

イリジウム使用量の削減による PEM水電解のスケーリングの進歩

著者: Bryan Erb¹, Andrew Smeltz¹, Niels Schouten², Erdem Irtem³, Nayab Azam⁴, Filip Smeets⁵, De Nora Tech LLC, ⁶VSParticle B.V.



目次

1. イリジウム使用量削減によるPEM水電解スケーリングの進歩	3
2. VSParticleの薄膜触媒層製造における先進技術	6
3. PEM電解アプリケーションにおけるテスト	9
3.1 De Nora社の多孔質輸送層(PTL)	10
3.2 サンプル調製およびその他の試験材料	11
3.3 試験結果	12
4. 数ギガワット規模のグリーン水素生産の実現	13



イリジウム使用量削減によるPEM 水電解スケーリングの進歩

著者: Bryan Erb¹, Andrew Smeltz¹, Niels Schouten², Erdem Irtem², Nayab Azam², Filip Smeets².

¹ De Nora Tech LLC, ² VSParticle B.V.

世界のエネルギー供給の脱炭素化に向けて大きな進歩が遂げられています。2023年には、世界の再生可能エネルギー容量の増加は過去20年間で最速のペースで増加し、510ギガワット(GW)¹に達しました。この傾向は心強いものですが、鉄鋼、精製、化学薬品、肥料生産など、いくつかの産業は依然として炭化水素ベースの原料に大きく依存しており、直接的な電化によって簡単に脱炭素化することはできません。再生可能エネルギーで稼働する水電解プラントで生産されるグリーン水素は、これらのセクターがネットゼロ排出を達成する上で不可欠です。

Hydrogen Europe²によると、欧州連合は2030年までに年間1,000万トンの再生可能水素を生産することを目指しており、100GWを超える電解装置の設置が必要になります。ポリマー電解質膜(PEM)電解は、従来のアルカリ電解に比べて電力変動への応答が速く、エネルギー効率がよく、耐久性があり、設置面積が小さいことから、有望な技術と考えられています。

¹ IEA Renewables 2023 report, Source: EIA International Energy Outlook 2021, <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>

² https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

この生産量の急増により、PEM電気分解に不可欠な触媒である白金やイリジウムなどの白金族金属(PGM)の需要が高まります。これらの金属は高価で希少であり、主に輸入されているため、不足や価格変動のリスクがあります。イリジウムは、グリーンディールを達成するためにヨーロッパが必要とする重要な材料のリストである欧州重要原材料法³の一部です。さらに、これらのPGMは、クリーンテクノロジーの他の用途でも重要です。イリジウムはPEM水電気分解プロセスで置き換えるのが難しいため、特に注意して使う必要があります。イリジウムは最も希少な貴金属の1つで、世界の年間生産量は約7～8トンで、プラチナの200トンよりもはるかに少なく、コストは4～5倍です⁴。現在、イリジウムはすべて電気、化学、医療などのさまざまな用途で消費されており、水素製造に使用されるのは1%未満です。これは、金属の希少性と、予想される水素の成長に対するその供給が限られていることに伴う課題を強調しています。現在の技術では、PEM電解容量1GWあたり約300～400kgのイリジウムが必要です。電解容量1GWあたりの現在のイリジウム負荷は、水素生産を拡大するという業界の展望に対する大きなボトルネックです。IEAは、パイプラインにあるすべてのグリーン水素プロジェクトが実現すれば、2030年までに世界で170GWの電解容量を実現できると見積もっています⁵。PEM電解装置の市場シェアを30%と想定すると、2030年までに15トンの累積イリジウム需要が必要になります。イリジウムの希少性と高価さを考えると、グリーン水素生産の持続可能性とスケーラビリティには、イリジウムの使用を最適化することが不可欠です。イリジウムは、電解装置スタックのコストの約20～25%を占める可能性があります⁶。したがって、イリジウムの供給量が限られており、コストが高いため、その使用量を減らし、可能な限りリサイクルすることが不可欠です。イリジウムのコーティングを薄くすることでイリジウムの使用量を 10 ～ 15 分の 1 に削減することは、世界的な脱炭素化の目標を達成する上で重要な役割を果たします。目標は、性能と安定性を維持しながらイリジウムの負荷を 0.1 mg/cm² 未満に削減することです。現在の PEM 電解槽の負荷は 1 mg/cm² であり、その結果、水素製造用のイリジウム使用量が 10 分の 1 に削減されます。

³ https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en

⁴ <https://matthey.com/pgm-market-report-2022>

⁵ International Energy Agency (2022), Tracking Electrolysers

⁶ National Renewable Energy Laboratory (2024) Updated Manufactured Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers

触媒コーティング膜 Catalyst Coated Membrane (CCM)

多孔質輸送膜電極 Porous Transport Electrode (PTE)

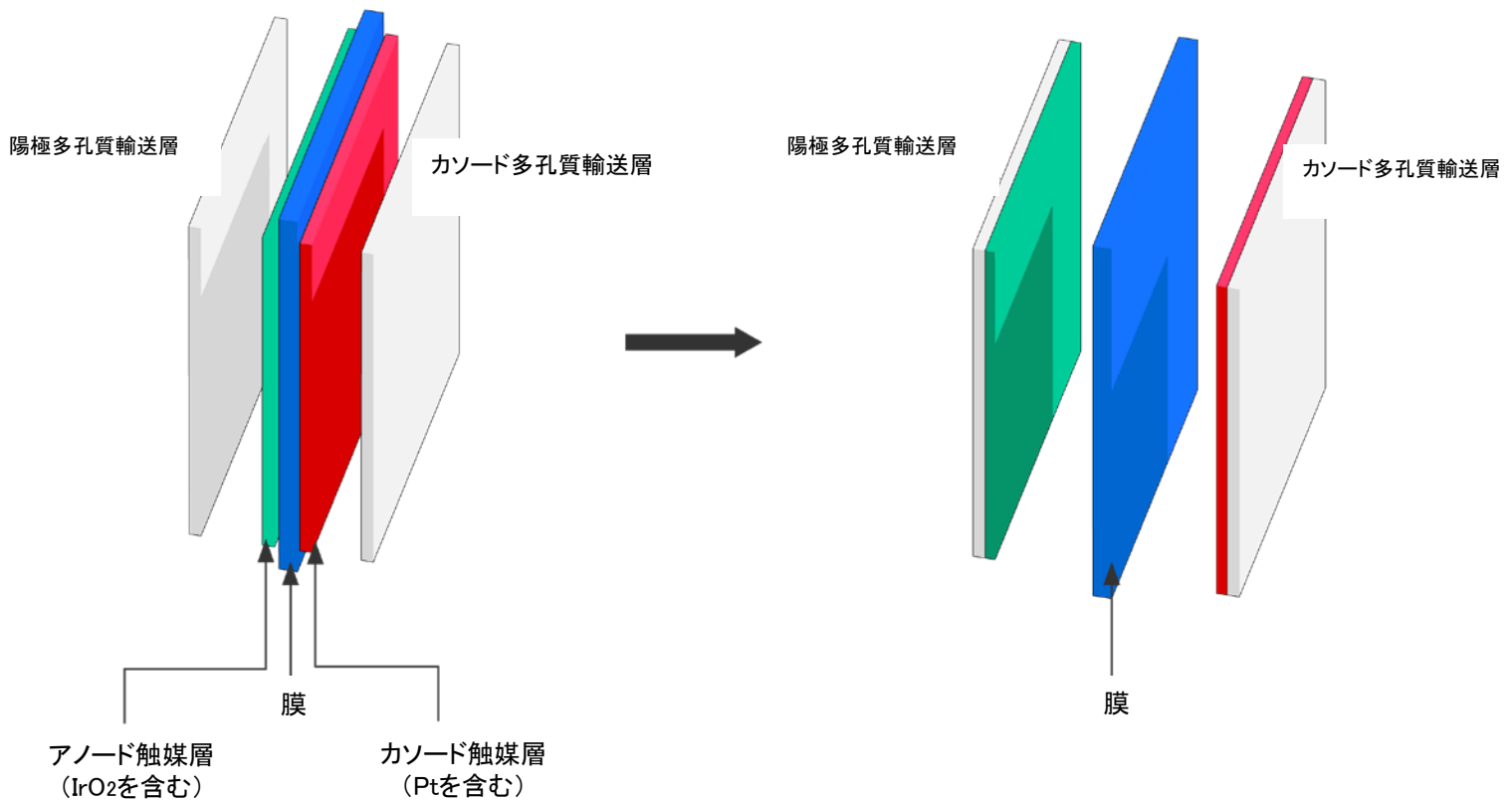


図1: PEM 電解セルの触媒層は膜 (左) または多孔質輸送層 (右) 上に堆積することができ、それぞれ触媒コーティング膜 (CCM) または多孔質輸送電極 (PTE) となります。

0.1 mg/cm²未満の負荷を達成した後も、イリジウムのリサイクルは持続可能性と長期的な供給の安全性にとって不可欠です。現在、イリジウムの世界的な使用済み (EOL) リサイクル率は比較的低く、20～30%⁷の範囲です。この限られた効率は、主にEOL材料の収集の難しさと、多くの用途におけるイリジウムの濃度が低いために、かなりの前処理プロセスが必要になります。PEM膜からのイリジウムのリサイクルは、イリジウム層がPFAS含有材料に埋め込まれているため、特に困難です。これらの課題に対処するために、触媒層をPEM膜ではなく多孔質輸送層 (PTL) に適用する新しいPEM電解槽設計が開発されています。

これは、多孔質輸送電極 (PTE) コンセプトとして知られています。この設計の利点は、非常に薄い触媒コーティングを広い表面積に塗布することで、はるかに少量のイリジウムをより効率的に使用できることです。さらに、これらの新しい設計により、PFAS材料に触媒層を埋め込む必要がなくなり、イリジウムのリサイクルがはるかに簡単になります。

⁷ International Journal of Hydrogen Energy (2021), Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis?

VSParticleの薄膜触媒層製造における先進技術

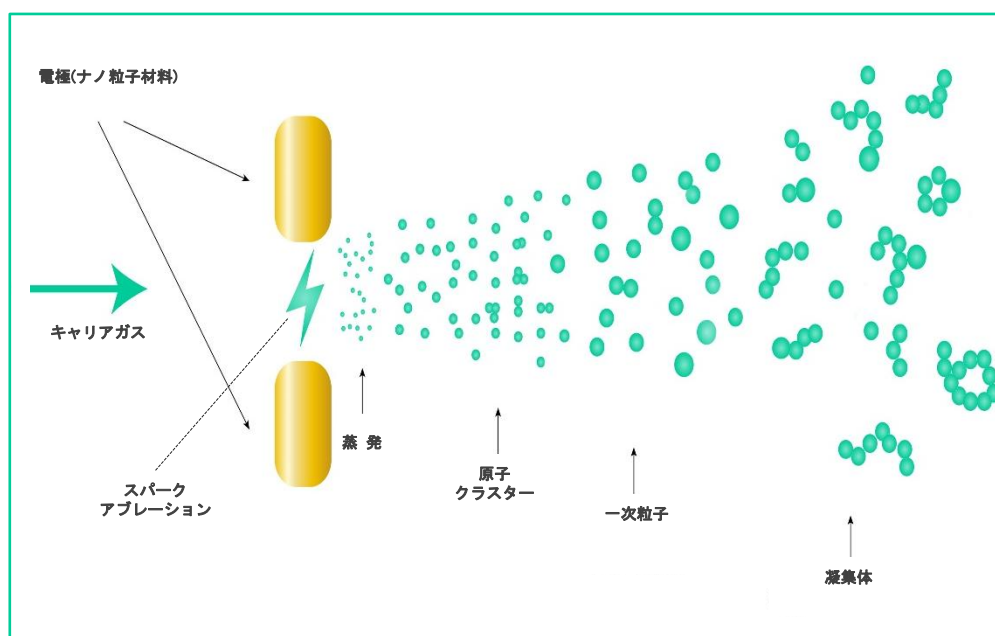


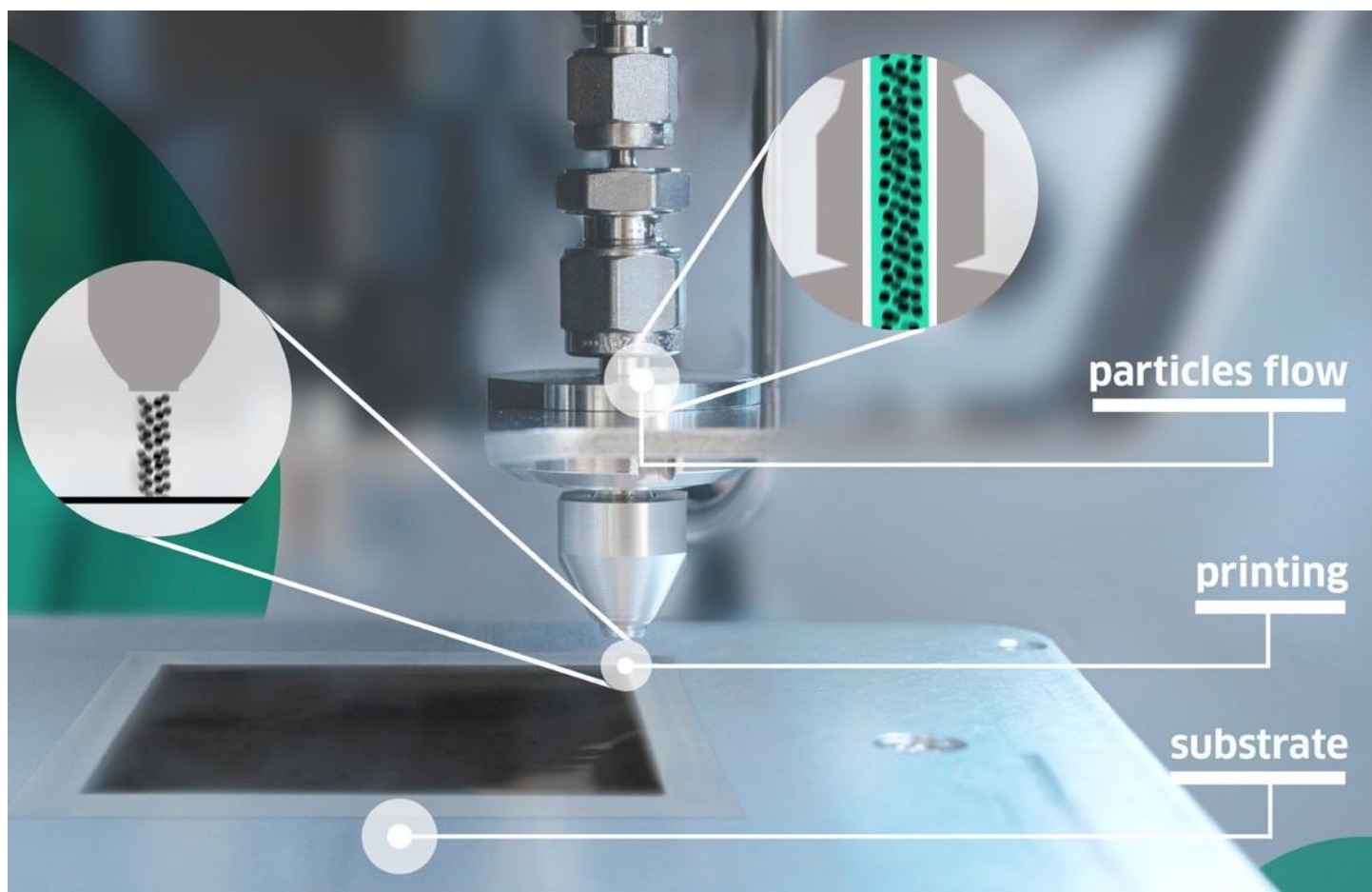
図2: スパークアブレーションプロセスの概略図

VSParticleの装置は、上記の課題を解決するのに最適です。装置はスパークアブレーションを使用して金属ロッド（電極）、たとえばイリジウムロッドを蒸発させます（図2）。蒸発した材料は（不活性）キャリアガスによって輸送され、ガス流中にナノ粒子が形成されます。ガス流はナノ粒子を基板に直接輸送し、ナノ粒子をナノ多孔質層として印刷します。

プロセスに液体がないため、結果として得られる層は非常に多孔質で非常に純粋（クリーン）であり、非常に大きな有効表面積が得られるため、（貴金属）負荷が低く、高性能が得られます。この特性により、PEM電解槽に必要なイリジウムの量を大幅に削減できます。

触媒層の良好な接着を可能にするために、ナノ粒子は超音波衝撃法を使用して PTL 基板上に堆積されます。これを実現するために、基板は約1mbar の粗真空状態に置かれます。この真空により、ナノ粒子を含むガス流がノズルから吸い込まれ、ナノ粒子が音速まで加速されます (図 3)。衝撃時に解放される運動エネルギーによってナノ粒子がわずかに焼結され、基板への良好な接着が実現します。

図3: ナノ粒子を堆積させてナノ多孔性触媒層を形成するために使用されるプロセスの概略図





研究開発から生産までのイノベーションを加速

図4: VSParticle の装置は、新材料の研究開発からプロセスの開発と最適化、大量生産まで、あらゆる範囲にわたります。

VSParticleは、市販の研究ツールを開発ツール(スケール100倍)に、さらに生産ツール(スケール1000倍)にスケールアップするロードマップに着手しました(図4)。研究ツール(VSP-P1)は、柔軟性を考慮して設計されています。処理できる材料と基板の種類に関する柔軟性。この新しい積層造形方法により、表面積と体積の比率が高いナノ多孔質薄膜と層の製造が大幅に簡素化されます。目的の材料が見つかったら、印刷プロセスを生産用に最適化する必要があります。これは開発ツールで行うことができます。

スパークイベントが同じ方法で制御されている限り、研究ツールで得られた結果は開発ツールに簡単に変換できるはずです。歩留まりと材料のパフォーマンスに合わせてプロセスが最適化されたら、生産の準備を行います。3つのツールを使用すると、最小限のリスクでラボから製造への迅速な移行が保証されます。

PEM電解アプリケーション におけるテスト

最近、VSParticleはDeNoraと協力し、PEM
電解アプリケーションにおける高度な堆積技術
の可能性を調査しました



De Nora社の多孔質輸送層(PTL)

PEM電解槽の性能は、多孔質輸送層 (PTL) と触媒層との界面接触に大きく影響されます。PEM 燃料電池では、この界面層を強化して燃料電池の性能を向上させるために、マイクロポーラス層 (MPL) が広く使用されています。

De Noraは、PEM電解槽で同じ利点を実現するために、チタン焼結粒子ベースのPTLのPTL w/MPL構造を最適化する取り組みを行っています。MPLを追加すると、主に2つの利点が得られます。



PTL 触媒層の接触面積が増加し、特にイリジウム負荷が低い場合に接触抵抗と触媒利用率が向上します (この作業の主なデモンストレーション)。



膜に面した孔のサイズを小さくすることで、薄膜の機械的サポートが向上します。

MPLの使用によって可能になるこれらの利点は、将来のPEM WEシステムを、この技術の成功に必要なイリジウム負荷と性能目標に向けて前進させるために不可欠です。PTLのこれらの構造変更により、質量輸送損失が生じないように、PTLを介した酸素と水の輸送が維持されることが重要です。

PTLのこれらの主な機能と、この研究で使用されている焼結粒子PTL構造は、下の図5に示されています。

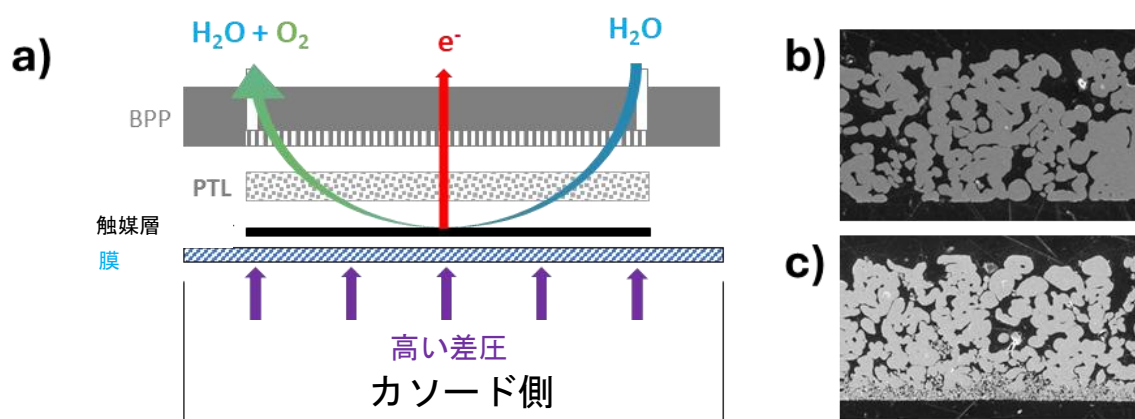
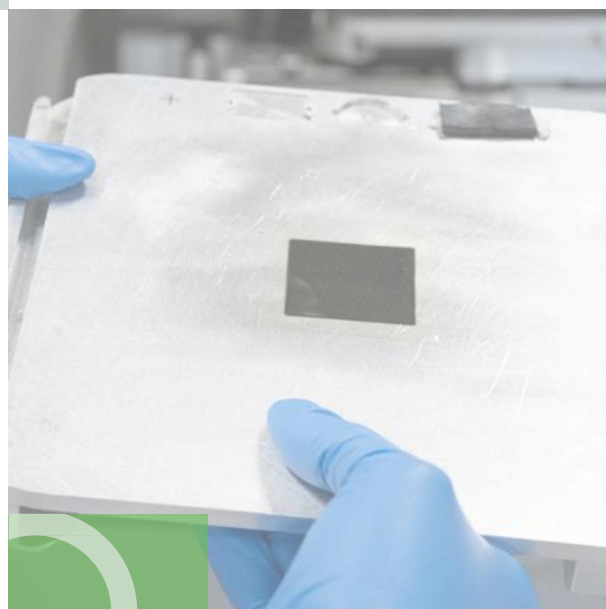


図5: a) PEM WEセルにおけるPTLの重要な機能 b) 単層PTLの断面 c) MPL付きPTLの断面



サンプル調製 およびその他の試験材料

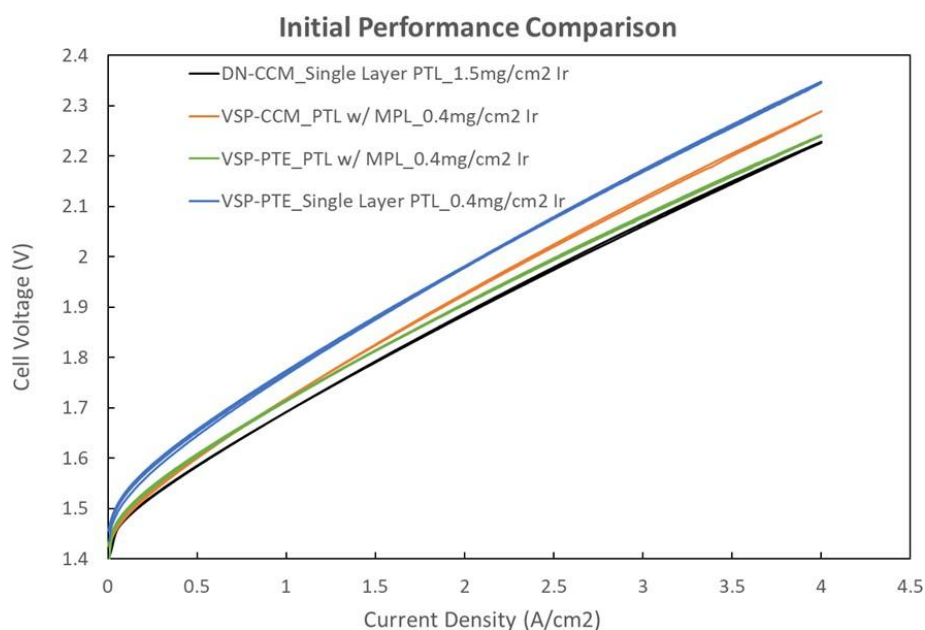
VSParticleのコーティング技術を用いて、単層PTL、MPL付きPTL、そして直接膜堆積（CCM）の両方に、 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ のイリジウムを塗布したサンプルをいくつか作製しました。比較のために、従来のインクベースの製造プロセスを用いて、公称 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ のイリジウムを塗布した市販のCCMを調製しました。試験セルのその他の部分、コンポーネント、および条件は、この試験では一定に保たれました。



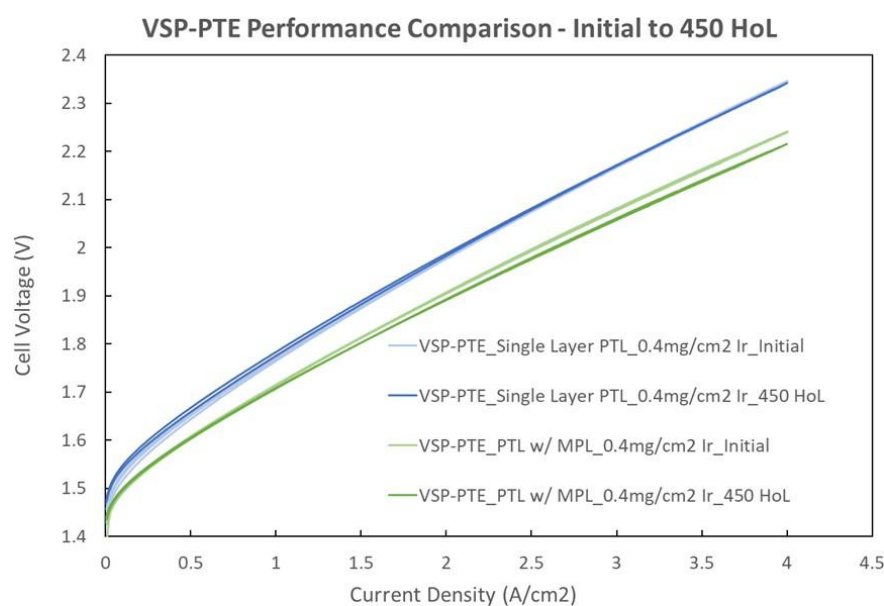
試験結果

グラフ1の分極曲線は、MPL（マイクロポーラス層）を備えたVSParticle PTEが、ベースラインCCM構成と同等の性能（ 10mV @ $2\text{A}/\text{cm}^2$ 以内）を示し、イリジウム含有量が約4分の1に低減していることを示しています。同様に、VSParticle CCM（MPL付きPTLを使用してテスト）は、ベースラインCCMと比較してわずかな低下（約 20mV @ $2\text{A}/\text{cm}^2$ ）を示しました。これは、VSParticle技術で膜ではなくPTLをコーティングすることに利点があることを示唆しており、繊細な膜材料の取り扱いを最小限に抑えるには、PTLをコーティングすることが好ましいと考えられます。

MPLなしのVSP PTEは、MPLありのVSP PTEと比較して、 $2\text{A}/\text{cm}^2$ で約 80mV 性能が低下しており、このような低イリジウム負荷量におけるこの改良インターフェース（MPL）の重要性を示しています。グラフ2の分極曲線は、初期性能と、電流密度 $2\text{A}/\text{cm}^2$ で450時間保持した後の性能を比較したものです。VSParticleで $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ のサンプルをMPL（マイクロポーラス層）付きDe Nora PTLに塗布し、定常状態の耐久性は良好で、わずかな改善が見られます。



グラフ1: 動作条件 N117膜、 60°C 、活性面積 25cm^2 。慣らし運転後の初期性能データを示す。PTLおよびCCM上に堆積されたVSParticle触媒層（ $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ Ir）。ベンチマーク触媒層（ $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ Ir）。



グラフ2: 動作条件 N117膜、 60°C 、有効面積 25cm^2 。慣らし運転後の初期性能データと、 $2\text{A}/\text{cm}^2$ の電流を450時間保持した後の性能の比較。PTL上に堆積されたVSParticle触媒層（ $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ Ir）。



数ギガワット規模のグリーン水素生産の実現

グリーン水素製造のためのPEM水電解は、この新興量産市場における主要技術となるための非常に魅力的な特徴を数多く備えています。しかしながら、現在の設計には課題も存在し、革新的なソリューションが求められています。特に、イリジウム使用量を10～15分の1に削減すること、そしてEOL（製造終了時）におけるイリジウムのリサイクル性確保が求められます。MPLを備えたPTLの使用に移行し、PEM膜ではなくこの構造上に薄い触媒層を堆積させる（CCMではなくPTE）ことが、最適な方法と考えられます。この移行を実現するには、イリジウム負荷量を 0.1 mg/cm^2 まで低減し、リサイクル性を妨げるバインダーを使用せずにこの性能を維持できる高度な触媒堆積技術が必要です。

初期概念試験では、VSParticleのスパークアブレーションナノプリンティング技術がこの課題に対応できることが示唆されています。VSParticleは、触媒効率を維持しながらイリジウム使用量を削減し、リサイクルプロセスを改善することで、グリーン水素技術のより広範な普及への道を切り開いています。市場パートナーとの協力と継続的なイノベーションは、現在の課題を克服し、将来の水素生産目標を達成するために不可欠です。