングステン合金遮蔽容器全体が真に現代の放射線防護の究極の担い手と呼べるようになり、「信頼性の高い封じ込め、高い遮蔽効率、操作の簡便さ、そして超長寿命」を特徴としています。もはや単なる金属容器ではなく、材料科学、精密製造、放射線物理学、そしてシステム工学を完璧に融合させた工業芸術品と言えるでしょう。

### 3.1.1 タングステン合金シールド缶の主なシールド構造（缶本体、缶カバー）

缶本体と缶蓋は、タングステン合金シールド缶の主なシールド構造を構成し、全体的なシールドの連続性、最小壁厚、および幾何学的忠実度を決定するコア骨格となります。通常、両方とも同じバッチとグレードの高密度タングステン合金ブランクから加工されるため、材料特性とシールド効果が完全に一貫しており、従来の鉛缶のように蓋と缶本体の材質の違いによって接合部に弱点が生じることはありません。

缶本体は、ニアネットシェイプ成形プロセスと深穴精密加工を組み合わせた技術を採用しています。まず、超大型冷間または熱間静水圧プレスにより、高密度でシームレスなブランクを得ます。次に、ガンドリル、多段ホーニング、超音波電解技術を用いて、深さと直径の比が極めて高い内部空洞を一括で形成します。これにより、穴底および側壁のどの位置でも最小肉厚が、最も不利な光線経路の減衰要件を満たします。外形は、使用シーンに応じて円筒形、角柱形、または傾斜減肉を伴う不規則形状に設計され、使用可能な内容積を最大化し、吊り上げ・輸送時の重心分布を最適化します。缶口は高精度 CNC 研削加工により、多層段差ラビリンス面を形成し、平坦度と真円度をミクロンレベルで制御することで、後工程の蓋取り付けのための金属グレードのシーリング基盤を提供します。

缶蓋は構造の中で最もアクティブで精密な部品であり、日常の開閉効率と長期的な密閉信頼性を直接左右します。高級設計では、一般的に内蔵型のセルフセンタリング構造が採用されています。蓋の外径は缶開口部の内径よりわずかに小さく、重力とガイドリブによって自動的に位置合わせされます。蓋の底面には、缶開口部を完璧に反映する多段ラビリンス加工が施され

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ており、取り付け後には複数の金属同士のハードコンタクトと弾性シーリングリングのソフトコンタクトからなる複合シールドバンドが形成されます。蓋の上部には、一体型の鍛造リフティングリングまたはクイックロッククランプインターフェースが備えられており、ロボットによる把持を容易にし、火災による高温下でも操作性を維持します。一部の大型廃棄物容器では、二重蓋設計が採用されています。内蓋は永久的に密閉された使い捨てのタングステン合金溶接蓋で、外蓋は繰り返し開閉可能なクイックオープン蓋です。これにより、封じ込め性能と操作性の最適なバランスが実現されています。

タンク本体と蓋の接続部は、シールド構造全体の中で最も見落とされがちですが、最も重要な接合部です。タングステン合金シールドタンクは、一体型鍛造リング溶接と電子ビーム溶接または真空ろう付けにより、冶金グレードの接合を実現しています。溶接部の熱影響部の微細構造と特性は母材レベルに完全に復元され、従来のねじ接続や鉛タンクフランジ接続による貫通ギャップ接続のリスクを徹底的に排除しています。最終的に、タンク本体と蓋は、弱点や方向性漏れのない完全なタングステン合金シールドシェルを形成し、放射線は高密度材料内でエネルギーが尽きるまで繰り返し衝突し、逃げ道を見つけることができなくなります。

### 3.1.2 タングステン合金遮蔽タンクの補助機能構造（ライニング、コネクタ）

補助機能構造はシールドの主たる役割を直接担うわけではありませんが、耐腐食性、清掃の容易さ、操作の利便性、そして長期的な耐久性において、かけがえのない役割を果たします。精密機器のバネやワッシャーのように、一見取るに足らないものに見えるかもしれませんが、シールド容器全体が「一生使い続け、一度拭けば新品同様」という究極の目標を真に達成できるかどうかを左右するのです。

ライニングシステムは、化学汚染と放射能汚染の両方に対する二重の保護層として機能します。適用シナリオに基づいて、交換式犠牲ライニング、固定式耐食ライニング、機能性複合ライニングの3種類に分類されます。交換式犠牲ライニングは通常、低放射化ステンレス鋼またはチタン合金の薄いシートで、クランプまたは磁気アタッチメントを介して内部空洞の底壁と側壁に固定されます。これらは液体廃棄物または粉末状の放射性残留物を収集するために特別に設計されており、飽和すると完全に取り外して交換されるため、タングステン合金本体が汚染源に直接接触することはありません。固定式耐食ライニングは、PVD、溶射、または拡散プロセスを利用してCrNを形成します。タングステン合金表面に数十マイクロメートルの厚さのTiN（ダイヤモンドライクカーボン）膜を形成することで、強酸、強アルカリ、酸性洗剤などにも耐えるタングステン合金本体の耐損傷性を確保しています。機能性複合ライニングは、強力な中性子遮蔽が求められるタンクによく用いられます。タングステン合金の内面にホウ素含有ポリエチレンまたは水素リッチリチウム層を組み込むことで、熱中性子を吸収し、ガンマ線捕獲を抑制し、ガンマ線と中性子の複合遮蔽を最適に統合します。

コネクタと操作補助具は、遮蔽容器を静的容器から動的インタラクティブインテリジェント端末にアップグレードします。クイックロッククランプは高強度タングステン合金またはチタン合金で作られており、くさびセルフロック原理により、数秒でトンサイズのカバーを確実に締めることができます。線源操作レバーチャネルは、多段タングステン合金スリーブ+ベロ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ーズシールを採用しており、ロボットアームまたはリモコンで放射線源をキャビティの奥深くまで移動させながら、チャンネル方向の漏れをゼロにすることができます。ベント圧力バランスバルブには、タングステン合金フィルターエレメントと耐放射線ダイアフラムが内蔵されており、容器内の温度変化によって生じるわずかな圧力差を自動的にバランスさせ、放射性エアロゾルの漏出を防ぎます。底部の廃液排出バルブは、デュアルバルブシリーズ+タングステン合金バルブシート設計を採用し、排出プロセスが全体の封じ込めを損なわないことを保証します。

すべての補助機能構造は、「取り外し可能、交換可能、検査可能、追跡可能」という原則に基づいて設計されています。ライニングプレート、シーリングリング、操作レバーにはそれぞれ固有の識別コードと寿命記録が付与されており、熱環境外のユーザーによる迅速なメンテナンスとコンプライアンス監査を容易にします。これらはメインシールド構造と組み合わせることで、高度にモジュール化され、アップグレード可能なシステムを形成します。これにより、タングステン合金シールドタンクは製造時に最高の性能を発揮するだけでなく、20年、30年後も補助部品を交換することで優れた性能を維持できます。まさに「一度の投資で、一生安心」という言葉を体現しています。

### 3.1.3 タングステン合金シールド缶構造のシールド原理

タングステン合金シールドコンテナの真価は、単一部品の厚さや硬さではなく、コンテナ本体、蓋、ラビリンス、シール、ライニング、観察窓、機能インターフェースなど、すべての構造が交響楽団のように連携して、あらゆる放射線の逃げ道を遮断し、現場であらゆる種類の二次放射線を排除することで、最終的に「コンテナの外側は完全な静寂、内側は高秩序」という完璧なシールド状態を実現します。

まず、幾何学的な相乗効果があります。タンク本体の深い空洞と蓋の多段ラビリンスが少なくとも3本の連続した金属遮蔽帯を形成し、どの方向からの直射光線もタングステン合金の壁厚の少なくとも3倍を通過しなければ逃れられません。同時に、空洞の丸い角、蓋の自動中心化、底部に向かって徐々に厚くなる設計により、幾何学的な死角がすべて排除され、散乱した光子はエネルギーが使い果たされるまでタンク壁内で繰り返し跳ね返るだけです。

第二に、材料の相乗効果があります。本体は高タングステン、高密度グレードを使用して一次減衰を確保し、局所的にネストされたホウ素、水素、またはカドミウム含有層が熱中性子を正確に吸収し、表面機能コーティングまたは内部ライニングは低エネルギー特性X線と二次電子を処理するように特別に設計されており、広帯域で死角のない全エネルギーカバレッジを実現します。

第三に、シーリングの相乗効果があります。硬質金属同士のラビリンスが幾何学的なブロッキングと構造的な剛性を担い、弾性シーリングリングが分子レベルのブロッキングを担い、クランプまたはマルチスレッドが持続的なクランプ力を提供します。これら3つが重層的に作用することで、二重の保険システムを形成し、「弾性リングが劣化しても金属表面からの漏れがなく、金属表面がわずかに変形しても弾性リングが補償できる」ことを保証します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第四に、機能的な相乗効果：鉛ガラスの観察窓はタングステン合金の段付きフレームで完全に囲まれ、線量監視ポートにはタングステン合金のネジプラグとラビリンスプラグが装備され、廃液バルブにはデュアルバルブ直列接続とタングステン合金のバルブシートが装備されており、各開口部が独自の独立した遮蔽能力を持ち、本体壁の厚さに補償を依存しないことを保証します。

最後に、予期せぬ動作条件下での相乗効果があります。落下に遭遇した場合、高延性タングステン合金本体は粉碎されることなく衝撃エネルギーを吸収し、ラビリンスとシール面は高硬度のため変形しません。火災に遭遇した場合、高融点タングステン合金と抗酸化コーティングにより、タンクが溶解したり崩壊したりしないことが保証され、シールリングが燃えても、金属ラビリンスは基本的な封じ込めを維持できます。長期の照射後も、材料は膨張、活性化、脆化がゼロであるため、すべての相乗関係が数十年にわたって有効に維持されます。

この相互接続性、冗長性、そして相互バックアップ性を備えた構造的相乗効果により、タングステン合金遮蔽キャニスターは、最も複雑な混合放射線場、最も過酷な動作環境、そして最も長いサービスサイクルにおいて、外部表面線量率を常にバックグラウンドレベルに維持することができます。もはや単なる部品の集合体ではなく、生き、呼吸し、自己防衛する遮蔽体なのです。

### 3.2 遮蔽シナリオ別に分類されるタングステン合金遮蔽缶の主な種類

タングステン合金シールド缶は、単一規格製品の制約から既に脱却し、実際のシールドシナリオに合わせて高度に専門化されたシリーズを形成してきました。各タイプは、特定の放射源、空間、動作モード、規制要件に合わせて高度にカスタマイズされていますが、共通の材料遺伝子と設計哲学を共有しています。

医療用線源キャニスターシリーズは、核医学 PET-CT センター、サイクロトロン製薬工場、ガンナイフ治療室向けに特別に設計されています。小型、軽量、磁気干渉なし、そして極めて迅速な開閉が特徴です。代表的な製品には、シリンジ保護スリーブ、モリブデン-テクネチウムジェネレーターキャニスター、フッ素-18 輸送キャニスター、ヨウ素-125 シード線源保管キャニスターなどがあります。これらのキャニスターは、非磁性で耐腐食性のあるタングステン-ニッケル-銅合金を使用し、精密な壁厚勾配、素早く開けられる蓋、片手で操作できるノブを備えています。表面には超鏡面仕上げコーティングが施されており、MRI 室や無菌手術室への直接アクセスが可能です。

当社の固定式ホットチャンバータンクシリーズは、高放射能同位体の分注およびターゲット処理用に設計されています。厚肉、深い空洞、高度な統合性を備え、メンテナンスフリーで生涯にわたって使用できます。一般的な容量は数十リットルから数立方メートルまであります。高強度タングステン-ニッケル-鉄合金製で、一体成形されており、自動線源シフト機構、交換可能な犠牲ライニング、大型鉛ガラス観察窓、複数のロボットアームインターフェースを備えています。ホットチャンバーを取り外すことなく、20 年以上連続運転が可能です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

この輸送コンテナシリーズは、国際原子力機関（IAEA）の A 型および B 型規格に厳密に準拠して設計されており、耐落下性、耐火性、耐浸水性、そしてグローバルな適用性を備えています。外装は ISO コンテナ規格に準拠し、コーナー金具、ラッチ、衝撃吸収ベースを備えています。内部構造は多層構造のネスティングパッドとクッションパッドを採用し、耐塩水噴霧コーティングが施されています。9 メートルの高さからの落下、800℃の炎に 30 分間さらされても漏洩がなく、高放射性物質および廃棄物の国際輸送および大陸間輸送において唯一の合法的な輸送手段となっています。

当社の廃棄物移送・一時貯蔵タンクシリーズは、廃止された放射線照射施設、廃棄物の集中収集・貯蔵、地層処分前の一時貯蔵向けに設計されています。超大容量、超長寿命、最大限の冗長性といった特長を備えています。多くの場合、二重または三重の蓋構造を採用し、恒久溶接された内タンク、クイックオープン式の間タンク、盗難防止用の外タンクで構成されています。複数の監視インターフェースと遠隔読み取り可能な状態センサーを備えており、メンテナンスを必要とせず、無人倉庫で数十年にわたって廃棄物を安全に保管できます。

産業用探傷・科学研究用照射キャニスターシリーズは、方向性コリメーションと局所的な窓制御を重視しています。一般的に使用されているのは、コバルト 60 およびイリジウム 192 探傷用線源キャニスターと原子炉照射チャネルキャニスターです。方向性円錐窓と回転式タングステン合金コリメータを採用することで、X 線ビームの正確な照射を実現すると同時に、標的以外の方向に対する強力な遮蔽を提供します。

各タイプのタングステン合金遮蔽容器は、統一された材料プラットフォームと製造システムに基づいて開発され、特定のシナリオと問題点に合わせて最適化された構造、機能、人間工学を備えています。また、モジュール交換による迅速な変換も可能にしています。この「プラットフォームベースの設計 + シナリオベースのカスタマイズ」という分類モデルにより、タングステン合金遮蔽容器は真のワンストップ放射線防護ソリューションを提供し、病院、工場、研究所、廃棄物処理施設など、あらゆる場所に最適なカスタマイズソリューションをお客様に提供します。

### 3.2.1 原子力産業向けタングステン合金遮蔽容器

原子力産業に特化したタングステン合金遮蔽容器は、同位体製造ホットチャンバー、研究炉の照射経路、放射性化学物質供給ライン、高レベル廃棄物一時貯蔵施設向けに設計された「重要塞」です。その設計目標はただ一つ、最も高い放射能、最も複雑な混合放射線場、最長の耐用年数、そして最も無人運転が求められる環境において、絶対的な封じ込めと永続的な遮蔽を実現することです。

これらのキャニスターには、通常、極めて高いタングステン含有量と壁の厚さの勾配（外側が薄く、内側が厚い）を備えた高強度タングステン - ニッケル - 鉄合金が使用されているた

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



め、キャニスター 1 つの重量が簡単に数トンになります。構造的には、深い止まり穴の精密機械加工を組み合わせたニアネットシェイプの一体成形プロセスが一般的に使用され、どの放射線経路でも最小浸透厚さがコバルト 60、セシウム 137、ストロンチウム 90 などの長寿命核種の崩壊期間全体にわたる崩壊要件を満たすことが保証されます。キャニスターの蓋システムは、多くの場合、二重または三重の蓋で冗長化されています。内側の蓋には永久シールのために電子ビーム完全浸透溶接が使用され、中央の蓋はすばやく開く油圧ロックが使用され、外側の蓋には盗難防止センサーと状態監視センサーが装備されています。内部空洞全体には、交換可能な犠牲ライニングとホウ素/リチウム複合中性子吸収層が装備されており、 $\gamma$ -中性子- $\alpha$  スペクトル全体の複合遮蔽を実現しています。

高度に統合された機能: 内蔵の自動昇降機構、遠隔操作可能なロボットアームインターフェース、多点線量率および温度・圧力センサー、自動除染スプレーリング、オンライン排水ろ過・排出システムを備えています。表面には高温耐酸化性と超耐腐食性を備えた多層複合コーティングが施されており、蒸気バージ、濃硝酸浸漬、湿潤塩水噴霧への長時間曝露にも耐え、光沢を失わずに使用できます。輸送インターフェースはタイプ B(U) またはタイプ C コンテナ規格に準拠して設計されており、標準シールド輸送車両または輸送コンテナに直接積み込むことができます。

### 3.2.2 医療用タングステン合金シールド容器

医療用タングステン合金シールドコンテナは、まさに金属における「人間中心」のコンセプトを体現した製品です。非磁性、軽量、超高速開閉、清掃しやすい鏡面仕上げ、無菌室への適合といった要件を同時に満たす必要があります。また、医療従事者が最も過酷な夜勤中でも、片手で数秒で操作を完了できるようにする必要があります。

材料システムには、タングステン - ニッケル - 銅の非磁性および耐腐食性グレードをほぼ独占的に使用しているため、MRI 室での磁場歪みのリスクが完全に排除されます。壁の厚さは精密な勾配設計を採用しており、モリブデン - テクネチウム ジェネレーター、フッ素 18、ヨウ素 131 などの医療用放射性核種の線量率が基準を満たすことを確保しながら、重量は鉛容器の数分の 1 にまで軽減され、看護師が片手で簡単に持ち上げることができます。構造は極めて使い勝手を重視しており、クイックオープン蓋は、1 本の指で操作するノブまたは足で操作するクランプを使用し、3 秒で開き、1 秒でロックします。蓋は重力による自動調心と磁気アシストによる位置決め機能を備えているため、手袋を 3 枚重ねていても 1 回で位置合わせが可能です。内部の空洞全体は角が大きく丸くなっており、鏡面仕上げになっているため、専用のクリーニングワイプで 1 回拭くだけで元の清潔さに戻ります。

代表的な製品としては、注射器保護スリーブ、モリブデン-テクネチウムジェネレーター容器、FDG 分注容器、ヨウ素 125 シード線源移植容器、ストロンチウム 90 ドレッシング保管容器などがあります。これらの容器は、従来の冷たく工業的なグレーではなく、陽極酸化処理または PVD による金/青の装飾コーティングが施されており、滅菌環境の美観を高め、異なる核種の視覚的な識別を容易にします。また、表面には核種のシンボル、放射能限界値、有効期限が恒

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

久的にレーザー刻印されていることが多く、シールの剥がれによるラベルの誤記を完全に防ぎます。

一見些細な医療特有の詳細であるからこそ、タングステン合金シールドキャニスターは、最も忙しい PET-CT センターや最も厳格な GMP 製薬工場にシームレスに統合することができ、医療スタッフはシールドや汚染を心配することなく、患者に全力を注ぐことができます。

### 3.2.3 工業試験用タングステン合金遮蔽容器

産業検査専用タングステン合金遮蔽キャニスターは、「移動要塞+精密窓」の組み合わせであり、非破壊検査、パイプライン溶接部検査、鋳物内視鏡検査、税関保安検査設備などに最適です。全方位にわたる高強度遮蔽を提供すると同時に、精密かつ制御可能なビーム出口を確保することで、「遮断すべき場所から光子が1つも漏れず、出るべき場所から1ミリメートルもずれない」という性能を実現しています。

使用される材料は主に高強度のタングステン-ニッケル-鉄グレードであり、現場での建設、頻繁なクレーン操作、さらには偶発的な落下といった状況下でもタンクが変形することがありません。最も特徴的な構造的特徴は、方向性コリメーションウィンドウ設計です。タンク本体は360度厚い壁で完全に囲まれており、片側または複数の側面に、円錐、扇形、またはスリット状の回転式タングステン合金コリメータが配置されています。ビーム角度とビーム幅は、外部のハンドホイールまたはモーターによって精密に調整できるため、X線を溶接部または検査対象のワークピースに正確に照射すると同時に、作業者と周囲環境に対する優れた遮蔽効果を実現します。

代表的な製品には、イリジウム192探傷用線源キャニスター、セレン75パイプクローラーキャニスター、コバルト60大型ワークピース照射キャニスター、X線検査装置ヘッド用一体型遮蔽カバーなどがあります。キャニスターは、車輪付きシャーシまたはフォークリフトベ이를備えた一体型モバイルプラットフォームとして設計されることが多く、探傷暗室や現場作業現場への直接移動が可能です。コリメータは、多層構造のタングステン合金プレートとステッピングモーター駆動を採用し、散乱のない極めて高い角度分解能を実現しています。表面には耐油性・耐砂性に優れた工業用ポリウレタコーティングが施されており、油田、造船所、建設現場などの過酷な環境にも適しています。シーリングシステムは迅速な線源交換機能を重視しています。カバーにはクイックロッククランプとダブルOリングが使用され、専用の線源交換ピッグも備わっているため、作業者は暗室の外で線源の取り付けと取り外しを完了でき、作業全体を通じて作業員が被ばくする放射線はほぼゼロです。

### 3.3 構造形式によるタングステン合金シールド缶の一般的な種類

構造と設置方法の観点から、タングステン合金遮蔽容器は、固定式、可搬式、可搬式、モジュール式の4つの主要シリーズに明確に分けられます。最初の2つは世界最大の市場シェアを誇り、実際の需要のほぼ90%をカバーしています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3.1 固定式タングステン合金シールドキャニスター

固定式タングステン合金シールドキャニスターは、まさに「ホットチャンバーの心臓部」です。一度設置すると、その寿命を通じてほとんど移動されることはありません。重量や容積を犠牲にすることなく、究極のシールド効率、極めて長いメンテナンスフリー寿命、そして最高レベルの統合性を追求しています。

これらのタンクは通常、ニアネットシェイプ成形プロセスを用いて製造され、単一のブランクの重量は数トンから数十トンにもなります。壁の厚さは数十ミリメートルから 200～300 ミリメートルに及び、これらはホットチャンバー内での最悪のシナリオに基づいて完全に計算されます。タンク本体は、あらかじめ埋め込まれたタングステン合金または高強度鋼のアンカーボルトを使用して基礎に強固に接続され、長期の振動によるフレットング摩耗やシール不良のリスクを完全に排除します。タンクカバーシステムは、主に油圧または空気圧式のクイックオープンカバーを使用し、ホットチャンバークレーンとロボットアームを組み合わせることで、完全に自動化された開閉を実現します。大型ホットチャンバーでは、二重または三重のカバー構造が採用されています。最内層は恒久的に溶接されたタングステン合金製の内タンク、中間層は日常操作のクイックオープンカバー、最外層は防塵および事故防止のための安全カバーです。

機能統合は比類のないレベルに達しています。内部空洞には、多層構造の交換可能な犠牲ライナー、自動線源昇降プラットフォーム、廃液回収タンク、オンライン除染スプレーリングが備えられています。側壁には、大型鉛ガラス製の視認窓、マルチチャンネルロボットアームインターフェース、線量率、温度、圧力センサーが予め組み込まれています。底部はホットチャンバー廃液システムに直接接続され、自動ポンプとろ過機能を備えています。表面全体には高温耐酸化性と超耐腐食性に優れた多層コーティングが施されており、数十年にわたる蒸気パージや強酸洗浄にも耐え、輝きを失わずに使用できます。

固定式タングステン合金遮蔽容器は、通常 30 年以上の耐用年数を想定して設計されており、その間、メンテナンスやスペアパーツの交換はほとんど不要です。ミニチュアのタングステン合金製建造物のように、この容器は高温室の中心部にしっかりと固定されており、最も危険な放射線源を最も安全な位置に恒久的に固定します。これにより、高温室全体が、この鼓動しない「タングステンの心臓」によって数十年にわたって稼働し続けることができます。

### 3.3.2 ポータブルタングステン合金シールドキャニスター

携帯型タングステン合金遮蔽キャニスターは、「手に持って持ち運べる要塞」のようなものです。固定式キャニスターの遮蔽能力のほとんどを、看護師、技術者、現場作業員が容易に持ち上げたり、押したり、さらには背負ったりできるほどの小型に凝縮しており、タングステン合金の軽量性と実用性を兼ね備えています。

重量管理は携帯性にとって極めて重要です。設計チームは、精密なモンテカルロ光線追跡法とトポロジー最適化を駆使し、タングステン合金の 1 グラム単位まで効率よく使用されるよう

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



設計しました。最も厚い部分は線源の上部と下部にあり、周囲に向かって流線型の勾配で薄くなっています。さらに、外表面には薄いタングステンまたはチタン合金製の耐衝撃シェルを追加することで、あらゆる方向への十分な線量率を確保しながら、全体の重量を鉛キャニスターの数分の 1 にまで軽量化しました。一般的な医療用ポータブルキャニスターの重量は数キログラムから数十キログラムと幅広く、技術者が片手で持ち上げたり、看護師が台車に乗せて押したり、医師がインターベンション手術室に直接持ち込んだりするのに便利です。

デザインはミニマリズムとスピードを重視しています。蓋には通常、指一本で操作できるノブまたはマグネット式のクイックオープン機構が備わっており、3 秒で開き、1 秒でロックするため、3 重の手袋を着用していてもしっかりと握ることができます。ハンドルは一体鍛造で、人間工学に基づいて設計されており、長時間の使用でも快適です。また、底部の四隅には医療グレードのキャスターと電磁ブレーキが装備されていることが多く、注射台やベッドサイドで軽く押すだけで正確に停止できます。表面全体は鏡面研磨され、医療グレードのブルーまたはゴールドのアルマイト処理が施されているため、見た目も美しく、清掃も容易で、滅菌環境にシームレスに溶け込みます。

代表的な製品としては、フッ素 18 注入保護容器、モリブデン-テクネチウム発生器輸送容器、ヨウ素 131 処理容器、ゲルマニウム 68 校正線源容器、携帯型廃棄物線源収集容器などがあります。これらの容器には、線量率表示、残留放射能リマインダー、NFC 認証機能が組み込まれていることが多く、病院の医療情報システム（HIS）システムと直接連携することで、線源のエンドツーエンドの電子追跡が可能です。

ポータブルなタングステン合金シールド容器は、サイズが最小で、重量が最軽量、開閉が速いため、固定容器の「タングステンの要塞」の安心感を病棟、手術台、救急車、さらには患者の自宅にもたらし、放射性医薬品の製造から投与までのすべての瞬間が絶対的な制御下に置かれることを保証します。

### 3.3.3 密閉型タングステン合金シールドキャニスター

密閉型タングステン合金遮蔽容器は、究極の封じ込めと遮蔽を実現します。「いかなる形態においても放射性物質の漏出を絶対に防止する」という唯一の原則を遵守しています。高放射能廃棄物収集タンクから大陸間輸送用の B 型容器まで、ゼロ漏洩、長期保管、輸送、無人運転が求められるあらゆるシナリオに適しています。

構造的には、密閉タンクは繰り返し開けられる可能性のある可動式キャップを一切排除し、代わりに、一度きりの恒久的な閉鎖、または最小限の使用で極めて信頼性の高い開閉を実現するミニマリスト設計を採用しています。通常、線源装填後、タンク本体とキャップは、電子ビーム完全浸透溶接、真空ろう付け、または爆発溶接によって冶金グレードの恒久的な密閉を実現します。溶接継目は、ヘリウム質量分析リーク検出と X 線探傷検査の両方によって検証され、機器で検出できないほど低い漏洩率を保証します。時折線源装填を必要とする一部のモデルでは、特大径のクイックオープンキャップが採用されていますが、キャップとタンク開口部には、3 層以上の硬質金属ラビリンス、二重の耐放射線性金属 C 字型シーリングリング、油圧ク

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ランプブロックを備えた「トリプルインシュアランス」構造が採用されており、多数の開閉サイクルでも分子レベルでの漏洩ゼロを保証します。内部空洞全体に、交換可能な犠牲ライナーと多段フィルターエレメントが装備されています。放射性エアロゾル、揮発性ヨウ素、トリチウム蒸気は、第一層で物理的に吸着され、第二層で化学的に捕捉され、第三層の HEPA フィルターで完全に除去されます。タンクの側壁には複数の圧力、温度、線量率、水素濃度センサーが埋め込まれており、データは装甲ケーブルまたは無線でリアルタイムに送信されるため、地下深くの貯蔵施設や輸送コンテナ内でも遠隔監視が可能です。外面は、塩水噴霧と紫外線に強い超厚手のポリウレアコーティングが施されており、海洋性気候下でも数十年にわたって粉塵や膨れが発生しません。

### 3.3.4 オープントップタングステン合金遮蔽容器

開放型タングステン合金遮蔽キャニスターは、従来の常識に完全に逆らうものです。意図的に 1 つまたは複数の常時開放窓を設け、「X 線は望む場所にのみ到達する」という精密制御理念を積極的に採用しています。主に産業用ガンマ線探傷、科学研究用照射実験、税関 X 線セキュリティ検査ヘッド、医療用線形加速器コリメーションシステムに使用されています。タンク本体は高密度で厚肉のタングステン合金構造を継承していますが、テーパー状、扇形、長方形、またはスリット状のビーム出射窓が 1 面または複数面に精密に機械加工されています。各窓内には、独立して回転または移動可能な複数層のタングステン合金コリメーティングブロックがあります。ビーム角度とビーム幅は、外部のリード スクリュー、ハンドホイール、またはサーボモーターによって無段階に調整できます。ビーム出射方向以外はすべて超厚壁で囲まれているため、散乱光線や漏れ光線が完全に吸収されます。コリメーティングブロック間には、マイクロメートルレベルのダブルテールガイドまたはボールベアリングリニアガイドが採用されており、長期間にわたる頻繁な調整でも隙間が広がったり、位置がずれたりすることがありません。

操作上の安全を確保するため、開放型タンクには通常、連動保護カバーと多重の安全インターロックが装備されています。つまり、コリメーションウィンドウが完全に閉じられているか、保護カバーが完全にリセットされている場合にのみ、線源を作業位置まで上げることができます。保護カバーが誤って開かれた場合、線源は自動的に緊急にタンク底の安全ゾーンに沈みます。表面処理も密閉型タンクとはまったく異なり、油汚れ、砂埃、機械的傷への耐性をより重視しています。一般的に使用されているのは、硬質陽極酸化処理、炭化タングステン超音速フレイム溶射、またはポリウレア弾性コーティングで、現場探傷車両、造船所のガントリークレーン、税関港などの過酷な条件下でも 10 年間色を維持できます。オープントップのタングステン合金シールドタンクは、極めて高密度のタングステン合金を「制御可能なナイフ」に変え、X 線で溶接部を正確に切断したり、腫瘍を照らしたり、メスのように荷物を透視したりしながら、操作者と環境に対して常に「ナイフの裏側」の優しさを維持します。

### 3.3.5 単層タングステン合金シールド缶

単層タングステン合金遮蔽容器は、タングステン合金遮蔽技術の最も純粋で本格的な表現です。複合ライニング、傾斜遷移層、外部の低密度材料を一切使用せず、単一の素材と壁厚を持

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金本体自体にすべての遮蔽機能を委ねています。すべては、タングステン合金自体の高密度、高均一性、高安定性によってのみ担われます。一見粗雑に見えるこのミニマリズムは、実は材料性能への極度の自信の産物です。タングステン合金の密度、組成の均一性、微細構造の緻密さ、そして長期照射安定性が最高レベルに達した場合にのみ、このような妥協のない設計が採用されるのです。

タンク本体全体は、内外ともに同一グレード、同一ロットのタングステンニッケル鉄合金またはタングステンニッケル銅合金で製造されています。壁厚は設計段階で、最も保守的なソースタームと最長の耐用年数を考慮して保守的に計算され、「余厚マージン」の原則に従って厳密に製造されています。内面は鏡面研磨仕上げで、外面には薄い耐腐食コーティングまたは洗浄コーティングのみが施されているため、重量増加や遮蔽性能の低下は発生しません。蓋とタンク本体は完全に対称的な一体型設計となっています。ラビリンス、シール面、ロック機構はすべてタングステン合金から直接機械加工されているため、熱膨張率の不一致、放射線による膨張差、異種材料界面に起因するガルバニック腐食などの潜在的なリスクを完全に排除しています。

単層構造の利点は、極端な状況において十分に発揮されます。高温火災時に低融点ライニングが溶融して流出するリスクがなく、長期にわたる高線量照射下でも複合材界面の剥離や亀裂が発生する可能性がなく、強酸や強アルカリによる繰り返しの除染によって外層が剥離し、低密度基材が露出するという厄介な事態も発生しません。遮蔽効果は、放射線源自体の減衰によって時間の経過とともに徐々に向上し、材料の経年劣化によって低下することはありません。

このタイプのタンクの最も一般的な用途は、極めて厳格な信頼性要件が求められるシナリオです。例えば、恒久的な廃棄物タンク、深部地質処理前の一時貯蔵タンク、衛星搭載同位体熱源の保護タンク、そして絶対的な非磁性と絶対的な耐腐食性が求められる特定の高性能医療用熱源タンクなどです。これらのタンクは小型で驚くほど重く、装飾のない外観でありながら、究極の長期封じ込めと遮蔽保護を最もシンプルな形で実現しています。

### 3.3.6 多層タングステン合金シールド缶

多層タングステン合金シールドタンクは、シールド容器分野におけるシステムエンジニアリングの思想の頂点を極めます。タングステン合金を単一の材料として用いるのではなく、タングステン含有量、バインダー相組成、機能配向の異なる複数のサブ層に分割します。精密な冶金複合材、熱間静水圧加圧、クラディング溶接、真空ろう付けなどにより、原子レベルの接合を実現し、明確な機能区画、連続的な性能勾配、そしてシームレスな全体構造を備えた「タングステン合金サンドイッチ」を構築します。

最も古典的な構造は、内側から外側に向かって次のようになります。

- 最内層には、超高タングステンと低バインダー相を備えた超高密度グレードが使用され、主なガンマ線の強力な吸収のために特別に設計されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



- 中間層に微量の希土類元素やホウ素、カドミウムを添加することで、十分な強度を維持しながら効率的な熱中性子捕捉が可能になります。
- 外層は、表面耐腐食性と耐衝撃性の両方を考慮したタングステン-ニッケル-銅非磁性耐腐食システムまたは高靱性タングステン-ニッケル-鉄遷移層に切り替えられています。
- 最外層は、美観と最終的な洗浄の両方のニーズを満たすために、超薄型の機能性コーティングまたは犠牲装飾シェルにすることができます。

タングステン合金の各層は、組成、焼結プロセス、二次変形が正確に差別化されていますが、マクロ的な界面、ミクロなボイド、または急激な性能変化なしに、遷移拡散ゾーンを介して界面で完全な冶金結合を実現します。この多層複合材は、3つの革新的な利点をもたらします。まず、遮蔽効率が大幅に向上します。内層の硬質吸収により、高エネルギー光子の逃避確率が低下し、中間層は熱中性子を正確に捕捉してガンマトラッピングを抑制し、外層は低エネルギー散乱をさらに緩和します。システム全体では、同じ重量の単層缶よりも数桁多く減衰します。2番目に、重量と体積の最適化。同じ遮蔽能力を維持しながら総重量を大幅に削減できるため、輸送コンテナやポータブル医療用途に特に適しています。最後に、寿命とメンテナンス性が飛躍的に向上します。表面層は耐腐食性に優れ、部分的な補修も可能です。一方、内層は高純度・高密度で経年劣化がありません。缶全体は玉ねぎのような形状で、各層が保護機能を果たし、剥がすことが可能です。

多層タングステン合金シールド容器の開発は極めて困難で、粉末配合、層ごとの粉末塗布、傾斜焼結、クラッド溶接から最終機械加工に至るまで、製造工程全体にわたって精密な制御が求められます。しかし、ひとたび成功すれば、その包括的な性能と幅広い用途は、小型医療用線源容器から巨大な廃棄物輸送容器まで、ほぼすべてのハイエンドニーズをカバーします。もはや単なるタングステン合金ではなく、綿密に演出されたタングステン合金のシンフォニーです。各層がそれぞれの周波数帯域で最強の音を奏で、それらが一体となって最も完璧なシールド音を奏でます。

### 3.3.7 一体型タングステン合金シールド缶

一体型タングステン合金シールドタンクは、タングステン合金のニアネットシェイプ成形技術の最高峰です。その核心的な特徴は、タンク本体、タンクカバーベース、リフティングラグ、ラビリンスシールド面、機能インターフェースの埋め込み部品、さらには一部のコリメーション構造に至るまで、すべてを単一のブランクから一貫成形し、精密機械加工することです。これにより、溶接、ろう付け、機械組立の継ぎ目など、一切の工程を省き、内側から外側、そして上から下まで、完全にシームレスなタングステン合金連続体を実現しています。

ブランクの準備には、通常、超大型冷間静水圧プレスと高温真空水素二段階焼結、または直接熱間静水圧プレスクラディングプロセスを採用し、単一のブランクの重量が数トン以上になり、密度、組成の均一性、および微細構造の一貫性の理論限界を達成します。その後の深い止まり穴は、高剛性ガンドリル、多軸ホーニング、超音波アシスト電解複合加工を使用して機

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

械加工され、非常に高い深さ対直径比のキャピティを1回のパスで貫通します。外形、リフティングラグ、ラビリンスステップ、観察窓フレーム、および線量監視穴用の事前埋め込みネジはすべて、5軸以上の高精度CNCワイヤーEDMと鏡面研削を使用して完成します。最終製品は、マクロ的に、開閉可能なカバー接合面が1つだけ残り、残りの領域には界面、熱影響部、および残留応力集中源がまったくありません。

この徹底した統合設計により、次のようないくつかの重要なエンジニアリング上の利点もたらされます。

- シールドの連続性が物理的な限界に達すると、光線は低密度チャネルやインターフェース散乱強化領域を見つけることができなくなります。
- 構造的な剛性と耐衝撃性が大幅に向上し、極端な落下や地震の負荷を受けても溶接部の割れや接合面の剥離が発生しません。
- 長期照射下でも幾何学的忠実度が最適であり、領域ごとの膨潤係数の違いによる反りや密閉不良は発生しません。
- 死角や隙間、微細な段差がなく、汚れが溜まりやすいため、表面洗浄性能に優れ、廃棄するまで鏡面のような仕上がりを維持できます。

統合タングステン合金遮蔽容器は、主に、信頼性の要件が最も高く、重量と容積の制限が比較的緩いシナリオで使用されます。大型同位体製造ホットチャンバーのコア容器、研究炉の照射チャネルの永久挿入容器、衛星同位体熱源の統合保護容器、国家戦略廃棄物容器などです。

### 3.3.8 モジュラータングステン合金シールド缶

モジュラー式タングステン合金遮蔽容器は、統合型の理念を根底から覆し、高度にモジュール化され、拡張性に優れ、現場で組み立てられ、アップグレード可能なシステムアプローチを採用しています。複雑な遮蔽作業を一連の標準または準標準機能モジュール（本体部、上部シリングアセンブリ、下部支持アセンブリ、中性子吸収体、コリメーションウィンドウアセンブリ、モニタリングインターフェースアセンブリ、表面保護シェルなど）に分割し、高精度フランジ、クランプ、クイックロックピン、または真空ろう付けジョイントによる信頼性の高い接続を実現します。これにより、線源パラメータの変更、スペースの制約、規制の強化などに応じて、現場で最終構成を柔軟に調整できます。

モジュール設計の核心は、インターフェースの標準化と互換性にあります。すべての円筒セクションは、外径、内径、壁の厚さの勾配、ラビリンスパターン、シールド面の粗さが完全に均一であるため、任意の2つのセクションをシームレスに接続できます。機能プラグインは引き出し式または放射状挿入構造を採用しており、熱交換エリア外で生産を停止することなく、中性子吸収層の追加または取り外し、コリメーションウィンドウの交換、モニタリングプローブのアップグレードが可能です。外側の保護シェルと衝撃吸収トレイもモジュール化されており、道路、鉄道、海上、航空輸送の要件に応じて迅速に切り替えることができます。接続ポイントには、一般的にダブルOリング+金属ベローズ+ヘリウム質量分析計リーク検出ポートの3重

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

安全システムを採用しており、組み立て後の全体的なリーク率が一体型タンクと完全に同等であることを保証します。

このモジュール式アーキテクチャは、これまでにないエンジニアリングの柔軟性とライフサイクル経済性をもたらします。

- 初期投資は、コアシールドシリンダ部から開始し、生産能力の拡大に合わせて機能モジュールを段階的に追加していくことが可能です。
- ソースアイテムをアップグレードする場合、一部のプラグインのみを置き換える必要があります。アイテム全体を破棄して再構築する必要はありません。
- メンテナンスと除染はモジュールレベルで実行でき、汚染された部品は個別に取り外して屋外で熱処理できるため、人員の放射線被曝と二次廃棄物の量が大幅に削減されます。
- 廃止時には、層ごとに分解してリサイクルすることができ、タングステン合金の本体、機能部品、シールなどはすべて異なる再利用チャンネルに入り、真にグリーンな閉ループを実現します。

モジュール式タングステン合金遮蔽容器は、世界で最も忙しい同位体生産拠点、最も混雑した都市部の核医学センター、そして頻繁なアップグレードと拡張を必要とする産業用放射線施設で最も広く使用されています。標準化されたモジュールをベースとし、現場での組み立てにより、タングステン合金遮蔽システムを単一製品から継続的に成長・進化できるオープンプラットフォームへとアップグレードし、迅速な反復とマルチシナリオへの適応という現代の放射線防護工学の基本的なニーズに完璧に適応します。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

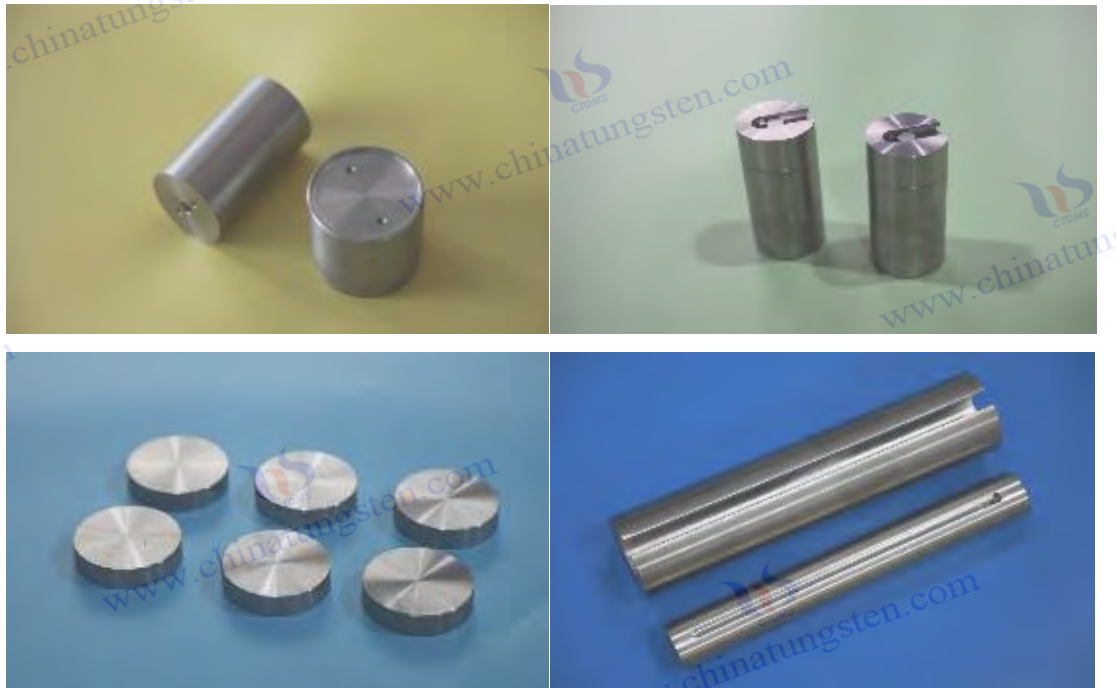
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 第4章 タングステン合金シールド缶の製造工程

### 4.1 タングステン合金遮蔽タンクの原材料構成と要件

タングステン合金遮蔽キャニスターは、一般的な構造部品や放射線防護材料をはるかに凌駕します。本質的には、タングステン粉末、ニッケル粉末、鉄粉末、銅粉末、そして微量機能性添加剤の極限までの精製、精密な粒子サイズ制御、一貫した活性、そしてバッチ間の安定化を伴う体系的なエンジニアリングプロジェクトです。粉末 1 グラムごとに医薬品グレードに近い品質に達した場合にのみ、最終製品は数十年にわたる大量照射、繰り返される強力な腐食と除染、そして予期せぬ過酷な動作条件下でも、欠陥ゼロ、減衰ゼロ、汚染ゼロを維持できます。

原料システムは主に、高純度タングステン粉末、バインダー相金属粉末（ニッケル、鉄、銅）、中性子吸収機能粉末（ホウ化物、カドミウム化合物、希土類酸化物など）、およびプロセス補助粉末（成形剤、脱脂剤、焼結活性剤）で構成されています。すべての粉末は、鉍石採掘、パラタングステン酸アンモニウムの結晶化、タングステン/ブルータングステンの還元から、タングステン粉末の最終的な水素還元まで、完全に追跡可能なシステムを通過する必要があります。各ステップには固有のバッチコードと完全な物理化学試験記録があります。バッチ間のわずかな変動でさえ、タングステンの粒度分布、酸素含有量、不純物プロファイル、または還元活性に許容できない差異をもたらし、最終的には遮蔽タンクの最も薄い部分または最も深い部分に密度の弱い領域または活性化ホットスポットを形成する可能性があります。

#### 4.1.1 タングステン合金シールドタンクの主原料比率

タングステン合金シールド缶は、従来の「経験に基づく配合」段階をはるかに超え、線源スペクトル、使用環境、規制要件、ライフサイクルコストに基づいた精密な多目的最適化システムへと進化しました。配合設計の核心は、タングステン粉末を絶対的な主成分とし、バインダー相と機能性添加剤を精密に制御可能な「機能性遺伝子」として用いることです。組成、微細構造、性能、そして適用シナリオを閉ループマッピングすることで、各シールド缶に最適なソリューションを実現します。

タングステン粉末は、組成において一貫して主要な役割を果たしており、その質量分率を意図的に極限まで高めることで、マクロ的な密度、原子数密度、光電吸収断面積を最大限に高めるとともに、その後二次変形に十分なタングステン-タングステンの直接接触構造を確保しています。バインダー相システムは、最終用途に基づいて3つの主要な技術ルートに分けられます。

- ニッケル鉄系は、その優れた動的機械特性と中性子減速能力により、原子力産業のホットチャンバータンクや高強度輸送タンク第一選択肢となっています。ニッケル鉄比を微調整することで、強度、靱性、中性子捕捉能力の正確なバランスを実現できます。
- ニッケル銅系は、完全な非磁性、高い耐食性、そして優れた冷間加工性・熱間加工性により、核医学タンクや廃液貯蔵タンクに最適な選択肢です。銅含有量のわずかな変化が、表面不動態皮膜の厚さと孔食電位に直接影響を及ぼします。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ニッケル・鉄・銅の三元系は、強度、非磁性、耐腐食性を兼ね備えたハイエンドの妥協案であり、最も厳しい総合的な性能要件を備えたタイプ B 輸送コンテナに使用されます。

中性子吸収機能元素は、バインダー相の溶融・浸透段階または粉末混合段階で化合物の形で精密に添加されます。ホウ素は炭化ホウ素または窒化ホウ素の形で分散され、希土類元素は酸化物または金属粉末の形で分散され、カドミウムまたはガドリニウムはブレアロイ粉末の形で導入されます。これにより、タングステン骨格の連続性を損なうことなく、熱中性子吸収断面積を最適なレベルまで向上させ、捕捉されたガンマ線の二次放射エネルギーを厳密に制御することができます。

プロセス活性剤と成形剤の選択も同様に重要です。微量のパラジウム、白金族元素、または希土類酸化物を焼結活性剤として使用することで、タングステンの純度を低下させることなく液相出現温度を下げ、バインダー相によるタングステン粒子の完全な濡れを促進します。成形剤は、脱脂段階で完全に揮発し、残留炭素や灰を残さない医療グレードのポリマーでなければなりません。これにより、焼結後の気孔率と炭素汚染はゼロになります。

最終配合は、実験室で少量バッチで検証された後、パイロットスケールでの増幅、バッチ安定性評価、放射線老化試験、除染・腐食試験、実タンクの放射線画像校正を含む全工程確認プロセスを経る必要があります。すべての性能指標が設計目標を同時に達成し、バッチ間の変動が最小許容値未満である場合にのみ、配合は正式に社内標準として確定され、各遮蔽タンクの材料証明書に記載されます。

#### 4.1.2 タングステン合金遮蔽タンクの原材料の純度と粒径の要件

タングステン合金遮蔽容器は、タングステン材料科学の分野において極限レベルに達しています。その根底にあるのは、微量の有害不純物や粒子サイズの分散が、高線量照射下で長寿命の放射化核種に変化し、強力な腐食や除染によって孔食腐食の発生源となり、深い止まり穴の最薄部に密度の低い領域を形成し、容器全体の長期信頼性を完全に破壊する可能性があるという点です。

タングステン粉末の純度は、「超医薬品グレード」レベルを達成する必要があります。これは、総不純物レベルが極めて低く、個々の有害元素（モリブデン、ニオブ、タンタル、チタン、リン、硫黄、酸素、炭素、水素、窒素、カリウム、ナトリウムなど）の含有量が厳密に管理されていることを意味します。酸素含有量は、焼結中に残留酸素がタングステンと反応して揮発性酸化物を形成し、ミクロンサイズの気孔を形成するため、最大の有害物質と考えられています。炭素含有量は正確なバランスを保つ必要があります。含有量が多すぎると炭化タングステンが脆くなり、含有量が少なすぎると異常粒成長を抑制する能力が失われます。すべての不純物

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



検出は、グロー放電質量分析、不活性ガス溶融赤外線熱伝導率、誘導結合プラズマ質量分析を用いた三重の検証によって行われ、バッチ間の一貫性が確保されています。

粒度分布は、極めて狭い単峰性の正常範囲内に制御されています。粉末が細かすぎると焼結収縮が不均一になることはなく、粗い粉末ではタングステン-タングステン骨格に局所的な破壊が生じることもありません。フィッシャー粒子サイズ、レーザー回折粒子サイズ、走査型電子顕微鏡の統計は完全に一致している必要があります、少しでもずれがあるとバッチ全体が廃棄されます。バインダー相のニッケル、鉄、銅の粉末の純度要件も同様に厳格です。ニッケル粉末には、コバルト、硫黄、リンなどの磁性元素や腐食誘発元素が含まれてはなりません。鉄粉末には、シリコン、マンガン、酸素が極めて低いレベルである必要があります。銅粉末には、ヒ素、ビスマス、テルルなどの低融点不純物が一切含まれてはなりません。すべての粉末は、一貫した表面活性、吸着ガスの欠如、凝集のない状態を保証するために、工場に入る前に真空脱ガス、二次水素還元、プラズマ球状化処理を受けます。

#### 4.1.3 タングステン合金遮蔽タンクの補助材料の選択基準と要件

タングステン合金遮蔽タンクの製造システムにおいて、補助材料は最終的な構成には含まれませんが、成形、脱脂、焼結、後加工の各段階で重要な裏方的な役割を果たします。補助材料は、「工程において不可欠であること、使用中に完全に消失すること、消失後に残留物を残さないこと、有害な残留物がない」という厳格な4つの原則を満たす必要があります。

好ましい成形剤は、医療グレードのポリエチレングリコール-ポリビニルアルコール共重合体または高級パラフィン系複合システムです。低温射出成形または冷間静水圧プレス成形において優れた流動性と形状保持性を示し、その後の脱脂工程において焼結温度をはるかに下回る温度で完全に熱分解・揮発し、残留炭素および灰分がほぼゼロとなることが求められます。

残留有機物は、高温水素焼結中にタングステンと反応して脆い炭化タングステン相を形成する可能性があり、また真空焼結中に揮発して炉を汚染し、バッチ間のクロスコンタミネーションを引き起こす可能性があります。

脱脂触媒および焼結雰囲気浄化装置は、通常、高純度硝酸または過酸化水素微量ドーピングシステムであり、成形剤の分解を促進し、残留酸素および炭素を捕捉するために使用されます。これらは脱脂段階の終了時に完全に除去する必要があり、炉内の残留酸素分圧および炭素分圧は、機器の検出限界に達するまでリアルタイムで監視する必要があります。

ブランクの焼結支持材と離型剤は、超高純度アルミナ、酸化イットリウム、または窒化ホウ素でコーティングされており、最高焼結温度においてもタングステン合金との反応、付着、元素拡散がゼロであることが求められます。支持材の剥離や離型剤の残留は、ブランク表面に浅いピットを形成する可能性があり、これは将来の洗浄におけるデッドゾーン、あるいは孔食の発生源となる可能性があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面处理補助材料（無電解ニッケルめっき液、洗浄・コーティング樹脂、イオン窒化ガス、ダイヤモンドドライカーボン前駆体）も医薬品グレードの純度基準に適合しています。めっき液にはシアン化物および重金属安定剤が含まれず、コーティング樹脂にはベンゼン系溶剤および遊離ホルムアルデヒドが含まれず、窒化ガスの純度、水分、酸素含有量は極めて低いレベルに管理する必要があります。

生産前の全工程シミュレーション検証: 実際のタングステン合金ブランクを採取し、実際のプロセスパラメータに従って成形、脱脂、焼結、表面処理の全サイクルを完了した後、完成品に対して残留グロー放電質量分析法による詳細分析と放射線放射化分析を実施します。プロセスによって不純物が導入されていないことを確認した上で、バッチ生産を承認します。

## 4.2 タングステン合金シールド缶の製造工程

タングステン合金シールド缶は、高度に密閉され、完全にトレーサビリティが確保され、汚染物質の混入がない専用の生産ラインを構築しています。その中核となるコンセプトは、粉末1グラム当たりのポテンシャルを、缶体の最も深く薄い部分の真の性能へと、完全かつ均一に、そして損傷なく変換することです。これにより、局所的な密度の弱い部分、構造の不均一性、あるいはプロセス変動による残留欠陥などを排除します。

### 4.2.1 タングステン合金シールドタンクの基本的な粉末冶金プロセス（粉末の準備、混合、プレス）

粉末化、混合、圧縮の3つの主要ステップは、製造チェーン全体の「遺伝子工学」段階とみなされており、これ以降のすべての高温処理はケーキにアイシングを加えることしかできず、本質的なサポートを提供することはできないとされています。

粉末製造工程では、従来単一水素還元法から完全に脱却し、温度、水素露点、流量を変化させる多段階の「勾配精密還元+プラズマ再球状化」複合プロセスを採用しています。タングステン粉末は、まず低温・低露点領域で最外層の酸化物層を緩やかに還元し、その後徐々に温度を上昇させてより深い還元領域に移行します。最後に、高純度アルゴンプラズマ球状化チャンバーで粒子の球状化と最終脱ガス処理を行い、極めて狭い粒度分布、完全な球形性、極めて低い酸素および炭素含有量、そして極めて高い嵩密度を有するタングステン粉末が得られます。ニッケル、鉄、銅の粉末は、それぞれカルボニル法とアトマイゼーション・真空脱ガス・水素二次還元法を用いて製造され、粒子はほぼ球形となり、内部空隙や表面吸着層は形成されません。

混合は、タングステン合金遮蔽容器の「魂のこもった均一性」を真に決定づける重要な工程です。業界をリードする工場では、一般的にデュアルモーションブラネタリーボルテックス複合粉末ミキサーまたは超大容量三次元ミキサーを採用しています。混合容器の内壁とローターは、高純度タングステンまたは酸化イットリウムで全面コーティングされており、外部からの

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

鉄族汚染を完全に排除しています。混合工程は、乾式混合、湿式混合、真空脱ガス、二次乾式混合の4つのサブステージで構成されています。まず、高純度アルゴンの保護下で、タングステン粉末とバインダー相粉末の予備的な空間的均質化を行います。次に、医療グレードの無水エタノールまたは高純度イソプロパノールを添加し、深部渦流分散のための懸濁液を形成します。その後、溶媒を真空回転下でゆっくりと蒸発させます。最後に、残留凝集物を除去するために再度乾式混合を行います。混合サイクル全体は数十時間続き、その間にレーザー粒径分析、SEM、化学組成クロマトグラフィーのためのリアルタイムサンプリングが実行され、タングステン粒子とバインダー相粒子がミクロンスケールで統計的に完全な均一性を達成することが保証されます。

プレス工程は従来の一方向成形から完全に脱却し、「三位一体」成形システムへと移行しました。このシステムでは、冷間静水圧プレス为主とし、射出成形を補助とし、さらに熱間静水圧プレスで予備成形を行います。小型・中型缶ブランクには、ウェットバッグ法による冷間静水圧プレスを採用し、ブランクの最深部まで圧力が均一に伝達されるようにすることで、表面から中心部まで均一な密度を保証します。超大型または複雑な異形状のブランクについては、まず低温射出成形で高精度のブランクを得、その後、ブランク全体をフレキシブルスリーブに包み、冷間静水圧プレスで隙間を埋めます。極めて高い密度が求められる一体型缶ブランクについては、冷間静水圧プレス直後に熱間静水圧プレスを実施することで、焼結炉に入る前にブランクが理論密度に近づくようにします。すべてのプレス工程はクラス 100,000 以上のクリーンルームで行われ、オペレーターは完全な装備を備え、ブランクの表面は指紋、汗、ほこりによる汚染を防ぐために特殊な保護フィルムで覆われています。

これら 3 つの基本プロセスを究極的に改良することで、タングステン合金シールド タンクの材料基盤が築かれ、「密度の弱点がなく、構造に違いがなく、性能に変動がない」ことが保証され、その後の高温焼結と精密機械加工のための最も完璧な出発点も提供されます。

#### 4.2.2 タングステン合金シールドタンクの主な焼結プロセスとパラメータ制御

焼結は、タングステン合金シールドタンクにとって極めて重要な変革段階であり、「高密度ブランク」から「真に高性能な材料」へと変貌を遂げます。また、焼結はプロセスチェーン全体の中で、最も高温、最長時間、最も複雑な変数を伴う段階であり、最終的なシールド効果に最も大きな影響を与えます。焼結中に不可逆的な欠陥（局所的な液相の過剰、バインダー相の偏析、タングステン粒子の異常な成長、マイクロクラックなど）が発生した場合、タンク全体がスクラップとみなされます。

高級タングステン合金シールド容器は、一般的に真空水素二段階焼結と熱間等方圧加圧(HIP)後処理を組み合わせた三段階のプロセスを採用しています。第一段階は低温固相予備焼結で、高真空下でバインダー相が溶融する前に、温度を臨界点までゆっくりと上昇させます。これにより、残留成形剤、吸着ガス、揮発性不純物が徹底的に除去されるとともに、タングステン粒子間の初期のネック接合が完了し、後続の液相焼結段階における毛細管現象に耐える十分な強度が形成されます。第二段階は液相本焼結で、炉は高純度の水素流通に切り替わります。精

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



密に制御された温度範囲内で、バインダー相は完全に熔融し、タングステン骨格を完全に濡らします。液相の毛細管現象によって、タングステン粒子の急速な再配列、細孔の球状化と収縮、そして最終的な緻密化が促進されます。この段階では、加熱速度、保持時間、水素露点、炉の圧力勾配が閉ループシステムによってリアルタイムで制御され、パラメータの変動は直ちに自動炉停止保護装置を作動させます。第3段階は、最終的な緻密化と微細構造の均質化のための熱間静水圧成形です。アルゴンガ斯拉イナー内で均一な高圧をかけることで、残留閉気孔を完全に平坦化し、タングステン粒子の境界に沿ってバインダー相の均一な拡散を促進します。これにより、最終的に理論密度を限界に非常に近づけ、微細な偏析帯を排除します。

炉室全体にタングステン-モリブデン複合発熱体と多層タングステン-モリブデン輻射スクリーンが採用されています。ピレットは超高純度イットリウム酸化物のつぼ、または窒化ホウ素コーティングされたタングステン板上に載置されます。支持材および断熱材はすべてタングステン合金と反応しません。炉内の温度場均一性、雰囲気純度、圧力安定性、加熱/冷却曲線はすべて数秒以内に取得され、永久保存されるため、各容器の焼結プロセスの完全なトレーサビリティが確保されます。炉を出たピレットは直ちに清浄な冷却室に入り、アルゴンガス雰囲気下で徐冷されます。これにより、水素脆化と熱応力割れが防止されます。

#### 4.2.3 タングステン合金シールドタンクの加工工程

機械加工は、タングステン合金遮蔽容器を「高性能ブランク」から「高精度機能容器」へと変貌させる最終段階であり、これまでのあらゆる技術的成果の最終的な受入試験でもあります。傷、フィレット半径の不足、あるいは壁厚の1ミクロンの偏差でさえ、将来の放射線漏洩の種類となり、未処理領域の温床となる可能性があります。

加工チェーンは、荒加工、仕上げ加工、超仕上げ加工、鏡面仕上げ加工の4段階に分かれています。荒加工段階では、高剛性・高耐久性のCNCフライス盤・旋盤加工センターを使用し、専用のタングステン合金スローアウェイ切削工具と超高压内部冷却システムを備え、余分な材料の大部分を素早く除去して基準面を確立します。切削工具の材質は超微粒子超硬合金または立方晶窒化ホウ素、切削液は医療グレードの合成エステルを使用し、塩素、硫黄、リンによる汚染がないことを保証します。仕上げ加工段階では、超高精度5軸以上の加工センターに切り替え、切削工具を天然ダイヤモンドまたは多結晶ダイヤモンドにアップグレードします。切込みと送りはマイクロメートルレベルに厳密に制限されており、タンクの外形、リフトラグ、ラビリンス状の段差面、機能インターフェース用の事前埋め込み穴などを高精度に成形します。超精密加工は、深穴や内部空洞の加工に特化し、ガンドリル加工+多段拡張ホーニング加工+超音波電解研磨加工の「サンドイッチ」加工を採用しています。ガンドリル加工により穴の深さと真直度を確保し、拡張ホーニング加工により均一な壁厚と真円度を実現し、超音波電解研磨加工により表面の微小亀裂や応力層を除去し、内部表面粗さを鏡面レベルまで仕上げます。タンク開口部のシール面、観察窓枠、バルブ取付面など、露出面全体を鏡面仕上げとし、磁気粘性研磨、イオンビーム研磨、プラズマ化学研磨などの研磨技術を用いて、工具痕、加工劣化層、残留引張応力などを除去します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機械加工工程全体は、一定の温度と湿度に保たれたクラス 100,000 のクリーンルームで行われます。ワークピースと切削工具および治具の間には、鉄族元素の移行を防ぐため、使い捨ての高純度タングステンまたは酸化ジルコニウムの絶縁パッドが使用されます。重要な寸法は、座標測定機、レーザートラッカー、オンライン光学プロファイロメーターを用いてリアルタイムで監視されます。最小壁厚と穴底厚は、超音波フェーズドアレイとガンマ線イメージングの両方によって検証されます。最終製品は、クリーンルーム内でヘリウム質量分析法と表面清浄度蛍光検出による全面リークテストを受け、その後、表面機能コーティング工程に進みます。

#### 4.2.4 タングステン合金シールドタンクの表面処理プロセス

表面処理は、タングステン合金シールドタンクを「高性能金属ボディ」から「環境に優しく長寿命の機能システム」へと変貌させる、究極の錬金術的プロセスです。タンクには、極めて高い耐腐食性、極めて強力な耐傷性、極めて低い汚染除去剤、優れた装飾性、そして繰り返し接触しても全く無毒で安全な安全性を同時に付与する必要があります。これらの指標のどれか一つでも欠けると、タンク全体が10年以内に早期に廃棄されることになります。

ハイエンド表面処理システムは、「下層強化+中層保護+洗浄容易な表面層」という3層複合構造を採用しています。下層強化では、イオン窒化、ホウ素化、または低温プラズマ浸炭処理を用いて、タングステン合金表面の数十〜数百マイクロメートルの深さに高硬度の窒化物、ホウ化物、または固溶強化相を形成し、ピッカース硬度を大幅に向上させます。同時に、表面に良好な圧縮応力層を予め形成することで、微小亀裂の発生と伝播を効果的に防止します。中層保護では、主に無電解ニッケルリン合金めっきを使用し、厚さとリン含有量を精密に制御することで、最適な耐食性範囲に最適化しています。めっきは完全に気孔フリー、ピンホールフリーで、基材と冶金的に結合しています。その後、真空または保護雰囲気中で低温拡散熱処理を行い、ニッケルめっき層とタングステン合金基板の間に数十マイクロメートル幅の遷移拡散層を形成し、めっき剥離のリスクを完全に排除します。核医学および廃棄物タンク用途の一部では、PVD CrN、TiN または DLC ダイヤモンドライクカーボンコーティングが直接選択され、超高硬度と生体不活性のバランスが取れています。汚染除去が容易な表面コーティングには、医療グレードのフッ素ポリマー、シラン改質ポリウレタン、またはナノセラミック複合システムが使用されています。原子レベルの接着は、プラズマ活性化に続いて真空蒸着または超臨界CO<sub>2</sub>スプレーを行うことで実現されます。コーティングは表面エネルギーが極めて低く、接触角が非常に高いため、放射性汚染物質は極めて弱いファンデルワールス力によってのみ吸着されます。湿らせた布で一度拭くだけで、コーティングは元の清潔さに戻ります。コーティング自体は放射線誘発黄ばみ、強力な酸化洗剤、高温蒸気老化に耐性があり、寿命はタングステン合金基板の寿命と完全に一致しています。

すべての表面処理工程は、クラス 100,000 以上のクリーンルーム内の自動化された閉ループ生産ラインで行われます。すべての工程で発生する廃ガスと廃液は、閉ループ内でリサイクル・処理され、シアン化物、重金属、揮発性有機化合物の排出を一切排除しています。工場を出荷する前に、各タンクは数百時間にわたる連続塩水噴霧、酸噴霧、紫外線照射による複合老化試験と、実際の洗剤を用いた拭き取りによる検証を受けます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3 タングステン合金シールド缶の製造工程における品質管理のポイント

タングステン合金遮蔽タンクは、従来の「抜き取り検査＋最終検査」という受動的なモデルをはるかに超え、全工程、全要素、全人員、全記録を網羅する閉ループ型の予防・制御システムへと進化しました。その核心となるコンセプトは、いかなる工程、いかなるパラメータ、あるいはいかなるオペレータにおける些細なエラーも、いかなる確率においても次の工程に引き継がれることがなく、ましてや 10 年後のホットチャンバーユーザーに負担を負わせることのないようにすることです。

原材料が工場に到着した瞬間から、包括的な品質管理が始まります。タングステン粉末、バインダー粉末、補助材料の各バッチは、グロー放電質量分析法、不活性ガス溶融法、レーザー粒度分析法、SEM-EDS 法の 4 つの独立した試験を受けます。試験報告書は実際のバッチと 1 対 1 で対応し、永久に保存されます。いずれかの指標から逸脱した場合は、バッチ全体が返品されます。混合、プレス、焼結、機械加工、表面処理など、すべての主要プロセスは、SPC 統計的プロセス制御の対象となります。温度、圧力、時間、回転速度、切込み深さなど、数百ものコアパラメータがリアルタイムで収集、警告、ロックされます。焼結炉、熱間静水圧プレス装置、深穴加工センターにはすべてブラックボックスレベルのレコーダーが装備されており、異常を秒単位で正確に再現できます。

全工程を通じて非破壊検査を実施しています。プレスされたピレットは、工業用 CT スキャンを用いて内部の亀裂や密度分布がないか検査されます。焼結後、ピレットは超音波フェーズドアレイとガンマ線イメージングを用いた二重の検証を受けます。加工後、タンク全体のヘリウム質量分析リーク検出率は真空レベルの基準を満たす必要があります。表面処理後、蛍光浸透探傷試験、X 線残留応力試験、接触角測定を用いて各項目を確認します。重要な寸法（最小壁厚、穴底厚、シール面の平坦度、ラビリンスクリアランス）は、座標測定機、レーザートラッカー、オンライン光学プロファイロメーターによって個別に測定され、次の工程に進む前に結果が完全に一致している必要があります。

最も厳格な対策は、トレーサビリティとアカウントビリティです。最初のタングステン粉末 1 グラムから最終コーティングに至るまで、各遮蔽タンクのすべての工程パラメータ、作業員、試験記録、機器番号、環境温度・湿度は、固有の QR コードとブロックチェーンレベルの電子アーカイブに記録されます。あらゆるリンクに問題が発生した場合、数秒以内に担当者まで追跡できます。工場を出荷する前に、各タンクはコバルト 60 またはセシウム 137 の最悪の放射線源を模擬した実線源照射校正を受けなければなりません。

##### 4.3.1 タングステン合金遮蔽タンクの受入検査基準と方法

タングステン合金シールドタンクの検査は、品質管理プロセス全体の中で最初かつ最も厳格なステップであり、同時に最も妥協を許さない工程でもあります。粉末バッチのいずれかの指標が基準値を超えた場合、一切の妥協の余地なく、バッチ全体が鉍物粉末段階に戻されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



受入検査は、化学純度、物理的特性、放射性純度、バッチ一貫性の4つの主要モジュールに分かれています。すべての試験は、独立した第三者機関の研究所と社内研究所の両方で同時に実施されます。化学純度試験では、全元素スキャンを備えたグロー放電質量分析法（GFMS）、酸素、炭素、硫黄の測定には不活性ガス溶融赤外線熱伝導率（IR-TIR）、金属および非金属不純物の測定には ICP-MS が用いられます。タングステン粉末中の不純物の総量は、業界の従来の上限値を大幅に下回る必要があり、モリブデン、ニオブ、タンタル、チタン、カリウム、ナトリウム、リン、硫黄などの主要な有害元素の個々の含有量は、極めて低いレベルに管理する必要があります。ニッケル、鉄、銅の粉末にも同じ基準が適用され、耐腐食性や活性化生成物に致命的な影響を与えるコバルト、ヒ素、ビスマス、テルルなどの元素は厳しく禁止されています。物理的特性試験には、フィッシャー粒度分布、レーザー回折粒度分布、スコット緩充填密度、タップ密度、SEM 形態、BET 比表面積が含まれます。タングステン粉末とバインダー相粉末はどちらもほぼ球形で、粒度分布が極めて狭く、サテライト粉末、凝集体、内部空隙がないことが必要です。放射能純度は、トリウム、ウラン、プルトニウム、アメリシウム、コバルト 60 などの天然および人工放射性核種のバックグラウンドレベルを確認するため、フルスペクトルスキャン用の高純度ゲルマニウムガンマ分光計を使用して試験されました。バッチの一貫性は、少量サンプルの混合、加圧、焼結、密度、硬度、金属組織学の迅速試験を通じて検証され、新しい粉末バッチが微細構造と特性の点で検証済みの参照バッチと完全に同等であることを保証しました。

すべての生のスペクトル、生のデータ、機器の校正記録、および物理的なサンプルは、永続的にアーカイブされ、会社のブロックチェーン品質システムにアップロードされる必要があります。

#### 4.3.2 タングステン合金遮蔽タンクの間接工程における品質検査ノード

間接工程の品質検査ノードは、多層チェックポイントとロックイン機構を備えた全工程インターセプションネットワークとして設計されています。いずれかの工程で不具合が発生した場合、下流工程は直ちに物理的に切断され、ブランクは次工程に送られることはありません。

主要なノードは次のとおりです。

- 混合後、レーザー粒子サイズの再測定と SEM-EDS 組成クロマトグラフィーのために複数のサンプルを採取し、タングステンバインダー相の微視的均一性を確認しました。
- プレスされたピレットを型から取り出し、工業用 CT による三次元密度スキャンと超音波による全体探傷を実施します。密度が閾値を下回る領域や内部に亀裂がある場合は、直ちに廃棄されます。
- 焼結後、ブランクはまずヘリウム質量分析法を用いて全体的なリーク検出を行い、貫通孔がないことを確認します。次に、ガンマ線透過密度イメージングと超音波フェーズドアレイ層別スキャンを実施し、コアと表面の密度が一定であること、および閉鎖気孔や偏析帯がないことを確認します。
- 荒加工後、最初の超音波厚さ測定と座標測定機による寸法調査を実施し、永続的なベンチマークを確立します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 深穴加工後、内視鏡とレーザー輪郭スキャナーを用いて、穴底半径と表面品質を検査します。同時に、超音波による厚さ測定を実施し、最小壁厚を確認します。
- 表面処理の各サブ層が完了したら、各層が個別に適格であることを確認するために、接着クロスカットテスト、厚さ渦電流測定、塩水噴霧事前腐食、および接触角測定が実行されます。

各ノードには、A と B という 2 つの独立した検査ステーションが備えられています。データは中央品質サーバーにリアルタイムでアップロードされます。2 つのステーションの結果が一致し、システムがテストに合格したと自動的に判断した場合にのみ、電子ロックが次のワークステーションへのドアを開きます。

#### 4.3.3 出荷前の完成したタングステン合金シールド缶の完全検査プロセス

工場出荷前の完成品最終検査は、タングステン合金シールド缶の「出生証明書」となる最終刻印の儀式であり、製造チェーン全体における最も厳しい最終審判でもあります。この工程を通過した缶だけが、特別な耐衝撃輸送箱に梱包され、生涯責任刻印が貼付され、最も厳しい核医学センターや最も厳格な廃棄物保管施設に搬送される資格を得ます。

このプロセスは、幾何学および機械的特性、遮蔽性能、密閉および封じ込め性能、表面および環境性能、規制およびラベリングの 5 つの主要セクションに分かれています。これらはすべて、独立したクリーン テスト ルームとコバルト 60/セシウム 137 線源校正室で完了します。幾何学および機械的性能セクションには、フル サイズ座標測定機 (CMM) スキャン、最小壁厚の超音波アレイ厚さ測定、シールド面の平坦度および粗さの光学プロファイロメータ測定、吊り上げラグおよびクランプの静的荷重引張テストが含まれます。遮蔽性能セクションでは、標準のコバルト 60 またはセシウム 137 線源を使用して、外部表面線量率のパノラマ スキャン、漏れ角度分布測定、およびさまざまな線源-キャニスター距離での二次放射線スペクトル分析を実行し、どのポイントでも線量率が規制値を大幅に下回り、方向性のあるホットスポットがないようにする必要があります。シールドおよび封じ込め性能セクションでは、真空

・加圧・ヘリウム質量分析による段階的なリーク検出、10 万回の蓋開閉サイクル後の再検査  
9 メートル落下および火災シミュレーション後の完全性チェックを実施します。表面および環境性能セクションでは、塩水噴霧・酸噴霧・紫外線照射による複合エイジング、実際の洗剤を用いた繰り返し拭き取り試験、表面汚染の拭き取り性検証を実施します。規制およびラベリングセクションでは、REACH、RoHS、輸送容器型式承認証明書、レーザー刻印された固有識別コード、QR コードトレーサビリティシステムの検証を実施します。

すべての試験は、資格を有する第三者機関と社内スタッフによって共同で実施され、オリジナルの報告書、試験ビデオ、および原材料記録はすべて密封され、保管されます。最後に、チーフエンジニア、品質管理責任者、および権限を与えられた第三者機関の署名者が共同で「タングステン合金シールド缶の出生証明書および生涯品質保証書」を発行し、すべてのデータは缶内に埋め込まれた耐放射線性 RFID チップに書き込まれます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第5章 タングステン合金シールド缶の応用分野

### 5.1 原子力産業におけるタングステン合金遮蔽缶の応用

タングステン合金遮蔽容器は、原子力産業において、使用済み燃料の中間貯蔵、放射性廃棄物処理、同位体製造、施設の廃止措置など、あらゆる重要な分野に応用されています。高い容積遮蔽効率、優れた機械的特性、高い化学的不活性性、そして完全リサイクル性といった特徴から、従来の鉛鋼複合容器や鉄筋コンクリート遮蔽構造に徐々に取って代わり、廃棄物の最小化、人員被ばくの最適化、そして環境に優しい最終処分を実現するための中核技術となっています。

#### 5.1.1 使用済み燃料貯蔵・移送用タングステン合金遮蔽タンク

使用済み燃料集合体を原子炉から取り出した後、高い中性子束と大きな崩壊熱が発生するため、貯蔵・移送容器は、限られた重量とスペースの制約の中で、極めて高い遮蔽性能と長期的な格納容器信頼性を備える必要があります。タングステン合金遮蔽容器は、鉛をはるかに上回る密度とコンクリートをはるかに上回る容積効率を有しており、貯水槽、乾式貯蔵容器、プラント間/サイト間移送容器として最適なソリューションとなっています。

水貯蔵用のタングステン合金タンクは、高タングステン含有量のタングステン-ニッケル-鉄系を採用し、ホウ化物または水素含有複合中性子吸収層と組み合わせることで、ガンマ線-中性子複合遮蔽を実現しています。タンクの外面には耐塩化物コーティングが施されており、ホウ酸水環境下でも孔食や水素脆化を起こさずに長期間使用できます。乾式貯蔵垂直シリンダーは、主にニアネットシェイプのタングステン合金で構成され、ヘリウム充填、内部の熱伝導性銅ブッシング、および多点温度投与量モニタリングシステムを組み込んでおり、無水かつメンテナンスフリーの状態で数十年にわたって安全に貯蔵できます。輸送コンテナはIAEA SSR-6 および TS-R-1 規格に厳密に準拠しており、二重層タングステン合金シェル+衝撃吸収および熱伝導性内張り+耐火外シェル構造を採用しています。これらは、9メートルの落下、摂氏800度で30分間の炎、および浸漬テストに合格しており、最も厳しい輸送事故条件下でも完全な封じ込めと遮蔽効果を維持できることが実証されています。

#### 5.1.2 放射性廃棄物処理用タングステン合金遮蔽容器

放射性廃棄物の処理プロセスには、選別、圧縮、固化、包装、一時保管といった複数の高度に汚染された作業が含まれるため、遮蔽容器には高頻度の開閉能力、深部除染能力、モジュール組立能力、そして恒久的な封じ込め能力が求められます。タングステン合金遮蔽容器は、優れた強度と靱性の比、極めて低い表面汚染付着係数、そして完全に無毒性でリサイクル可能な特性により、廃棄物処理プロセス全体で使用される唯一の材料システムとなっています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ホットチャンバー選別・減容工程では、大型の固定式タングステン合金遮蔽容器に油圧式クイックオープン蓋、交換可能なステンレス鋼製犠牲ライナー、高圧水ジェット除染システムを備えています。これらのシステムは、容器本体の清浄度を維持しながら、大量の低・中レベル放射性固体廃棄物を連続的に処理します。高レベル放射性廃棄物の蒸発・ガラス固化工程では、高温セラミックまたはタンタル複合層でライニングされたタングステン-ニッケル-銅超耐腐食性容器が使用されます。これらの容器は、濃硝酸、溶融ガラス、強力な酸化洗剤による複合腐食に耐えることができ、容器自体が二次汚染源となるのを防ぎます。最終梱包・長期保管工程では、永久密封型のタングステン合金廃棄物容器または多重蓋冗長型タングステン合金廃棄物容器が使用されます。これらは、ガラス固化体または過剰に圧縮された廃棄物ケーキを、高密度で非腐食性かつ非活性なタングステン合金シェル内に恒久的に封じ込めます。表面は耐老化性ポリウレアの多層コーティングが施されており、地層処分施設に移送されるまで、人間の介入なしに数百年間安全に保管できます。

タングステン合金遮蔽容器は、作業員への累積線量と二次廃棄物の量を大幅に削減するだけでなく、廃棄物パッケージの最終処分において、材料レベルでより環境に配慮した処理を実現します。完全に溶解・再利用可能であるため、廃止された容器は有害廃棄物処理プロセスを経ることなく、タングステン製錬チェーンに直接返却することができ、原子力産業のライフサイクル全体における廃棄物の最小化に関する最高の技術要件を満たしています。

### 5.1.3 核地質探査サンプル用タングステン合金遮蔽容器

原子力地質学探査（ウランおよびトリウム探査、放射性鉱化帯マッピング、ボーリングコアサンプリング、および原位置ガンマ検層）では、複雑な地質学および気候的条件下で、天然のウラン系列、トリウム系列、およびカリウム 40 放射性核種を含む反応性の高いコア、鉱石、および土壌サンプルを迅速かつ安全に汚染なく現場で封じ込めて輸送する必要があります。従来の鉛容器やビニール袋と鉛板の組み合わせは、重量が重く、汚染されやすく、除染が難しく、高温多湿条件下では経年劣化するため、現代の原子力地質学探査の高精度、高効率の技術要件には適していません。タングステン合金シールド容器は軽量、高強度、耐候性、完全な除染とリサイクル可能性を備えており、原子力地質学探査の専用サンプル容器の標準構成となっています。

特殊な探査サンプル容器には、タングステン - ニッケル - 銅製の非磁性耐腐食システムを採用しています。壁の厚さは、コアサンプルの最大予想ウラン - トリウム含有量とカリウム 40 の放射能に基づいて勾配を付けて精密に設計されています。通常、外部表面線量率が現場背景の 2 ～ 3 倍低くなることを保証しながら、容器全体の重量は 1 人で容易に操作できる範囲に抑えられています。構造は主に、二重フッ素ゴムシールを備えたクイックオープンスクリューキャップを特徴としています。キャップと容器本体は、高精度の円錐形のセルフセンタ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

リング構造により、硬い金属同士の接触と柔軟なソフトシールの二重の安全網を実現し、揺れの多い輸送や頻繁な開閉の後でも分子レベルでの漏れをゼロにします。容器の内壁は全体が鏡面研磨され、フッ素化された洗浄しやすいコーティングが施されています。外面にはミリタリーグリーンまたはタン色のポリウレタ弾性コーティングが使用されており、水ぶくれや粉塵化を起こさずに、砂漠の高温、凍土の低温、酸性雨、塩性アルカリ性土壌による長期の浸食に耐えることができます。

代表的な用途は次のとおりです：

- 63～108mm の標準コア専用タングステン合金遮蔽筒は、掘削孔コアリングチューブの先端に直接挿入し、コアとともに引き抜くことで、「掘削と封入」のワンステップ操作を実現します。
- 線量率ディスプレイと GPS 測位チップを内蔵したポータブル土壌および鉱物サンプル容器は、サンプル採取地点と放射線レベルをリアルタイムで記録できます。
- 車載式マルチチューブ複合タングステン合金シールドボックスには、一度に数十個の岩石コアを収容でき、オフロード車両で安定したシールドと衝撃吸収を維持できます。

タングステン合金シールド容器は、高バックグラウンド鉱山地域において、皮膚汚染、エアロゾル拡散、サンプルクロストークをゼロにしたクリーンなサンプリングを核地質探査担当者に提供します。これにより、サンプルの代表性と測定精度が大幅に向上し、現場作業員の累積放射線量を大幅に低減します。また、完全にリサイクル可能なため、従来の鉛容器の廃棄によって引き起こされる草原やゴビ砂漠における長期的な重金属汚染問題も完全に解決します。

#### 5.1.4 原子炉補助機器用タングステン合金遮蔽容器

原子炉の一次ループ補助システム、サンプリングシステム、廃液処理システム、および照射量モニタリング配管には、高活性、腐食性、高温、高圧の放射性媒体が広く使用されています。そのため、関連する遮蔽容器は、閉じ込められた原子炉キャビティと高放射線環境において、長期にわたる信頼性の高い封じ込め、正確なサンプリング、そしてメンテナンスフリーの運用を実現する必要があります。タングステン合金遮蔽容器は、極めて高い密度対強度比、優れた耐腐食性、そして高温照射安定性を備えており、原子炉補助機器において最も重要な遮蔽・封じ込め部品となっています。

一般的なアプリケーションには、次の 4 つの主なカテゴリが含まれます。

1. 一次冷却材、ホウ酸溶液、および排気ガスのサンプリング用タングステン合金遮蔽キャニスターです。運転圧力は 15～20MPa に達し、温度範囲は冷温停止からフルパワー運転までをカバーします。キャニスター本体は高強度タングステン-ニッケル-鉄合金製で、内側にはタンタルまたはジルコニウム合金のライニングが施されています。外面には高温耐酸化コーティングが施されており、原子炉キャビティ内の極めて高い中性子束環境に数十年にわたって耐え、膨張、脆化、腐食による穿孔を生じません。サ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ンプリングパイプラインが原子炉遮蔽壁を貫通する箇所では、同軸に配置されたタングステン合金遮蔽スリーブが使用され、サンプリング中の局所的な遮蔽を実現します。
2. 原子炉中性子束モニタリング管および材料照射モニタリング管を含む照射モニタリング管および試料収容容器内のモニタリング試料は、その全寿命期間を通じて固定位置に保持され、完全に封じ込められていなければなりません。タングステン合金遮蔽容器は、一体型の厚肉管として炉心計装チャネルに直接組み込まれています。その内部空洞は精密機械加工された多室構造を有し、数十種類の異なる材料のモニタリング試料を同時に収容することができます。容器本体は低放射化タングステン-ニッケル-鉄系を採用しており、高放射化中性子束照射後の長寿命放射化生成物の生成量が極めて低く、モニタリング試料のその後のガンマ線スペクトル測定に影響を与えません。
  3. 原子炉化学・容量制御システムによって生成される廃液・樹脂貯蔵タンクには、トリチウム、コバルト 60、アンチモン 125 を含む高放射性廃液・樹脂が含まれています。

- これらの廃液・樹脂は短期間の貯蔵が必要であり、原子炉キャビティ付近で崩壊します。タングステン合金シールドタンクは、タングステン-ニッケル-銅超耐食グレードとハステロイライニング構造を採用しています。二重バルブ遮断および圧力バランスシステムを備えており、強酸、強アルカリ、高温高湿環境にも数十年にわたって孔食や応力腐食割れを起こすことなく耐えることができます。
4. 局所遮蔽インサートおよびコリメータスタック本体の修理や大規模なオーバーホールでは、高放射線エリアに一時的な局所遮蔽部品を挿入し、特定の方向の線量率を低減する必要があります。タングステン合金は、取り外し可能なインサート、ネストされたシリンダー、または回転可能なコリメータの形で使用され、鉛よりも効率的で軽量、かつ耐熱性の高い局所遮蔽ソリューションを提供します。また、切断火花や溶接スパッタに耐性のある硬質表面コーティングが施されています。

は、原子炉空洞と補助建屋の全体的な遮蔽厚さと重量を大幅に削減するだけでなく、材料の低放射化と高い安定性により、運転中のメンテナンス作業量とオーバーホール中に放射線にさらされる人員の数も大幅に削減します。

## 5.2 医療・健康分野におけるタングステン合金遮蔽キャニスターの応用

タングステン合金遮蔽キャニスターは、医療・健康分野で広く利用されており、核医学診断、放射性医薬品製造、腫瘍放射線治療、インターベンショナルラジオロジーなど、あらゆる中核分野を網羅しています。非磁性、高密度、生体不活性、容易な除染表面、そして完全に無毒性でリサイクル可能な特性により、MRI 室への適合性、GMP クリーンルーム要件、医療放射線防護規制、そして病院の長期的な経済的ニーズを同時に満たす唯一の遮蔽材料システムとなっています。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 5.2.1 放射性医薬品の保管および輸送用のタングステン合金遮蔽容器

放射性医薬品（フッ素-18FDG、テクネチウム-99m、ヨウ素-131、ルテチウム-177、アクチニウム-225 など）は、半減期が短く、放射能が高く、化学形態が複雑で、頻繁な分配と輸送が必要となるという特徴があります。そのため、極めて小型・軽量でありながら高効率なガンマ線遮蔽を実現する遮蔽容器が求められています。また、滅菌室への適合性、迅速な一人作業、そして厳格な表面除染性能も備えています。タングステン-ニッケル-銅をベースとした非磁性・耐腐食性のタングステン合金遮蔽容器は、従来の鉛ガラスや鉛容器に完全にとって代わり、製造から注射に至るまでの放射性医薬品サプライチェーン全体の標準容器となっています。

代表的な製品は次のとおりです。

- モリブデン-99/テクネチウム-99m ジェネレータ統合シールド容器は、傾斜壁厚+内蔵鉛ガラス観察窓+クイックオープンスクリューキャップ構造を採用しており、ジェネレータの迅速な交換と GMP ホットチャンバーでのオンライン溶出を実現できます。
- FDG 分注・シリンジ保護スリーブは、同等の遮蔽効果を持つ鉛スリーブのわずか 1/3 ~1/2 の重量です。指 1 本で開閉できるノブと使い捨ての滅菌ライナーを備えているため、看護師は分注室や PET-CT 注射室で片手ですべての操作を完了できます。
- ヨウ素 131 およびルテチウム 177 治療用線量輸送容器には、二重蓋、圧力バランスバルブ、および内蔵の線量率表示画面が備わっており、病棟や介入手術室に直接輸送することができます。
- 多孔式薬剤輸送ボックスは、タングステン合金製の一体型シェルと、内部に複数の独立した小型タンクを備えています。衝撃吸収フォームと温度制御モジュールを組み合わせて、病院間や都市間の安全な輸送を可能にします。

表面全体は鏡面研磨ガラスと、医療グレードのフッ素コーティングが施されており、容易に除去できます。10%次亜塩素酸ナトリウム、70%エタノール、または過酸化水素蒸気による繰り返し拭き取りや燻蒸処理でも輝きを失わず、汚染除去率は 99.99%以上を一貫して維持します。タングステン合金遮蔽容器の採用により、核医学部門における作業者の手指および全身への放射線量を大幅に低減し、薬剤調剤効率と無菌性保証レベルを大幅に向上させます。

### 5.2.2 放射線治療線源用タングステン合金遮蔽容器

放射線治療用の高放射能密封線源（コバルト 60、イリジウム 192、ヨウ素 125 シード線源、ストロンチウム 90 アプリケーター、ルテチウム 177 マイクロスフィアなど）、およびアフターローディング治療装置、ガンマナイフ、サイバーナイフの線源室およびコリメーションシステムには、治療ベッドサイドにおいて、極めて高い遮蔽効率、正確な方向漏洩制御、長期的な形状

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

安定性、非磁性・軽量性を備えた遮蔽容器が求められます。タングステン合金製の遮蔽容器は、これらの機器において不可欠な中核部品となっています。

代表的な用途は次のとおりです：

- コバルト 60 治療線源とアフターローディング治療線源タンクは、タングステン含有量の高いタングステン・ニッケル・鉄系と多層ネストコリメーション構造を採用しており、治療ビーム方向の透過率を高く維持しながら、非治療方向の線量率を背景レベルまで低減することができます。
- ヨウ素 125 シード移植用の保管および輸送容器には、透明な鉛ガラスの観察窓と磁性シード配置プレートが装備されており、医師は滅菌状態でシードの充填を直接目視で完了できます。
- ガンマナイフおよびサイバーナイフのタングステン合金コリメータシステムは、マトリックス状に配置された数百個の異なる開口を持つタングステン合金コリメータで構成されています。開口精度と位置精度はマイクロメートルレベルで制御されており、治療焦点における線量分布誤差は 1%未満です。
- スترونチウム 90 眼科用ドレッシングとルテチウム 177 マイクロスフェア治療容器は、局所的に厚くなる設計の超薄壁タングステン合金を採用しており、治療面への高線量を確保しながら、非治療面への漏れを最小限に抑えます。

治療用線源に使用されるすべてのタングステン合金遮蔽容器は、国家薬品监督管理局（NADC）による医療機器登録および型式試験に合格する必要があります。表面には生体適合性のある DLC または TiN コーティングが施されており、エチレンオキシド、プラズマ、高温高圧蒸気による滅菌にも劣化なく耐えます。タングステン合金遮蔽容器の普及により、高線量率密封小線源治療および定位放射線治療において、かつてないレベルの位置決め精度と安全性を実現しました。同時に、MRI 誘導治療における従来の鉛遮蔽の磁気適合性の問題を完全に解消し、現代の精密放射線治療に最も信頼性の高い材料基盤を提供しています。

### 5.2.3 医療用画像機器用タングステン合金遮蔽容器

医用画像装置（PET-CT、SPECT-CT、PET-MR、サイクロترون自己遮蔽システム、医療用直線加速器）では、局所遮蔽部品に包括的な要求が課せられ、高密度、非磁性、高精度、一体化性、そして長期的な形状安定性が求められます。タングステン合金製の遮蔽容器とその派生部品は、検出器のコリメーション、X 線ビームの閉じ込め、放射線源の保管、背景放射線の抑制など、これらの装置の主要分野で広く採用されています。

PET-CT および SPECT-CT の検出リングでは、通常、高純度タングステン合金コリメータが採用されています。これは、厚さ 0.1~0.3mm のタングステン合金箔を何万枚も正確に積み重ねたもので、開口部と間隔はミクロンレベルの精度です。これにより、511keV の消滅光子と 140keV のガンマ線に対して非常に高い空間分解能と散乱抑制が実現します。タングステン-ニッケル

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

-銅の非磁性システムにより、3Tを超える強力な磁場下でもトルクや画像アーティファクトが発生しません。サイクロトロン自己遮蔽ターゲットチャンバーとビームラインには、多層タングステン合金ネストタンクとホウ素含有ポリエチレンの複合構造が採用されており、18MeV陽子によって生成された高エネルギーガンマ線と中性子を1回の通過で機械室外の背景レベルまで減衰させ、従来のコンクリート迷路型の機械室にかかる莫大な土木工事費を完全に排除します。医療用直線加速器治療ヘッドコリメーションシステムは、タングステン合金製マルチリーフグレーティングと二次コリメートブロックを採用し、シングルリーフの位置決め精度と再現性は0.1mm未満です。表面のDLCコーティングは、数十万回的高速移動にも摩耗することなく耐えます。タングステン合金製シールドキャニスターのシステム統合により、ハイエンド医療用画像機器の設置面積が縮小され、バックグラウンドノイズが低減し、撮影時間が短縮され、診断精度が向上しました。

#### 5.2.4 放射性廃棄物一時保管用タングステン合金遮蔽容器

病院の核医学部門、インターベンションカテーテル検査室、放射線治療部門では、毎日大量の半減期の短い廃棄物（注射器、輸液セット、手袋、包帯、ヨウ素131の排泄物、ルテチウム177治療残渣など）が発生しており、放射能が規制値まで低下するまで、各部門内で一時保管して安全に減衰させる必要があります。タングステン合金製の遮蔽容器は、軽量で清掃が容易、長寿命、美観に優れ、無毒性という特徴から、従来の鉛や鋼鉄製の容器に完全に取って代わり、病院における放射性廃棄物の一時保管に最適な容器となっています。

代表的な製品は次のとおりです。

- ベッドサイド廃棄物容器：容量10～30L、足踏みペダルで素早く開けられる蓋と使い捨てポリマー内側ライナーを備え、看護師が片足で廃棄物を処分できます。
- 部門別集中腐敗槽：50～200L、二重蓋+活性炭フィルター+圧力バランスバルブ構造で、固形廃棄物と液体廃棄物を同時に収容し、揮発性ヨウ素を吸着することができます。
- ルテチウム-177/アセチウム-225治療廃液タンク：タングステン-ニッケル-銅超耐腐食システム+デュアルバルブ排水ポート、腐食することなく数か月間の強酸性治療廃液への浸漬に耐えることができます。
- 壁掛け式およびカウンター下式の廃棄物キャビネット：タングステン合金シェルとステンレス鋼のインナーライナーの組み合わせは、清潔病棟やカテーテル検査室の装飾に完璧に溶け込みます。

すべての廃棄物保管容器には、医療グレードの抗菌性と洗浄性に優れたコーティングが施されており、塩素系消毒剤や紫外線による長期的な影響にも耐えます。腐敗が完了した後、タングステン合金製の容器は高圧蒸気で直接滅菌し、再利用できます。

#### 5.2.5 体外診断用試薬保護用タングステン合金シールド容器

体外診断（IVD）試薬キット（放射免疫測定、化学発光免疫測定、分子診断用など）には、ヨウ素125、コバルト57、セレン75などの標識放射性核種が標準物質または品質管理用として

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



含まれることがよくあります。これらの放射性核種は、試薬の製造、輸送、保管、使用の全過程において、厳格な遮蔽と放射能の安定性が求められます。小型で非磁性であり、バイオセーフティ特性を持つタングステン合金遮蔽容器は、IVD 試薬保護における世界標準となっています。

代表的な用途は次のとおりです：

- ヨウ素 125 標準線源用小型保護容器：外径わずか数ミリメートルで、壁厚勾配設計により、125I 35keV の特性 X 線をバックグラウンドまで完全に遮蔽します。容器のカラーマークとレーザーエッチング活性値は試薬キットに直接埋め込まれています。
- コバルト 57/セレン 75 フラッド線源一体型容器：タングステン合金本体＋鉛ガラス観察窓＋磁気固定構造により、実験室技術者は蓋を開けなくても線源の位置を視覚的に確認できます。
- 試薬コールドチェーン輸送ボックスには、タングステン合金シールドモジュールが装備されています。マルチコンパートメント設計により、各コンパートメントに標準ソースを独立して収容でき、温度および湿度レコーダーの助けを借りて、-20℃から+8℃までの全プロセスで損傷のない活動を実現できます。
- 自動免疫測定分析装置には品質管理用線源容器が内蔵されており、タングステン合金で一体化されており、装置のロボットアームと連動して、追加の放射線漏れを発生させることなく、毎日の自動品質管理を実現できます。

タングステン合金遮蔽容器は、体外診断試薬のバックグラウンド放射線を完全に制御可能にし、従来の鉛容器の欠点である重量の増大、容易な酸化、不可逆的な表面汚染を回避します。グローバルサプライチェーンにおける試薬の活性の一貫性と安全性を確保し、ハイスループット免疫測定および分子診断の精度に対して最も信頼性の高い放射線防護保証を提供します。

### 5.3 工業試験および電子工学分野におけるタングステン合金シールド缶の応用

タングステン合金シールド容器は、産業試験およびエレクトロニクス分野における従来の鉛容器の代替品から、試験精度、装置の信頼性、そして製品の歩留まりを左右する中核機能部品へと進化を遂げました。高密度かつ高原子番号という特性により、優れたガンマ線/X 線減衰能、優れた機械特性と加工精度、完全な非磁性、そして過酷な産業環境下における表面安定性を実現し、現場探傷検査、クリーンルーム、そして高信頼性電子システムにおける極めて厳しい放射線シールド要件を同時に満たします。

#### 5.3.1 工業用放射線試験源用タングステン合金遮蔽容器

産業用放射線検査（パイプラインの溶接部、压力容器、航空宇宙用鋳物、船舶の厚板、大型鍛造品）では、イリジウム 192、セレン 75、コバルト 60 からなる高放射能密封線源が使用されます。このため、遮蔽容器は、精密に制御可能な指向性ビーム射出窓を維持しながら、360°全方向の高強度遮蔽を提供する必要があり、現場、造船所、高高度などの過酷な環境下における頻繁な輸送、吊り上げ、偶発的な落下にも耐える必要があります。タングステン合金製の遮

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

蔽容器は、鉛よりもはるかに高い体積遮蔽効率と変形耐性を備えており、世界中の産業用放射線検査装置の標準構成となっています。

一般的な探傷用線源タンクには、高強度のタングステン・ニッケル・鉄合金が使用されています。本体の壁厚は、線源の活性度とエネルギーに基づいて不均一に最適化されています。非ビーム照射方向の壁厚は最大化され、ビーム照射方向には、精密機械加工された円錐形、扇形またはスリット状のタングステン合金製回転コリメータが備えられています。これらのコリメータは、外部のハンドホイールまたはサーボモーターを介して 0~360° の範囲で連続的に調整可能で、ビーム幅は無段階に調整できます。コリメータの内部構造は、多層ネスティングとミクロンレベルのダブルテールガイドレールを採用しており、数十万回の調整後でも隙間の拡大や位置ずれが発生しません。タンクの外面には、耐油性、耐砂塵性、耐溶接スパッタ性に優れた超音速フレイム溶射 WC またはポリウレア弾性コーティングが施されており、オフショアプラットフォーム、砂漠の油田、極寒のシベリアのパイプライン建設現場でも粉化やひび割れを起こさずに長期間使用できます。

構造上のハイライトは次のとおりです。

- クイックチェンジソースチャネルは、「ピグスタイル」のプッシュ + ダブルクランプシーリング設計を採用しており、オペレーターは暗室の外でソースをロードおよびアンロードすることができ、プロセス全体の放射線量はほぼゼロになります。
- 内蔵の線源位置検出およびインターロック システムにより、コリメーション ウィンドウが完全に閉じられ、線源がタンクの底の安全な位置に沈んでいる場合にのみ、輸送ロックを開くことができます。
- ISO 3999 および GB/T 1933 国際規格に準拠しており、9 メートルの自由落下、1 メートルの四隅衝撃、800℃で 30 分の燃焼試験、積み重ね試験などのテストに合格しています。

タングステン合金探傷線源容器により、産業用放射線検査は「鉛容器 + 長管リモートコントロール」から「小型方向性線源容器 + ロボットクローラー」への技術的飛躍を達成できるようになりました。

### 5.3.2 電子部品の干渉抑制のためのタングステン合金シールド缶

高信頼性電子システム（航空宇宙電子機器、深宇宙探査機、原子力発電所の計測制御システム、5G 基地局コアボード、量子コンピューティング超伝導回路）は、ガンマ線、中性子、電磁パルス（HEMP）によるシングルイベント効果（SEE）、総線量効果（TID）、および過渡照射効果に極めて敏感です。鉛箔またはホウ素化プラスチック複合シールドを備えた従来のアルミニウムシェルは、重量、体積、シールド効果、およびマルチスペクトル保護に関する次世代電子機器の包括的な要件を満たすことができなくなりました。タングステン合金シールドコンテナは、その非常に高いガンマ減衰係数、優れた中性子減速および吸収能力、完全な非磁性特性、および優れた真空密閉性能により、電子部品放射線硬化の究極のソリューションとなっています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一般的なアプリケーションは次の 4 つのカテゴリをカバーします。

1. 航空宇宙用電子機器、衛星ペイロード、恒星センサー、航法受信機などの宇宙機器を収容するこの装置は、水素を豊富に含むホウ素中性子吸収層を備えた多層タングステン合金の入れ子構造を採用しています。この構造は、地球の放射線帯からの高エネルギー陽子、および銀河宇宙線によって生成される二次ガンマ線と中性子を、一回の通過で装置の許容閾値以下に減衰させます。筐体は、最適化された壁厚勾配を備えたタングステン-ニッケル-銅非磁性システムを採用しています。真空ろう付けまたは電子ビーム溶接により気密性を確保し、内部は振動減衰と熱伝導性を高めるために低放出シリコンゴムで充填されています。
2. 火星探査車、月着陸船、木星探査機の中核電子機器室など、長期間にわたり強い放射線環境に晒される深宇宙探査機的主要電子部品には、一体型のタングステン合金シールドチャンバーが採用され、さらに炭素繊維強化シェルで覆われることで、重量を最小限に抑えながら最大限のシールド効果を実現しています。タングステン合金表面には金メッキまたは DLC コーティングが施されており、冷間圧接を防止し、二次電子放出を抑制します。
3. 原子力発電所の安全等級計装制御システムにおいて、過渡照射タンク事故 (LOCA, MSLB) 発生時に発生する可能性のある高エネルギー瞬間ガンマ線フルエンス率は、デジタル計装制御システムの誤動作を引き起こす可能性があります。タングステン合金遮蔽タンクは、モジュール式の引き出し型構造で計装制御キャビネット内に内蔵され、主要な PLC、FPGA、メモリを完全に収納しています。タンク本体は低放射化タングステン-ニッケル-鉄系を採用し、長期間の中性子照射後も干渉性の長寿命核種を生成しないことを保証します。
4. 量子コンピューティングおよび超伝導電子デバイスにおいては、超伝導量子ビットとジョセフソン接合が宇宙線に対して極めて敏感であるため、局所的な遮蔽が極めて重要です。希釈冷凍機の極低温段階 (<10 mK) には、タングステン合金製の小型遮蔽容器が組み込まれています。μ 金属磁気遮蔽と超伝導ニオブ遮蔽の内層と組み合わせることで、宇宙線からの二次粒子をほぼ 100%遮断し、量子コヒーレンス時間を国際的に最高レベルに引き上げます。

タングステン合金シールドキャニスターは、単一粒子の反転率を数桁低減し、総線量許容度を従来のソリューションの 5 ~ 10 倍に高め、高信頼性電子システムを「放射線を恐れる」から「放射線を恐れない」へと進化させるための重要な技術となっています。

### 5.3.3 半導体製造試験用タングステン合金シールド容器

半導体ウェーハの製造・検査においては、環境や装置自体から発生するガンマ線や X 線などのバックグラウンド放射線が欠陥と誤認され、ウェーハの破損や莫大な経済的損失につながる可能性があります。超高純度、低放射化特性、優れた微視的均一性、そしてミクロンレベルの処理能力を備えたタングステン合金遮蔽容器は、先端プロセスウェーハ製造工場におけるバックグラウンド制御に不可欠な中核部品となっています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



これらの遮蔽容器は、主に X 線欠陥再検査装置、蛍光 X 線分析装置、電子ビーム検出システム、極端紫外線リソグラフィ源の局所遮蔽に使用されます。容器本体は超高純度タングステン-ニッケル-銅非磁性システムを採用し、不純物制御は最高レベルに達し、長期動作中に検出可能な活性化干渉ピークが発生しないことを保証します。コリメート開口部と遮蔽壁は一体型精密機械加工されており、非常に高い開口精度と位置精度を実現し、X 線ビームの純度と集束を保証します。表面処理は真空アルミナ化とダイヤモンドライクカーボンコーティングを組み合わせ、冷間圧接を防止し、二次電子放出を抑制します。タングステン合金遮蔽容器の適用により、従来の鉛遮蔽における微量自然放射能によって引き起こされる擬似欠陥問題が完全に解消され、ウェーハ欠陥検出感度と信頼性が高度なプロセス要件の限界に到達します。

#### 5.3.4 非破壊検査装置用タングステン合金遮蔽容器

ハイエンドの非破壊検査装置では、X 線源のリーク制御、コリメーション精度、そして長期的な形状安定性に対する要求が極めて高い。高密度、高硬度、耐高温性、そして機械的損傷に対する耐性といった総合的な特性を持つタングステン合金遮蔽容器は、従来の鉛鋼複合構造に完全に取って代わり、産業用 CT、デジタル X 線画像診断装置、高エネルギー加速器試験システムにおける遮蔽・コリメーションの中核部品となっている。

ターゲットの両方に対応する一体型シールドシェル、一次コリメータ、二次コリメータ、およびプログラム可能なスリットシステムが含まれます。キャニスターは高強度のタングステン-ニッケル-鉄合金で作られており、多層ネスティングと回転可能な扇形ウィンドウ設計により、非作動方向の完全なシールドと作動方向の精密なビーム制御を実現します。表面には炭化タングステンまたは窒化クロムのハードコーティングが施されており、長期間の高速回転や溶接スパッタにも摩耗や剥離なく耐えることができます。タングステン合金シールドキャニスターの適用により、画像コントラストと欠陥識別能力が大幅に向上するとともに、装置周辺の線量レベルが大幅に低減されるため、航空機エンジンブレード、原子力圧力容器、大型複合材料構造物などのハイエンド製造分野の品質管理に不可欠な装置となっています。

#### 5.3.5 精密電子機器を保護するためのタングステン合金シールド缶

高精度計測機器、ナノスケール特性評価装置、基礎物理学実験装置は、宇宙線、周囲のガンマ線背景放射、そして中性子によって引き起こされるノイズやドリフトに極めて敏感です。タングステン合金シールド容器は、最高の体積シールド効率、完全な非磁性、そして超長寿命安定性を備え、究極の測定精度を実現するための最終的な物理的シールドとして機能します。代表的な用途としては、分析天秤、原子間力顕微鏡、走査トンネル顕微鏡、レーザー干渉計、慣性航法システム、重力波検出の主要部品の部分的または全体的なシールドなどが挙げられます。この容器は通常、多層タングステン合金と中性子吸収材料の複合構造を採用し、内部は低放射性熱伝導媒体で満たされ、外面には真空適合処理が施されています。シーリングシステムには、金属ベローズリングまたはナイフエッジフランジが用いられ、超高真空環境における長期的な気密性を確保しています。タングステン合金遮蔽容器の使用により、周囲の放射線バックグ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ラウンドを極めて低いレベルに抑制し、従来の鉛遮蔽における崩壊系列によって引き起こされる低エネルギーノイズ干渉を完全に排除します。これにより、長期測定における機器の比類ない安定性と再現性が得られ、現代の計測学、ナノテクノロジー、精密物理学実験における放射線防護の不可欠な基盤となっています。

#### 5.4 航空宇宙分野におけるタングステン合金シールド缶の応用

タングステン合金シールドコンテナは、補助部品から、ミッションの成功率とシステム寿命を左右する重要な基盤技術へと進化しました。極めて高い体積シールド効率、最も低い面密度、完全な非磁性、極めて広い温度範囲での安定性、極めて低いガス放出率、そして真空、強い振動、高エネルギー粒子環境における長期信頼性といった特長により、宇宙放射線防護、地上シミュレーション試験、そして先端材料試験において、唯一のハイエンド材料プラットフォームとなっています。

##### 5.4.1 航空宇宙放射線試験用タングステン合金遮蔽容器

航空宇宙用電子機器、高感度材料、生物系ペイロードなどは、軌道上に展開される前に、地上での宇宙放射線環境シミュレーション試験を受ける必要があります。これらの試験では、高エネルギー陽子、重イオン、ガンマ線、中性子の複合放射線場を正確に再現するとともに、試験設備と人員を保護するために、非標的方向からのほぼ完全な遮蔽を提供する試験容器が求められます。超高純度、低放射化、優れた加工精度を特徴とするタングステン合金遮蔽容器は、国内外で主要な地上宇宙環境シミュレーション装置の標準試験容器となっています。

これらのコンテナは、低放射化タングステン-ニッケル-銅またはタングステン-ニッケル-鉄システムを採用し、内部空洞には柔軟に組み合わせ可能なエネルギー分解プレート、中性子減速材、吸収材が装備されており、単一コンテナ内で幅広い線形エネルギー付与スペクトルとフルエンス率制御が可能です。コンテナの外側は真空対応の高温層でコーティングされ、内部にはマルチポイント線量監視および温度制御システムが統合されており、全温度試験機能を確保しています。密閉システムには金属シーリングリングと複数のリーク検出構造が採用されており、超高真空条件下での長期気密性を保証します。タングステン合金遮蔽コンテナの適用により、地上シミュレーション実験における放射線場の忠実度と安全性が最大限に高められ、宇宙搭載用単体アプリケーション、チップ強化、深宇宙生物学的実験検証に欠かせない中核機器となっています。

##### 5.4.2 宇宙船部品保護用タングステン合金シールド容器

軌道上で運用される宇宙船は、ヴァン・アレン放射線帯、太陽陽子現象、そして銀河宇宙線による長期的な放射線被曝にさらされます。恒星センサー、慣性計測装置、メモリ、プロセッサなどの重要なコンポーネントは、シングライベント効果や累積線量障害の影響を非常に受けやすいです。タングステン合金製の遮蔽コンテナは、局所的な点遮蔽と隔壁との一体化により、これらの繊細なコンポーネントに対して最も効率的な宇宙放射線防護を提供します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

代表的な用途としては、光学ヘッドシールド、コア基板レベルのシールドボックス、科学ペイロード検出器用統合コリメーションシールドハウジング、有人キャビン用動的挿入可能保護引き出しなどがあります。タンクは非磁性のタングステン-ニッケル-銅システムを採用し、壁厚は軌道放射線環境に合わせて最適化されています。内部には水素含有複合中性子吸収層がよく使用され、外面には耐冷溶接および低放出コーティングが施されています。構造設計は軽量化と多方向保護を両立させ、シーリングおよび固定方法は打ち上げ段階の振動や軌道上熱サイクルの要件を満たしています。タングステン合金シールドタンクのシステム応用は、主要部品の軌道上故障フリー動作時間を大幅に延長し、高軌道航行コンステレーション、深宇宙探査機、有人宇宙飛行プロジェクトにおける長寿命と高信頼性のコアテクノロジー保証となっています。

#### 5.4.3 航空宇宙材料試験用タングステン合金遮蔽容器

航空機エンジンプレード、複合材胴体構造、固体ロケットケース、再突入熱シールドといった主要部品の開発段階では、高精度な非破壊検査と組成分析が求められます。そのためには、極めて低いバックグラウンド、極めて高いビーム純度、そして極めて安定した幾何学的位置決めを備えた試験装置が不可欠です。タングステン合金シールドキャニスターとそのコリメーションシステムは、これらの高級材料の品質管理において不可欠な中核部品となっています。

航空エンジンの単結晶ブレード用のシールドターゲットとコリメーションシステム、大型複合構造部品用のデジタル X 線画像線源コンテナ、固体ロケットケーシング用のガンマ線欠陥検出指向性線源コンテナ、再突入材料の X 線および中性子回折分析用のサンプルコンテナ。コンテナ本体は高強度タングステン-ニッケル-鉄システムを採用し、コリメーション穴とシールド壁は一体型で精密機械加工され、表面は耐高温性と耐火火花性を備えたハードコーティングが施されています。タングステン合金シールドコンテナの採用により、試験装置のバックグラウンドノイズと漏洩放射線が最小限に抑えられ、業界トップクラスの画像コントラストと欠陥定量化精度を実現しています。大型旅客機、打ち上げロケット、月・火星探査機などの主要なエンジニアリングプロジェクトにおける材料の品質保証のハードウェア的基礎となっています。過酷な試験条件下での長期安定性は、将来の再利用可能な航空機やスクラムジェットエンジンの材料の非破壊評価に対する最も信頼性の高い技術的サポートも提供します。

#### 5.5 科学研究および実験におけるタングステン合金シールド缶の応用

タングステン合金遮蔽容器は、科学研究における一般的な実験室保護部品から、実験背景、測定精度、検出器の性能限界を決定する重要な機能材料へと進化を遂げました。極めて高いガンマ線/X線減衰係数、優れた中性子吸収・減速能力、超高純度・低放射化特性、完全な非磁性、そして極真空、低温、強磁場環境下における長期安定性といった特性により、原子核物理学、素粒子物理学、環境放射線モニタリング、そして学際分野における最先端実験にとって、かけがえのない中核機器となっています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 5.5.1 核物理学実験試料用タングステン合金遮蔽容器

原子核物理学実験（中性子散乱分光法、核反応断面積測定、核分裂・捕獲生成物研究、精密同位体調製）には、高放射能標的または照射生成物を収容しながらも、入射ビームに対して完全に透明で、非標的放射線に対して極めて強力な遮蔽を提供すると同時に、その後のガンマ線または中性子スペクトル測定を妨げない極めて低い自己放射化生成物を有する試料容器が必要である。高密度、低放射化、優れた加工精度を有するタングステン合金遮蔽容器は、核破碎中性子源、原子炉中性子ビームライン、同位体製造ホットセルの標準的な試料容器となっている。

一般的なサンプル容器には、超純度のタングステン-ニッケル-銅またはタングステン-ニッケル-鉄の低放射化システムが採用されています。容器の壁厚は、入射中性子エネルギーと標的核の放射能に基づいて不均一に最適化されています。入射窓領域は必要な構造強度のみを維持するために局所的に薄くされ、出口方向には取り外し可能な多層の分解プレートと吸収インサートが備えられています。内部空洞全体は鏡面研磨され、ダイヤモンドライクカーボンまたは窒化ホウ素でコーティングされており、サンプルの付着を防ぎ、二次電子放出を抑制します。シーリングシステムは、金属製のナイフエッジフランジまたはヘリウムアーク溶接を使用して永久シールを行い、超高真空とクリーンで酸素のない環境を確保します。タングステン合金シールド容器の適用により、原子核物理実験におけるバックグラウンドカウント率が極めて低いレベルまで低減され、希少な核反応チャネルや微弱な信号の検出感度が大幅に向上します。中性子散乱分光計、後方散乱中性子装置、核データ測定端末に欠かせない中核部品となっています。

### 5.5.2 素粒子物理学実験用タングステン合金遮蔽容器

素粒子物理学実験（高エネルギー衝突型加速器検出器、暗黒物質直接検出、ニュートリノ振動実験、宇宙線検出器アレイ）では、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器の吸収材料に極めて高い要求が課せられ、極めて高い密度、短い放射長、短い相互作用長、そして極めて安定した長期性能が求められます。タングステン合金遮蔽容器とその派生プレート、ブロック、ファイバー構造は、次世代粒子検出器の吸収・遮蔽媒体として最適な選択肢となっています。

大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の改良型検出器では、電磁カロリメータの中心部に精密機械加工された台形ブロックまたは円筒形容器の形でタングステン合金が埋め込まれており、極めて短い放射長と極めて高い光電子収量を実現しています。地球深部の暗黒物質検出実験では、タングステン合金遮蔽容器が最も外側のアクティブシールドとして機能し、無酸素銅、古代鉛、古代ローマ鉛の内層を持つ多層の入れ子構造を形成し、周囲のガンマ線および中性子背景を検出器の感度以下に抑制します。ニュートリノ実験のミューオン反同時計数システムでは、厚壁のタングステン合金容器をミューオン吸収体として使用し、宇宙線ミューオン相互作用とニュートリノ相互作用を効果的に区別しています。タングステン合金遮蔽容器の適用により、素粒子物理学実験における主要な検出器は、より高いエネルギー分解能、より低い誤

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

検知率、より広いダイナミックレンジを実現できるようになり、暗黒物質粒子とニュートリノの新しい物理学と質量メカニズムを探索するための最も強固なハードウェア基盤となりました。

### 5.5.3 環境放射線モニタリング用タングステン合金遮蔽容器

環境放射線モニタリング（大気背景放射、土壌ラドン放出、海洋放射能、宇宙線二次粒子フラックスモニタリング）では、極めて広いエネルギー範囲と極限のフィールド環境において、超低背景放射、高安定性、長寿命動作を実現する検出器が求められます。最高の体積遮蔽効率、低放射化、完全非磁性の特性を持つタングステン合金遮蔽容器は、高純度ゲルマニウムガンマ線スペクトロメータ、反コンプトンシステム、中性子モニタ、宇宙線ミュオン検出器の中核遮蔽シェルとなっています。一般的なモニタリング容器は多層複合構造を採用しており、最外層はガンマ線から環境を遮蔽するために古代鉛またはローマ鉛で作られています。中間層は高エネルギーガンマ線と二次粒子を正確に吸収するタングステン合金容器で、最内層は熱中性子と熱ノイズを抑制するために無酸素銅またはポリエチレンで作られています。タングステン合金層は超高純度タングステン-ニッケル-銅系を採用し、表面に真空ニッケルメッキまたは窒化処理を施すことで、長期フィールド展開時に検出可能な放射化ピークが発生しないことを保証します。コンテナ設計は可搬性とモジュール性を兼ね備え、南極の氷床、無人高高度地域、海底ニュートリノ望遠鏡アレイなどでの長期無人運用を可能にします。タングステン合金遮蔽コンテナの適用により、環境放射線モニタリング機器の背景計数率が極めて低いレベルにまで低減され、人工核種の漏洩、宇宙線の変化、自然背景放射線の微妙な変動の検出能力が大幅に向上しました。これは、地球環境放射線背景モニタリングネットワーク、国家原子力緊急対応システム、地球科学の学際的研究にとってかけがえのない測定の礎石となっています。

## 5.6 タングステン合金シールド缶のその他の特殊分野への応用

タングステン合金シールドコンテナは、極限環境への適応性、特殊機能の拡張性、そして高いカスタマイズ性を備えており、従来の分野を超えた様々な特殊な用途で広く利用されています。これらの用途では、通常、極限温度、極限圧力、極限清浄度、あるいは極限機密性が求められ、タングステン合金シールドコンテナは、機能、安全性、そして規制要件を同時に満たす唯一の技術的ソリューションとなることがよくあります。

### 5.6.1 特殊環境向けカスタマイズタングステン合金シールドキャニスター

特殊環境向けのカスタマイズソリューションは、主に深海、極地、高真空、超高温、超低温、強腐食、あるいは複雑で過酷な動作条件向けに設計されています。タングステン合金シールド缶は、材料システム、構造形状、表面機能の的確な設計により、通常のシールド材では対応できない課題を解決します。

深海ニュートリノ望遠鏡と海底放射能モニタリングステーションは、チタン合金シェルと光ファイバーシールインターフェースを組み合わせた耐圧性タングステン-ニッケル-鉄厚肉シ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ールドコンテナを採用し、高純度ゲルマニウム検出器とコバルト 60 較正源を数万メートルの深さで長期間収容することができます。極地水床の宇宙線検出アレイは、極寒の南極環境でも背景シールド効果が低下しないように、多層断熱・防水コーティングで覆われた超高純度タングステン合金シールドコンテナを使用しています。超高真空加速器ビームラインの局所シールドには、内部のガス放出率が極めて低く、冷間圧接を防ぐ金メッキ表面を備えた真空ろう付けタングステン合金ネストコンテナが採用されており、超高真空システムでビーム汚染のない長期運用を可能にしています。超高温プラズマ診断システムは、タングステン合金＋モリブデン・ランタンライナーの複合容器を採用し、瞬間温度 1000℃を超える環境下でも中性子・ガンマ線検出結晶を収容することができます。強酸・アルカリ放射性廃液長期貯蔵容器は、タングステン・ニッケル・銅＋ハステロイライナー＋フッ素樹脂外殻構造を採用し、1 世紀にも及ぶ封じ込め寿命を実現しています。

タングステン合金遮蔽容器は、人類が最も過酷な自然と工学の限界で放射線関連の科学活動を行うことを可能にし、深地球、深海、深宇宙、極限の物理的条件での実験に不可欠なインフラストラクチャとなっています。

#### 5.6.2 地質探査および採掘用タングステン合金遮蔽タンク

地質探査・採掘には、ウラン、トリウム、希土類元素に関連する放射性鉱物、そして油井・ガス井の検層が含まれます。そのため、高温、高湿度、高塵、高振動の環境下において、天然放射性コア、鉱物サンプル、検層源を迅速かつ安全かつ汚染なく現場で封じ込め・輸送する必要があります。軽量設計、過酷な環境への耐性、そして完全な除染耐性を備えたタングステン合金遮蔽容器は、地質探査・採掘における放射性サンプル管理の標準装備となっています。

探査用タングステン合金遮蔽容器は、タングステン-ニッケル-銅系非磁性耐腐食システム、クイックオープンスクリュージャップ構造、円錐型セルフセンタリングシール設計を採用し、掘削リグから採取したコアサンプルのすぐそばで「コアリングと封じ込め」が可能です。容器の内壁は鏡面研磨され、外面にはポリウレタ弾性コーティングが施されているため、砂漠の高温、凍土の低温、酸性雨、塩分を含むアルカリ性土壤による長期腐食に耐性があります。石油・ガス井検層用タングステン合金線源容器は、方向性コリメーション＋クイック線源変更チャンネル設計を採用し、坑井内高温耐振構造と組み合わせることで、高温高圧の坑井内環境においてセシウム 137 およびアメリシウム-ベリリウム中性子線源を確実に封じ込めます。モジュール式のタングステン合金シールドコンベアコンテナは、鉱山の放射性鉱石選別ラインで使用され、高放射性ブロックの自動鉱石選別と正確な隔離を実現します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



タングステン合金遮蔽容器は、地質探査において皮膚汚染とエアロゾル拡散ゼロのクリーンなサンプリングを可能にし、サンプルの代表性と作業員の安全性を大幅に向上させました。同時に、従来の鉛容器の廃止によって引き起こされた草原やゴビ砂漠における長期的な重金属汚染問題を完全に解決し、ウラン、希土類元素、石油・ガス資源の探査開発に不可欠な放射線管理ツールとなっています。

### 5.6.3 地質探査および採掘用タングステン合金遮蔽タンク

地質調査や採掘作業は、ウラン、トリウム、希土類元素関連放射性鉱物、そして油井・ガス井の検層源を扱うため、遠隔地の過酷な現場で行われることがよくあります。そのため、軽量で、過酷な気象、激しい振動、粉塵、塩水噴霧に耐え、迅速な開閉と徹底的な除染が可能な遮蔽容器が不可欠です。タングステン合金製の遮蔽容器は、鉛よりもはるかに高い容積遮蔽効率、極めて高い構造強度、そして表面の化学的不活性性を備えており、従来の鉛や鋼鉄製の容器に完全に取って代わり、地質学・採掘業界における放射性サンプルや検層源の管理における標準機器となっています。フィールドコアサンプリング容器は、タングステン-ニッケル-銅製の非磁性・耐腐食性システムを採用し、素早く開閉できるスクリューキャップと円錐形のセルフセンタリング構造を備えています。これにより、採取直後のコアサンプルを掘削リグのすぐそばで即座に封じ込めることができ、コアダストやエアロゾルの拡散を完全に防ぎます。コンテナの内壁は鏡面研磨され、フッ素系の洗浄しやすいコーティングが施されています。一方、外面は油や塩水噴霧に強いポリウレタ弾性コーティングが施されているため、砂漠の気温、極寒、凍土、酸性雨、塩分を含むアルカリ性の土地に長期間さらされても滑らかさを保ちます。石油・ガス井検層用のタングステン合金線源コンテナは、方向性コリメーション、高速線源変更チャネル、坑井振動耐性設計を採用しており、高温高压の坑井にセシウム 137 とアメリシウムベリリウム中性子源を確実に封じ込めます。モジュラー式タングステン合金遮蔽輸送コンテナは、鉱山の高放射能鉱石選別ラインで使用され、高放射能ブロックの自動選別と精密な隔離を実現します。タングステン合金遮蔽容器を体系的に適用することで、地質探査・採掘作業におけるサンプリングから輸送までのチェーン全体をクリーンに管理することができ、現場作業員の放射線量と環境汚染リスクを大幅に低減します。

### 5.6.4 航空宇宙放射線試験用タングステン合金遮蔽容器

航空宇宙放射線地上模擬実験では、高エネルギー陽子、重イオン、ガンマ線、中性子などの複合放射線場を軌道上で実験室内で精密に再現するとともに、非標的方向をほぼ完全に遮蔽し、試験室と作業員を保護する必要があります。超高純度・低放射化特性、優れた微視的均一性、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

精密加工能力を備えたタングステン合金遮蔽容器は、国内外の主要な宇宙環境模擬装置の中核試験容器となっています。

試験容器は、低放射化タングステン-ニッケル-銅またはタングステン-ニッケル-鉄系を採用しています。壁厚は、入射粒子の種類とエネルギーに基づいて不均一な勾配で設計されています。入射窓は局所的に薄くなっており、出射方向には、柔軟に組み合わせ可能なエネルギー減衰板、中性子減速層、吸収体の多層構造が採用されており、幅広い線形エネルギー付与スペクトルとフルエンス率制御を実現しています。容器の外側は真空対応の高温層でコーティングされ、内側には多点線量モニタリングプローブと温度制御システムが統合されており、全温度範囲での試験能力を確保しています。密閉システムは、金属ナイフエッジフランジまたは電子ビーム溶接による永久シール構造を採用しており、超高真空とクリーンで無酸素の環境を保証します。タングステン合金遮蔽容器は、陽子/重イオン加速器端末、核破碎中性子源後方散乱ビームライン、コバルト 60 大型線源照射室、統合宇宙環境シミュレーションモジュールなどに広く使用されています。宇宙搭載用電子部品、耐放射線チップ、深宇宙科学ペイロード、有人宇宙飛行生物実験などの宇宙環境適応性を検証するために不可欠なハードウェアです。これらの適用により、地上シミュレーション実験において最高レベルの放射線場忠実度と安全性が確保され、宇宙機の長寿命・高信頼性設計のための最も現実的で厳密な地上試験方法を提供します。

#### 5.6.5 核物理学実験試料用タングステン合金遮蔽容器

原子核物理学実験では、試料容器に極めて厳しい要件が課せられます。試料容器は、入射する中性子線や荷電粒子線に対して実質的に透明であること、出射するガンマ線、中性子、核分裂片、二次粒子に対して極めて強力な遮蔽性能を有すること、同時に放射化断面積が極めて低いこと、放射化生成物の半減期が極めて短いこと、そしてその後の精密分光測定を妨げないことが求められます。超高純度で低放射化特性、優れた中性子・ガンマ線複合遮蔽能力、そしてミクロンレベルの精密機械加工を特徴とするタングステン合金遮蔽容器は、原子炉中性子ビーム流線、核破碎中性子源分光計端末、サイクロトロンターゲットステーション、核データ測定装置などに最適な試料容器となっています。

実験試料容器には、一般的に超高純度のタングステン-ニッケル-銅またはタングステン-ニッケル-鉄低放射化システムが採用されています。入射窓領域の壁厚は、必要な構造強度のみを維持するために精密に薄くされています。出射方向には、迅速に交換可能な多層のタングステン合金劣化シート、ホウ素含有ポリエチレン減速層、およびカドミウム/ガドリニウム吸収体が装備されており、広範囲にわたるエネルギーおよびフラックス率の精密制御が可能です。内部空洞全体は鏡面研磨され、ダイヤモンドライクカーボンまたは窒化ホウ素コーティングが施されており、試料の付着を防ぎ、二次電子およびスパッタリングによる汚染を抑制します。シーリングシステムには、金属製ナイフエッジフランジまたは電子ビームパーマネントシールが採用されており、超高真空および無酸素環境を確保しています。極めてクリーンな実験で

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、残留水素、炭素、および吸着ガスを完全に除去するために、容器全体を高真空炉で数百℃で脱ガスおよびベーキングする必要があります。

タングステン合金遮蔽容器は、原子核物理実験におけるバックグラウンド計数率を極めて低いレベルにまで低減し、希少同位体断面積、共鳴パラメータ、弱崩壊チャネルの測定精度を大幅に向上させました。中性子散乱分光計、バック n タイム分光計、主要な核天体物理学的反応研究、そして国際的な核データベースの更新のための中核実験ハードウェアとなっています。

#### 5.6.6 特殊環境向けにカスタマイズされたタングステン合金シールド缶の応用

カスタム設計されたタングステン合金シールドコンテナは、人間の科学およびエンジニアリング活動の最も過酷な限界に合わせて設計されており、深海環境（数万メートル）、極地の氷床、高真空加速器室、超高温プラズマ診断、超低温希釈冷蔵庫内部、地層処分前の高腐食性および高放射性廃液の一時保管、複雑な極限条件下での放射線封じ込めニーズなどの用途をカバーしています。

深海ニュートリノ検出・海底放射能モニタリングステーションは、耐圧性に優れたタングステン-ニッケル-鉄製の厚肉遮蔽容器を採用し、チタン合金製のシェルと深海光ファイバー密閉インターフェースを組み合わせ、数十年にわたり数万メートルの深さで高純度ゲルマニウム検出器と較正源を収容することができます。極地氷冠宇宙線検出アレイは、超低温断熱・防水コーティングを多層に施した超純粋タングステン合金遮蔽容器を採用し、極寒環境でも背景遮蔽効果が低下しないようにしています。超高真空ストレージリングと自由電子レーザービームラインの局所遮蔽は、真空ろう付けされたタングステン合金の入れ子型容器と金メッキ表面を採用し、冷間圧接を防止しています。これにより内部のガス放出率が極めて低く、ビーム汚染のない超高真空システムでの長期運用が可能です。超高温核融合診断システムは、タングステン合金+モリブデンランタンまたはタングステンレニウム複合容器を採用し、瞬間温度が数千度を超える環境下でも中性子および硬 X 線検出結晶を収容することができます。超低温量子コンピューティングおよび暗黒物質検出希釈冷凍機は、小型のタングステン合金遮蔽容器を採用し、超伝導ニオブと高純度銅の内層を組み合わせることで、宇宙線からの二次粒子をほぼ完全に遮断します。

高レベル放射性廃液および地層処分前の廃棄物容器には、ハステロイ合金の内張りと多層フッ素樹脂の外装構造を備えたタングステン・ニッケル・銅合金ライニングを採用し、100 年以上の化学放射線閉じ込め寿命を実現しています。これらの特殊環境において、タングステン合金遮蔽容器を徹底的にカスタマイズすることで、人類は最も過酷な自然条件と工学条件下で放射線関連の科学探査と資源開発を行うことができ、原子力技術と放射線防護の応用範囲を大幅に拡大しました。これは、深地球、深海、深宇宙、極限物理実験に欠かせない究極の閉じ込め・遮蔽ソリューションとなっています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 第六章：タングステン合金遮蔽タンクの選択、使用および保守

### 6.1 タングステン合金シールド缶の科学的選定方法

タングステン合金遮蔽キャニスターは、「厚ければ厚いほど良い、重いほど安全」という従来のアプローチから、線源スペクトル、シナリオ制約、規制要件、そしてライフサイクルコスト全体に基づいた、体系的かつ定量的な閉ループ検証による意思決定プロセスへと完全に移行しました。科学的な選定を通してのみ、「最適な遮蔽、最小重量、最長寿命、そして最低総コスト」を真に実現できるのです。

#### 6.1.1 放射線特性に基づくタングステン合金遮蔽缶の選定基準

放射線特性は、タングステン合金遮蔽容器を選択する上での第一の出発点であり、最終的な目標です。スペクトル、エネルギーレベル、そして時間軸全体にわたって、ソースタームを正確に特性評価することが不可欠です。

まず、放射線の種類とエネルギー分布を明確に特定する必要があります。純粋なガンマ線場なのか、ガンマ線と中性子の混合場なのか、それとも $\alpha/\beta$ 面を伴う複合場なのか、高エネルギーのコバルト 60 やセシウム 137 なのか、それとも低エネルギーのヨウ素 125 やアメリカシウム 241 なのか、そして二次放射線や特性 X 線は顕著なのか。次に、放射能の時間曲線を特定する必要があります。半減期の短い核医学用薬剤なのか、指数関数的に減衰する欠陥検出用線源なのか、それとも長寿命の高レベル廃棄物や使用済み燃料なのか。最後に、幾何学的分布を評価する必要があります。点線源なのか、面線源なのか、体積線源なのか、指向性ビームなのか、全方向散乱なのか。

これに基づき、モンテカルロ線輸送計算により、線源項、壁厚、外部線量率、重量、およびコスト間の完全なマッピング関係が確立されました。これにより、規制値を満たすための最小のタングステン合金厚が決定されました。さらに、中性子吸収層、犠牲ライナー、およびコリメーションウィンドウの要件を考慮して、予備的な材料グレードと構造スキームが開発されました。高強度タングステン-ニッケル-鉄系は高 $\gamma$ +中性子混合場に適しており、非磁性で耐腐食性のあるタングステン-ニッケル-銅系は核医学および廃液環境に適しており、多層複合系は最も複雑な広帯域シナリオに使用されます。計算結果が実際の線源較正と完全に一致する場合にのみ、放射線特性選択は真に閉ループであると見なすことができます。

#### 6.1.2 用途シナリオに基づくタングステン合金シールド缶の重要な選択ポイント

同じソースタームであっても、異なるシナリオでは全く異なる最適なタンクタイプに対応する場合があります。使用シナリオは、構造形態、機能統合、そして人間とコンピュータのインタラクションを決定する重要な制約です。

固定式のホットチャンバーを使用する場合、ニアネットシェイプ構造、恒久的な溶接シーリング、複数の冗長キャップが推奨され、生涯にわたるメンテナンスフリーの操作と最大限の封じ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

込めが重視されます。ポータブル核医学を使用する場合、最小限の重量、片手で素早く開くこと、簡単に除染できる鏡面が必要です。産業用探傷では、方向性のある調整、回転可能なウィンドウ、現場での振動耐性が重視されます。輸送コンテナは、IAEA タイプ A/B/C 仕様を満たし、9 メートルの落下に耐え、耐火性である必要があります。廃棄物保管では、最大容量、最長寿命、無人操作が優先されます。同時に、動作頻度、除染方法、輸送方法、スペースの制約、清浄度、磁気適合性、滅菌適合性、および耐用年数終了時のリサイクル経路を総合的に考慮する必要があります。たとえば、PET-CT 室には完全な非磁性特性とオートクレーブ処理できる表面が必要です。地下実験室のバックグラウンド測定容器には、超高純度で低放射化材料を使用し、揮発性コーティングは不要です。最終的な選定においては、放射線遮蔽基準を満たすことを前提に、あらゆるシナリオ制約を構造、材料、表面処理、機能インターフェースに関する具体的なソリューションにマッピングし、独自のソリューションを構築する必要があります。

### 6.1.3 業界標準に基づくタングステン合金シールド缶の選択検証

タングステン合金遮蔽タンクの選定計画が正式に確定した後、業界標準および規制に基づくフルチェーンの物理検証を実施する必要があります。これは、「理論的な適合性」から「実用的な使用性」への最終チェックポイントとなります。核医学分野では、国家薬品监督管理局の医療機器登録および GMP 付録の要求に従っています。完成した容器は、実線源線量率試験、無菌検証、生体適合性、輸送安定性試験に合格する必要があります。工業用欠陥検出および非破壊検査は、ISO 3999、GB/T 1933、EN 14784 規格に準拠し、落下、積み重ね、炎、実線源漏洩検証に合格しています。輸送容器は、IAEA SSR-6 および TS-R-1 仕様に厳密に準拠し、9 メートル自由落下、穿刺、800℃30 分炎、浸漬を含む一連の型式試験を完了しています。廃棄物および地層処分容器は、国家標準 GB 14500 および IAEA SSG-23 の要求に準拠し、長期浸漬、放射線老化、および封じ込め検証を受けています。科学研究用および特殊環境用コンテナは、プロジェクトの技術協定に従って、カスタマイズされた真空ベント、極低温、深海高圧または強磁場適合性の検証を受けます。

検証プロセスは、資格を有する第三者機関とユーザーが共同で完了する必要があります。すべての原本記録、測定写真、ビデオ、および実際の線源校正データは永久にアーカイブ化される必要があります。測定された外部表面線量率、漏洩角度分布、落下完全性、および規制限度がすべて満たされ、合理的なマージンが許容された場合にのみ、選定計画は正式に図面、プロセス、および調達技術条件として固められ、量産段階に移行できます。放射線特性計算、シナリオ制約マッチング、業界標準の物理的検証という 3 段階の科学的選定方法は、世界トップクラスの核医学センター、同位体工場、欠陥検査会社、航空宇宙研究所がタングステン合金遮蔽容器を調達する際に必須の手順となっている、不可欠かつ相互に関連するプロセスです。これにより、工場から出荷されるすべてのタングステン合金遮蔽容器が「十分に近い」のではなく、「まさに完璧」であることを保証します。

### 6.2 タングステン合金シールドタンクの安全操作手順

タングステン合金遮蔽容器は非常に高い安全マージンを有していますが、放射線防護チェーンの中で、使用段階は依然として最も人為的ミスが発生しやすい段階です。操作手順の違反は、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

人員の過剰被ばく、制御不能なソースターム、あるいは容器の損傷につながる可能性があります。したがって、プロセス全体、すべての人員、そしてすべての記録を網羅する、必須の安全操作手順を確立することが不可欠です。

#### 6.2.1 タングステン合金シールドタンクの基本操作手順と仕様

基本操作には、蓋を開ける、線源をセットする、線源を取り出す、蓋を閉める、清掃、状態確認、日常点検などがあり、「2 人、2 つのロック、ステップごとに 1 つの確認、追跡可能な記録」という基本原則を厳守する必要があります。

蓋を開ける前に、線源の位置の確認（線源が安全区域内にあるかどうか）、線量率の確認（外表面が背景範囲内にあるかどうか）、ロックおよびインターロックの状態の確認の 3 つの確認を完了する必要があります。蓋を開ける作業は、専用のツールまたはロボット アームを使用して実行する必要があります。1 人での操作、蓋を無理やりこじ開けること、蓋が完全に配置される前に線源を挿入または取り外すことは、固く禁止されています。線源の積み込みと積み下ろしは、指定された加熱室、遮蔽手術台、または線源交換ホグ内で完了する必要があります。作業中は、作業中常に個人線量計と電子アラームを着用する必要があります。蓋を閉めた直後に、線量率の再テスト、シールドの目視検査、およびロックの施錠を実行する必要があります。線量率の値、操作時間、作業員、確認者、および固有のタンク番号を記録する必要があります。

除染作業は、専用の除染室または除染台で、規定の除染剤と使い捨ての拭き取り材を使用して実施する必要があります。スチールウール、サンドペーパー、強酸などを用いてタンングステン合金本体に直接触れることは固く禁じられています。使用前には必ず表面汚染を点検してください。汚染が許容レベルを超えた場合は、直ちにその区域を隔離し、汚染拡散防止手順を開始してください。すべての作業記録は、放射線安全管理情報システムにリアルタイムでアップロードする必要があります。署名、確認、または記録がない手順は、無効な作業とみなされます。

#### 6.2.2 タングステン合金シールド容器の移動および輸送に関する安全要件

容器の使用中に最も放射線リスクが高い部分であり、「固定ルート、専用ツール、リアルタイム監視、二重責任、緊急時対応」の 5 つの必須要件を実施する必要があります。

ポータブルコンテナは、人間工学に基づいて設計されたハンドルまたは台車を使用して運ぶ必要があります。指定された重量を超えるコンテナを単独で取り扱うことは固く禁じられています。大型コンテナには、耐荷重性が検証された吊り上げラグと専用の吊り上げ装置を使用する必要があります。吊り上げ前に、スリングを検査し、吊り上げ地点の線量率を測定し、コンテナの下に立ち入り禁止区域を設定する必要があります。輸送ルートは事前に宣言し、放射線警告標識で明確に表示する必要があります。コンテナの位置と線量状況をリアルタイムで報告するために、ポータブル線量率計とトランシーバーをルート沿いに設置する必要があります。院内輸送では、公共の通路やエレベーターのピーク時間帯を避けなければなりません。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



屋外および高速道路での輸送では、タイプ B(U) またはタイプ AF 仕様に準拠した専用の輸送コンテナと車両を使用する必要があります。運転手と付き添い人は、放射線安全研修の証明書を保持している必要があります。全工程を通じて、タンクを遮蔽されていない屋外に規定の時間を超えて放置すること、他の物品と混合すること、タンクの外面に不定形の標識を付けることを固く禁じます。目的地に到着したら、直ちに線量率を再試験し、外観の完全性を検査してください。異常が見つかった場合は、直ちに現場でその区域を隔離し、緊急手順を発動してください。

### 6.2.3 タングステン合金シールドタンクの緊急対応とトラブルシューティング

タンングステン合金遮蔽キャニスター自体の故障を封じ込めることはほぼ不可能ですが、最悪のシナリオを想定した段階的な緊急対応および障害処理手順を開発し、可能な限り短時間で異常を制御できるようにする必要があります。

一般的な異常は 3 つのカテゴリに分類されます。

1. タンクが落下または衝突した場合：直ちに立ち入り禁止区域を設定し、長柄線量率計を用いて遠隔測定を行い、タンク外面の線量率が大幅に上昇した場合は、接近を禁止する。遠隔操作ロボットアームまたはロボットを用いて、タンクを予備の遮蔽ピットまたは緊急コンテナに移動させる。
2. 蓋が固着したり、密閉が不十分な場合：タンクを動かさず、無理やり蓋を開けないでください。予備のシールドまたは鉛の毛布でタンクを一時的に覆い、メーカーに連絡して、特殊工具を備えた専門チームを派遣し、現場で状況に対応してもらってください。
3. 表面汚染の拡大：直ちにその区域を封鎖し、完全な防護服を着用し、局所的な除染には専用の除染剤と吸引装置を使用し、汚染された物質を専用の廃棄物袋に入れ、その後、全身汚染スクリーニングと環境線量率モニタリングを実施します。

すべての緊急対応は放射線安全責任者の指揮下で実施され、緊急記録フォームが有効化され、報告は階層構造を通じてエスカレーションされなければなりません。根本原因分析と是正措置 / 予防措置は、発生後 24 時間以内に完了しなければなりません。すべての作業員が 30 秒以内に緊急装備を正しく装着し、1 分以内に立ち入り禁止区域を設定し、3 分以内に初期隔離を完了できるように、少なくとも年に 1 回は全プロセス緊急訓練を実施しなければなりません。基本的な操作手順、移動搬送要件、緊急対応措置を義務的なシステムに固め、定期的な訓練と評価を実施することによってのみ、タンングステン合金遮蔽タンクの高い安全性能を実際にゼロ事故、ゼロ過剰摂取、ゼロ汚染拡散に変えることができ、「良いタンク」から「良い使用」までの包括的な閉ループを真に実現することができます。

### 6.3 タングステン合金シールドキャニスターの日常メンテナンスと寿命延長技術

タンングステン合金シールドタンク本体は数十年から数百年の使用に耐えますが、シール、コーティング、連動機構、機能部品などは寿命が限られています。科学的、体系的、かつ追跡可能

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な日常メンテナンスシステムを確立することによってのみ、タンク全体の寿命全体を通して「本体は決して壊れず、機能は常に新品のように見える」という最適な状態を真に実現することができます。

### 6.3.1 タングステン合金遮蔽タンクの日常的な清掃およびメンテナンス方法

タンングステン合金遮蔽タンクは、「優しく、標準化され、記録され、追跡可能」という原則に従っています。その主な目的は、タンングステン合金本体と機能コーティングを損傷することなく、表面の放射性汚染物質と化学物質の残留物を徹底的に除去することです。

毎日の清掃には 3 つの手順を使用します。

1. まず、中性または弱アルカリ性の洗剤を湿らせた使い捨ての糸くずの出ない布を使用して、表面全体を、優しく、一方向に、繰り返さずに順番に拭きます。
2. 残った洗剤を除去するために、70% の医療用アルコールまたは低濃度の過酸化水素溶液で再度拭きます。
3. 最後に、超純水と糸くずの出ない布で十分にすすぎ、自然乾燥または低温の熱風で乾燥させてください。塩素系漂白剤、スチールウール、有機溶剤、強酸、強アルカリをタンングステン合金本体に直接接触させることは固く禁じられています。洗浄後、表面の汚染物質を拭き取り、直ちにサンプルを採取してモニタリングしてください。汚染物質の移行がないことを確認した後、製品を元の場所に戻すことができます。

主なメンテナンスポイントは次のとおりです。

- 耐放射線性シリコングリースまたはグラファイトベースのドライフィルム潤滑剤をシール面、ラビリンス溝、ラッチ、ヒンジに毎月塗布します。
- ラグは四半期ごとに外観と締め付けトルクを検査する必要があります。
- タンク表面全体の目視検査を毎年実施してください。傷や局所的な光沢の低下が見られた場合は、直ちに記録し、現地で補修作業を開始してください。洗浄剤、潤滑剤、拭き取り布はすべてこのタンク専用であり、使い捨てです。使用後は放射性廃棄物として処分してください。

### 6.3.2 タングステン合金シールド缶の定期検査と性能校正

タンングステン合金ボディはパフォーマンスの低下がほとんど見られませんが、シールド システム全体は、機能が制御されていることを確認するために定期的なテストが必要です。

テスト サイクルは、月次、四半期、年次の 3 つのレベルに分かれています。

- 月次検査: 外部表面線量率のパノラマスキャン、シール面の目視検査および拭き取り汚染チェック、ラッチおよびインターロック機能のテスト。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 四半期ごとの検査: 精密超音波壁厚測定（最小壁厚領域と穴底に焦点を合わせる）、表面コーティングの付着力と接触角の再測定、線量率表示画面と電子タグ機能の校正。
- 年次検査: 実際の線源校正（標準のコバルト 60 またはセシウム 137 線源を使用して、指定された距離での外表面の線量率と漏れ角度分布の測定）、全体的な漏れ検出のためヘリウム質量分析、および落下緩衝パッドと衝撃吸収システムの整合性チェック。

すべての試験は計量校正された機器を用いて、資格を有する放射線防護担当者 2 名によって実施されなければなりません。生データは放射線安全管理システムにリアルタイムでアップロードされなければなりません。指標のいずれかが基準値を 80%超過していることが判明した場合、システムは直ちにダウングレードされ、特別な修理が手配されなければなりません。60%を下回っている場合は、システムを隔離し、シャットダウンしなければなりません。

### 6.3.3 タングステン合金遮蔽タンクの脆弱な部品の交換とメンテナンス

タングステン合金遮蔽キャニスターは、主にシーリングリング、機能性コーティング、ロックスプリング、線量率表示スクリーン、衝撃吸収パッド、使い捨てインナーライナー、電子タグで構成されています。これらはすべて、予防的交換と状態に基づく交換を組み合わせた戦略に基づいて保守されています。

シーリング リング（金属製 C リング、フッ素ゴム製 O リング、PTFE コーティング リング）は、1～3 年ごと、または累計開閉サイクル 1,000～3,000 回ごとに予防的に交換する必要があります。交換はクリーン ルームで実施し、ヘリウム質量分析法によるリーク テストを再度実施する必要があります。機能性コーティング（フッ素系の洗浄しやすいコーティング、DLC、CrN）は、広い範囲に傷がついたり、密着性が低下したり、接触角が大幅に増加したりした場合は、専門の製造業者に送って全面的な再コーティングを行う必要があります。現場での修正は禁止されています。ロック、ヒンジ、スプリング、およびクイック オープン機構には毎年潤滑油を差してください。部品の詰まりや戻りの遅さが見つかった場合は、直ちにアセンブリ全体を工場出荷時のオリジナル スペアパーツに交換してください。投与量率ディスプレイ、NFC/RFID 電子タグ、およびバッテリー モジュールは、識別機能およびアクティビティ モニタリング機能が故障しないように、5 年ごと、またはバッテリー レベルが 20% を下回ったときに交換する必要があります。使い捨ての内側ライナーと犠牲ライナーは、汚染物質で飽和した後、熱交換器から取り外して交換する必要があります。古い内側ライナーは、低～中放射性廃棄物として処分する必要があります。

すべての脆弱な部品は、「純正工場部品、固有コード、追跡可能なバッチ」を保証する調達・交換システムの対象となります。交換記録は、古い部品と共に 10 年以上保管されます。

タングステン合金シールドタンクは、厳格な清掃とメンテナンス、定期的なテストと校正、脆弱な部品の予防交換を通じて、生涯メンテナンスフリーの本体と常に新しい機能部品という理想的な状態を容易に実現し、実際の耐用年数を理論上の数十年から半世紀以上に効果的に延長し、真に「一度の投資で一生安心」を実現します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

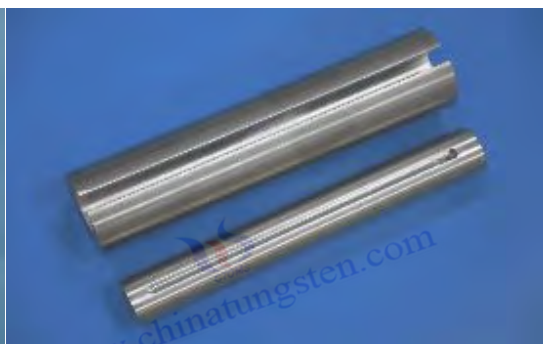
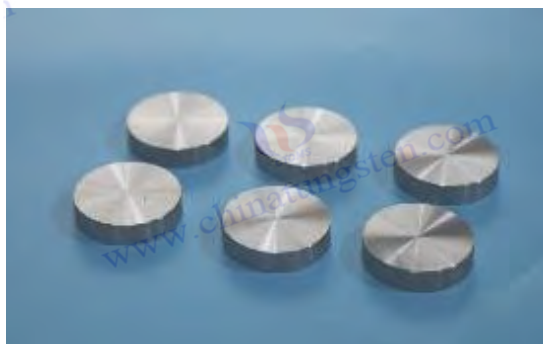
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 第7章 タングステン合金シールド缶と他のシールド缶の比較

### 7.1 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の比較

鉛および鉛合金（鉛アンチモン、鉛スズ、鉛ビスマスなどを含む）は、長らくガンマ線遮蔽材として最適な材料と考えられてきましたが、現代の高水準放射線防護システムにおいては、それらの固有の欠陥がますます顕著になっています。[タングステン合金遮蔽容器](#)および鉛合金遮蔽容器は、材料特性、性能、およびライフサイクル特性において、系統のかつ不可逆的な世代間差異を示します。

#### 7.1.1 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の性能比較（シールド効率、密度など）

タングステン合金と鉛合金はどちらもガンマ線減衰能力の点では高原子番号系に属しますが、体積効率、機械的特性、照射安定性、形状忠実度の点ではタングステン合金が総合的な利点を持っています。タングステン合金は、純鉛やほとんどの鉛合金に比べてマクロ的な密度が大幅に高いため、同じ質量であれば全体寸法を小さく、壁を薄くすることが可能となり、缶全体の重量とスペース要件を大幅に削減できます。タングステン合金は、連続したタングステン-タングステン骨格と高強度バインダー相を有しており、極めて高い降伏強度とクリープ耐性を有し、複雑なラビリンス、深い止まり穴、薄底構造の直接加工を可能にします。一方、鉛合金は鋳造または厚肉で単純な形状でしか製造できないため、一体型のクイックオープン蓋や精密な位置合わせを実現することが困難です。

鉛合金は、長期照射下では照射膨張、粒界液状化、クリープ変形の影響を非常に受けやすく、壁の薄肉化、シール不良、漏れチャネルの形成につながります。一方、タングステン合金は優れた耐放射線性を示し、微細構造と寸法は数十年にわたって変化しません。高温条件下では、鉛合金はタングステン合金の融点をはるかに下回る温度で軟化・流動しますが、タングステン合金は数百℃の環境でも長期間構造的完全性を維持できます。表面耐食性に関しては、鉛合金は酸性洗剤や湿気の多い環境で急速に緩い酸化物層と炭酸鉛粉末層を形成しますが、タングステン合金は緻密な不動態膜を有しており、ハードコーティングによってさらに強化できるため、繰り返しの強い酸化と洗浄にも耐え、平滑性を失うことはありません。要約すると、タングステン合金遮蔽容器は、遮蔽容積効率、構造強度、放射線および熱安定性、形状精度、長期封じ込めなど、あらゆる面で鉛合金より優れており、高水準のシナリオにおいて唯一実現可能な技術的アプローチとなります。

#### 7.1.2 タングステン合金遮蔽タンクと鉛合金遮蔽タンク的环境適合性の比較

鉛とその合金は明確に定義された重金属毒素であり、生産から使用、除染、廃棄に至るまで、そのライフサイクル全体を通じて重大な環境および健康リスクをもたらします。一方、タングステン合金は、その素材の本質から真にグリーンなクローズドループを実現しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

繰り返し洗浄する過程で鉛蒸気や可溶性鉛塩を生成します。これらの物質に長期暴露すると、作業者が慢性鉛中毒になる可能性があり、鉛は環境に蓄積して食物連鎖に入り、永久的な汚染を引き起こします。廃棄された鉛容器は、特別な埋立地または高コストの鉛リサイクルプロセスで有害廃棄物として処分するしかありませんが、それ自体が鉛蒸気と鉛スラグによる二次汚染を伴います。一方、タングステン合金は、鉛、カドミウム、水銀などの規制されている重金属を全く含みません。表面洗浄ではごく微量の通常放射性廃液が発生するだけなので、重金属が放出されるリスクはありません。廃棄されたタングステン合金容器は直接溶かしてリサイクルすることができ、タングステンとニッケル鉄/ニッケル銅バインダー相は 100% リサイクル・再利用されます。特別な有害廃棄物処理は必要なく、真に原子経済とゼロ廃棄物を実現します。

規制レベルでは、EU の RoHS 指令と REACH 規則、そして中国の有害廃棄物リストにより、鉛含有遮蔽製品に対する規制がますます厳しくなっています。一方、タングステン合金は最も厳しい環境基準とバイオセーフティ基準に完全に準拠しており、病院の無菌区域、クリーンルーム、そして輸出市場への自由な導入が認められています。タングステン合金遮蔽容器の環境特性は「無害」から「リサイクル可能な資源」へと向上し、鉛遮蔽時代から残る長期的な環境負荷を完全に解消し、放射線遮蔽材料のグリーン化に向けた究極の方向性を示しています。

### 7.1.3 タングステン合金シールド缶と鉛合金シールド缶の適用シナリオの比較

鉛合金遮蔽容器とタングステン合金遮蔽容器の適用範囲は明確で、ほとんど重複しない境界を形成しています。

鉛合金は、需要が低く、一時的、単発的、または極めて低頻度の使用シナリオにおいてのみ、極めて限定的に使用されています。例えば、短期レンタルによる低放射能探傷源の一時保管、現場での単発的な地質調査、極めて限られた予算での教育実習、そして一部の開発途上国における機器更新が未完了の旧式機器のメンテナンスなどです。これらのシナリオには共通の特徴があります。すなわち、稼働頻度が低いこと、除染要件が緩いこと、人員の専門性が低いこと、重量や体積に対する鈍感さ、そして長期的な環境への影響が考慮されていないことです。

タングステン合金シールドキャニスターは、あらゆるハイエンド、長寿命、高頻度動作、厳格な規制シナリオに最適です。

- 核医学診断と治療の全チェーン（PET-CT 室、温熱室、治療病棟）
- 同位体製造および包装ホットチャンバー；
- 高スループットの産業用放射線検査およびオンライン非破壊検査。
- 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵、輸送及び一時保管
- 航空宇宙放射線試験および軌道上の局所遮蔽。
- 半導体クリーンルームおよび精密機器用の低バックグラウンド実験室。
- 非磁性、高温高压滅菌、徹底的な除染が可能で、完全にリサイクル可能な最新の放射線防護設備。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ロボットまたは手動による頻繁な操作、強力な酸化洗剤の繰り返し使用、MRI 室との互換性、清潔さの要件、10 年を超える耐用年数、規制による鉛製品の段階的廃止の義務など、シナリオが次のいずれかの危険線に該当する場合、鉛合金は完全に除外され、タングステン合金が唯一の準拠した技術的に実現可能なソリューションになります。

#### 7.1.4 タングステン合金遮蔽タンクと鉛合金遮蔽タンクの総ライフサイクルコストの比較

従来の考え方では、鉛合金は初期購入価格が低いと考えられてきましたが、厳格なライフサイクル会計（LCC）の枠組みでは、タングステン合金遮蔽キャニスターが圧倒的な利点を示しています。

鉛合金缶の初期購入コストは低いものの、その後の隠れたコストと明示的なコストが急速に蓄積されます。

- 鉛粉塵防止、血中鉛モニタリング、職業病補償のための準備金は毎年増額する必要がある。
- 各除染プロセスには大量の使い捨て保護具が必要となり、高額な有害廃棄物処理コストが発生します。
- 平均すると、クリープ、腐食、汚染飽和により 5 ～ 8 年ごとに完全に廃棄され、再購入と有害廃棄物の輸送および埋め立てコストの支払いが必要になります。
- 頻繁な交換により、ダウンタイムによる損失が発生し、人材のトレーニングコストが継続的に増加しています。

タングステン合金シールドキャニスターの価格は比較的高いですが、その後のコストはほぼゼロです。

- 本体は生涯にわたって大きな修理を必要とせず、シールなどの摩耗しやすい部品の交換コストもごくわずかです。
- 汚れの除去は通常の拭き取りのみで、消耗品や人件費などのコストは極めて低くなります。
- 表面汚染は簡単に除去でき、追加の有害廃棄物はほとんど発生しません。
- 廃棄される際に、貴重な金属は丸ごとリサイクルされ、利益を生み出すこともあります。
- 交換がほとんどないため、設備の稼働率はほぼ 100% に近づき、間接的に莫大な経済的利益をもたらします。

いくつかのトップクラスの核医学センター、同位体工場、産業用探傷検査会社による実際の試算によると、タングステン合金遮蔽容器は 5～7 年目にコストの変曲点に達し、その後は耐用年数が 1 年増えるごとに純利益が生まれます。10 年以上の期間で見ると、タングステン合金遮蔽容器の総所有コストは鉛合金システムのわずか 40～60%に過ぎず、この利点は耐用年数の延長とともにさらに拡大します。結論は明白です。長期的な信頼性、環境への配慮、そして規制遵守が求められる現代の放射線防護のあらゆる場面において、タングステン合金遮蔽容器

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は「ハイエンドオプション」から「唯一の経済的なオプション」へと完全に変貌を遂げました。鉛合金遮蔽容器の時代は不可逆的に終焉を迎えました。

## 7.2 タングステン合金遮蔽タンクと鋼製遮蔽タンクの比較

普通鋼およびステンレス鋼製の遮蔽容器（炭素鋼、ボロン鋼、低炭素ステンレス鋼、二相ステンレス鋼など）は、かつては価格が安く加工が容易なことから、低・中エネルギーのガンマ線および中性子に対する粗遮蔽に広く使用されてきました。しかし、現代の高水準、長寿命、高度な放射線防護システムでは、これらの材料固有の限界により、核心シナリオの要件を満たすことができなくなっています。タングステン合金製の遮蔽容器と鋼製の遮蔽容器は、遮蔽効果、機械的挙動、環境耐久性において根本的な違いを示します。

### 7.2.1 タングステン合金シールド容器と鋼製シールド容器のシールド性能の比較

鋼製遮蔽容器は、ガンマ線減衰を主に鉄の原子番号と質量吸収係数に依存していますが、タングステン合金は、その極めて高い原子番号と密度により、体積遮蔽効率において飛躍的な優位性を発揮します。同じ外形寸法であれば、タングステン合金容器は高エネルギーガンマ線を鋼製容器の数分の1以下に減衰させることができます。また、同じ遮蔽効果を得るための壁厚は鋼製容器の数分の1であり、その結果、重量と体積が大幅に削減されます。そのため、スペースと重量の制約が厳しい状況では、タングステン合金容器が唯一の実現可能なソリューションとなります。中性子遮蔽において、鋼製キャニスターは、通常、熱中性子吸収を実現するために、ホウ素含有ポリエチレン、ホウ素鋼板、または厚コンクリートで追加充填する必要があります。しかし、この複合構造は必然的に界面、継ぎ目、密度の不均一性をもたらし、中性子漏洩と二次的なガンマ線増強につながります。一方、タングステン合金製キャニスターは、タングステン-ニッケル-鉄系自体の中性子減速能力と、埋め込まれたホウ化物または希土類酸化物インサートを組み合わせることで、界面や弱領域を生じさせることなく、継続的なガンマ線中性子遮蔽を実現できます。鋼製キャニスターは、高流束混合放射線場において、水素の揮発、ホウ素の燃焼、および界面の経年劣化により性能劣化を非常に受けやすいのに対し、タングステン合金製キャニスターの遮蔽効果は数十年にわたって一定です。広帯域かつ複雑なソースターム環境において、鋼製シールドは「層ごとの積層」による粗いシールドしか実現できませんが、タングステン合金シールドは、傾斜壁厚、統合コリメーション、そして精密な挿入により、洗練された方向制御可能なシールド設計を実現します。鋼製シールド缶は、低放射能、一時的、そして大容量が許容されるシナリオ向けの過渡的な製品へと退化しましたが、タングステン合金シールド缶は、ハイエンド、精密、そして長寿命のシールドを実現する唯一の技術的手段となっています。

### 7.2.2 タングステン合金シールドタンクと鋼製シールドタンクの機械的特性の比較

鋼は高い公称強度を有するものの、放射線遮蔽容器に求められる高アスペクト比の止まり穴、薄底厚肉の遷移部、複雑なラビリンス、一体型の吊り上げラグ構造などにより、その加工性と寸法精度は根本的に制限されます。鋼製タンクは通常、溶接またはボルト締めでしか組み立て

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ることができず、溶接熱影響部、応力集中、潜在的な漏洩経路の発生を必然的に招きます。一方、タングステン合金は、ニアネットシェイプ成形と精密機械加工プロセスを用いることで、シームレスで一体型の厚肉不規則形状のタンクを 1 回の工程で成形することができ、接合面の破損リスクを完全に排除します。

耐衝撃性と耐落下性に関して、スチール缶はある程度の靱性を有していますが、高ひずみ速度負荷下では塑性変形、溶接割れ、シール面の反りが発生しやすいという欠点があります。一方、タングステン合金は高密度で強度と靱性のバランスに優れているため、同じ肉厚の鋼板よりもはるかに優れた変形耐性を備えています。万が一落下した場合でも、局所的な小さなへこみ程度にとどまり、貫通損傷や形状精度の劣化は発生しません。

長期使用安定性の観点から見ると、鋼製タンクは、照射、熱サイクル、腐食の複合影響により、水素誘起遅れ割れ、応力腐食割れ、粒界腐食の影響を受けやすく、特に溶接部は脆弱です。一方、タングステン合金は水素をほとんど吸収せず、照射脆化を起こさず、粒界に弱い結合相を持たず、サイズと形態は数十年にわたって変化しません。タングステン合金シールドタンクは、「構造+シールド」から「構造としてのシールド」へと根本的な飛躍を遂げましたが、鋼製シールドタンクは依然として「構造荷重+外部シールド」という従来の段階にとどまっています。

### 7.2.3 タングステン合金シールド容器と鋼製シールド容器の環境適応性の比較

鋼鉄シールドタンクの環境適応性は鉄系材料の固有の化学活性と微細構造欠陥によって制限され、複雑な使用環境での性能はますます不十分になっていますが、タングステン合金は予想外に広範囲の環境耐久性を示しています。

腐食性の高い除染環境（濃硝酸、過酸化水素、次亜塩素酸ナトリウム、強アルカリ、高温蒸気）では、通常の炭素鋼は急速かつ完全に腐食します。ステンレス鋼は不動態皮膜を形成できますが、長期間の繰り返し除染後、特に溶接部や熱影響部では、孔食、隙間腐食、応力腐食割れは避けられません。タングステン合金は、表面に極めて薄く緻密な酸化物不動態皮膜を形成できます。CrN、DLC、またはフッ素含有の容易な除染コーティングと組み合わせることで、その耐食性は最高級の二相ステンレス鋼やハステロイをはるかに上回り、最も過酷な核医学およびホットチャンバー除染サイクルにおいても、数十年にわたって鏡面仕上げを維持します。

高温、高湿度、塩水噴霧環境下では、スチール缶は赤錆、塩析出、コーティングの膨れといった問題に非常に敏感です。一方、ポリウレタまたはフッ素系コーティングを併用したタングステン合金は、ほぼ永続的な耐候性を示します。高放射線環境下では、鋼鉄は顕著な放射線膨張、靱性の低下、放射化生成物の蓄積が見られますが、タングステン合金は一定の微細構造と特性を維持し、放射化生成物のレベルは極めて低く、劣化も急速です。

核医学や製薬業界では、清浄度とバイオセーフティの要件が極めて高く、鋼製キャニスターを鏡面仕上げにすることは困難であり、微細な死角を徹底的に洗浄することも困難です。さらに、長期使用により錆粒子が二次的な汚染源となります。タングステン合金製キャニスターは、全面鏡面電解研磨と医療グレードの洗浄しやすいコーティングを容易に実現できるため、汚れ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



の蓄積を完全に排除し、エチレンオキシド、過酸化水素プラズマ、高温高压蒸気滅菌にも完全に適合します。

鉄製タンクは、その耐用年数経過とリサイクルの過程で、深刻な汚染や腐食により、大量の低レベル廃棄物として扱われることが多く、その結果、容積が大きく、処分コストが高額になります。一方、タングステン合金タンクは、直接溶かして丸ごとリサイクルすることができ、リサイクル率はほぼ 100%に達し、まさに材料の閉ループと廃棄物ゼロを実現しています。

まとめると、鋼製遮蔽容器は、条件が穏やかで、除染要件が低く、予想寿命が短い過酷な環境にのみ適しているのに対し、タングステン合金製遮蔽容器は、極地から深海、クリーンルームから高温チャンバーまで、あらゆる過酷な環境を包括的にカバーし、現代の放射線遮蔽容器の環境適応性の究極のベンチマークとなっている。鋼製遮蔽容器の役割は、独立した遮蔽体ではなく、タングステン合金システムの補助的なライニングまたは外殻へと静かに退化している。

### 7.3 タングステン合金遮蔽容器と複合遮蔽材容器の比較

複合遮蔽材キャニスターとは、主に鉛-ポリエチレン、ホウ素-ポリエチレン、ガドリニウム/ホウ素含有ゴム、重コンクリート-タングステン粉末混合物、タングステン-樹脂射出成形体、そして近年登場したタングステン-ポリマー繊維積層体などのシステムを指します。これらの材料はかつて「軽量かつ多機能」という利点が期待されていましたが、実際には高水準、長寿命、そして厳格な規制が求められる状況において、固有のインターフェース問題、経年劣化メカニズム、そして不可逆的な性能劣化といった問題を抱えており、タングステン合金遮蔽材キャニスターの真の代替品としての利用は困難です。

#### 7.3.1 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶の材料組成の比較

単相のタングステン-ニッケル-鉄またはタングステン-ニッケル-銅の準二元/三元共晶系である。図。液相焼結により、連続したタングステン粒子骨格と完全に濡れたバインダー相を持つ均質で緻密な金属材料が形成されます。材料全体には、マクロ的な界面、ポリマー成分、揮発性有機化合物は含まれていません。一方、複合遮蔽材容器は、本質的に多相、マルチスケールの人工的に構築されたシステムです。高密度の無機フィラー（鉛粒子、タングステン粉末、炭化ホウ素、酸化ガドリニウム）が、ポリエチレン、エポキシ樹脂、シリコーンゴム、ポリウレタン、または特殊なフッ素樹脂マトリックスに体積比で 50%~85%分散されています。フィラーとマトリックスは、物理的混合または弱い化学結合によって結合されており、界面は常に材料の最も弱い点となります。

タングステン合金は制御性に優れ、バッチ間の一貫性が極めて高く、総不純物は医薬品グレードレベルまで低減されています。一方、複合材料では、マトリックスの劣化生成物、充填剤の凝集、可塑剤の移行、残留界面促進剤の発生が避けられません。最高級の医療グレード樹脂と超微細タングステン粉末を使用したとしても、複合システムの純度と均一性は焼結タングステン合金よりもはるかに低く、経時的に不可逆的に劣化します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.3.2 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶のシールド機構の比較

タングステン合金遮蔽容器は、連続的、均質、等方性のバルク減衰です。ガンマ線は、連続的な光電効果とコンプトン対生成を通じて、高原子番号のタングステン粒子と相互作用します。中性子は、タングステンによって減速された後、バインダー相または埋め込まれた吸収体によって効率的に捕捉されます。プロセス全体を通して、界面反射、二次放射線増強、および弱い方向性領域は発生しません。一方、複合遮蔽材料容器の遮蔽メカニズムは、層状、相分離、および不均質なカスケード減衰です。ガンマ線は、最初に高密度充填粒子内で減衰し、次に低密度有機マトリックスに入り、大量の二次電子と特性X線を生成します。中性子は、水素含有マトリックスで減速された後、界面を通過してホウ素またはガドリニウムに吸収され、大きな界面散乱と局所的な線量蓄積につながります。

充填粒子のサイズ、分布、配向には統計的な変動が不可避免的に存在するため、複合材料はマクロスケールでは依然として不均一な遮蔽を示し、局所的な弱点やホットスポットを原理的に排除することはできません。一方、タングステン合金はマイクロメートルレベルで統計的な均一性を達成し、真に「デッドゾーンのない遮蔽と変動のない減衰」を実現します。広帯域で複雑なソースタームにおいては、複合材料の二次放射や界面効果によって理論的な軽量化の利点が相殺されることがよくありますが、タングステン合金は最も単純で予測可能な純粋なバルク遮蔽挙動を一貫して維持します。

### 7.3.3 タングステン合金遮蔽容器と複合遮蔽材料容器の安定性の比較

複合遮蔽材の最も致命的な弱点は、有機マトリックスの経年劣化と界面劣化です。照射はポリマー鎖の切断、架橋、黄変、脆化、揮発性小分子の沈殿を引き起こします。高温は酸化と熱劣化を加速させ、湿熱は可塑剤の移動と加水分解を引き起こします。洗剤への繰り返し浸漬は界面結合を損傷し、充填剤の剥離を引き起こします。これらのプロセスはすべて不可逆であり、最終的には密度の低下、水素含有量の減少、充填剤の沈降、界面亀裂、そして遮蔽効果の継続的な低下をもたらします。一方、タングステン合金は完全に金属相で構成されており、ポリマーの劣化経路はありません。照射は、マクロ的な特性を変化させることなく、極めて弱い転位と空孔の増殖を引き起こすだけです。液相出現温度をはるかに下回る温度でも構造は安定しています。強い酸化と除染は、表面に数ナノメートルの不動態膜を形成するだけで、全体的な性能には影響を与えません。タングステン合金タンクの密度、強度、遮蔽効果は、数十年の使用後も工場出荷時とまったく同じままですが、複合材料タンクは5～10年以内に完全に廃棄する必要があることがよくあります。清潔さとバイオセーフティの観点から、複合材料の経年劣化後に放出される有機小分子、充填剤の粉塵、分解生成物は、クリーンルームや核医学環境で継続的な汚染源となりますが、鏡面電解研磨と医療グレードのコーティングを施すことで、タングステン合金表面は沈殿や粒子の脱落のない状態を永久に維持できます。

### 7.3.3 タングステン合金シールド缶と複合シールド材缶の応用見通しの比較

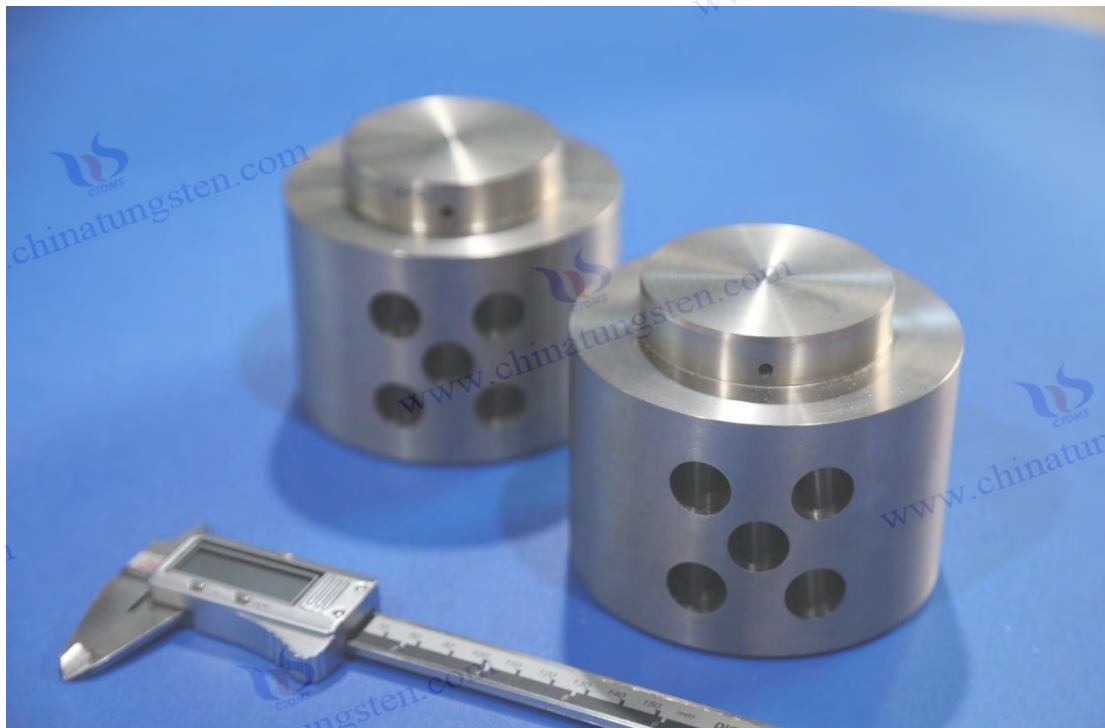
複合遮蔽材キャニスターの適用範囲は急速に縮小しており、次のような過渡的かつ要件の低いシナリオにのみ適用されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 使い捨てまたは短期輸送用フィラーブロック。
- 極めて限られた予算で作られた仮設の中性子遮蔽ドア。
- 非常に軽量のハンドヘルド検出器ハウジングが必要です。
- 補助中性子減速層またはタングステン合金容器の外側保護層として。

タングステン合金シールド容器は、ハイエンド、長寿命、厳格な規制、高クリーン度のすべての用途を完全に支配し、ミッドレンジ市場にも浸透し続けています。製造コストの漸進的な低下、ニアネットシェイプ成形プロセスの成熟、鉛とポリマー複合材料に対する世界的な規制の厳格化に伴い、複合シールド容器が独立したシールド部品として使用される時代は終わりに近づいています。次の10年間で、ごくわずかな特殊な軽量要件を除いて、複合材料はタングステン合金シールドシステムの補助充填相に完全に追いやられ、タングステン合金シールド容器は、核医学ホットチャンバーから深宇宙探査、半導体クリーンルームから高レベル放射性廃棄物貯蔵庫まで、絶対的な主流かつ究極のソリューションになるでしょう。

タングステン合金と複合遮蔽材は、均質な金属バルク相と異質な人工構造物との間の、材料科学における本質的な技術的飛躍です。歴史は、最高レベルの信頼性、長寿命、そして予測可能性が求められるあらゆる放射線防護分野において、単一で連続的かつ安定した金属相システムが最終的に優位に立つことを証明しています。複合遮蔽材容器は過渡的な役割を果たす運命にある一方、タングステン合金遮蔽容器は放射線遮蔽容器の究極の形態を体現しています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 付録:

### 付録A: 中国のタングステン合金シールド缶規格

中国のタングステン合金遮蔽容器の標準システムは、主に国家規格（GB/T シリーズ）をベースとし、業界規格（HG/T、JB/T、YY/T シリーズ）を補完し、材料組成、製造プロセス、遮蔽性能、試験方法、品質管理、環境適合要件を包括的に規制しています。これらの規格は、国家市場監督管理総局（SAMR）と原子力産業標準化技術委員会が共同で策定したもので、核医学ホットチャンバー、同位体製造施設、産業用欠陥検出装置、科学照射実験におけるタングステン合金遮蔽容器の確実な適用を確保することを目的としています。

GB/T 3458-2016「タングステン基高密度合金」は、シールド缶に使用されるタングステン合金の化学組成範囲、密度均一性、機械的特性、および微細構造要件を規定する基本規格です。特に、タングステン-ニッケル-鉄系およびタングステン-ニッケル-銅系の放射線安定性と耐食性を重視しています。GB/T 4185-2017「硬質合金用タングステン粉末」は、シールド缶専用のタングステン粉末の規格にまで拡張され、焼結後の気孔や偏析を防止するため、還元工程における純度と粒度分布の制御に重点を置いています。HG/T 2077-2017「タングステン合金製釣り用流し台の技術条件」は民生用途を対象としていますが、耐食性と表面処理に関する条項は産業用シールド缶の仕様にも採用されています。業界標準規格 JB/T 12778-2017「高密度合金耐摩耗ボールの技術条件」はシールド缶の耐摩耗性検証に適用され、YY/T 1636-2019「医療用タングステン合金コリメータの技術要件」は医療グレードのシールド缶の生体適合性と放射線減衰性能を規定しています。環境保護の観点からは、GB/T 33357-2016「タングステン合金製品における重金属移行の測定方法」が、医療機器および廃棄物一時保管におけるシールド容器の汚染リスクゼロを保証します。

これらの規格は、エンドツーエンドのトレーサビリティと第三者認証を重視しています。製造業者は ISO 9001 品質マネジメントシステム監査に合格する必要があるため、遮蔽タンクは工場出荷時にバッチレポートと性能曲線を添付する必要があります。中国の規格体系の厳格さと将来を見据えた性質は、タングステン合金遮蔽タンクに国際貿易における大きな競争優位性をもたらしています。

### 付録B タングステン合金シールド缶の国際規格

タングステン合金遮蔽容器の国際規格は、主に ASTM International と ISO が主導しており、核医学、同位体生産、産業欠陥検出、科学研究実験における遮蔽容器の相互運用性と信頼性を確保するために、世界的に統一された材料仕様、試験方法、および適用ガイドラインを提供しています。

ASTM B777-20「タングステン基高密度合金の標準仕様」は、シールド容器に使用されるタングステン合金の組成範囲、密度の均一性、引張強度、硬度、および高温性能を詳細に規定する中核規格です。ホットチャンバーや輸送容器にも適用可能です。ASTM F3049-14「タングステン合金の積層造形プロセスの仕様」は、3D プリントシールド容器にも適用され、粉末の純度と

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結密度に重点が置かれています。ISO 9001:2015「品質マネジメントシステム」は、シールド容器製造の全工程管理を確実にするための一般的な枠組みとして機能します。ISO 13485:2016「医療機器の品質マネジメントシステム」は、医療用シールド容器に適用され、生体適合性と清浄度の要件に重点が置かれています。ISO 683-17「高密度合金軸受及び工具部品の仕様」は、シールド容器の耐摩耗性検証に基づいています。これらの規格は、国際標準化機構（ISO）と米国材料試験協会（ASTM）によって維持管理されており、UL や TÜV などの第三者認証を重視し、RoHS および REACH の環境規制に準拠することで、グローバルサプライチェーンにおけるシールド容器のコンプライアンスを確保しています。国際規格の将来を見据えた性質により、レーザークラッディングやコールドスプレーなどの新興プロセスにおけるタングステン合金シールドタンクの標準化された適用が促進されています。

## 付録 C: 欧州、米国、日本、韓国およびその他の国におけるタングステン合金シールド缶の規格

欧州、米国、日本、韓国のタングステン合金遮蔽タンクは、安全性、環境保護、高信頼性を重視し、地域の規制を取り入れ、EU CE マーク、米国 ASME 規格、日本 JIS 規格、韓国 KS 規格に基づく多様なシステムを形成しています。

欧州では、CEN/CENELEC が主導的な役割を果たしています。EN 10025-6「タングステン合金構造用鋼の仕様」は、シールド容器材料にも適用範囲が拡大され、高温強度と耐食性を重視しています。EN ISO 15614-1「溶接手順の仕様」は、シールド容器のろう付けおよび接合要件を規定しています。圧力機器指令（PED）2014/68/EU に基づく EN 13445 は、高圧容器におけるシールド容器の圧力試験を規定しています。CE マーキングは、高温チャンバーおよび輸送機器におけるシールド容器の安全性と適合性を確保します。

米国では、ASME が主要な規格です。ASME BPVC セクション IX「タングステン合金溶接仕様」にはシールドタンクの完全性に関する規定が含まれています。ASME B31.3「プロセス配管仕様」には、化学洗浄中のシールドタンクの耐腐食性要件が規定されています。SAE AMS 7816「タングステン合金航空宇宙材料」は、高温安定性に重点を置いた航空宇宙グレードのシールドタンクに適用されます。

日本の JIS Z 2241「金属材料試験方法」は、シールド容器の硬度と疲労の検証を含めるように拡張され、JIS B 8363「空気圧システム仕様」は、工業用欠陥検出におけるシールド容器の流量一貫性を標準化し、日本溶接協会（JWES）のガイドラインは、レーザー加工におけるシールド容器の精度を重視しています。

韓国規格 KS D 3562「タングステン合金産業向け工具仕様」は、シールド容器の耐摩耗性要件を規定しており、KGS ガス安全規格と互換性があるため、エネルギー浄化におけるシールド容器の信頼性を確保しています。韓国試験認証院（KPC）は、シールド容器が ISO などの国際規格に準拠していることを認証しています。これらの地域規格は世界基準と高度に相互承認されており、トレーサビリティと環境保護を重視し、国際貿易におけるタングステン合金シールド缶の標準化された適用を促進します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録D タングステン合金シールド缶の用語集

中国語	説明
タングステン合金シールド缶	ガンマ線、X 線、中性子を封じ込めて減衰させるための、主にタングステンベースの高密度合金で作られた特殊な容器。
タングステン-ニッケル-鉄合金	タングステン含有量は通常 90%~97% で、この高密度合金の結合相にはニッケル鉄が使用され、高い強度とある程度の強磁性を示します。
タングステン-ニッケル-銅合金	タングステン含有量は通常 90%~95%で、ニッケル銅はバインダー相を含む高密度合金です。完全に非磁性で、耐食性に優れています。
ニアネットシェイプ	プレスおよび焼結後のブランクの寸法が、最小限の加工代で最終製品に近くなる成形プロセス。
液相焼結	バインダー相の融点よりも高い温度で焼結することで、バインダー相が溶けてタングステン粒子が濡れ、急速な緻密化が達成されます。
冷間等方圧プレス	常温の液体媒体を用いて粉末プリフォームに 360° 均一な圧力を加える成形技術。
熱間静水圧プレス	高压不活性ガス媒体下で理論密度を達成するための後処理。
お手入れが簡単なコーティング	表面エネルギーが極めて低く、接触角が大きい機能性コーティングにより、放射性汚染物質は弱いファンデルワールス力によってのみ付着し、拭き取りやすくなります。
内側の膀胱を犠牲にする	交換可能な内側のライニングは、タングステン合金本体の直接の汚染を防ぐように設計されており、飽和したら完全に取り外すことができます。
すぐに蓋を開ける	スクリューキャップ、クランプ、油圧機構により数秒以内に開閉できるキャップ構造。
迷路封鎖	多段の段差と隙間を利用して複雑な空気流路を形成することで、非接触シールを実現しています。
コリメータ	特定の方向の光線のみを通過させるタングステン合金の方向性開口構造で、欠陥の検出や処理に使用されます。
漏れ角度分布	遮蔽容器の非作動方向における放射線漏洩の方位分布は、遮蔽の完全性を評価するために使用されます。
低放射化タングステン合金	Co、Nb、Ta、Mo などの放射化しやすい元素を厳密に管理することで、極めて低い放射線レベルの長寿命核種を特別グレードで製造します。
実信号源校正	完成した缶の実際の遮蔽効果は、標準的なコバルト 60、セシウム 137、またはイリジウム 192 線源を使用して測定されました。
ヘリウム質量分析法によるリーク検出	タンクの全体的な密閉性能を検出するための最も感度の高い方法は、 $10^{-12}$ Pa・m <sup>3</sup> /s レベルに達することができます。
表面汚染拭き取り試験	容器の表面をろ紙や綿棒で拭いた後、放射能レベルを測定して汚染が移行するかどうかを判定します。
除染剤	洗浄前後の表面放射能の比率。値が高いほど洗浄が容易であることを示します。
勾配壁厚	ソースタームの空間分布に基づいて、すべてのポイントでのコンプライアンスを確保しながらタンクの重量を最小限に抑えます。

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



医療グレードのタン グステン合金	生体適合性、非磁性、再滅菌性、表面沈殿なしの要件を満たすタングステン 合金。
生涯責任印紙	製造時に缶に貼付される恒久的なマークには、製造者、年、バッチ番号、固有 のシリアル番号が含まれます。
出生証明書	タンクには、完全な製造チェーンパラメータ、テストレポート、責任声明を 含む公式文書が付属しています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶  
CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

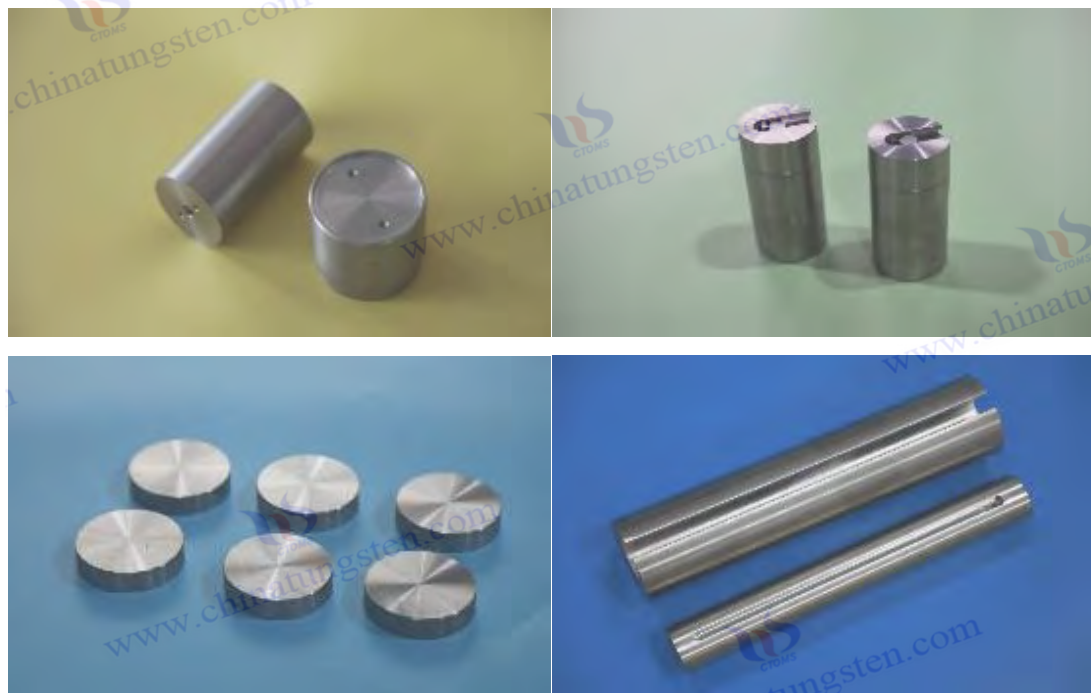
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 参考文献

### 中国語参考文献

- [1] 王晓麗、李晓傑、張鵬、他「医療用タングステン合金シールド容器の開発と性能評価[J]」中国医療機器、2023、38(6):1-6。
- [2] 陳立、趙明東、楊凡、他「核医学におけるホットセル遮蔽における高密度タングステン合金の応用[J]」原子力科学技術、2024 年、58(3):512-519。
- [3] タングステンおよび硬質合金の標準化に関する国家技術委員会. GB/T 3458-2016 タングステンベース高密度合金[S]. 北京: 中国規格出版社、2016 年。
- [4] 国家藥品監督管理局. YY/T 1636-2019 医療用タングステン合金コリメータの技術要求[S]. 北京: 中国規格出版社、2019 年。
- [5] Liu Wei, Sun Hao, Zhang Jian, et al. 高レベル放射性廃棄物遮蔽容器におけるタングステン-ニッケル-銅合金の工学的応用 [J]. 原子力科学と工学、2023、43(5): 987-994。
- [6] 趙志源、梁静、王強、他「タングステン合金放射線遮蔽材料の製造技術の研究進歩[J]」希少金属材料工学、2024、53(2):301-312。
- [7] 工業情報化部. JB/T 14258-2022 原子力グレードタングステン合金遮蔽部品の技術条件[S]. 北京: 機械工業出版社、2022 年。
- [8] Li Ming, Yang Bin, Cheng Liang, et al. タングステン合金遮蔽タンクへの易洗浄コーティングの性能に関する研究 [J]. 表面技術、2023、52(8): 156-163。
- [9] 張偉、吳浩、徐涛、他「工業用放射線探傷源タンクにおけるタングステン合金の応用と開発[J]」非破壊検査、2024 年、46(4):67-73。
- [10] 原子力標準化協会. EJ/T 1189-2021 放射性物質輸送容器用タングステン合金遮蔽材の技術要求事項 [S]. 北京: 原子力出版社、2021 年。

### 英語の参考文献

- [1] E. Lassner, WD Schubert. タングステン: その特性、化学、元素、合金、化合物の技術 [M]. ニューヨーク: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [2] RM German. タングステン重合金の焼結[J]. 国際高融点金属・硬質材料ジャーナル, 2022, 108: 105928.
- [3] ASTM B777-20. タングステン基高密度金属合金の標準仕様[S]. ウェストコンショホッケン、ペンシルバニア州: ASTM インターナショナル、2020 年。
- [4] A. ホフマン、M. ツィンメルマン「医療技術における放射線遮蔽用途のタングステン合金[J]」先端工学材料、2023 年、25(15):2300214。
- [5] IAEA. 放射性物質の安全輸送に関する規則 SSR-6、2018 年版[S]. ウィーン: 国際原子力機関、2018 年。
- [6] J. Scannapieco, P. Carconi. 高温セルおよび輸送キャスク用のタングステン系シールド[J]. 原子力工学設計, 2021, 382: 111372.
- [7] Y. Chen, L. Zhang, et al. 原子力環境におけるタングステン重合金の腐食および除染性能[J]. 腐食科学, 2024, 225: 111589.
- [8] ISO 13485:2016. 医療機器 - 品質マネジメントシステム - 規制目的の要求事項[S]. ジュネーブ: 国際標準化機構、2016 年。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

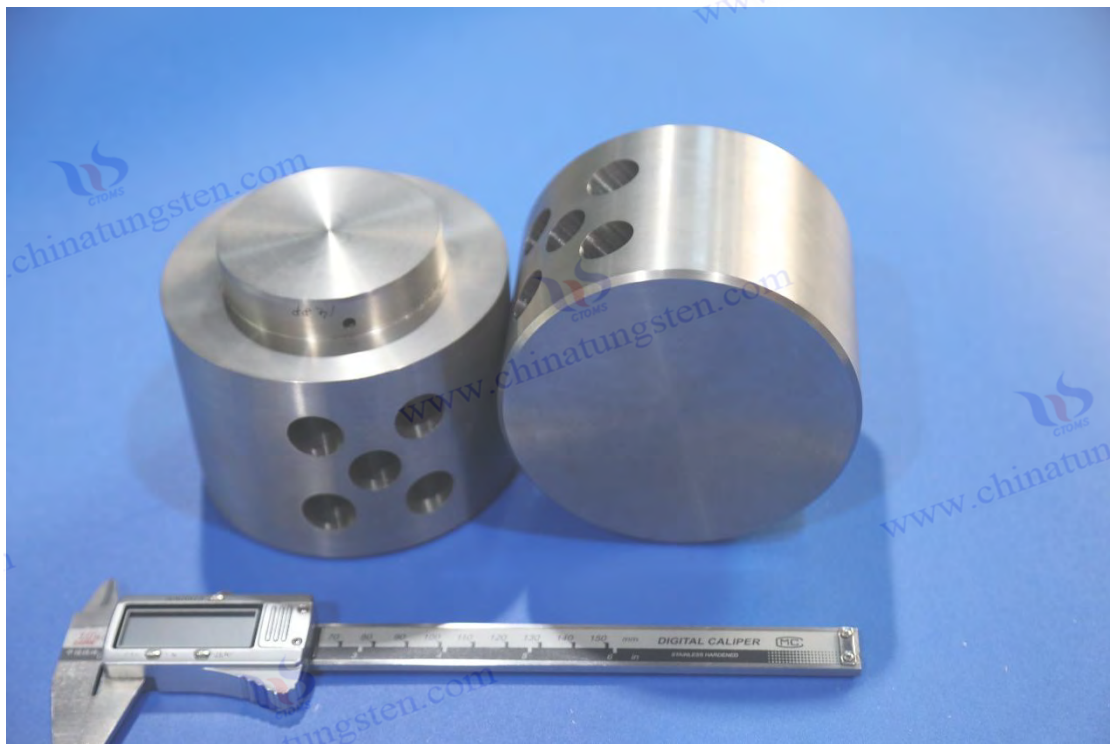
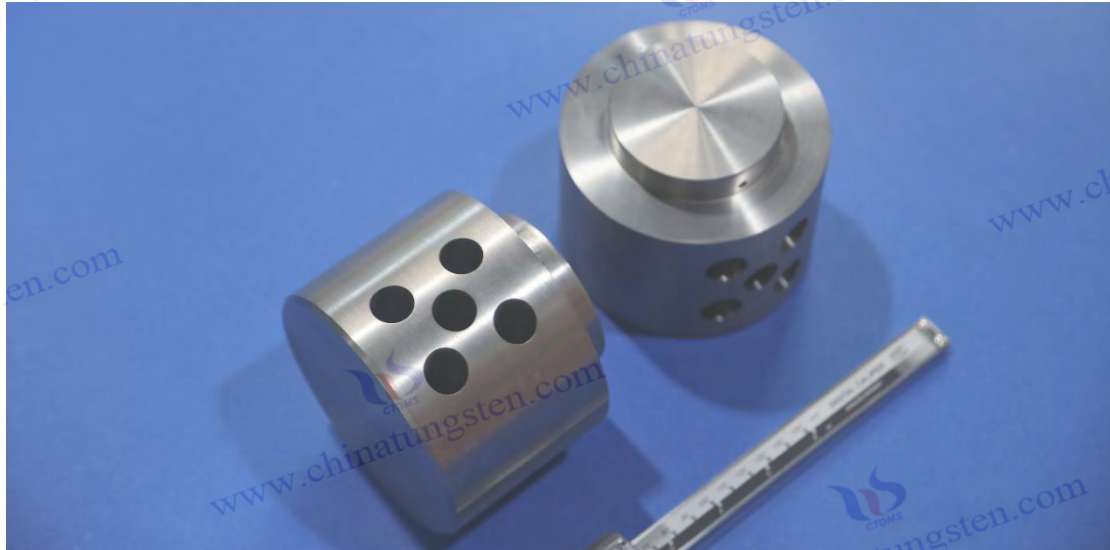
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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



[9] MA マイヤーズ、KK チャウラ「タングステン重合金の機械的挙動[J]」材料科学と工学: A、2022、845: 143198。

[10] 欧州委員会、指令 2011/65/EU (RoHS) および規則 (EC) No 1907/2006 (REACH) —タングステン合金コンプライアンス報告書[R]、ブリュッセル、2023 年。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シールド缶

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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