

エコプロダクトによる風力発電の安定稼働への貢献とそのCO₂削減貢献量の定量化

The Contribution of Eco-Product to the Stable Operation for Wind Turbines and Quantitative Assessment of its Contribution to CO₂ Emission Reduction

福島 利保*¹ 濱野 利幸*²

FUKUSHIMA Toshiho and HAMANO Toshiyuki

1. はじめに

近年、地球温暖化防止策としてカーボンニュートラル社会の実現を目指す動きが世界的に加速し、具体的な方策・目標が表明されている。鉄鋼業界ではその実現に向け製鋼工程、圧延工程、熱処理工程等で発生するCO₂排出量削減の取組みが始まっている。

当社は2050年カーボンニュートラルの実現に向けたロードマップを策定・公表した¹⁾。当社はCO₂排出量を2030年度までに50%以上(2013年度比)の削減、2050年度カーボンニュートラル(実質ゼロ)を目標としている。その実現に向け、当社では自社の製造工程におけるエネルギー効率を高める「エコプロセス」やカーボンフリー電力等の「グリーンエネルギー活用」だけでなく、製品を使用する段階でCO₂排出削減に貢献する商品やお客様のエコプロセスに貢献する商品である「エコプロダクト」等、ライフサイクル全体でCO₂排出量削減を推進している。カーボンニュートラルに貢献するエコプロダクトの一例としては自動車EV化に伴う小型・軽量化や静粛性を重視した軸受、陸上・洋上を含む大型の風力発電用軸受等が挙げられる。これらの軸受の長寿命化による故障低減・メンテナンスフリー化や自動車部品等の耐久性向上による小型・軽量化に貢献する鋼材・ソリューションの研究・開発等を推進している。

風力発電増速機用軸受鋼は、当社の高清浄度技術を活かし、軸受の長寿命化を実現したエコプロダクトであり、風力発電の安定稼働を通じてCO₂排出量削減への貢献が見込まれる。本報告ではエコプロダクトによるCO₂排出削減貢献量を具体的かつ定量的に可視化することを目的とし、算定ロジック及び算定評価した結果について報告する。

算定は従来材(ベースライン材)と高機能材とのライフサイクル全体でのCO₂排出量の差を比較することによって行った。定量的に評価するためには評価の前提条件を明確にし、使用する数値の出所も明確にする必要がある。そこで本算出にはあたっては文献等の公知データや当社のファクトデータ(実測値)を使用した。

2. CO₂削減の観点からみた風力発電の重要性について

風力発電は再生可能エネルギーの主力としてさらなる拡大が予想されている。特に洋上風力発電は陸上に比べて安定的に風力を確保し易い点や、大型の風力発電設備が設置し易い点等から、設置の増加が見込まれている。

また洋上風力発電機は近年サイズが大型化する傾向であり、Fig. 1に示すように2010年に商用化された3MWクラスで全高100m超え、2016年の8MWクラスで全高180m超え、近年開発が進められている12MWクラスでは全高260mを超えるサイズとなる²⁾。

風力発電機の概略構造はFig. 2に示すようにブレード・

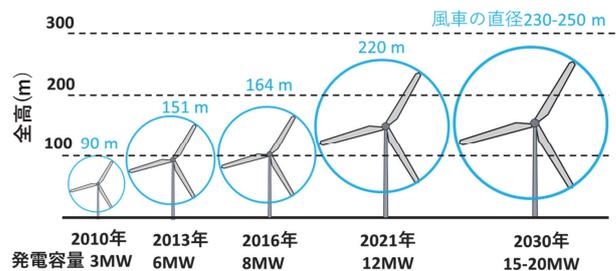


Fig. 1 洋上風力発電用の風車最大サイズ推移 (IEA)²⁾

*1 研究・開発センター 研究開発企画室 企画グループ

*2 研究・開発センター 研究開発企画室 企画グループ長

ハブ・ナセル・タワーといった部品から構成され、いずれも大型の部品である。ナセル（保護カバー）内には、ギアを用いてブレードの回転を発電に必要な回転数まで増幅させる増速機、その回転を電力に変換する発電機、風速が強すぎる場合に回転を停止するブレーキシステム、ナセルを風に正対させ風の効率を最適に保つヨーシステム等が格納されている。最近では増速機が無いダイレクトドライブ式の風力発電機も登場しているが、本報では増速機を有するタイプの風力発電機について、増速機用を対象とした軸受鋼について紹介する。

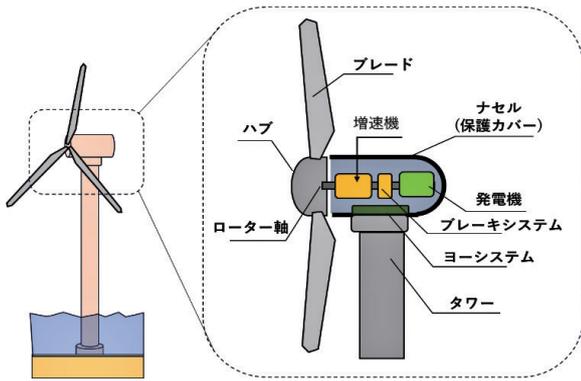


Fig. 2 風力発電機の構造模式図

3. エコプロダクト（風力発電増速機用軸受鋼）について

洋上風力発電は設置場所が洋上かつ高所であることによるメンテナンスの困難さが課題であり、その安定稼働による故障率の低減、メンテナンスフリー化が強く望まれる。風力発電機に使用される軸受用鋼材に対しては、これらの課題をクリアするために一般鋼材以上の高い信頼性が求められ、それに応える高機能が要求される。

3.1 風力発電増速機用軸受鋼に要求される課題

1) 故障率とダウンタイム

風力発電機の増速機の全体に占める故障率は調査実績³⁾によると約3%とわずかである。しかしながら、風発1基当たりの故障・不具合による平均ダウンタイム（設備の稼働停止期間）が約30日であるのに対し、増速機の故障によるダウンタイムは、部品の製造、調達、輸送等に長期の期間が必要であることから、平均で約170日を要する。さらに増速機の故障原因の調査結果から、その原因のほとんどが軸受に起因することが分かっている。

これらの故障状況の調査の結果に基づくと、風力発電の安定稼働には風力発電増速機用軸受の短寿命回避が特に重要であることがうかがえる。

2) 故障時の代替電源とそれによるCO₂排出

風力発電機において増速機が故障し発電が停止した場合、その停止期間中は、他の方法での代替発電によるバックアップが必要となり、国内の場合は主に火力発電による代替発電が行われる。Fig. 3は各電源別のライフサイクルCO₂排出量を示したものである。風力発電のCO₂排出は、火力発電のCO₂排出量より低いため、風力発電機が故障し代替電源が使用されれば、その期間はより多くのCO₂排出が生じることになる。

風力発電機における増速機の故障は、長期ダウンタイムの発生とダウンタイム中の火力を主体とする代替電源発電時のCO₂排出量の増加に影響を及ぼすと考えられる。各電源別のライフサイクルCO₂排出量の調査結果からも風力発電増速機用軸受鋼の長寿命化は風力発電の安定稼働において重要性が高い課題である。

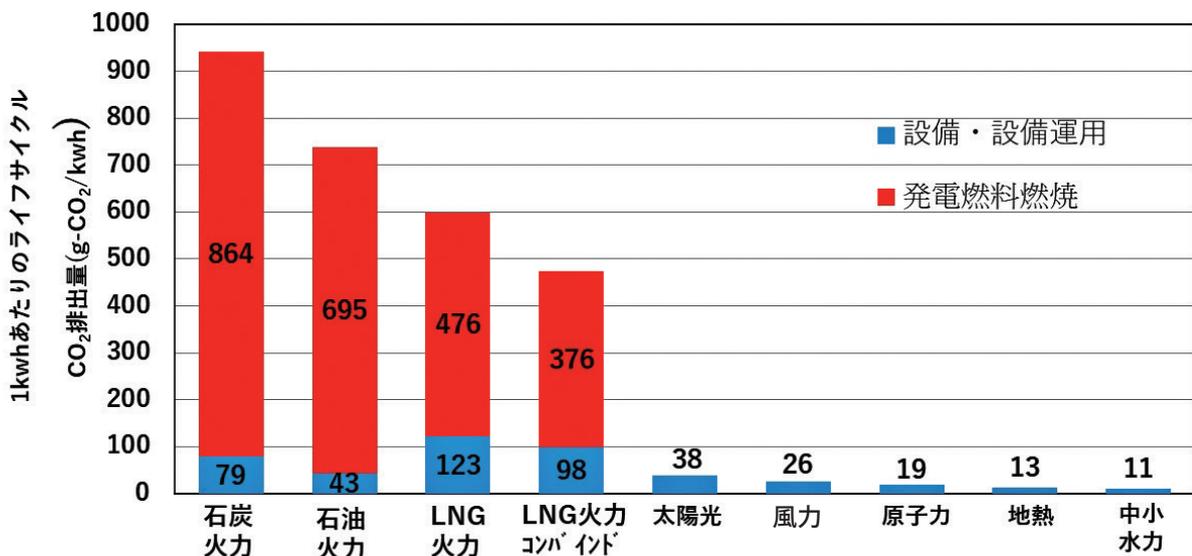
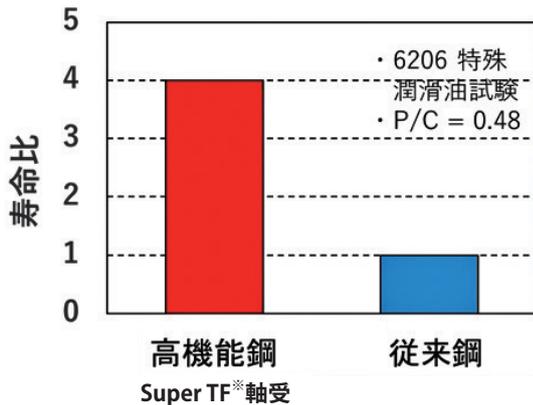


Fig. 3 各電源別のライフサイクルCO₂排出量⁴⁾

3.2 エコプロダクト（風力発電増速機用軸受鋼）による貢献

風力発電増速機用軸受は設備の稼働期間中ブレードの回転に必要な回転数に増速するために回転し続けることから、転がり疲れに対する耐性を増して長寿命化することが設備の安定稼働に欠かせない課題である。当社は軸受の疲労破壊の起点となる非金属介在物を極限まで低減させる超高清浄化技術を確立しており、さらにお客様における特殊熱処理（Super-TF[※]）を組み合わせることにより、大幅な長寿命化を実現した。Fig. 4 に軸受鋼に特殊熱処理を組合わせた高機能鋼と従来鋼との寿命比を示す通り、軸受寿命比で約4倍もの長寿命化を達成している。



※「Super TF」は、日本精工株式会社殿の登録商標であり、特殊環境下における軸受を長寿命化する熱処理技術です。

Fig. 4 高機能鋼と従来鋼の転がり疲れ寿命比較⁵⁾

3.3 エコプロダクト（風力発電増速機用軸受鋼）の適用効果

現状の風力発電機の定格寿命は一般に20年程度とされている。増速機についてはその運転開始から経過年数と故障率の間に Fig. 5 に示す関係が提示されており、稼働初期4年目以降に故障率の増加（主に軸受損傷が原因）が認められる。他の国内レポートにおいても9年目以降の故障率は増加傾向にあり、メンテナンス頻度が増加していることが報告されている。このように風力発電機が期待される寿命を満たせていない場合があることが現状では見て取れる。

対して、風力発電機の増速機の軸受にお客様での特殊熱処理を組み合わせた当社高機能鋼を使用した場合、その材料特性である長寿命化（Fig.4、従来比で寿命4倍）と、運転開始から増速機の故障までの経過年数の関係（Fig. 5）から、増速機における軸受に起因する故障率は定格寿命20年内でゼロにすることが可能と考えられる。

この長寿命化効果によって故障発生が抑止されることで、従来鋼使用の場合の故障時に発生しうる代替発電に伴う多量のCO₂排出削減が可能になると考えられる。

エコプロダクトとしての風力発電機増速機用軸受は超高清浄化技術および特殊熱処理を適用してその長寿命化を図っ

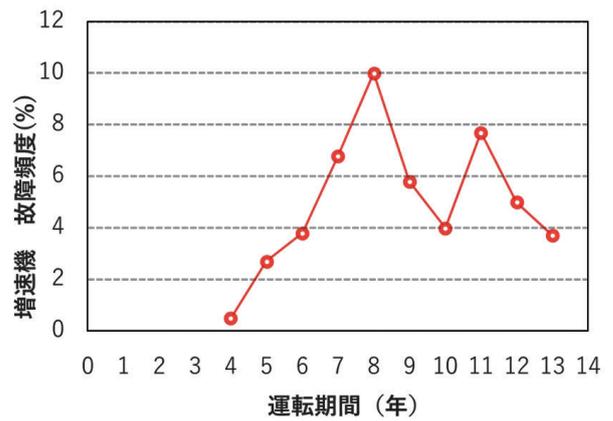


Fig. 5 故障率と経過年数の関係⁶⁾

たことにより、風力発電設備（増速機）の安定稼働、メンテナンスフリーの実現だけでなくCO₂排出量の削減にも貢献可能な材料である。

以降では、この風力発電増速機用軸受鋼を使用して風力発電の安定稼働を実施した際に得られるCO₂削減貢献量を以下に示すシナリオ比較により定量的評価した事例を報告する。

4. シナリオ比較によるCO₂排出量の定量評価

4.1 シナリオ比較の考え方

一般的にはエコプロダクトはライフサイクルの各過程での環境負荷を少なくする等により、環境に配慮した製品やサービスを指すが、当社では「部品加工段階もしくは最終製品使用段階、あるいはその双方においてCO₂削減に貢献する高機能鋼材」をエコプロダクトと定義し、日本鉄鋼連盟の「高機能鋼材の使用段階における削減量の評価について」⁷⁾に沿って削減貢献量の評価を実施した。その概要は従来鋼を使用する工程をベースラインシナリオ、エコプロダクト（高機能材）をその代替として適用した工程を仮想シナリオと設定し、両シナリオで想定されるCO₂排出量を比較し各シナリオによる差を定量的に評価する手法である。製品の各段階におけるライフサイクルを考慮した際に、エコプロダクト適用によるCO₂排出量の変化が想定される工程としては、Fig. 6のようにA：素材製造、B：部品加工、C：輸送・組立、D：製品使用時が挙げられ、Aは鋼材メーカーでの社内工程、B以降は顧客での工程となる。

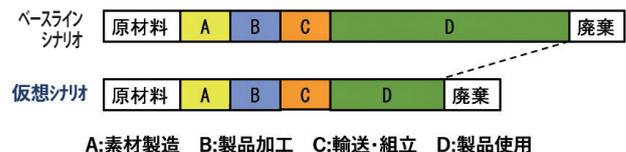


Fig. 6 シナリオ概要イメージ

今回は、A～Cの工程でのCO₂排出量は従来鋼と高機能鋼ではほぼ同等とし、Dの製品使用時にのみCO₂排出量に変化が生じるとして、その変化量を定量評価し、その差分をエコプロダクト（高機能材）のCO₂削減貢献量として算出した。なお、社外に対して客観性のある貢献量を提示するため、算出にあたっては文献等の「公知データ」と「当社のファクトデータ」に基づいた数値を使用した。

4.2 エコプロダクトのCO₂削減貢献量の定義

風力発電は発電時にCO₂をほとんど排出しないグリーンなエネルギーであるため、通常発電時のCO₂発生量はわずかであるが、故障で設備が停止すれば、火力発電等の代替電源での発電が必要となり、その代替発電時には多くのCO₂が排出される。

そこで、従来鋼を使用した風力発電増速機にて、故障発生に伴い代替発電が生じる場合をベースラインシナリオとし、高機能材である当社高機能鋼を使用することで、従来鋼使用時の増速機の故障がゼロになり、CO₂排出が多い代替方式による発電が不要となる場合を仮想シナリオとしてシナリオ構築を行った。

その結果、Fig. 7に示すように高機能鋼使用によるCO₂削減貢献量は、ベースラインシナリオの代替発電時に発生するCO₂排出総量に等しいと考えることができる。

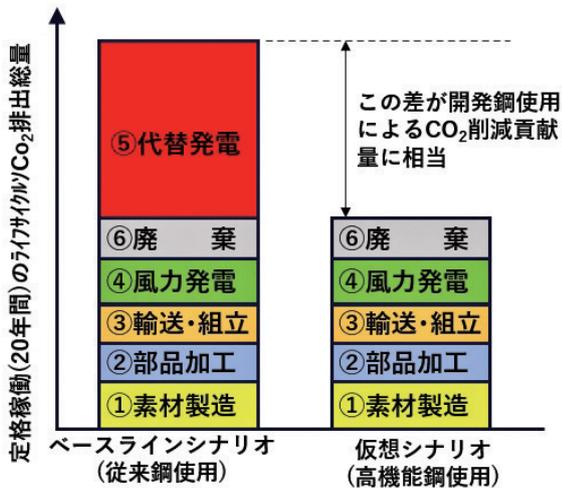


Fig. 7 ベースシナリオと仮想シナリオのライフサイクルCO₂排出総量の比較

4.3 CO₂削減貢献量の算出条件

高機能鋼使用によるCO₂削減貢献量の算出を行うにあたって、以下の前提条件を適用した。

- ・対象部品：風力発電機増速機用軸受
- ・対象鋼種：風力発電増速機用軸受鋼（当社材）
- ・期待効果：軸受長寿命化による増速機の故障率低減
→故障期間中の火力発電をベースとした代替発電にて排出されるCO₂の削減が可能と想定

- ・算出方法：故障期間中の代替発電によって排出されるCO₂量を算出
→風力発電増速機用軸受鋼（当社材）使用により風力発電機が安定稼働することで代替発電が不要となることを想定
- ・算出対象：日本国内で稼働する風力発電機（定格寿命 20 年）
- ・使用データ：公知文献、ファクトデータ（当社データ含む）

4.4 算出式とそのパラメーター

高機能鋼使用による年間CO₂削減貢献量 (t-CO₂/年) は、前述の通りベースラインシナリオにおける代替発電時に発生するCO₂排出総量に等しいと考えることができ、その量は (A) 高機能鋼使用により代替発電が抑止された風力発電基数と、(B) 風力発電 1 基当たりの代替発電時のCO₂排出量 (t-CO₂/基) の積として以下の〔1 式〕にて算出される。

〔高機能鋼使用によるCO₂削減貢献量 (t-CO₂/年)〕

$$= (A) \text{ [1 年間に高機能鋼が使用された風力発電基数 (基/年)]} \\ \times (B) \text{ [ベースラインシナリオの代替発電時のCO}_2 \text{ 排出量 (t-CO}_2 \text{/基)]} \cdots \text{〔(1) 式〕}$$

$$= (a) \text{ 高機能鋼年間販売量 (t/年)} \div (b) \text{ 高機能鋼使用量 (t/基)}$$

$$\times (c) \text{ 平均発電容量 (KW/基)}$$

$$\times (d) \text{ 設備利用率 (\%)}$$

$$\times (e) \text{ 増速機故障時のダウンタイム (h)}$$

$$\times (f) \text{ 軸受起因の増速機故障率 (\%)}$$

$$\times (g) \text{ 国内エネルギーミックス排出係数 - 風発排出係数 (t-CO}_2 \text{/kWh)}$$

$$(a) \text{ 高機能鋼販売量 (t/年)} \cdots \text{【当社ファクトデータ】}$$

当社が 2021 年度に販売した高機能鋼の量。

$$(b) \text{ 高機能鋼使用量 (t/基)} \text{【顧客から得た概略値】}$$

風力発電設備 1 基の増速機に使用される軸受鋼の量。

$$(c) \text{ 平均発電容量} \cdots 1,780 \text{ (KW/基)}$$

風力発電設備 1 基当たりの発電容量。

2021 年 12 月末時点、設置基数 2574 基⁸⁾

総容量 4581MW⁹⁾

$$(d) \text{ 設備利用率} \cdots 23.9 \text{ (\%)} \text{ } ^{9)}$$

風力発電設備を定格出力で運転を続けた発電電力量に対して、実際に発電した電力量の割合。

$$(e) \text{ ダウンタイム} \cdots 4,080 \text{ (h)} \text{ } ^{10)}$$

増速機起因の故障による風力発電設備の平均停止日数。

$$(f) \text{ 故障率 (\%)} \cdots 3.0 \text{ (\%)} \text{ } ^{10)}$$

全コンポーネントに占める増速機の故障率

(g) CO₂ 排出係数 (t-CO₂/kWh)

代替発電のCO₂ 排出係数は、国内における火力発電等の各種発電方式を合わせて供給する電力をまかなう発電方法であるエネルギーミックス (E.M.) の考え方をを用いて、国内の電源構成割合¹¹⁾と各電源の電力供給量 1kWh 当たりのCO₂ 排出量¹²⁾に基づいて算出した。各電源のCO₂ 排出量には、ライフサイクルを考慮して、発電時の燃料燃焼時だけでなく、設備の設置・運用時のCO₂ 排出量も含まれている。

4.5 算出結果

高機能材 (風力発電増速機用軸受鋼) による風力発電の安定稼働によるCO₂ 排出削減貢献量を (1) 式を用い、文献等の公知データや当社ファクトデータに基づいて算定した結果、約 1.5 万 (t-CO₂/年)¹³⁾であった。

なお、算定においては日本国内の電源構成や、風力発電故障時には火力を中心とした電源が速やかにバックアップとして稼働すること等を前提とした。

5. おわりに

エコプロダクトである風力発電増速機用軸受鋼を対象に、CO₂ 排出削減貢献量の算出を行った。算出にあたり、「一般風力発電増速機用軸受」と「顧客における特殊熱処理を組み合わせた当社風力発電増速機用軸受 (当社高清浄技術を適用)」とのライフサイクル全体でシナリオを比較する手法を用いた。算出に必要なデータは公知文献や当社のファクト数値を用い、国内エネルギーミックス等の前提で定量的なCO₂ 排出削減貢献量は約 1.5 万 (t-CO₂/年)¹³⁾であった。

当社は、カーボンニュートラル社会の実現に向けて社内の製造工程で発生するCO₂ 量削減だけでなく、エコプロダクトを通じた製品ライフサイクル全体でのCO₂ 削減への貢献を目指し、研究・開発を推進して参ります。

6. 参考文献

- 1) 山陽特殊製鋼レポート 2021
- 2) IEA, Offshore Wind Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report, Figure 3, (2019) , 20
- 3) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：風力等自然エネルギー自衛研究開発風力発電高度化研究開発スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (リスク解析等) , (2018)
- 4) 日本原子力文化財団 原子力・エネルギー図案集 「【2-1-9】種電源別のライフサイクルCO₂ 排出量」
- 5) K. L. Lee, NSK Technical Journal, No.691,

- (2019) , 19-27
- 6) 田中和宏, 足立慎一, 宗像明彦, 飯田誠 風力エネルギー利用シンポジウム 37 巻 (2015) , 381-384
- 7) 一般社団法人日本鉄鋼連盟, 高機能鋼材の使用段階における削減貢献量の評価について, (2017)
- 8) 一般社団法人日本風力発電協会, 2021 年末日本の風力発電の累積導入量, 入手先 <<https://jwpa.jp/information/6225/>>
- 9) 経済産業省, 風力発電競争力強化研究会報告書, (2016) , 12
- 10) テロイトトーマツコンサルティング共同 風力発電業界の構造調査 (2018 年 3 月 16 日)
- 11) 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計 エネルギー需給実績 2018, 参考 4, (2018)
- 12) 関西電力：原子力発電について エネルギー問題と原子力, 入手先 <https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_poWer/noWenergy/need.html>, (参照 2022-8-1)
- 13) HAMANO Toshiyuki and FUKUSHIMA Toshiho, Contribution from Materials to the Stable Operation of Bearings in Wind Turbine Gearboxes, 28th IFHTSE 2023