

付加製造技術とトポロジー最適化による BWR 制御棒落下速度リミッターの軽量設計

Method Combining Additive Manufacturing with Topology Optimization for Design of
Lightweight BWR Control Rod Velocity Limiters

BWR 制御棒落下速度リミッターの大幅な軽量化と寿命延長に 向けた新たな設計・製造手法

沸騰水型原子炉（BWR：Boiling Water Reactor）の制御棒に装着される落下速度リミッターは、スクラム（制御棒の緊急挿入）時の過度な落下速度を制限する重要部品です。制御棒の長寿命化や制御性能の向上には中性子吸収材の充填量増加が有効ですが、質量制限があるため軽量化が不可欠です。そこで、トポロジー最適化と寸法最適化を組み合わせた軽量化設計手法を開発しました。これにより、落下速度の制御特性に影響する外形形状を維持しながら、約50 %の軽量化を達成する設計が得られ、付加製造技術（Additive Manufacturing）を活用した造形試作を行いました。

背景

BWRの制御棒は、原子炉の出力調整や緊急時の停止機能を担う極めて重要な機器です。制御棒の下端に装着される落下速度リミッター（図1）は、制御棒がスクラム時に過度な速度で落下しないように落下速度を制限する役割を持ち、原子炉の安全性確保に不可欠な部品です。制御棒は、長期間にわたって安定した制御性能を維持することが求められます。また、運転期間の延長や燃料交換サイクルの最適化に伴い、制御棒の寿命延長も重要な課題となっています。これらの性能向上や寿命延長を図る手段の一つとして、中性子吸収材の充填量を増加させる方法があります。しかし、制御棒全体の質量には設計上の上限があるため、充填量を増やすには構成部品の軽量化が不可欠です。特に、従来はステンレス鋳鋼製の中実構造であった落下速度リミッターは、軽量化の余地が大きい部品と考えられます。しかし、従来の製造技術では、落下速度の制御特性に影響する外形形状を維持しながら内部を中空化することは困難であり、設計自由度の高い新たな製造技術の導入が強く期待されていました。

付加製造技術の可能性

付加製造技術は、材料を層ごとに積み重ねて形状を構築する製造技術です。例えば、PBF-LB（Powder Bed Fusion-

Laser Beam）方式では、金属パウダーを敷き詰め、レーザーで選択的に溶融・凝固させて層を形成します。従来の切削や鋳造では困難であった中空構造や複雑形状の一体造形を可能とし、設計の自由度を大きく広げます。

原子力分野でも、付加製造技術は廃番部品の再生産や、カスタム部品の迅速供給、設計自由度の拡大など、多くの課題解決手段として期待されています。特に落下速度リミッターのような特殊形状部品では、付加製造技術の適用により従来不可能であった中空化や内部骨格構造の設計が実現できます。付加製造技術の活用により、従来の製造方法では実現できなかった高付加価値製品の開発や部品供給体制の強化が図れます。更に、設計変更への柔軟な対応や少量多品種生産にも適しており、今後の原子力機器設計・製造のあり方を大きく変革する可能性を秘めています。

軽量化設計のアプローチ

付加製造技術の設計自由度の高さを最大限に活用し、落下速度リミッターの外形を維持しながら内部を中空化する方針で軽量化を検討しました。まず、有限要素法（FEM）を用いたトポロジー最適化により、設計領域内の不要部分を除去し、必要最小限の内部骨格構造を抽出しました。トポロジー最適化では、設計領域を小要素に分割し、各要素の密度を設計変数として最適な材料分布を算出します。これにより、応力の低い領域を除去し、構造的に重要な骨格

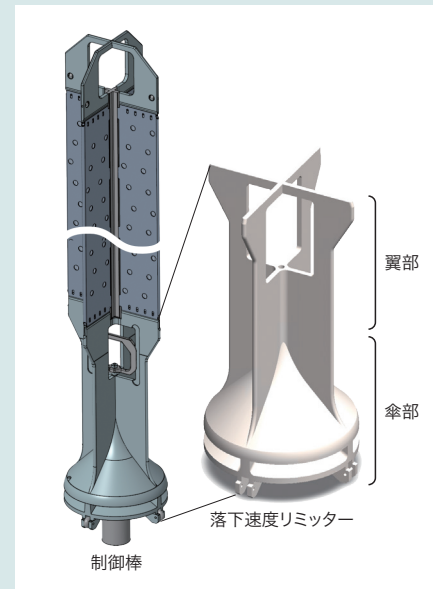


図1. 落下速度リミッターの外観

制御棒の下端に装着されていて、翼部（上半分の薄板がクロスしている領域）と傘部（下半分の二重円錐（えんすい）部分）から成っています。

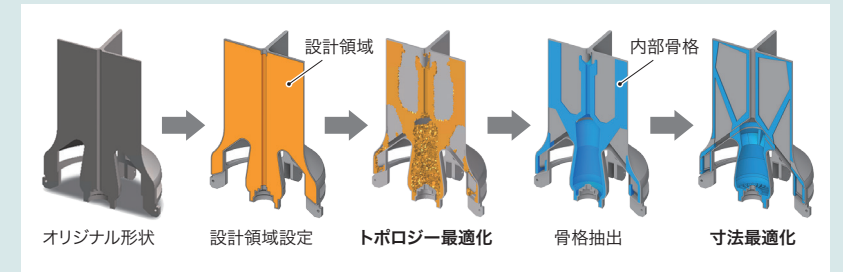


図2. 落下速度リミッターの軽量化設計の流れ

内部を中空化することで、外形形状を維持しながら、約50 %の軽量化ができました。

だけを残せます。次に、造形性や後加工性を考慮し、骨格構造の形状修正やパウダー除去経路の追加を行いました。更に、抽出した骨格構造に対して寸法最適化を実施し、必要な強度・剛性を確保しながら質量を最小化しました。このとき、国内プラントのノーバッファースクラム^(注)条件及び地震時スクラム条件を考慮し、外形形状の維持を制約条件としました。

これらの一連の設計プロセス（図2）により、従来の外形形状を維持しながら、約50 %の軽量化を達成する見込みを得ました。また、最適化後の形状は、造形性や後加工性を考慮し、オーバーハング部の角度調整やパウダー除去用の穴設置など、実際の製造工程を見据えた修正も加えました。

試作と課題

軽量化設計に基づき、PBF-LB方式による試作を実施しました。使用材料はType316Lステンレス鋼で、造形領域やパウダー供給量の制約から、上半分の翼部と下半分の傘部の2分割構造とし、造形後に内部パウダー除去用の穴を設けました。翼部の造形には約36時間、傘部には約110時間を要しました。試作体は構造崩壊なく目標形状を達成し、内部中空構造も設計どおり形成されていることを確認しました。FEM解析の結果、ノーバッファースクラム条件下で

（注） 機械的なブレーキ機能が喪失した状態でのスクラム。

は翼部が垂直方向に変形し、最大応力は許容応力の95 %以内に収まりました。地震時スクラム条件下では傘部が斜め方向に変形し、最大応力は許容応力の97 %以内となり、いずれも十分な強度を持つことが確認されました。

ただし、部分的に粗い表面が観察され、今後はショットブラストや研磨などの後処理による表面品質向上が必要です。また、より大規模な造形装置を用いた一体造形や、溶接性の検証も今後の課題です。更に、付加製造技術の造形欠陥や寸法精度など、今回の試作により、実用化に向けて解決すべき技術課題も明らかになりました。

今後の展望

付加製造技術と最適化設計を組み合わせることで、BWR制御棒の落下速度リミッターの大幅な軽量化と性能維持が可能であることを示しました。今後は、より大規模な造形装置を用いた一体造形や、溶接性・表面品質の向上、材料特性の検証など、実用化に向けた課題の解決を進めます。

設計・製造・評価の各段階でのデジタル連携やAIを活用した最適化設計の高度化を更に進めることで、原子力機器の高性能化・高信頼化に貢献していきます。

甚目 靖明

総合研究所 生産技術センター 機械構造・製造技術研究部
日本原子力学会会員