

自動車用燃料電池市場におけるePTFE強化固体高分子電解質膜 (PEM) の役割

はじめに

水素は未来のクリーンエネルギー社会を切り開く鍵であり、化石燃料からより持続可能で低炭素なグローバルエネルギーの未来へ移行する上で重要な役割を担っています。

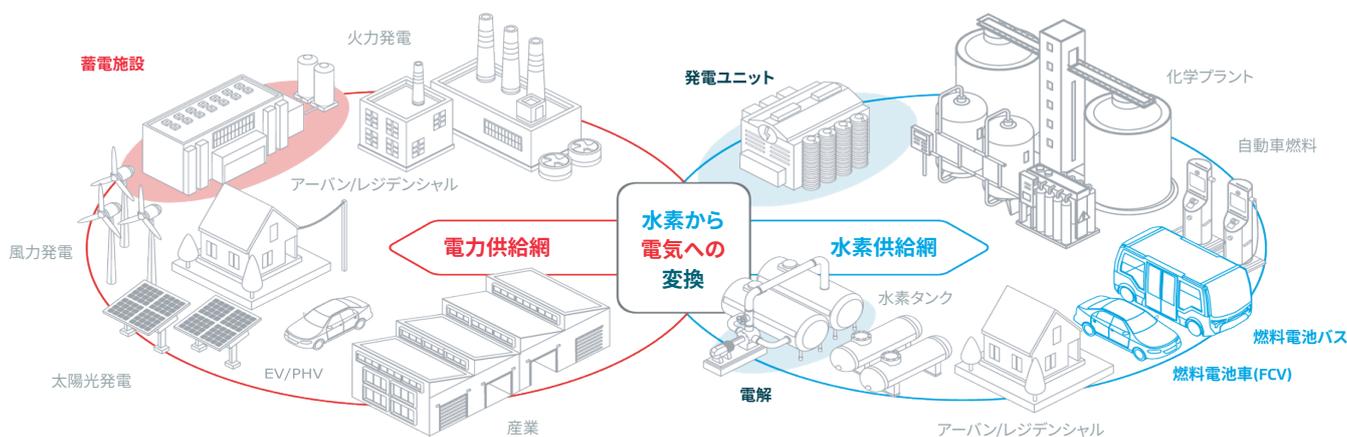
そして、水素エネルギーの導入・商業化において大きな役割を果たすのが、運輸セクターです。乗用車・商用車から陸・海・空の長距離輸送に至るまで、運輸分野における水素の活用が水素経済の成長を牽引しています。

水素から電気への変換において立役者を務めるのが、燃料電池技術です。燃料電池技術にはいくつか種類があります

が、数十年にわたる開発の結果、プロトン交換膜 (PEM) 燃料電池が自動車・運輸セクターをリードするようになりました。

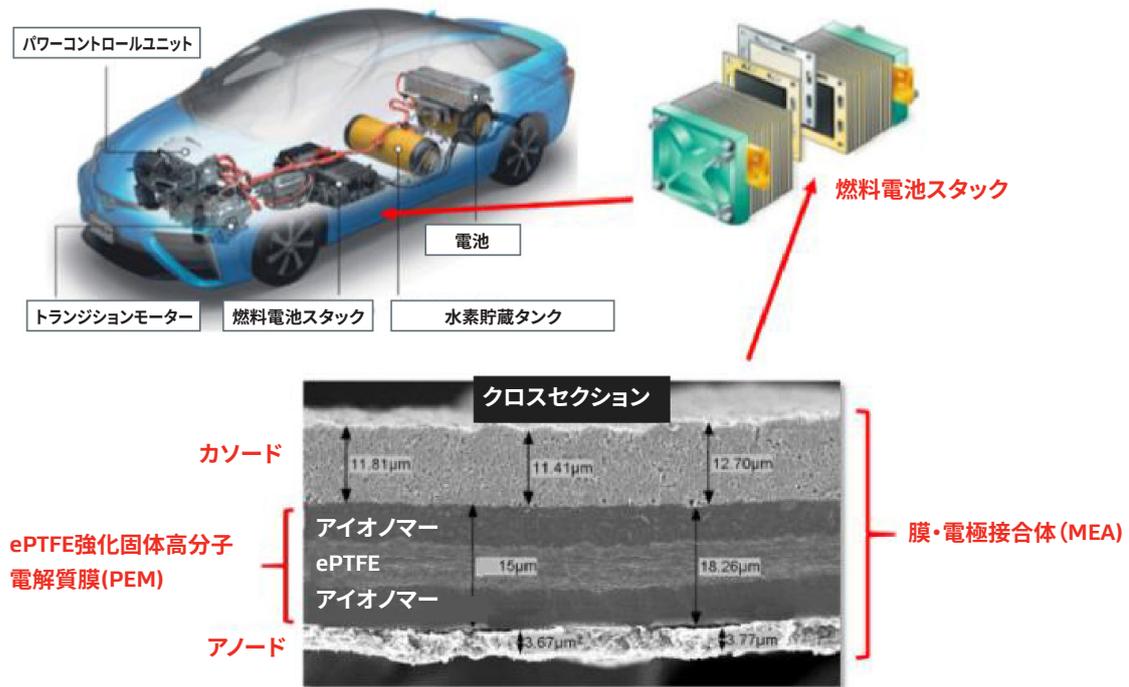
PEMは、アルカリ型や直接メタノール型、リン酸型などの燃料電池と比べて、高電力密度・軽量・低体積が特徴です。

図1:水素—電力変換^a



a. Fueling The Future Of Mobility, Deloitte China, 2022, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

図2: 燃料電池スタックの中心を占めるMEA

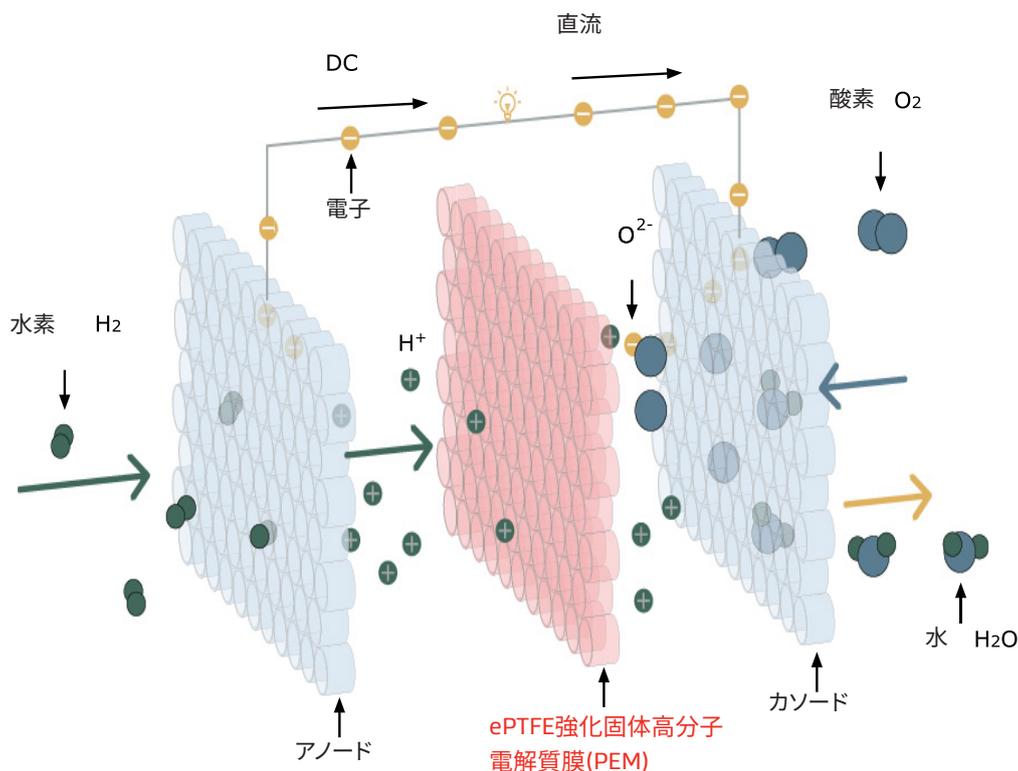


燃料電池スタックは、スタックの出力に応じて数百もの膜・電極接合体 (MEA) で構成されています。各MEAは、PEMの両側にあるアノードとカソードという電極から成ります。MEAは燃料電池の心臓部であり、燃料を電気化学的に電気エネルギーに変換する役割を担います。

燃料電池の実際の動作では、水素燃料はセルのアノード側から入り、アノード触媒と反応してプロトンと電子に分離されます。次に、プロトンはイオン伝導性を持つPEMを通してカソード側で触媒の力で酸素と結びつき、水を生成します。電子は膜を通過できないため、燃料電池から流れて電流となり、電気を発生させます (図3)。

PEMの性能は、スタックやシステムの設計や、PEMの動作環境に大きく左右されます。しかしながら、PEMは燃料電池のコア部品であり、PEMは燃料電池自動車の普及を前進させ、ひいてはクリーンエネルギーへの世界的な転換を後押ししているのです。

図3:MEAの心臓部であるePTFE強化PEM



自動車用燃料電池市場におけるPEMの要件

CO₂排出量ゼロ、長い航続距離(約480~640km)、短い燃料補給時間(3~5分)といった特徴を持つ燃料電池電気自動車(FCEV)は、未来の輸送手段の有力な候補です。

しかし、FCEVがポテンシャルを最大限に発揮するには、商業的に成立するだけでなく、確立した技術でスケールメリットを持つ従来型の内燃機関に対して確かな競争力を有する必要があります。

自動車産業におけるPEM技術の大規模導入を実現するには、以下の3つのカテゴリにおいてメーカー側の要求に応える必要があります。

1. 性能
2. 信頼性
3. コスト

これら3つは相互に依存しているため、このうち1つの変化が他カテゴリのトレードオフを招くことがあります。

性能

このカテゴリーは、様々な動作環境下（相対湿度[RH]、温度、デューティサイクル等）での燃料電池スタックにおけるPEMの働きについて、その基本的特性を表したものです。

プロトン伝導性と電力密度

電力密度は、燃料電池自動車の性能を大きく左右します。その電力密度に影響を与える要素のひとつが、PEMのプロトン伝導性です。逆にいえば、プロトン輸送に対する抵抗の大小が、スタックやシステム全体の効率性を決定づけているのです。

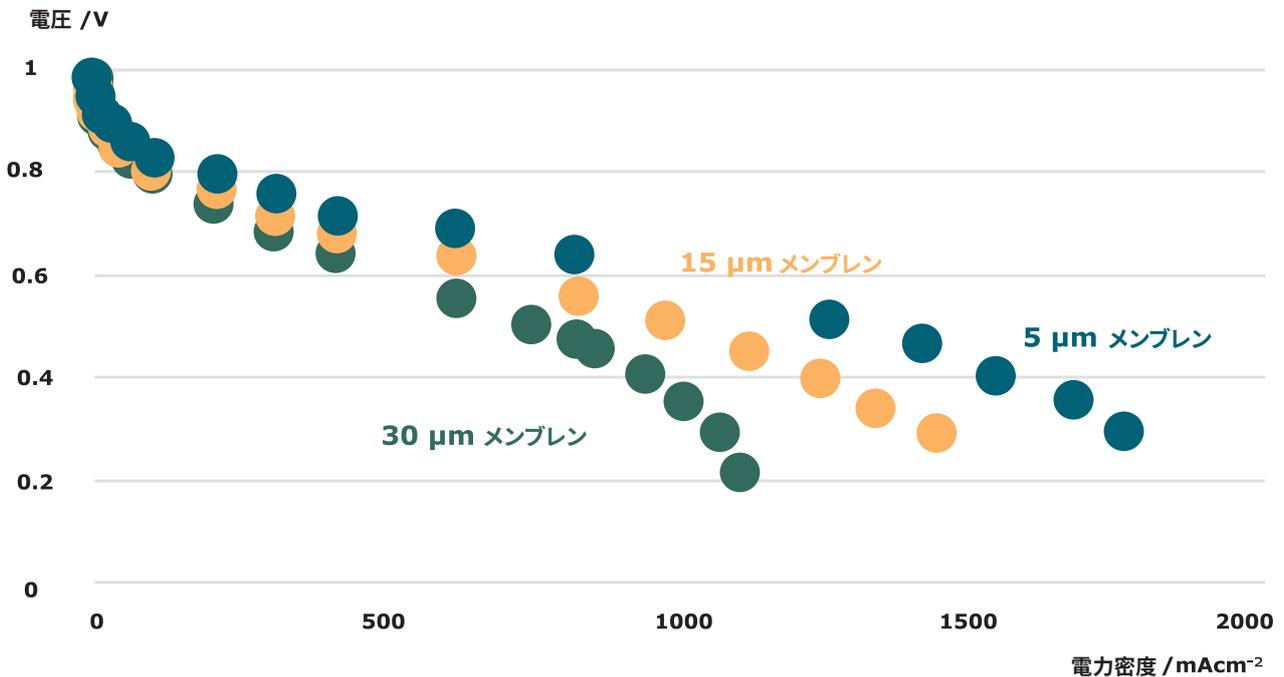
プロトン伝導性は、使用されているアイオノマーの種類や、メンブレン（膜）の補強構造、PEM自体の厚みなどによって変化します。

また、これらの要素はPEMの水輸送速度にも影響します。例えば、薄膜のPEMではプロトン抵抗が小さくなるため、電力密度は高くなります。さらに、薄型のメンブレンは水輸送にも優れるため、低相対湿度下で高い性能を発揮します。

しかし、メンブレンの薄膜化は、ガスクロスオーバーを増大し機械的耐久性を下げるためトレードオフになり、長期的には性能に悪影響を及ぼすとされてきました。

このトレードオフを大幅に抑制するソリューションのひとつが、延伸ポリテトラフルオロエチレンメンブレン（ePTFE）によるPEMの強化です。数十年にわたる開発活動の成果により、ゴアのePTFE強化複合膜技術は、過酷な動作環境下であっても、長期にわたるPEMのライフサイクルを向上させ高い性能を実現してきました。

図4：高い電流密度出力



業界のコスト低減や性能要求水準が高まるなか、より高い電力密度と耐久性を備えつつ性能面のトレードオフを抑えた、薄型で強力なPEMの研究開発に注力すべきだと考えています。

また、以下で述べるように、開発・設計においては、他の特性を考慮することも重要となります。

耐久性

実際の環境における燃料電池の耐久性も、FCEVの性能を左右する重要な要因のひとつです。米国エネルギー省 (DOE) は、現実的な運転条件下での製品寿命の目標値を5,000時間(約24万km)に定めています。

この目標を達成するには、PEMの設計において以下の2種類の耐久性を考慮する必要があります。

機械的耐久性

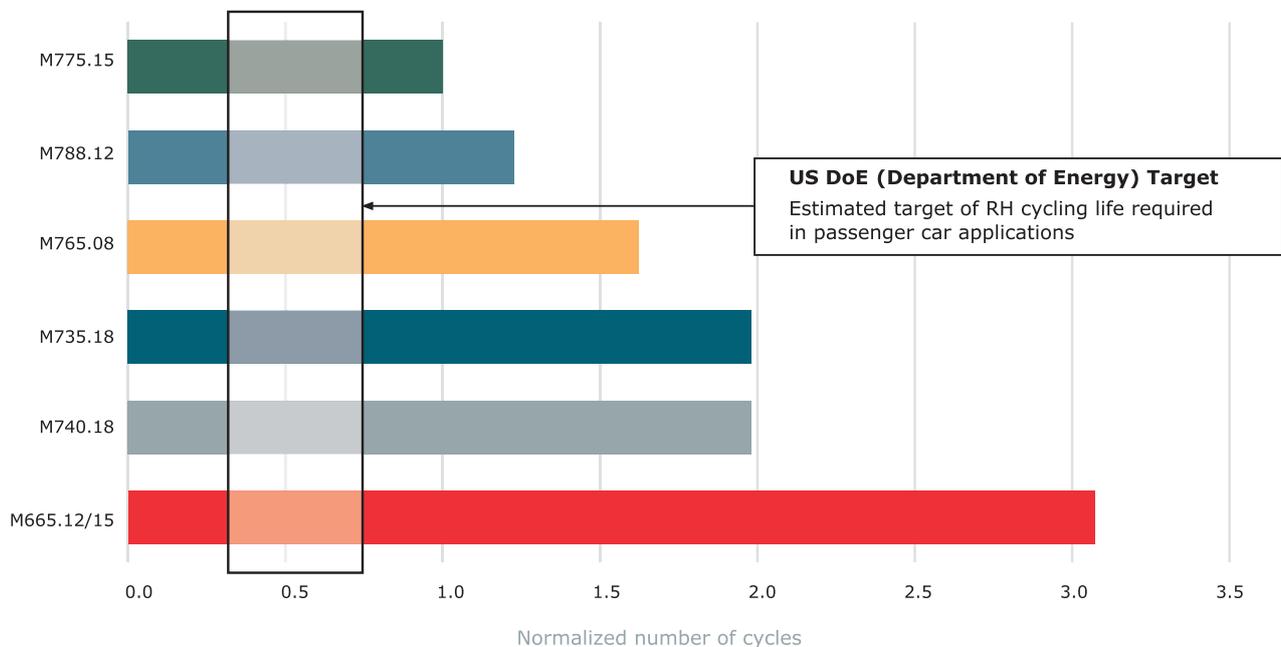
動作中の乾湿サイクルは、PEMの機械的劣化を引き起こします。RHの上昇・下降によってPEMが膨張・収縮し、MEAに亀裂や穴を生じるためです。

これが長期的に繰り返されることで、ガスクロスオーバーの増加や効率の低下が発生し、ひいては燃料電池スタックの致命的な故障に繋がる恐れがあります。従来は、厚みを増すことで非強化PEMの耐久性向上が図られていたため、結果としてプロトン伝導率や電力密度が低くなっていました。

現在では、化学的に安定したePTFEでPEMを補強することで、面方向の膨張が抑えられ、乾湿サイクル耐久性の改善とスタックの長寿命化に繋がるのが業界で広く知られています。これにより、トレードオフを解消して高プロトン伝導率と高い機械的耐久性を兼ね備えた、薄型ながら機械的強度の高いPEMの開発が可能になりました。

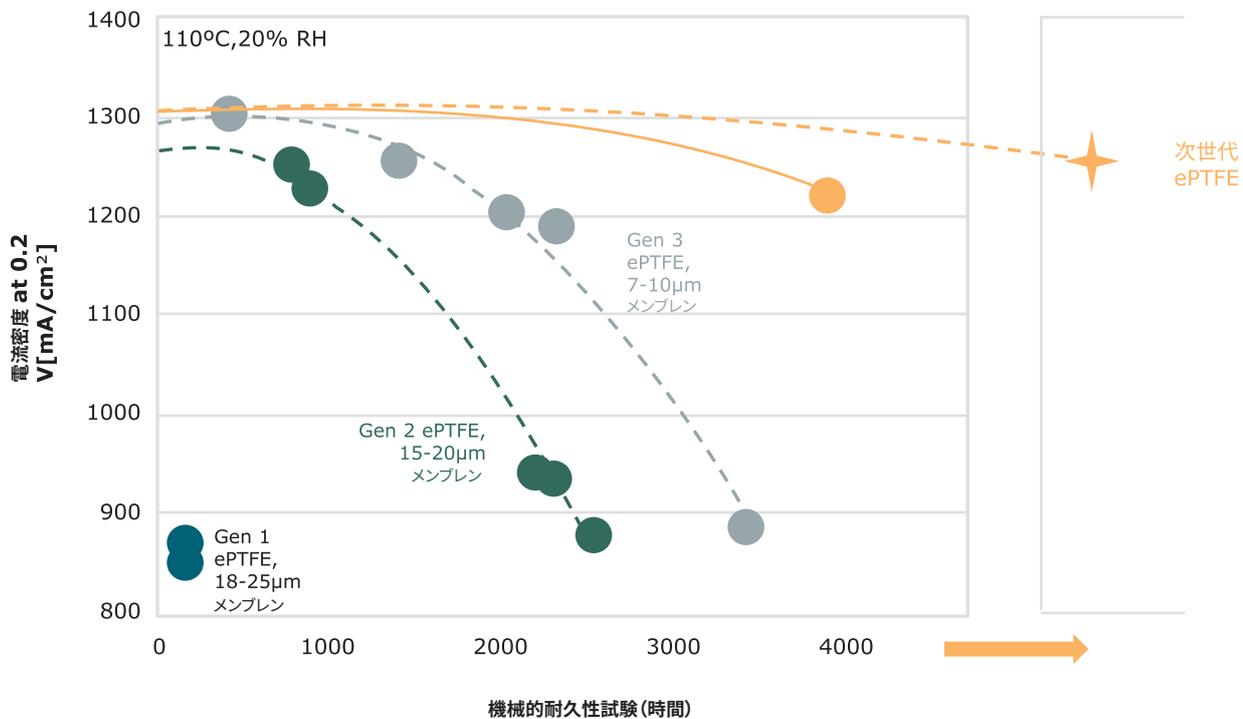
ePTFE補強メンブレンは設計の違いによって、各用途で得られるメリット(とトレードオフ)も異なります。ゴアの先進的なPEMラインナップは、機械的耐久性・電力密度に対する幅広い要求にも対応可能な製品を取り揃えています。

図5: ゴア 乾湿サイクル試験



より高い電力密度と機械的耐久性を同時に叶える新世代のPEM技術の開発は、トータルコストオブオーナーシップ(後に詳述)を低減して業界における商業的実現性を確保する上で非常に重要です。

図6: PEMの機械的耐久性を改善するゴアのePTFE技術



化学的耐久性

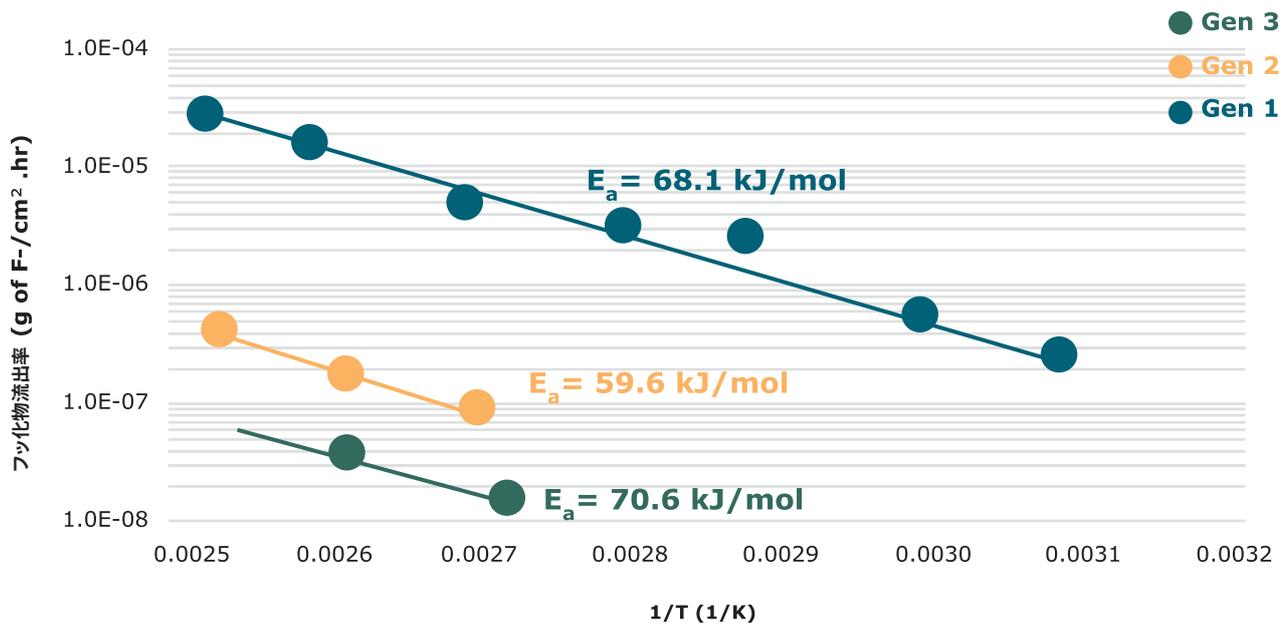
燃料電池の作動中に発生する有害なラジカルは、アイオノマーと反応してアイオノマーの損失を引き起こす可能性があります。それにより生じる劣化により、燃料電池の性能が継続的に低下し、ガスクロスオーバーが増加して、最終的にはPEMや燃料電池自体の故障に繋がることがあります。

アイオノマーが劣化すると、分解してフッ化水素が形成されます。放出されたフッ化水素は生成水から計測できるため、PEMの化学的耐久性の評価指標としてよく用いられます。

PEMの化学的耐久性は、PEMの性質と動作環境の両方に影響されます。例えば、温度は劣化状況を大きく左右します。30度の温度変化によって、フッ化物放出率 (FFR) が10倍増加することが試験から明らかになっています。(図7)

しかし、適切な添加剤を用いることで、PEMの化学的耐久性が大幅に向上することが分かっています。(図7)

図7:70%RH OCV(開回路電圧)におけるフッ化物流出率



ガスクロスオーバー

PEMの主な機能はプロトンの輸送ですが、水素ガスと酸素ガスを分離しておくのもPEMの重要な役割のひとつです。

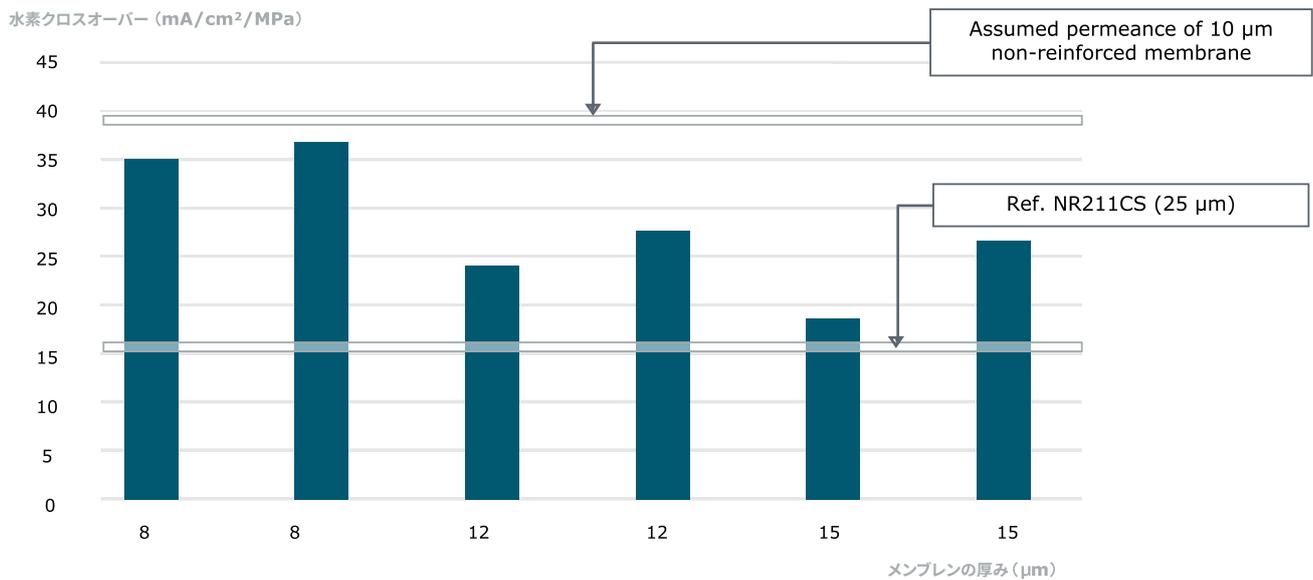
水素と酸素の効率的な電気化学的変換が目的である以上、これらのガスがメンブレンに浸透することで生じる燃料の損失をできる限り削減することが重要なのです。また、窒素のクロスオーバーがアノード流路に蓄積することで、水素濃度が低下し、局所的な燃料欠乏^aを引き起こす可能性もあります。

先に述べたとおり、(電力密度上有利な)薄型のメンブレンでは、従来からガスクロスオーバーが多く発生し、性能低下を招いていました。

独自のePTFE構造を実現したゴアの新世代薄型PEMは、こうしたトレードオフを回避し、ガスクロスオーバーを削減しながら高い電力密度を達成しています。

a.Kocha, Shyam S. et al. "Characterization Of Gas Crossover And Its Implications In PEM Fuel Cells". Aiche Journal, vol 52, no. 5, 2006, pp. 1916-1925. Wiley, <https://doi.org/10.1002/aic.10780>

図8:水素透過性



ガスクロスオーバーによる燃料効率低下への影響を踏まえると、業界が成長しシステムコストからランニングコストへ関心が移るにつれ、OEM各社にとって水素透過性という特性はますます重要になります。燃料電池メーカーは、「性能か水素透過性か」というトレードオフの打破に向けた研究開発への注力が必要になります。

高温環境

外気温はフッ化放出率に影響を与えるだけではありません。高温環境における運転は、ラジエーターを小型化してコストを削減するという共通の目標を持つOEM各社にとって、ますます重要なテーマとなっています。

しかし、高温の動作環境はPEMにとって過酷です。性能や耐久性の低下を招く上、PEMの劣化も加速します。

薄型のPEMは、高温環境下での性能向上に役立ちます。だからこそ、ePTFE強化構造の有効性によって、耐久性への相対的な効果が左右されるのです。

PEMの性能:カスタマイズによる最適化

上記の性能に関わる要素は全て相互に関連しています。それらが互いにどのように作用し、トレードオフを発生させるかを理解するには、研究開発やPEMの設計において包括的なアプローチを取る必要があります。

燃料電池産業が成熟するなか、PEMサプライヤーには、材料の専門知識や、材料とMEA等のスタック構成部品との関係性に関する専門知識に加え、電力・耐久性・コストの面でシステムの最適化を実現する燃料電池の設計戦略のノウハウも求められます。

信頼性

PEMの「性能」は、単一または少数のデータポイントによって測られます。

一方でPEMの「信頼性」は、大規模量産体制における長期的なPEMの供給という別のより大きな視点から語られます。

私たちは、オックスフォード英英辞典に従い、「信頼性」を「頼れること、または常に安定して性能を発揮すること」と定義しています。

燃料電池産業が量産段階に移行するなか、研究開発段階と比べ、まったく異なる要件が求められていることを意識する必要があります。高性能な製品のサンプルを少量生産するだけでは、拡大する世界的な需要に応えることはできません。

PEMメーカーは、安定供給を実現するために、コストへの影響と品質リスクを最小限に抑えながら、安定して高い性能を発揮する製品を高い歩留まりで生産できなくてはならないのです。その際に考慮すべき要素がいくつかあります。

製品の品質と安定性

「品質」は、部品の百万個当りの不良品数 (DPPM) から「信頼性」の技術的な定義 (= 部品が特定の期間機能し続ける確率) まで、様々な側面を包含する幅広い概念です。

この「信頼性」は、次のように計算されます。 $R(t) = e^{-\lambda t}$

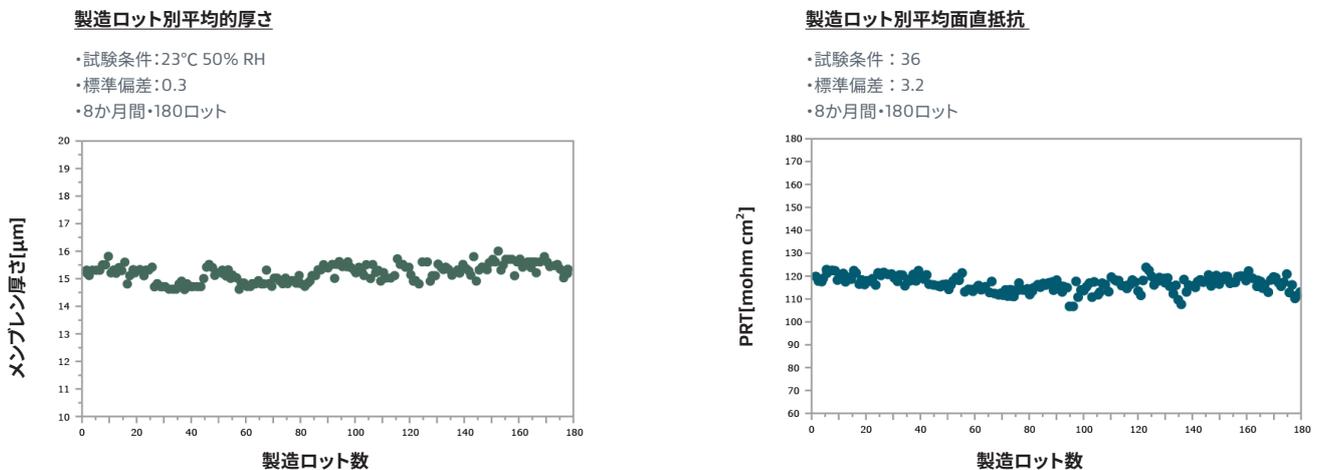
Rが故障確率、 λ が偶発故障率 (故障数/時間)、平均故障間隔 (MTBF) が $1/\lambda$ です。

システムの偶発故障率は、システムの構成部品の故障率をすべて加算したものです。つまり、システムの信頼性は故障率が最も高い部品によって制限されます。そのため、この最も弱い部分に着目する必要があります。

ここで登場するのがPEMです。製品の特性を測定しても故障が発生しないことを保証することはできませんが、偶発的な故障のリスクの大幅な削減に繋がる製品の均一性やプロセスの安定性の良い目安になります。その結果、MEAやスタックメーカーはプロセスの管理がしやすくなりバラツキが減るため、故障の可能性が低くなります。

大量生産環境においては、歩留まり低下や製品品質に起因する下流コストの発生といったリスクの削減のため、これが特に重要になります。

図9: ゴアのPEM量産実績データ (8ヶ月間・180ロット以上)



生産能力と供給安定性

このカテゴリで考慮すべきもうひとつの点は、原材料の確保や、急速な市場拡大に対応した数量を生産可能なPEMの製造能力といった、PEMの供給における信頼性です。

PEMの重要な構成部品はアイオノマー、ePTFE強化材、保護シート、添加剤です。燃料電池産業は最近まで研究開発段階にありました。このため、深い研究開発活動に基づく、実績と信頼性を有する確立した原料サプライチェーンを抱え、サブサプライヤーと安定した提携関係を結ぶPEMメーカーはほんの数社しかありません。

加えて、業界のニーズを満足させるのに必要な規模のPEM生産能力を持つサプライヤーは多くありません。しかし、新たに生産能力を拡張し、安定した確実な供給が実現できるレベルまでスケールアップを行うには、コスト・時間・経験等の面で多額の投資が必要になります。

大手PEMサプライヤーは、事業活動の合理化やコスト・品質管理のため、ある程度の垂直統合を行っています。例えばゴアでは、ePTFE強化の専門知識を活かし、PEM製品の開発・製造・設計を行っています。

生産能力の可用性だけでなく、生産能力の安定性や実績をも考慮することが重要なのです。

実績

燃料電池スタックや燃料電池システムの設計・構築・評価には、非常に高いコストがかかります。業界の「先駆者」(トッププレーヤー)は、PEMの性能や燃料電池用途における適合性を検証するため、往々にして市場に先立って投資を行っています。すべてのスタックやシステムが同じように設計されているわけではありませんが、この方法はPEMの性能の良いベンチマークになります。

バリューチェーン下流のリスクを軽減するためには、既存の素材を使い、実績のあるプロセスで生産され、エンドユースのシステムでの運用が実証されている製品を使用することが重要です。成長途上の市場での競争にはわずかな失敗も許されないことを考えると、これは重大なリスクです。

例えば、2020年から4年間続く予定の中国の燃料電池に対する補助金プログラム^aの場合では、高度な技術的要件や政策目標にも関わらず、その価値は年々低下しています。さらに、期中レビュー後には、新たに罰則が適用されます。

実際に、バリューチェーンがこの政策の恩恵を受け、市場において足場を固める機会は限られています。技術やコストパフォーマンス、PEM供給の実績などで優位性を持つ企業が、もっとも恩恵を受けることになるのです。

a. “China Fuel Cell “Subsidy” Policy: Game Plan Breakdown - Energy Iceberg”. Energy Iceberg, 2022, <https://energyiceberg.com/china-fuel-cell-subsidy-design/>.



コスト

水素燃料電池は、世界的な脱炭素化目標の達成に向けた持続可能な代替エネルギーソリューションとして、輸送システムから各業界全体、さらには私たちが呼吸する空気そのものまであらゆるものを変革する存在として期待されています。

しかし、「ネットゼロ」を実現するには、長期にわたって商業的に成立する必要があります。現時点ではまだ、水素燃料電池は内燃機関車 (ICEV) やバッテリー式電気自動車 (BEV) に比べコスト高になっています。

この主な理由は、規模の経済と、PEMの製造に使用される原材料が高コストであることです。

薄型メンブレンに使用されるガスクロスオーバーが少ないアイオノマーは、一般的に高価です。電極やガス拡散層、セパレータなどのその他の部品も同様に高価で嵩張るため、燃料電池スタックのコスト上昇要因となります。

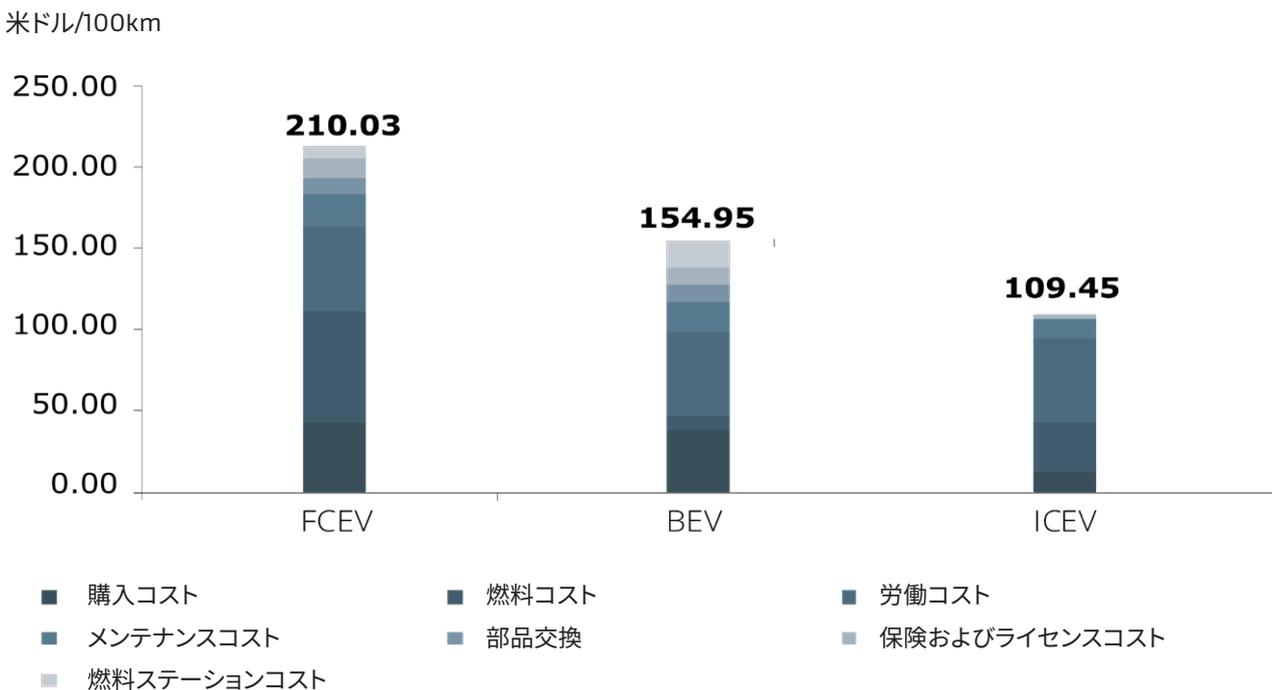
メーカー側の生産コスト高は、車両販売価格となって消費者側に転嫁されます。その結果、BEVやICEVと競合できないほどFCEVの価格が高くなってしまいます。

同程度のコストを達成するには量産化が必須ですが、原材料費が高止まりしてはそれも実現できません。

こうした実情は国家政策レベルで世界的に認識されており、5,000億ドルを超える世界的な投資^aが行われ、66カ国が持続可能なエネルギーへの移行を表明しています。また、世界の経済大国10カ国のうち、8カ国が2050年までのネットゼロ達成を公約しています。

規制や財政支援は永遠に続くものではないため、燃料電池バリューチェーンだけでなくコスト削減戦略も必要になります。

図10：FCEV、BEV、ICEVのシステムコスト



a. "Fostering Effective Energy Transition". World Economic Forum, 2022, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2021.pdf

従来のコスト削減戦略は、各構成部品のコスト割合を考慮して目標を設定し、全体コストの削減を図るものでした。

しかし、前述のとおり燃料電池スタックの部品やその特性には相互依存性があるため、この場合はトータルコストオブオーナーシップ(TCO)を考慮した包括的なアプローチの方がより適切です。

TCOの指標を設定する上で最初のステップとなるのは、ユーザーニーズの把握です。例えば、

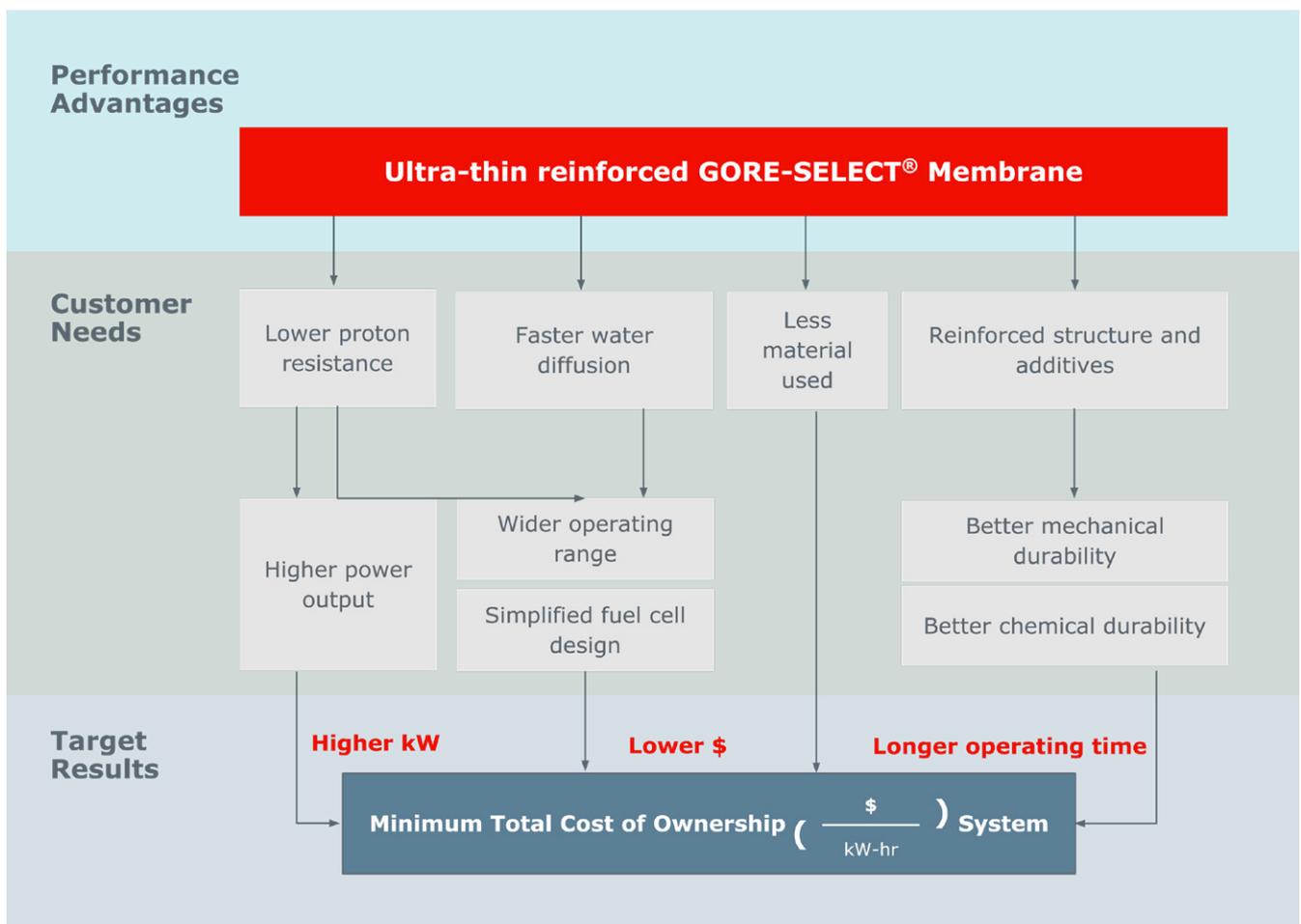
- 燃料電池システムの最終コストに影響する特性は何か？
- より高出力の発電が可能なPEMの金銭的価値を高めるには？
- 電力とトレードオフになっても、低コストのPEMの方がよいのか？

繰り返しになりますが、各部品が独立して機能することはほとんどないため、他の要素も考慮しなくてはなりません。薄型のePTFE強化PEMは、高出力発電を実現しつつ迅速な水拡散を可能にするため、低RH環境下での動作が改善されます。これにより、より幅広い温度範囲での使用が可能になります。ePTFE強化メンブレンはより耐久性に優れ長持ちするため、システム寿命を通じて総所有コストの削減を実現します。

また、薄型のPEMは使用する原材料も当然少ないため、PEM自体のコスト削減を達成しながら、高出力の効果によって他のスタック構成部品の材料コストの削減にも繋がります。これにより同等の能力を持つスタックと比べ、小型化・軽量化(・低コスト化)が可能になります。

さらに、薄型のPEMなら、少ない原材料で大量に製造・出荷することができます。

図11:トータルコストオブオーナーシップ(TCO)の削減に貢献する様々な性能上の利点を備えたゴア セレクト® メンブレン



現時点では、燃料電池システムはバッテリー式電気自動車 (BEV) や内燃機関車 (ICEV) と比べ高価ですが、最近の研究やTCO分析では将来に向けた非常に有望な見通しが明らかになっています。^a

TCOについては、FCEVは今後10年間で50%下落し、2026年までにBEVより安価になり、2027年頃にはICEVをも下回るようになると予測されています。この背景には、調達・運用に関する次のような要因があります。

- 技術の成熟とスケールメリットの向上に伴う車両製造コストの低下
- 調達・サプライチェーンの発達による原材料コストの低下
- インフラや輸送メカニズムの生産・開発における再生可能エネルギーの世界的な利用拡大による、水素燃料コストの大幅な低下
- 公共・民間セクターの投資、補助金、インセンティブの増加
- 規制、より高い排出基準、純ICEVの全面販売禁止による、内燃機関車に対する価格上昇の可能性

研究者自身も認めているように、これらは控えめな予測である可能性すらあります。これまでに登場した数々の新技術では、予想よりも著しく生産量が増加しコストが低下しています。このため、燃料電池技術に対する世界的な関心が高まれば、指数関数的に変化していく可能性があります。

そして、その中心となるのが、長寿命でパワフルな燃料電池スタックを実現する、薄型で強力なePTFE強化PEMなのです。

a. Fueling The Future Of Mobility, Deloitte China, 2022, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>



より明るく、クリーンな未来へ

ePTFE強化PEMは、燃料電池スタックの根幹であるだけでなく、クリーンエネルギー活動の中心でもあります。効率的な製品設計と信頼性の高い製造工程を通じて、ePTFE強化PEMは燃料電池システムの運用、耐久性、信頼性に直接的・因果的な影響を与え、結果的にシステムの商業的成立を可能にします。

過去10年間で、燃料電池自動車産業は大きな進歩を遂げました。そして、今後の10年間でさらなる飛躍が期待されています。FCEVは、長航続距離、急速燃料補給、高電力密度、そしてゼロエミッションという特徴により、商用・大型輸送用途においても非常に魅力的なソリューションになっています。

気候変動危機が依然として世界の最重要課題である今日において、水素は未来のクリーンエネルギー社会の実現に向けた最適な解決策を提供します。そして、この流れを牽引するのは燃料電池自動車業界です。

この分野に関心を持つ企業やメーカーにとって必要になるのは、豊富な実績と研究開発やプロセスの専門知識を持ち、安定供給が実現可能なパートナーなのです。



お問い合わせ先

各国へのお問い合わせ先

オーストラリア	+61 2 9473 6800	メキシコ	+52 81 8288 1283
ベネルクス	+49 89 4612 2211	スカンジナビア	+46 31 706 7800
中国	+86 21 5172 8299	シンガポール	+65 6733 288
フランス	+33 1 5695 6565	南アメリカ	+55 11 5502 7800
ドイツ	+49 89 4612 2211	南アメリカ	+34 93 480 6900
インド	+91 22 6768 7000	台湾	+886 2 2173 7799
イタリア	+39 045 6209 250	英国	+44 1506 460 123
日本	+81 3 6746 2570	米国	+1 410 506 7812
韓国	+82 2 393 3411		

日本ゴア合同会社

〒108-0075 東京都港区港南1-8-15 Wビル14F
TEL: 03-6746-2570 FAX: 03-6746-2571
gore.co.jp/alt-energy

本製品は工業製品に限定してご使用ください。食品、医薬品、化粧品および医療機器の製造、加工ならびに包装工程にはご使用いただけません。

記載された技術情報および推奨事項は全て、ゴアにおける過去の経験または試験結果に基づくものです。可能な限り正確な情報を記載していますが、法的責任を伴うものではありません。製品の動作性能は、運転データが全てそろわない限り判断できないため、お客様の実際のご使用状況において適合性と機能性をご確認ください。上記情報は変更されることがあり、仕様書として使用することはできません。

GORE、ゴア、GORE-SELECT、ゴアセレクト、*Together, improving life*および記載のデザイン(ロゴ)は、W. L. Gore & Associatesの商標です。

