

水素メタルスタンダード

2021年11月





水素メタルスタンダード

2021年11月

1号

© Published in November 2021 by SFA (Oxford) Ltd.

デザイン: Francesca Price

写植: Holywell Press

目次

創刊にあたって	5
脱炭素化された未来のための金属	7
迫る持続可能な世界における水素とPGMの役割	9
水素に関する世界的な理解の進捗	11
実社会における水素	16
持続可能な社会におけるPGMの役割	19
社会における水素	19
水素ビジネスの拡大状況	20
結論 “水素はあなたにそしてPGM 産業に何をもたらすか”	21
参考文献	22
グリーン水素に向けて	23
COP26の背景	25
脱炭素と水素	26
水素生産	28
電解装置の種類	32
水素と白金族 (PGM) 金属	33
低炭素の未来を促進する： 水素経済のためのミッションクリティカルな金属類	39
南アフリカにさらにグリーンな未来をもたらす水素メタル	42
南アフリカ：世界の水素PGM金属バスケット	43
UG2は「水素リーフ」だ	46
プロジェクト再稼働が将来130万オンスの水素メタル供給を実現	47
鉱業収入は次第に水素メタル基準に	48
水素産業のニーズに合わせた金属採掘	49
南アフリカのサプライチェーンがよりグリーンな地球へのユニークな回転軸となる	50
PGM (白金族) 市場2021	51
PGMの価格推移	57
付録	63
プラチナ需給バランス	64
ルテニウム需給バランス	66
イリジウム需給バランス	67
用語集	69
メソドロジー	70
謝辞	71

TPSコレクション:アジェンダ設定の徹底解説



The Palladium Standard は、The Platinum Standard (2014年5月創刊) の好評を受け、2016年9月に創刊されました。



The Platinum Standard および Palladium Standard はレビューとプレビュー半々で構成され、翌年のPGMアジェンダ設定に関わると思われる問題について、分析的な解説を提供します。



本コレクションのお読みにになりたいエディションを [website](#) からダウンロードしていただけます



創刊にあたって



創刊にあたって

脱炭素化された未来のための金属

2021年11月26日開催の「グリーンメタルと水素」会議に合わせ、SFA (Oxford)から「水素メタルスタンダード」創刊号をお届けいたします。本書から脱炭素に向けてプラチナ、イリジウム、ルテニウムが果たす役割を俯瞰していただけると存じます。白金族金属の中には私たちが「水素メタル」と呼ぶ種類があります。それらは水素技術の重要な構成要素として低炭素の将来を実現し、気候変動に対する世界の戦いを可能にします。

地球温暖化抑制のための大幅な戦略はすでに合意され、2030年までに炭素排出を半減させて、2050年までには人類が排出する全炭素量を地球が吸収するネットゼロを達成することになっています。その達成には、化石燃料の段階的廃止、森林伐採の防止、エネルギー効率向上のほか、再生可能な太陽光熱・風力・波力由来の電力による石炭・ガス燃焼の代替が必要となります。

今月グラスゴーで行われたCOP26では、こうした目標に向けていくらかの前進が見られました。参加した多くの国々により、森林伐採からの復興、メタン排出削減、石炭火力発電の段階的廃止と新規建設の停止などに向け誓約が行われました。しかし、いまだに最大の炭素排出国のいくつかは目標達成への協定に署名していません。言葉と行為の間に感じられる間隙への批判も続き、COPのプロセスはあまりに遅くてうわべを繕う「グリーンウォッシング」にすぎず、従来のエネルギー生産方法への固執が明らかだといわれます。

ネットゼロカーボンという望ましい状況が2050年までに達成できるかどうか不明な中で、到達点を目指すルートの可能性は迅速に開発され、現実のものとなりつつあります。そのルートのひとつが水素です。「水素経済」という言葉も知られるようになりました。その水素は非常に重要なものではあっても、将来の低炭素経済の構成部分にすぎません。水素の性質と熱力学の法則により、水素のみでエネルギーをカーボンゼロへと進められるわけではないからです。水素は自然に発生するものではありません。ほかの化合物や分子から抽出する必要があり、抽出の過程でいくらかのエネルギーが無駄になります。

そのため低炭素の未来では、可能なところで最も大きな働きを担うのは再生可能電力となるでしょう。とはいえ、大規模な電解設備による「グリーン」水素は、再生可能電気やバッテリーを使用できない経済部門の脱炭素化に不可欠となります。こうした水素の用途には、鉄鋼生産におけるコークの代替から、長距離輸送交通用の水素燃料電池、安定的なエネルギー供給確保のための再生可能エネルギー貯蔵媒体としての用途まで、多岐にわたります。そのグリーン水素はどのように生産されるのか、既存のエネルギー源に対してそれはいかに、いつ費用効果を発揮するのか、水素の最適な用途は何か。そしてグリーンエネルギーの未来に向けてプラチナ、イリジウム、ルテニウムがいかに寄与するか。そうした情報をお届けするのが「水素メタルスタンダード」です。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) 所属・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所招聘教授であり、元トヨタ自動車(株)先進技術統括部プロフェッショナルパートナーの広瀬雄彦氏は、その寄稿論文「迫る持続可能な世界における水素とPGMの役割」で、2050年社会における水素とPGMの価値を考察しています。ますます多くの国々が水素戦略を採用し、新しい水素技術の開発を推進するにしたがって、グリーン水素の機能は輸送用の代替燃料から社会全体の基本的なエネルギー媒体へと変化しています。脱炭素化とエネルギー効率向上に役立つにとどまらず、雇用、富の創造、国家のエネルギー自給機会など、水素経済は、PGMを本質的な実現材料として、その他の大きなメリットをもたらします。

独立コンサルタントでSFA (Oxford) エグゼクティブ委員会メンバーであるジェレミー・クームズは「グリーン水素に向けて」において、水素の限界とメリット、コスト、低炭素または炭素ゼロの水素を生産する諸方法を含め、グリーン水素の供給と用途を決定する要因を追究しています。同論文では性能と用途の面で完成型および開発中の電解装置技術を紹介し、電解設備コストの削減と長期的な需給バランス改善に向け、PGMの節約と代替の可能性を論じています。

SFA (Oxford) 所属のフランススカ・プライスとアレックス・ビドルによる第3の論文「低炭素の未来を促進する：水素経済のためのミッションクリティカルな金属類」は、電解装置と燃料電池用の需要の高騰を受け、イリジウムとルテニウムの今後の可用性を考察するものです。こうしたレアメタルの最大産出国は南アフリカですが、生産者が水素経済からの将来の需要を満たそうと能力を確保する中で、イリジウムとルテニウムに富む鉱体からの生産は拡大傾向にあります。そこに影響を与えている地質学的・経済学的・戦略上・投資上の圧力が検討されています。

最後に、2021年の需給予測を含めて、PGMの3主要メタルの市場レビューをまとめてお届けします。

COP26の成果がいかなるものであっても、世界経済の脱炭素化が深く浸透していくことは必然です。お届けする「水素メタルスタンダード」本号と今後の続刊を通し、またコモディティ分析における実績を駆使して、SFA (Oxford)は、情報に精通した討論を促進し、PGMを通して実現するグリーン水素がこの実存的プロセスで果たす役割について理解を深めていきたいと考えます。

迫る持続可能な世界における 水素とPGMの役割



迫る持続可能な世界における水素とPGMの役割

PGMは平和で幸福な社会に向けてより積極的な役割を果たす

広瀬雄彦

世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)所属・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所招聘教授、元トヨタ自動車(株)先進技術統括部プロフェSSIONナルパートナー

水素に関する世界的な理解の進捗

世界では水素が政治的にも認知されつつある

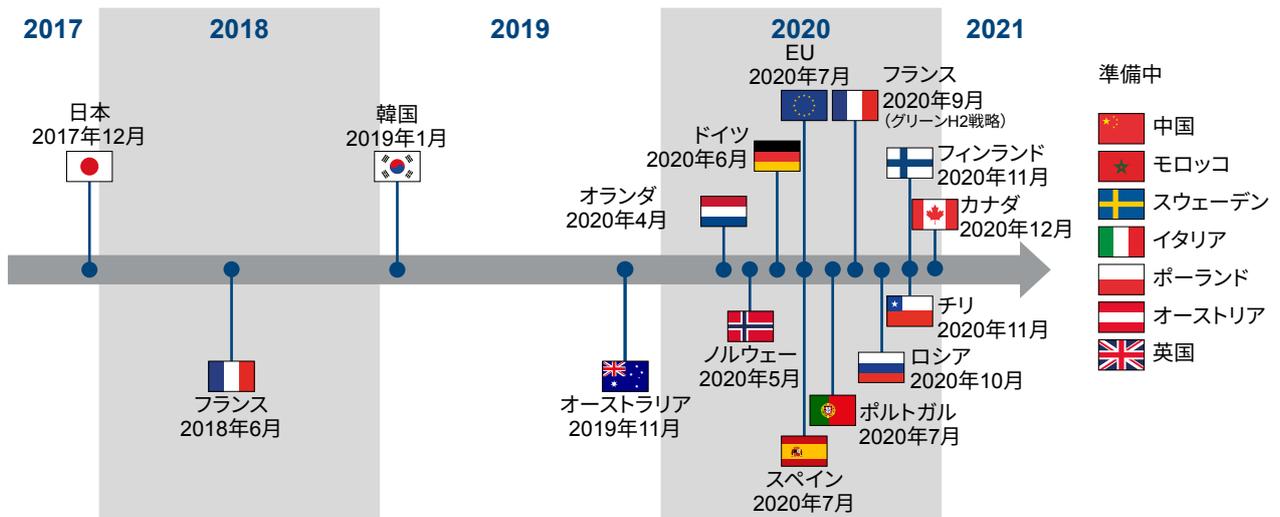
筆者がSFA-Oxfordで水素について最初に講演したのはほんの5年前であった。その時には水素はまだ代替燃料車の燃料としての認識しかなかった。電池電気自動車(BEV)がちょうど話題になっており、聴いた人たちは“水素は可能性はあるかもしれないがずっと先だろう”という認識だったと思われる。

最近5年間の変化は？

この時、水素戦略があったのは日本だけで、それもR&Dのロードマップだけというものであった。しかしながら、現在は技術戦略ではなくて国家戦略として水素戦略がどんどん策定されつつある。図1に戦略策定の進捗状況を、図2にそれらの国が世界のどこかを示している。今や水素戦略はカーボンニュートラル、NetZero宣言の拡大と合わせて世界中で策定されつつある。化石燃料王国の主であるサウジアラビアもついに水素戦略を策定中で近日中にも発表すると宣言した¹⁾。

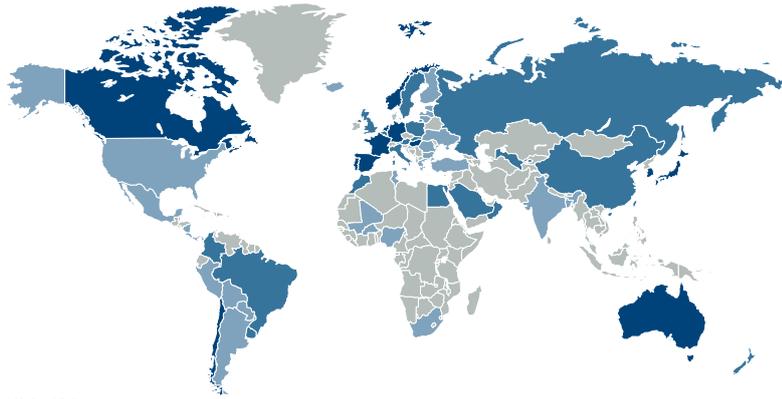
豊富な水素戦略

各国の水素政策状況(図1)



World Energy Councilの許可を得て掲載

世界の水素戦略マップ(図2)



進行状況

- 国家戦略を公表
- 国家戦略を準備中
- 政策論議中／初期実証プロジェクト

World Energy Councilの許可を得て掲載

各国の水素戦略の在り方は、2019年以降大きく変わった。それまでの水素戦略は日本のものが典型であるが、水素燃料自動車の導入目標台数を決めて、同時に水素インフラの水素充填所の展開目標基数を示すというものであった。しかしその後の水素戦略、例えばEUやドイツの戦略では2030年までには40GWの電解設備を入れるとなっている。この戦略の大変化はハイドロジェンカウンシルの革新的なレポートの結果の反映だと思われる。報告書に、水素は低炭素へ大きな役割を果たす、そのうえで水素導入の結果、年間6GtのCO2削減と280兆円規模のビジネスと3千万人規模の雇用を生み出すというものであった。(図3) (手前みそではあるが筆者はこの報告書の作成チームで共同議長を務めるという関わりがある)。そしてこの報告書は水素の役割を、自動車用の代替燃料の位置づけから脱炭素に向けた総合的なエネルギーシステムの解決策であるという役割に換えた。水素は電気と共に社会を脱炭素化する強力な力であり再生可能エネルギーの量を増やし、信頼性を上げ、交易可能にし、かつ貯蔵可能にすることを助ける。水素は非炭素化した熱や原料の供給を通じて輸送や産業、家庭を脱炭素化することが出来る。(図4)

脱炭素社会への媒介
としての水素の重要性

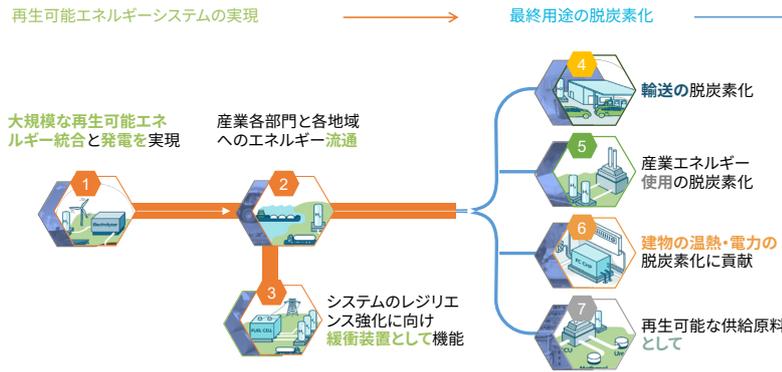
環境とビジネスにおける水素の役割² (図3)



雇用創出3,000万、
事業価値総額は
2.5兆米ドル

資料: Hydrogen Council. ¹燃料電池の付加価値。

脱炭素世界における水素の役割³ (図4)



大規模な再生可能エネルギー統合実現から工業・輸送・温熱・電力の脱炭素化へ

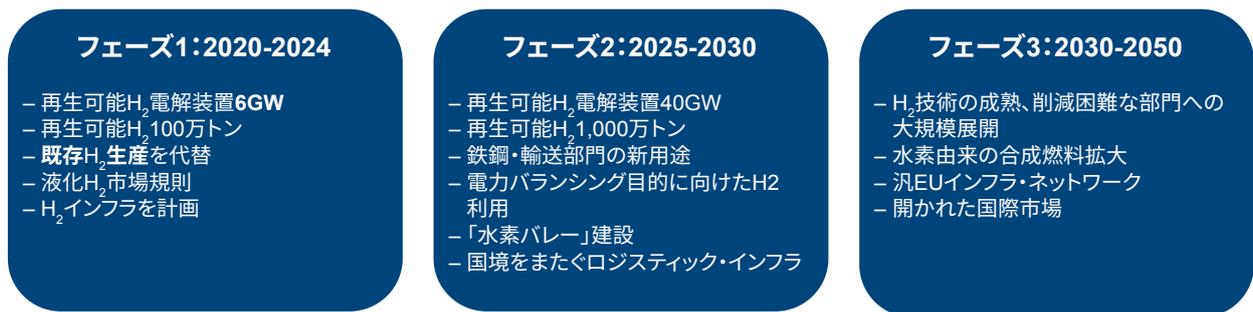
資料: Hydrogen Council

その結果、水素は温暖化対応の波とCovid 19からの復興案を捕まえた格好になっている。その波は大きく、さらにその投資は単なる環境への費用あるいは環境対策というよりは解決策であり将来への投資と見なされている。

嘗て、水素の普及には水素自動車の台数と水素ステーションの数という典型的な鶏と卵問題があった。水素ステーション無しには車は売れないが車無しにはステーションインフラは作れないというもので、この関係を壊して進めるためには国による介入が必須というものであった。新しく策定されつつある国、地域での国家戦略は全く異なる。それらは社会のエネルギー、産業、家庭が低炭素化・脱炭素化出来るように水素のコストを大幅に下げられる規模の大規模な電解水素の設備の導入をまずは策定している。

大規模電気分解が各国戦略の焦点

EUの水素戦略(図5)



資料: FCH

水素メタルスタンダード

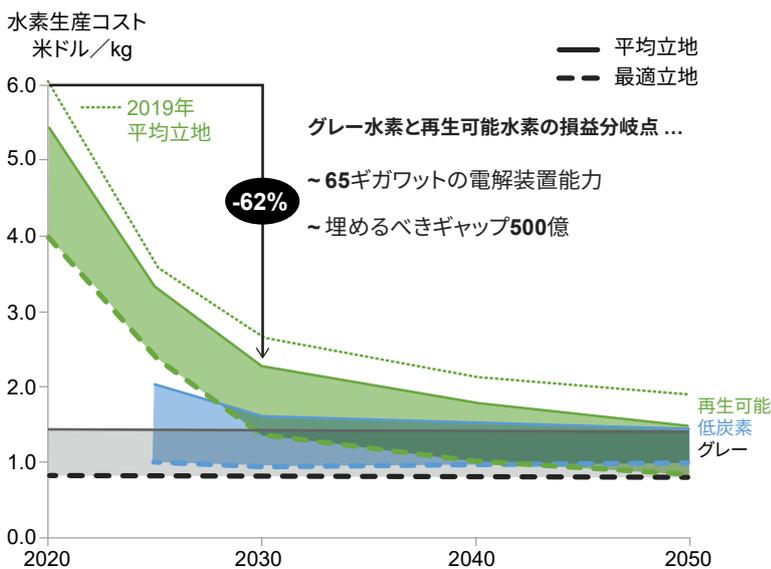
先ほど述べた水素カウンシルの報告書では、電解で作るグリーン水素が化石燃料に対してコスト競争力をつけるためには65GWレベルの累積設備導入量が必要というものであった。EUの目標自体40+40GW (EU内で40GW、EU外でさらに40GW) というもので、既にこの段階で水素カウンシルの大変意欲的な目標である65GWを超えている。EUの目標設定には意図的に化石エネルギーに勝てる数字を目標にして策定したと思われる。

グリーン水素コストは化石燃料エネルギーと競争可能な水準へ

これらの最近の水素の国家戦略は温暖化に向けた水素の役割をきちんと認識したうえで、温暖化対策として策定されている。各国の戦略は水素の製造規模にも反映されている。2017年に設定された日本の戦略では、当時としては大変意欲的であったが、年間30万トンという数字であった。2020年のEU目標は再生可能エネルギー由来の(グリーン)水素だけでも、年間一千万トンとなっている。この違いは水素の使用が車の燃料主体から社会の基本エネルギーに変わったことが大きい。(図5)

各国政府による水素生産目標は次第に拡大

進展に伴う水素生産コストの変化⁴ (図6)



資料 : Hydrogen Council, McKinsey & Company

コストとサプライチェーンの進捗

水素の大規模導入に向けた一番大きな課題はコストであって、特に水素で天然ガスを置き換える場合には大きな課題である。天然ガスから水素を作る場合においては変換の際に熱が必要であり、結果的に出来る水素は原料の天然ガスの熱量より小さくなる、その結果、水素は熱量当たりのコストで常に天然ガスよりも高価になる。しかしながら水の電気分解で製造するグリーン水素のコストは天然ガスの価格と関係なくなる。最近の再生エネの低コスト化は水素が天然ガス価格より安くできる可能性を生み出している。

最近の再生エネルギーコスト削減が水素コスト抑制に重要な影響を及ぼす

水素メタルスタンダード

このグリーン水素と化石燃料由来のエネルギーの価格競争は炭素税の導入によってさらに変わりつつあり、グリーン水素には追い風であるが、化石燃料には重荷となりこの傾向はさらに加速すると思われる。現在ほとんどゼロの国や3\$ (日本) から中間の英国 (30\$) フランス (50\$) からスウェーデンの128\$超まで幅広い。ただ今後は多くが高く推移してゆくとみられている。

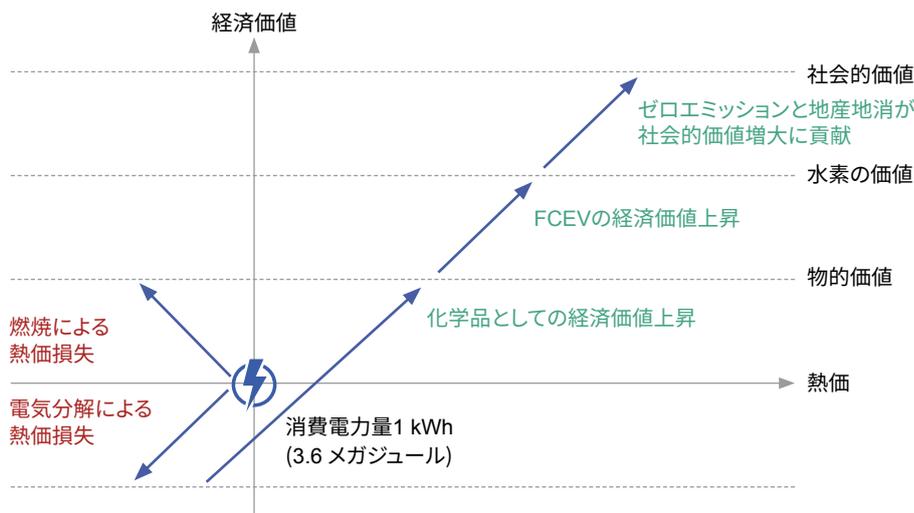
炭素税上昇が
水素生産価格の
競争性を強化

社会における水素の価値

水素は今後、単に燃やすのではなく燃料電池の様な幅広い技術のイノベーションをもたらすと考えられている。水素エネルギーのユニークな点は使われる方法によって許容される価格が異なる点にある。例えば燃料電池車で使うと同じ熱量から2-2.5倍走れる距離が延びる。石油は熱量当たりの価格が最も高いエネルギーなので比較的高価格の水素価格も許容できる。

最終用途の効率が
「水素vsその他燃料」
の競争力を決定する

水素の社会的価値 (図7)



資料: HyWealth

社会における水素の経済的な価値の考察

水素の価値 (価格) は物理量である熱量で決まるわけではない。近い将来にはさらに社会的な価値、例えば脱炭素価値や雇用増等を加えて考える必要がある。図7で社会的な価値の考え方を示す。水を電気分解して水素を作る場合に熱となって減る部分が約20-30%あるので、結果として水素の熱量は減る。しかし生成された水素の経済価値はその化学物質としての価値で決まるため増加する。水素を燃やして使う場合には電気-水素変換では使えるエネルギー量は減ることになる。しかしながら水素が燃料電池車で使われる場合には熱量当たりの走行距離は2-2.5倍に増加するため、この効率アップは水素の経済価値の向上に寄与する。さらに経済的な価値は水素の排気ガスフリー、炭素フリー、地産地消価値等の社会的な価値が加えられる余地がある。

金銭だけでなく、
ゼロエミッションと
地産地消も水素の魅力

実社会における水素

輸送分野における水素

筆者が最初に燃料電池の仕事をしたころには、燃料電池は重く、かさばり、そして大変高価であった。現在はどんどん出力アップし、かつ信頼性も上がっている。その利用も乗用車から重量トラックや船舶に広がろうとしている。さらには航空分野にも広がろうとしている。(図8) 多くの人たちは乗用車におけるBEV対FCEVの勝負は済んだと思っているが。現実にはBEVはノルウェーや中国の様に大きな政府補助金やインセンティブがある国を除けば、多くの国で未だ新車販売の数%程度であり、本当の普及初期段階にある。ユーザーにとって車の選択はライフスタイル(家族数や車の使い方や趣味等)の反映した結果でもある。車の選択に当たって、快適性やパワーによって価格には結構譲歩する(良いものにはお金を出す)も、車の不便性には譲歩しない(不便なものはそもそも買わない)。ZEV車(ゼロエミッション車)の普及は、まだこれからで候補技術であるBEVs、FCEVs、xEVs等による競争になると思われる。社会が水素や電気を基盤としたインフラになる段階では、水素ステーション等のインフラはそこら中に水素がある結果、殆ど問題でなくなる。無論、輸送分野においてもPGM(白金族金属、以下PGM)を使用する事、とりわけパワートレインにおいて大変重要な役目を果たす。PGMを使うことによって燃料電池の効率が上がり、小さくコンパクトで高出力で、信頼性が高くなる。PGM触媒を使うことによって燃料電池は実際に安くなる。それは小さくコンパクトに出来るからであり、その結果、必要な材料や構造体を減らすことが出来て、安く出来るようになる。

水素燃料は陸上・海上・航空すべての輸送で利用可能

PGM触媒は、効率的でコンパクト、パワフルで信頼性の高い電池を作り出す

輸送における水素(図8)



資料 : Toyota Motor Co.



資料 : Norled



資料 : Toyota Motor Co.

エネルギーシステムと産業における水素

エネルギー転換という電化が常に語られる。しかしながら電化ではできないか、あるいは実用的でない分野が、多数存在する。実際半分以上のCO₂は、電力以外の産業や家庭で排出されている、例えば製鉄やセメント製造や暖房等で実際に電力より多く排出されている。水素は、殆ど電気で出力される再生可能エネルギーと、幅広いエネルギーや原料・材料を必要とする実社会との間を埋めることが出来ると考えられる。

水素が電化困難な
セクターのグリーン
化推進を支援

エネルギー貯蔵とその分配・交易機能としての水素

電気は貯めるのが難しいエネルギーでもある。電気は化学物質化貯蔵（電池や水素）か機械力学的貯蔵（揚水発電や慣性電力貯蔵）でしか蓄えられないエネルギーである。さらに電気は途中で減衰が起きるので長距離輸送や広い海を越えての輸送は難しい。従って今後のさらなる電化の推進には、水素の様な補完するものが必要である。水素がバッファや貯蔵と輸送を担って電化を助けることになる。水素が季節間の変動吸収や長期大量貯蔵及び長距離輸送を担うことで、今後の世界の中心的なエネルギーである再生可能エネルギーをより実社会で大量に安定的に使うことが出来る様になる。

エネルギー緩衝装置
としての水素の重要
な役割

一方で電気には一秒たりとも需給のバランスが崩れると大停電が発生するという大変脆弱な面がある。このため高価で複雑なシステムが必要であり、大量に再生可能エネルギーを使う世界では基幹インフラシステムとして脆弱すぎる。これに対してガスネットワークでは、入出力変動はガスネットワーク内の圧力の変化として受け止めることが出来る。

水素は貯蔵も輸送も
容易で、電気に比べて
堅牢

この際にガスとしての水素の性能は1kg当たり120MJ(LHV)、140MJ(LHV)と圧力が変わっても変わらない、一方の電気は周波数や電力を厳密に維持しないとエネルギーの性能自体が変動することになる。筆者は、社会の基幹バックボーンとしては電力が大きな役割をするにしても全体のシステム変動を受け止める必要から水素ガスによるガスネットワーク・パイプラインによる方が良いのではないかと考えている。

家庭での水素の活用

水素ガスネットワークには家庭の脱炭素化を最低限のコストで達成できる可能性がある。暖房の必要な多くの国では、暖房には天然ガスが使われている。しかし、多くの寒い国で、これらの設備をすべてヒートポンプの活用で電化するにはシステム全体を入れ替える必要があり、大変多額の費用が必要である。しかしローカルガスネットワークが水素の様な脱炭素ガスを流せば比較的安価に脱炭素が進められる。実際、英国のLeeds市では大規模なガス管の水素化のプロジェクトが進行している。

グリーン水素が
住宅用温熱を容易
に脱炭素化

持続可能なカーボンニュートラル社会のバックボーン (図9)



資料 : SFA (Oxford) HyWealth

持続可能な社会におけるPGMの役割

現在、PGMの役割は車の排気ガスを浄化する触媒が主である。化学産業や製油所でのガスや石油を有効な材料原料に換えることとしてはいるがやはり主用途は排気ガス浄化の触媒用である。現在のZEVのトレンドは少し前のディーゼルゲートの影響による内燃機関の減少に加えて長期的に進むであろう。脱炭素社会においてはエネルギーのソースは化石燃料からソーラーや風力等、再エネを中心としたものに移る。しかしながら、我々は物質社会に住んでいるため、再生可能エネから発生する電気だけでは我々の生活は担保できない。電気を物質変換するpower to X (PtX)が重要であり、その効率を支配するPGM触媒の働きは大変重要である。

自触媒への機会が長期的に衰退し始めるにつれ、水素社会におけるPGMへの機会が成長

一方で、将来社会ではエネルギーの使用もタービン／バーナー／ICEなどの燃焼プロセスで進化してきた現在とは大きく異なる。水素は燃料電池と組み合わせると大変効率的に使える。内燃機関に比べて2－2.5倍効率が高い燃料電池は多くのPGMを必要とする。結果としてPGMは水素の生産においても使用においても大きな役割を果たすことになる。来るべき低炭素の持続可能な社会では、PGMにはより積極的な役割が期待される。

水素の生産・利用に大きな役割を果たすPGMには、魅力ある未来が期待できる

社会における水素

水素は社会が化石燃料ベースから持続可能な低炭素社会へ移行するのを助ける。この移行に際しては大きなビジネスを生み出すが、一方で大規模な投資(お金)が必要になる。

水素に必要な投資額を過小評価すべきでない

この大規模なお金は何時どうやって社会に還元できるのであろうか。簡単に考えるため、ガソリンスタンドで100円使うことを考えよう。日本でも欧州でも40－50%は税金であるので、ここではひとまず税金を置いておいて話を進めよう。先ほどの100円(税別)の支払いの内70－80円は産油国へ行くお金であり、残りの20－30円が製油所やガソリンスタンド等の国内での付加価値となる。エネルギー転換はこのお金のフローを内向きに変えることになる。特に日本の様な消費国は、さらに何処か世界中の安いところで造ったものを買うか、あるいは国内で作るかという自由を得ることが出来る。

お客様の視点では同じお金を払うので変わらないというように見えるとしても、お金の分配という視点で見ると全く異なることになる。再生可能エネルギー起源であるグリーン水素は大変幅広いソースから作ることが出来、ソーラーPVや水力発電、陸上、海上風力発電、さらには廃棄物・ゴミからもできる。これらの製造や輸送を通じて国内に多くの投資がなされ、結果として仕事を生み出すことになる。このことは発展途上国にとっても大変有効な解決策になる可能性がある。多くの途上国では収入のかなりの部分を石油購入に充てており、車を使うことでお金が無くなって自国経済への投資がほとんどできなくなる(いわゆる(1人当たりGDP 5000ドルの罫)というものだ。さらに、歴史上多くの争い、戦争はエネルギーに関わってきた。水素社会では、我々はもう争う必要はなく自分の国土から得られるエネルギーを使えばいいことになる。現在の様な化石燃料主体の世界では、お金(富)の有り無しは資源を持っているかどうかの影響が大きい。再生可能エネルギーは地球上に広く分布しているため、水素社会ではお金(富)の動きは、資源の有り無しというよりはより労働の多寡によることになる。従って水素社会はより平和で多くの人にとって幸せな社会になる可能性を持っていると思われる。

石油輸入とは異なり、エネルギーの地産地消は地域に雇用を創出し、途上国を助ける

再生可能エネルギーと水素社会は世界により平等に行きわたり、地政学的緊張を緩和

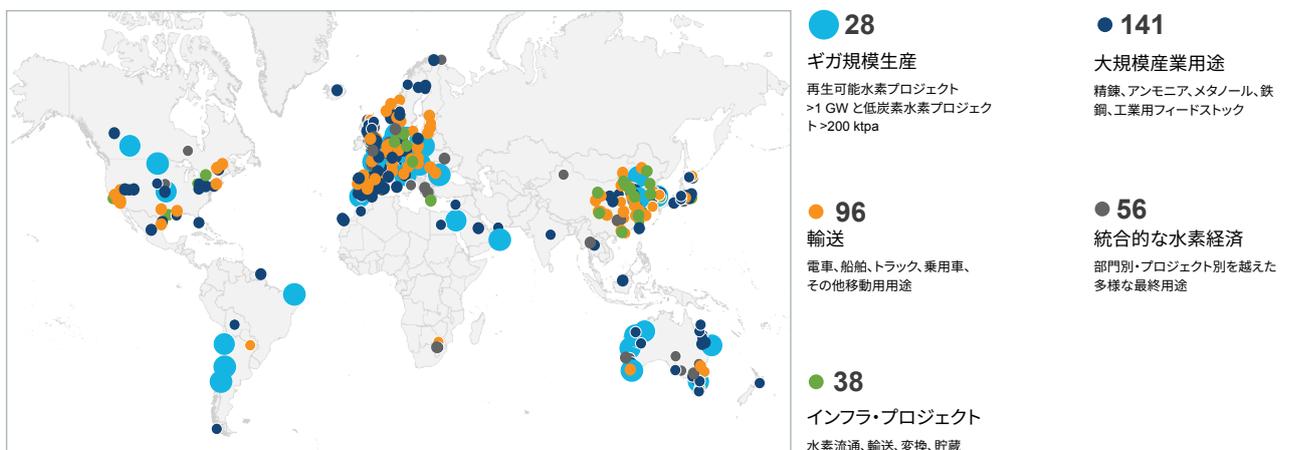
水素ビジネスの拡大状況

EUや他の多くの国で水素の国家戦略を策定するに従い、水素に関するプロジェクトや投資は急速に成長しつつある。図10に示すように水素に関するプロジェクトの数は約360件に達しており、額として500兆円規模になりつつある。2030年に向けて電気分解装置は6900万kW、水素の生産量は770万トン規模になりつつある。これらのプロジェクトがすべて決まっているわけではないが、多くは既に真剣な準備段階に入っている。

世界中で水素プロジェクトが進行し、2030年までの69 GW電解設備実現は誇大広告ではない

水素ビジネスは単なる流行ではなくすでに巨大なビジネスになりつつある。

バリューチェーンで見る世界の水素プロジェクトと投資(図10)



資料: Hydrogen Council, Hydrogen Insight Report 2021

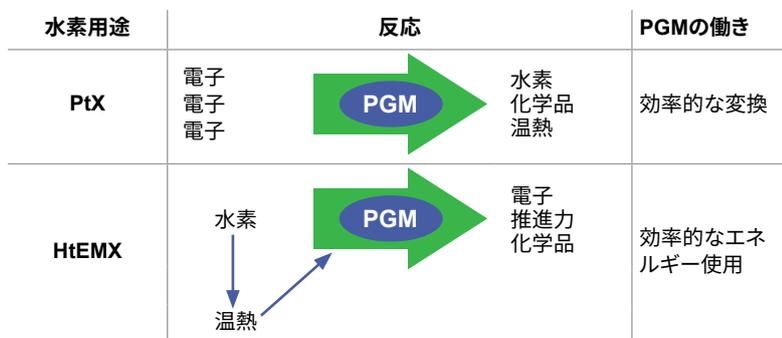
結論 “水素はあなたにそしてPGM 産業に何をもたらすか”

地球温暖化がもたらすエネルギー転換は、社会により多くの水素の利用をもたらす、これは多くの国に自由をもたらすことになる。社会での水素の利活用は、社会に巨大なエネルギー転換プロセスをもたらす。電気から物質変換“PtX”と利用時の燃料電池内の様に水素から電気・物質変換“HtEMX”が実行される。結果としてPtXもHtEMXもPGMを大量に使うことになる。技術開発はこのエネルギー転換でPGM使用量をいかに減らすかに注力しているが、結果的に全体の使用量及び活用方法は大幅に増加する。さらにPGMの役割は大きく変化し現在の受け身的な役割(汚染物質をきれいにする触媒機能)から水素を通じて物質を生成する(PtX)さらには水素を直接あるいは間接的に使う際に大きな役割を果たす(HtEMX)能動的な働きをすることになるだろう。

気候変動が水素社会への転換の原動力に

エネルギー変換ではPGMの節約が行われるが、全体として持続的な市場成長の可能性は高い

水素社会におけるPGMの役割(図11)



資料: HyWealth

現在のエネルギーシステムは経済成長を追って作られて来たものであり、マスタープランやビジョンが有ったことは無い。現在のエネルギー転換は未だ本当に初期段階ではあるが、方向性は鮮明であり、ほぼ決まっているが、方法はまだこれからである。人類にとって持続可能な目標や脱炭素に向けたビジョンを共有することで未来を作ることが出来ると思われる。それは大変な挑戦ではあるけれども、言い方を変えれば我々にとって初めて未来を我々自身で設計することが出来ることとも言えそうだ。さらにその予算は、現在化石燃料に使っているお金を回すことを考えれば、巨大な額が準備されているとも考えられる。欧州で言えば1200兆円以上(年間40兆円掛ける30年)、日本で言えば600兆円規模(年間20兆円×30年)になる、この便益じたいは2050年以降も大きく続くので、これは我々の子供たちへの大きな贈り物になるだろう。

人間性で未来を設計するチャンス

この低炭素化へのエネルギー転換の挑戦は未来に向けたアイデアの勝負、競争である。エネルギー転換はだれにでも大きなチャンスを与えるが、特に若い世代には“仕事と希望を”高齢者世代には“投資先とリターンを”、さらに途上国にはエネルギーに関しての自由と成長の余地が得られることになる。PGMは将来の世界において物質を生み出し、さらなる機能を獲得することができ、それによって未来を生み出す役割をされると考えられる。

PGMは未来社会の材料と機能を創造する中心的存在

過去は変えられない、現状を変えるのはさらに難しいが、未来を変えることに挑戦することは出来る。それは未来を設計することでもある。我々は未来を設計する課題に挑戦し、我々自身の未来が平和で幸福である社会を作ることを(PGMを通じて)楽しんでいこうではないかと思う。

PGMを中心に未来を
設計する

水素とPGMによるエネルギー移行がもたらすものは・・・

若年層にはチャレンジと雇用を

高齢世代には投資先とリターンを

万人に幸せな夢を

参考文献

- 1) https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf
- 2) https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf
- 3) <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>
- 4) <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>

グリーン水素に向けて



グリーン水素に向けて

ジェレミー・クームズ
独立コンサルタント、SFA (Oxford) エグゼクティブ委員会メンバー

COP26の背景

新型コロナウイルス感染症拡大による1年の延期の後、国連気候変動枠組条約第26回締約国会議 (COP26) は、2021年11月に英国スコットランドのグラスゴーで開催されました。これは2015年パリ開催のCOP21会期末に締結された地球温暖化対策への取り組みを世界の国々が再検討する機会として計画されたものです。

パリ協定では、産業革命以前のレベルを基準として地球温暖化を2.0°C未満に抑える取り組みを行い、1.5°Cを目指すとう合意にいたしました。一般的な理解としては、目標下限を達成するには2030年までの10年間に炭素排出を半減させ、2050年までにネットゼロ(=環境に流入する二酸化炭素量が環境の吸収量を超えない状態)を実現する必要があります。脱炭素に向けた取り組みは、石炭・天然ガス使用の段階的停止、輸送手段の電化、森林破壊の制御、農業の持続可能性強化など、多岐にわたります。

合計194か国がNDC (国の自主的貢献)、すなわち気候アクションプランを国連に提出しました。2021年7月時点で、ネットゼロ目標を採択した国の総計は世界GDPの80%を占めるものとなります。炭素削減目標は、その国の化石燃料依存度や経済発展度など、歴史的な現状にも依拠します。したがって、たとえばサウジアラビア、オーストラリア、中国、インドなどのNDCは、パリ協定の目標に完全に合致するものではありません。他にも、開発途上国が行う気候制御と緩和対策の努力に対する先進国からの資金援助についても論議がありますが、期待通りの結論は出ていません。

世界規模の脱炭素への気運は高まってきましたが、COP26後に継続的にどこまで達成できるかは不透明です。グラスゴー会議直前に国連環境計画が発表した「排出ギャップ2021」では、各国が改訂した最新版NDCでも世界的にパリ協定の地球温暖化抑制目標を達成するには不十分であり、「ただちに、急速かつ大規模な温室効果ガス削減を実行しない限り、今世紀末までの温暖化を1.5°Cに留めるところか、2°Cとすることさえ到底無理である」と不穏な宣言が下されました。そして目標をさらに絞ったとしても、その他の障害が立ちはだかります。ニッケル、コバルト、リチウムをはじめとする多くの必要原料を時間制限内に供給増加するのは至難の業です。

世界の炭素排出量は2030年までに半減を目指し、2050年までにはゼロを目標

世界GDPの80%は、ネットゼロの目標を持つ国からとなる

先進国からの資金では、発展途上国の気候変動への取り組みを支援するには不十分

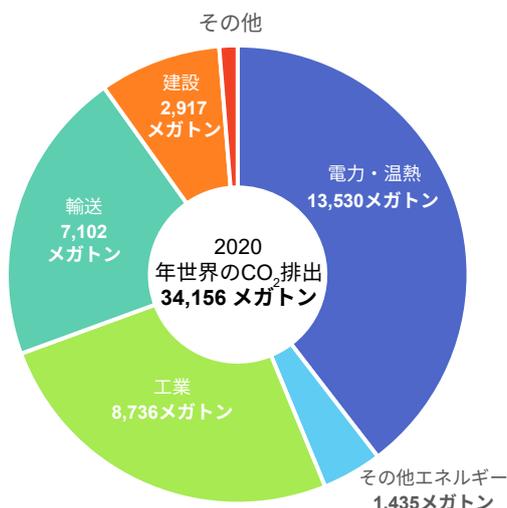
脱炭素技術のための原料供給は、急速に増加しなければならない

脱炭素と水素

グリーンエネルギー移行には、化石燃料エネルギー（石炭・石油・天然ガス）を再生可能エネルギー（風力・太陽光）で代替することが求められます。国際エネルギー機関（IEA）の最新の「World Energy Outlook」によると、2020年のCO₂排出の世界合計は34.2ギガトンでした。最大の炭素排出部門はエネルギー産業（電力、温熱、その他のエネルギー）で、世界合計の約44%を排出しました。ここでは、排出削減は、化石燃料から再生可能エネルギー源へのシフト、およびエネルギー使用のさらなる効率化によって達成することが可能です。CO₂排出の26%を占める工業部門でも再生可能エネルギーに基づくシステムを導入することができます。輸送部門からの排出は21%ですが、ここでは電化技術と代替燃料により削減を図ることが可能です。これらの部門では、再生可能資源由来の水素がエネルギー移行にますます重要な役割を果たすと考えられます。

世界最大のCO₂排出源はエネルギー分野

部門別CO₂排出



グリーン水素は、各産業分野からの排出量を削減する役割を果たすことが出来る

資料：IEA, World Energy Outlook 2021年10月

水素の重量当たりのエネルギー密度は非常に高く、天然ガスの2.6倍となります。燃焼時に地球温暖化や大気汚染につながる炭素排出がなく、安定的なエネルギー貯蔵の媒体として役立ち、ガスパイプラインを通して輸送も容易です。一方で、水素は最軽量の元素であることから、体積当たりのエネルギー密度には乏しく、輸送や使用には圧縮または液化が必要になります。また自然に発生することがないため、天然ガスや水といった他の分子から抽出しなければなりません。このため生成プロセスで効率が低下し、水素生産コストはどうしても使用エネルギーのコストを上回ってしまいます。そのため、水素の競争力は、電気自動車用バッテリーや家庭暖房用ヒートポンプなど、再生可能電力を直接使用できる用途で発揮されることとなります。

水素製造のコストは入力電力のコストよりも高い・・・

・・・したがって、再生可能エネルギーを直接使用できる場合、水素が常に最良の選択であるとは限らない

水素のメリットとデメリット

メリット

- 重量当たりの高密度
- 燃焼や電化において炭素排出がない
- エネルギー貯蔵媒体

デメリット

- 自然発生しないため、生産にエネルギーが必要
- 体積当たり低密度で、使用には圧縮か液化が必要

そのため水素は、他の方法では不十分な場合や排出を抑えるのが困難な場合に、エネルギー貯蔵やエネルギー集約的な用途の脱炭素に貢献します。工業界ではすでにアンモニアや化学製品の生産に重要な役割を担っています。水素が天然ガスからではなく再生可能電力から生成されれば、こうしたプロセスを脱炭素化します。製鋼においては、溶鉱炉中の熱源として水素とコークスを併用すると、炭素排出をいくぶん抑えることができます。しかし直接還元電気アーク炉で水素をコークスに替えて還元剤として使用すれば、炭素排出量はほぼゼロに近づきます。ヨーロッパではそうしたプロジェクト14件が計画されており、うち9件はEUの年間製鋼量の13%に及ぶ具体的な生産目標を掲げています(資料: <https://bellona.org>)。

エネルギー媒体としての水素は、天然ガスと混合して発電に使い、また一般住宅のボイラー燃焼にも使えます。しかし、電力の安定供給を行う適応力あるエネルギー貯蔵体として、脱炭素にさらに大きな効果を発揮します。太陽や風力による不安定な発電への依存度が高まると、電力供給と供給不足に備えた貯蔵装置のバランスが問題になります。余剰電力があるときに生産貯蔵される水素は、このニーズに最適です。

輸送部門では、水素と酸素の混合が燃料電池内で発電を行い、副産物は水のみとなります。特に大型車や長距離輸送用途では、バッテリーの重量と走行距離の限度が問題となるため、車両の電化において水素はバッテリーを代替する主要な手段となります。水素に適切な圧縮あるいは液化を達成できれば、長距離トラック、電車、また船舶や航空機まで、すべてにおいて燃料電池の採用が可能になります。ディーゼルに替えて100%水素で稼働する内燃機関も大型車両用に開発が進められています。

グリーン水素は、アンモニアや鉄鋼などの産業上重要な製品の脱炭素化に役立つ

グリッドバランシングー水素は断続的な再生可能エネルギーとエネルギーの貯蔵庫としての役割も果たす

水素は、長距離重量輸送車向け燃料、あるいは内燃機関、燃料電池にもなる

水素生産

環境への配慮、カーボンフットプリントから見た水素化の行程

行程	カーボンフットプリント
グレー:石油、ガス、石炭の水蒸気メタン改質 (SMR)	高い
ブルー:SMRによるが、排出CO ₂ を回収・貯留 (CCS)	低い
ターコイズ:メタン熱分解により、副産物として個体炭素が発生	低い
ピンク:原子力エネルギーの電解による	低い
グリーン:再生可能エネルギー(風力または太陽光熱)の電解による	ゼロ

今日使用されているほとんどの水素は、二酸化炭素排出量が高い

現在、水素の95%は炭化水素から製造されています。「グレー」水素は(天然ガスの価格により)キログラム当たり1米ドルと安価に生産できますが、その際に多量の温室効果ガスを排出します。「ブルー」水素も化石燃料から生産されますが、排出炭素を回収・捕捉するため、コストはやや増大します。捕捉できる排出炭素は85~95%に留まり、地下の洞穴や工場跡地に大量のCO₂を貯蔵する長期的義務は複雑で数量化が困難であることから、解決策としてはおそらく中間的なものとなるでしょう。「ピンク」水素(または「イエロー」水素)は原子力による電気を使って生産されます。低炭素ながら高価で、水素生産方法としては好まれません。排出ゼロ、またはほぼゼロとなる、本当の意味で容認できる方法は、ソーラーパネルや風力タービンからの無限に再生可能な電力を用いて、電解装置の中で水を水素と酸素に分解して生み出す「グリーン水素」となります。

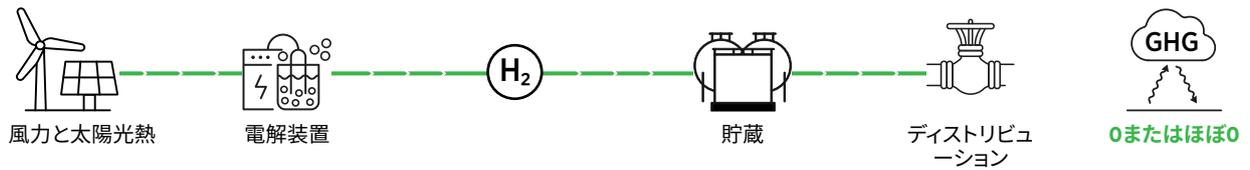
炭素貯留は限られた解決策

再生可能電力による電気分解は水素に導き、ゼロカーボンフットプリント

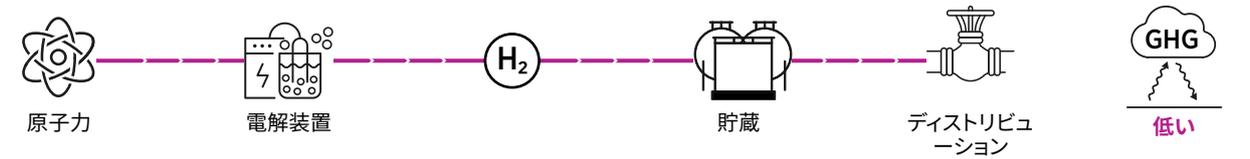
水素メタルスタンダード

水素の色分け

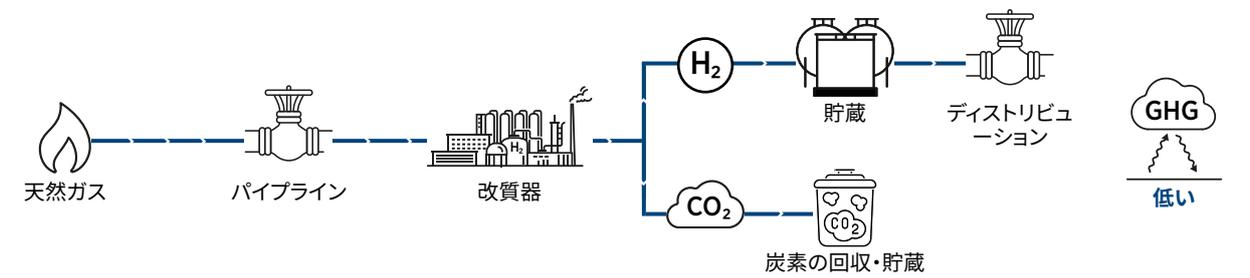
グリーン水素



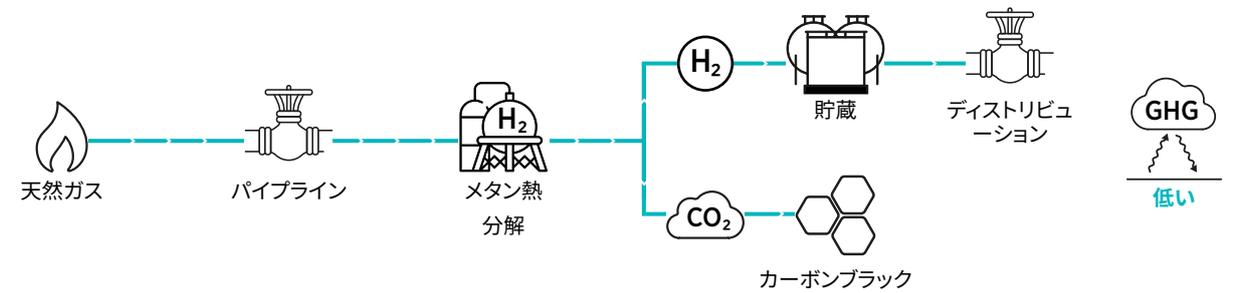
ピンク水素



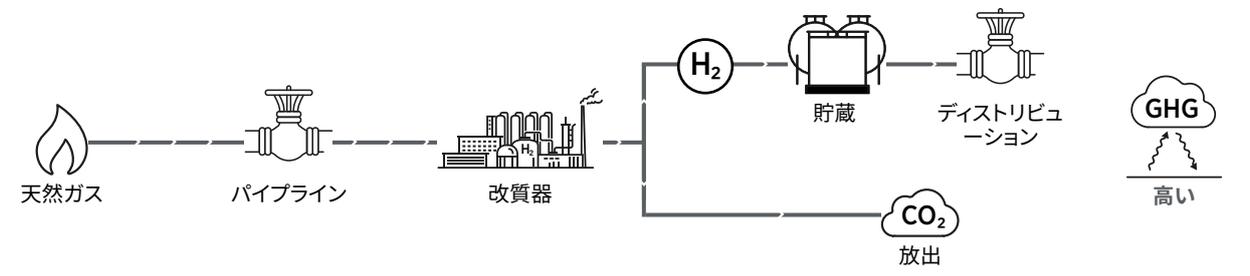
ブルー水素



ターコイズ水素



グレー水素



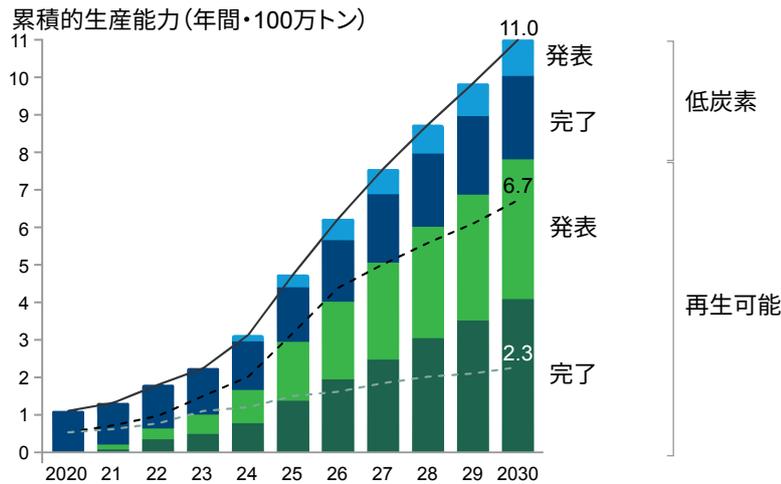
資料 : Energy Industry Review

水素メタルスタンダード

このように、技術開発の焦点は水素と電解装置となりました。EUの水素戦略ではグリーン水素を焦点とし、2050年までのカーボンニュートラル達成とパリ協定に基づく汚染ゼロへの世界的な取り組みに向けて、優先項目と定めています。2020年の「欧州グリーンディール」で、EUは2030年までに域内で電解装置能力を40ギガワットとし、水素輸出ができる近隣諸国でさらに40ギガワットとする目標を公表しました。英国も同時期までに低炭素水素能力5ギガワットを目指しています。

EUの水素戦略は、2030年までに40GWの電解槽容量という野心的な目標を設定している

2030年に向けたクリーン水素能力公表



再生可能エネルギーにおける水素製造は、急速に増加する見込み

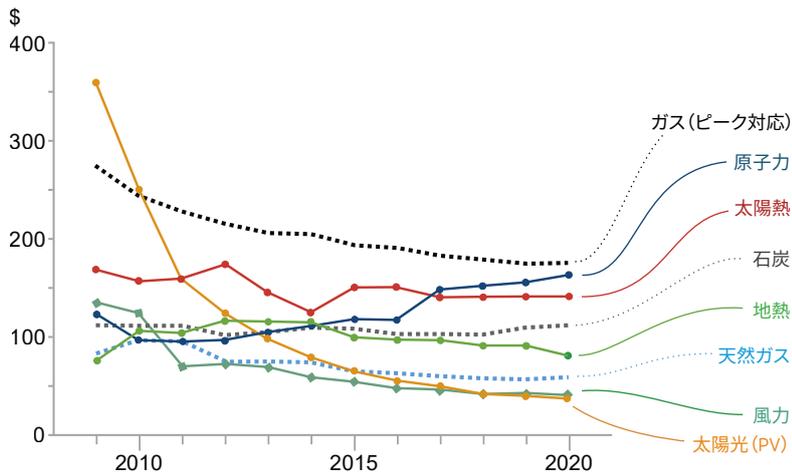
資料 : Hydrogen Council, McKinsey & Company, Hydrogen Insights 2021年7月改訂

十分な競争力をつけるためには、グリーン水素の生産コストは、現状のキロ当たり2.5~6米ドルからかなり低減させなくてはなりません。十分な投資と原料の供給があれば長期的に達成可能と考えられます。グリーン水素が依存する再生可能電力の生産コストは、太陽光熱・風力発電による均等化発電原価(LCOE—発電所の建設・運転維持の生涯コスト差引き)が石炭・天然ガス由来の電気コストを下回るまでになっています。現時点での世界の電解装置能力は約3ギガワットです。2021年7月にMcKinsey & Company が水素協議会に提出した報告書「Hydrogen Insights」で予想するように、2030年までにこの能力が70ギガワットまで高まるとしても、電解装置の資本的支出を軽減するまでには長い時間がかかりそうです。

水素のコストを削減することは、再生可能エネルギーのコストを削減することに結びつく

太陽光と風力はすでに発電のために石炭及びガスと競合している

化石資源・再生可能資源からの均等化発電原価



資料 : RCraig09 - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=99427431>

グリーン水素はいつブルーやグレー水素と同等の価格になるか？

こうした動向により、グリーン水素のコストは、既存の生産方法と競争できる水準にまで低下するだろうと考えられます。BloombergNEFによれば、プロトン交換膜 (PEM) 電解装置使用のグリーン水素価格は、2030年までにブルー水素と並ぶまでに低下するかもしれません。モルガンスタンレーによると、再生可能電力への高評価と現在米国で施行されているような電解装置への助成があれば、グリーン水素は数年のうちにグレー水素と競争できるということです。

PEM水電解装置をスケールアップするだけではなく、資金の融資や補助金も必要

ネットゼロへ舵を切るにあたり、カーボンプライシングが重要要素と認識されてきました。以下のIHS Markit世界炭素インデックスが示すように、炭素クレジットのコストは上昇傾向にあります(データ構成要素の80%はEU27か国およびカリフォルニアの炭素クレジット先物市場より)。排出量取引制度や炭素税のかたちでカーボンプライシングがより世界的に採用されれば、そこにグレー水素・ブルー水素生産の実コストが考慮されることから、今後のグリーン水素の競争力を強化することにつながります。

ガス排出権の実質価格を支払うことは、グリーン水素実用化支援のかなめ

世界炭素インデックス (単位:米ドル)



資料 : IHS Markit

電解装置の種類

グリーン水素生産に使える水電解装置には4タイプがあります。アルカリ(ALK)水電解装置とPEMは、すでに大規模な商業生産に利用されています。ともに、現在のグレー水素生産コストと比較した場合に高価だと考えられています。アニオン交換膜(AEM)および固体酸化物(SOE)を用いた電解装置はいまだに開発途上ですが、大きな可能性を秘めています。4タイプの技術には、いずれにおいても基本的な原材料からパフォーマンス、耐久性、完成時期まで、それぞれに課題があります。今のところ明らかに抜きん出たタイプはなく、将来性はそれぞれのアプリケーションに依拠しているといえます。

水からグリーン水素を製造することは、いくつかの電解装置技術が実用化されている

2020年現在のPEMおよびALK技術

	PEM	ALK
冷間起動(常用負荷へ) / 分	<20	<50
寿命(スタック) / 時間	50,000-80,000	60,000
スタックのユニットサイズ / MW	1	1
資本費用(スタック) 最小1 MW	400米ドル / kW	270米ドル / kW
資本費用(システム) 最小10 MW	700-1400米ドル / kW	500-1,000米ドル / kW
水素生産率 / m ³ / h ¹	400	1,000

資料 : (1) IRENA (2020), *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
 (2) Yujing Guo et al (2019), *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 371 042022

ALK電解装置は設計も生産プロセスもシンプルで、高効率で大量生産に適しており、コストも比較的抑えられます。稼働はベースロードで大きな変動なく最適となります。PEM電解装置は白金族金属の触媒に依存するため、現在のところALKと比較して50~60%高価になりますが、動的応答に優れ、再生可能電力の供給に伴う断続稼働でも能力を発揮します。ALK電解装置の開発要件は、その動的応答と断続稼働の能力の向上です。一方PEMの場合は、より高効率・低コストで大量生産を可能にすることが求められます。

ALKとPEMは商業的に実用化されていますが、AEMとSOEは初期段階

AEMの可能性は、ALKの単純さを備えながら過酷な稼働環境を緩和し、高価な金属を使わずにPEMの効率を獲得することですが、全体としてパフォーマンスと安定性に欠けます。SOEは高温での効率に優れるため、安価な金属を利用することができますが、主な問題は耐久性です。

完全な勝者は今のところ存在しないのが現状

電解装置技術の比較

	アルカリ	PEM	AEM	個体酸化物
稼働温度	70-90 °C	50-80 °C	40-60 °C	700-850 °C
動作圧	1-30 bar	< 70 bar	< 35 bar	1 bar
電解物	水酸化カリウム (KOH) 507 molL ⁻¹	PFSA膜	DVB高分子支持体併用KOHまたはNaHCO ₃ 1molL ⁻¹	イットリア安定化ジルコニア (YSZ)
セパレーター	ZrO ₂ 安定化、PPSメッシュ併用	固体電解質 (上記)	固体電解質 (上記)	固体電解質 (上記)
電極/触媒 (酸素サイド)	ニッケルコート有孔ステンレス鋼	酸化イリジウム	高表面積ニッケルまたはNiFeCo合金	ペロブスカイト型 (LSCF、LSMなど)
電極/触媒 (水素サイド)	ニッケルコート有孔ステンレス鋼	カーボンブラック上にプラチナナノ粒子	高表面積ニッケル	Ni/YSZ
多孔輸送層アノード	ニッケルメッシュ (該当する場合)	プラチナコートの焼結有孔チタニウム	ニッケルフォーム	粗いニッケルメッシュまたはフォーム
多孔輸送層カソード	ニッケルメッシュ	焼結有孔チタニウムまたは炭素布	ニッケルフォームまたは炭素布	なし
二極プレートアノード	ニッケルコート of ステンレス鋼	プラチナコートのチタニウム	ニッケルコート of ステンレス鋼	なし
二極プレートカソード	ニッケルコート of ステンレス鋼	金コートのチタニウム	ニッケルコート of ステンレス鋼	コバルトコート of ステンレス鋼
フレームとシーリング	PSU, PTFE, EPDM	PTFE, PSE, ETFE	PFE, シリコン	セラミックガラス

資料 : IRENA

水素と白金族 (PGM) 金属

エネルギー、工業、輸送の分野では、水素とPGMが深く結びついており、こうした用途におけるPGM需要は今後10年間で次第に拡大すると考えられます。最大の成長は、電解装置を使う水素生産のグリーン化によるものです。

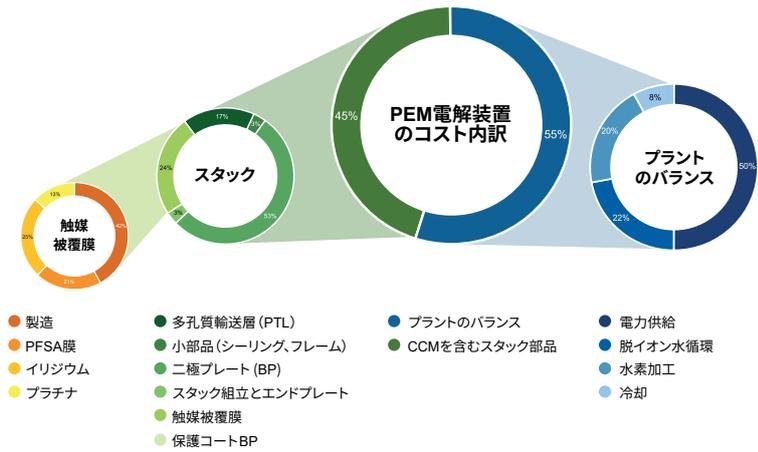
PEM電解装置では、水素が生成される電極 (カソード) でプラチナ主体の原料が使われ、酸素が生成される電極 (アノード) では通常イリジウムが使用されます。

PEM電解装置のコアでは、PGMを含む触媒被覆電解質膜 (CCM) が全システム費用の約10%を占めます。このコスト要素を低減するためには、PGM、特にプラチナ精錬の副産物であるために非常に生産量が少ないイリジウムの装填量を削減する必要があります。

PEM水電解装置においては、プラチナとイリジウムが不可欠

PEM水電解装置技術にはPGMが不可欠なので、PEM採用コストの懸念が生じる

PEM電解装置のコスト内訳



資料 : IRENA

イリジウムとプラチナは技術的にPEM電解装置に最適であるため、完全に代替するのは困難でしょう。集約的なPGM使用を削減するイノベーションは、たとえば触媒表面積を増大させる、触媒被覆材量の層を薄くするなど、触媒界面化学技術において知られたテーマに基づくものとなります。PGM製作者は長年にわたり、こうした方法を用いてPGM装填量を削減しつつ、同時に自触媒や燃料電池など製品のパフォーマンスを向上させて成功を収めてきました。

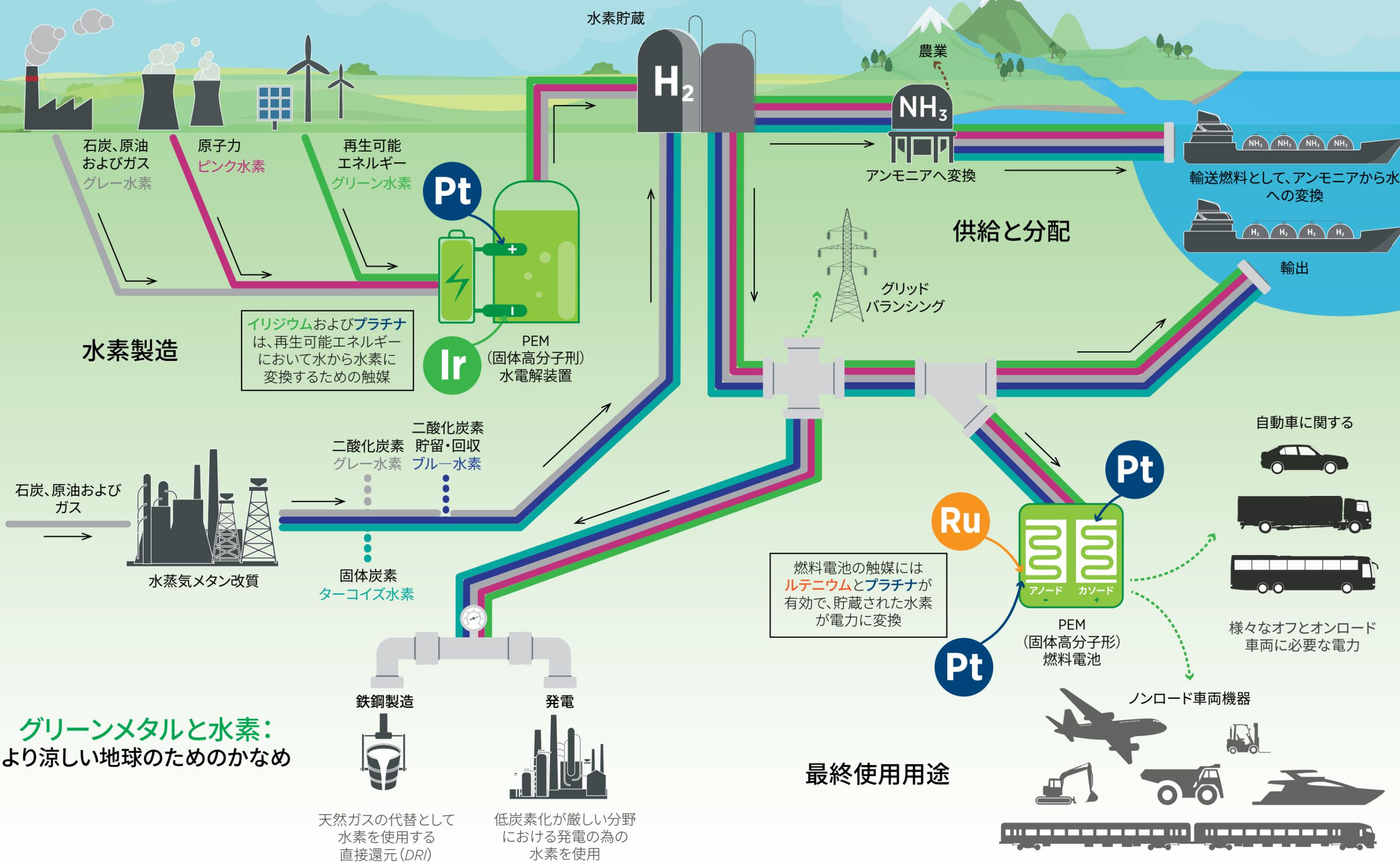
技術革新によりPGMの利用も低減できるであろう

PEM燃料電池では、バックアップ、ポータブル、グリッド外電力など、輸送用途であれ工業用途であれ、カソードとアノードの双方に触媒としてプラチナが使用されています。ルテニウムは、水素フィード中の不純物からプラチナを保護するために追加されます。グリーン水素はグレー水素より純度が高いため、不純物のない水素が広く行きわたれば、ルテニウム装填量を削減することにつながるでしょう。

水素エンジンでは、炭化水素と炭素が排出されないため、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンのようなPGM自触媒が不要になるかもしれません。窒素酸化物の排出があっても、エンジン温度の制御により制限することが可能です。残りの排出物は選択触媒還元 (SCR) により除去することが可能ですが、PGMがそこに使われることはありません。しかし、ディーゼル触媒の窒素酸化物除去システムのように、SCRから漏れるアンモニア除去のために多少のプラチナが使用される可能性はあります。しかし、かつてのディーゼルエンジンにスパークプラグが必要になり、プラチナとイリジウムの需要が伸びる可能性があります。

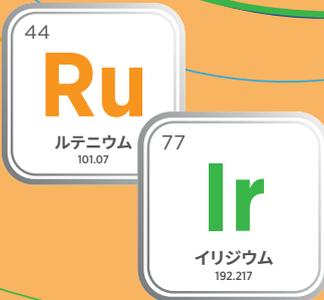
内燃機関で水素を使用すると、自動車触媒やスパークプラグに影響を与える可能性がある

世界的な水素社会におけるPGM需要の高まり



イリジウム& ルテニウム 市場

四半期コア分析パッケージ
2021年第4四半期



イリジウムおよびルテニウム市場の短期的需要動向
と弊社の最新5か年予想をお届けいたします

水素経済に不可欠な金属類

SFA (Oxford) は、イリジウムおよびルテニウム市場の現在と将来について信頼できる視点を提供することを目的に、両金属の採掘生産まで遡り、全主要エンドユーザーの詳細な需要モデリングを開発した唯一の会社です。

「イリジウム&ルテニウム四半期コア分析パッケージ」は市場の現状を見つめ、分析、グラフ、解説を通じて市場の変化を視覚的に紹介します。

SFAのイリジウムとルテニウムの市場に関する膨大な知識と経験を駆使して、独自のレビューを提供いたします。技術開発による変化をまとめ、その基盤となる需要と最終用途の変化、また台頭する水素経済に注目します。

一次金属供給に対する商業的洞察、他のPGM類との関連、最終用途、価格弾力性、代替にかかわるリスクなども解説します。

「四半期コア分析パッケージ」は、現在イリジウムおよびルテニウム市場に影響している事象や動向について実践的な精査を行うものです。

レポートの特色:

- 市場概説
- 価格展望と2025年に向けたけん引要素
- 需要動向
- 市場需給バランスを提供する唯一の情報源
- 貿易動向の分析
- 供給課題と鉱業経済

最新号では以下のトピックで解説と分析をお届けいたします。

- 改善する **メタル流動性** と南アフリカからの **供給拡大** における中期的投資機会
- **自動車市場** に対する短期的・長期的需要変化に対する影響
- 該当市場セクターにおける **リサイクリング** 拡大の予測
- エレクトロニクス市場・メモリ市場の需要持続を支える **技術開発**

低炭素の未来を促進する：
水素経済のためのミッションク
リティカルな金属類



低炭素の未来を促進する： 水素経済のためのミッションクリ ティカルな金属類

フランセスカ・プライス&アレックス・ビドル SFA (Oxford)

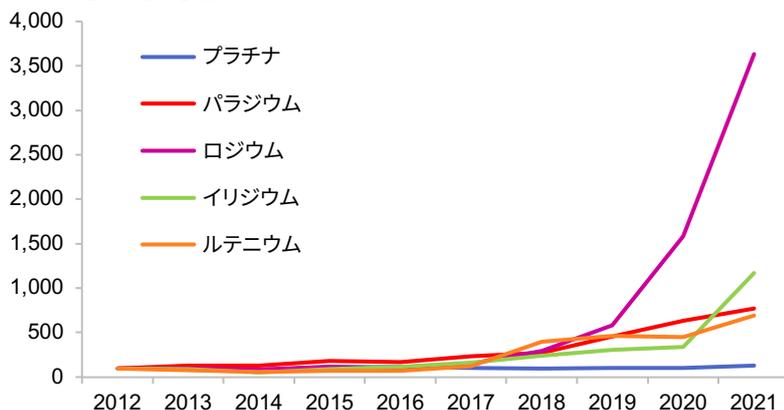
水素経済がいつその脚光を浴びるにつれ、その実現へのミッションクリティカルな金属類としてプラチナ、イリジウム、ルテニウムの長期的確保に対する関心が高まっています。特定の電解装置に使われるイリジウム、燃料電池に使われるルテニウムにはまったく新しい市場が開かれ、需給分野に興味深い動きを作り出しています。

プラチナ、ルテニウム、
イリジウムおよび水素
用の主要触媒金属

従来、イリジウムとルテニウムでは（プラチナと異なり）、10年前に生産者がかなりの貯蔵量を有したにも関わらず、「新規の」最終用途数が限られ、市場開発のイニシアチブはほとんどありませんでした。ごく最近まで生産者がイリジウムとルテニウムの生産量を公表することさえしておらず、その不透明性から、エンドユーザー側では採用する確信を持たずにいました。市場規模が小さいこともこれらの採用機会を奪ってきました。特にイリジウム市場は、PGM市場中でも他を大きく下回る規模に限られます。イリジウムの市場は30万オンスで、プラチナのほぼ20分の1です。ルテニウムはプラチナ市場の1/6ほどの100万オンス未満です。

南アフリカ5金属収入

2012年を100とする指標



資料：SFA (Oxford)。注記：2021年南アフリカランド実質収入を掲載。

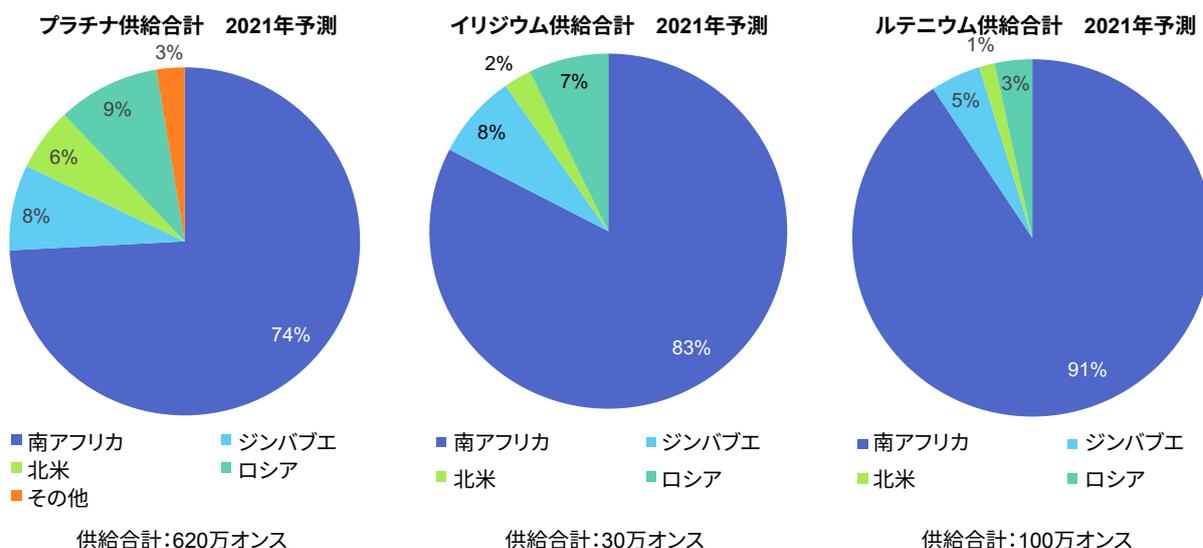
しかし南アフリカの鉱業に変化が生じ、イリジウムとルテニウムによる収入が上昇してきました。PGMの収入バスケットに占めるこれら副産物の収入が重要性を増し、生産者もそれを認識するようになりました。

鉱業収入中でこの金
属ミックスの重要性が
拡大

南アフリカにさらにグリーンな未来をもたらす水素メタル

「水素メタル」すなわちプラチナ、イリジウム、ルテニウムの一次供給は、ほぼすべてが南アフリカの「よりグリーンな」鉱石から採取され、それぞれ世界の鉱業生産のうち74%、83%、91%を占めます。ジンバブエのGreat Dyke、ロシア、米国のStillwaterのPGM採掘からも供給がありますが、イリジウムとルテニウムの産出は報告されていません。

主要な水素メタルの一次供給



資料: SFA (Oxford)

プラチナの確立したリサイクル産業と比べ、イリジウムとルテニウムのリサイクル産業は閉鎖型かつ非常に不透明であり、取扱い量も限られていると考えられます。さらに、そのミクロ的な金属量がイリジウムとルテニウムの多くの用途に使用されたとしても、特にこれらの歴史的な低価格を考えると、リサイクル方式の回収は非常に不経済です。

そのため、水素メタルの今後の供給については南アフリカのPGM採掘が不可欠なものとなります。一方で電解装置および燃料電池の製造企業は、掘り出される金属の比率に合致する技術を継続的に開発していくでしょう。今後10~15年にわたり水素関連用途におけるPGMの節約(使用量の削減)や部分的な代替を考慮すれば、可用金属量に対する懸念はありません。現在の南アフリカの埋蔵量は、プラチナ約1億5,000万オンス、イリジウム500万オンス以上、ルテニウム2,500万オンス以上とされます。

ルテニウムとイリジウムのリサイクルは査定も成長促進も難しい

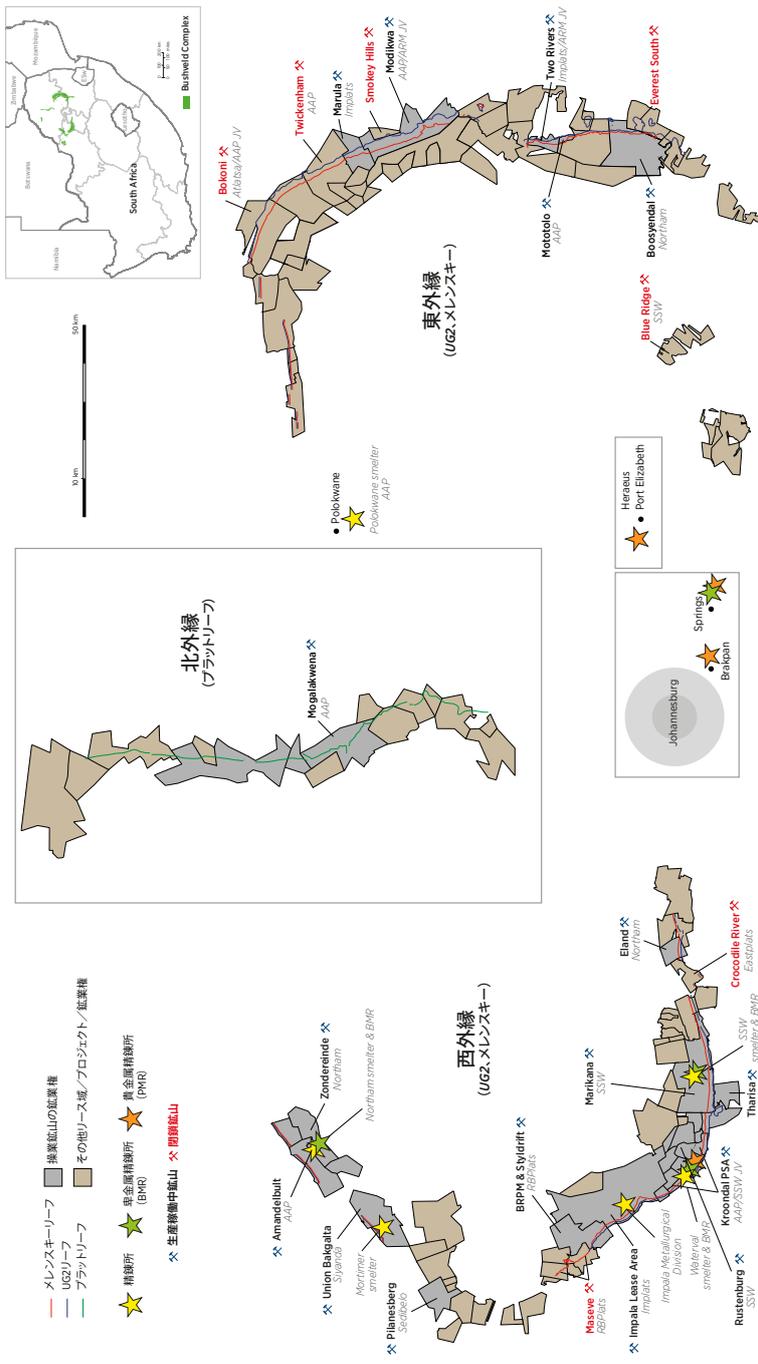
そのため水素経済用金属の主要供給源は採掘となる

南アフリカ: 世界の水素PGM金属バスケット

南アフリカでは、PGM金属はブッシュフェルト複合岩体と呼ばれる巨大な火成貫入岩層で生成し、世界の既知のプラチナ埋蔵量の70%がそこに含有されています。ブッシュフェルト複合岩体は、直径370キロほどのすり鉢型の貫入岩です。異なるマグマ層から成り、うち3層にPGM金属が集中して含有されています。「リーフ」と呼ばれる主要なPGM含有層には、UG2リーフ、メレンスキーリーフ、プラットリーフがあります。

南アフリカのブッシュフェルト複合岩体(6万6,000 km²)の水素用触媒金属の埋蔵量は既知の生産地として世界随一

南アフリカ、ブッシュフェルト複合岩体のPGM鉱床マップ



水素金属の安定したサプライチェーン:

- 16の稼働中のPGM 鉱山とその他の様々な資源元(クロム 採掘や尾鉱の再処理 など)
- 完全に資本化
- 幾つかのアクティブなプロジェクトを備えた 巨大な資源ベース
- 既知の地質
- 確立された熟練労働者
- 何十年にもわたって洗練された抽出技術
- 鉱山から市場へのルートが整備されている

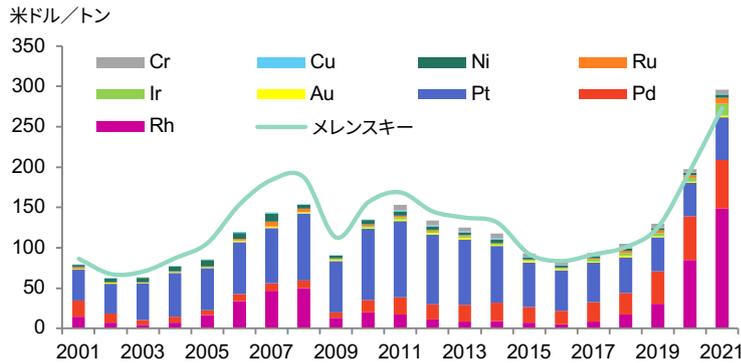
資料: SFA (Oxford)

水素メタルスタンダード

ブッシュフェルト複合岩体の西外縁および東外縁から採掘が行われるUG2リーフには、「マイナーPGM」と呼ばれるロジウム、イリジウム、ルテニウム、メレンスキーの産出で南アフリカ随一の集中的鉱床があります。メレンスキーリーフも西外縁および東外縁に位置しますが、採鉱の中心はプラチナに偏ります。2000年代中期、ロジウムの価格高騰とUG2に多くの新鉱山が開かれたことから、UG2リーフの採取が重要な一次PGM生産源となりました。その直後にロジウム価格が下落すると、多くの生産者は利益の上がない鉱山を保存整備にまわりました。

UG2鉱体は現在南アフリカ鉱体中最高のトン当たり収入を達成、採掘量の増大に拍車をかける可能性

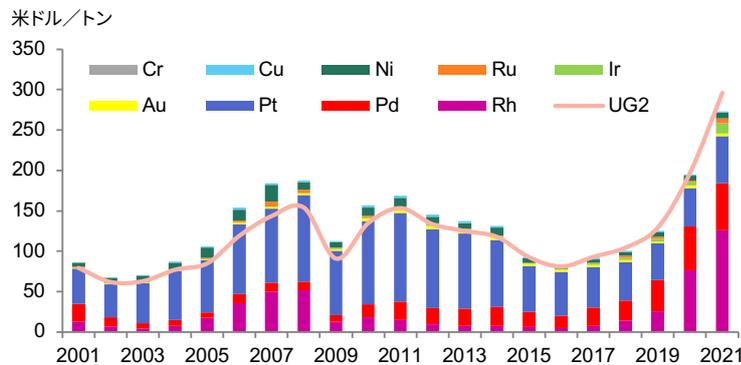
トン当たりUG2リーフ収入



資料：SFA (Oxford)

ロジウム価格の高騰により、UG2は最近メレンスキーを凌駕・・・

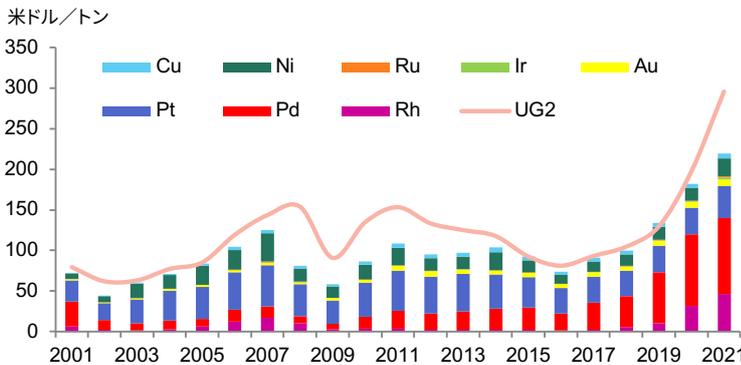
トン当たりメレンスキーリーフ収入



資料：SFA (Oxford)

・・・しかし、プラチナ価格が高かった期間は、メレンスキーが生産者の主要収入源だった

トン当たりプラットリーフ収入



資料：SFA (Oxford)

ロジウム、イリジウム、ルテニウムの不足がプラットリーフの収益を妨げている

メレンスキーリーフとUG2リーフはともに高価値の銅とニッケルの副産物を含有しますが、卑金属が集中するのはUG2低部です。UG2リーフにはクロム鉄鉱も含有されます。クロム鉄鉱はPGMの低価格制度の中で、UG2収入バスケットに重要な役割を果たすようになり、高費用の事業の黒字を支えました。プラットリーフはブッシュフェルト複合岩体の北縁にあり、そのパラジウム対プラチナ比率はUG2やメレンスキーと比較してよりバランスの良いものです。

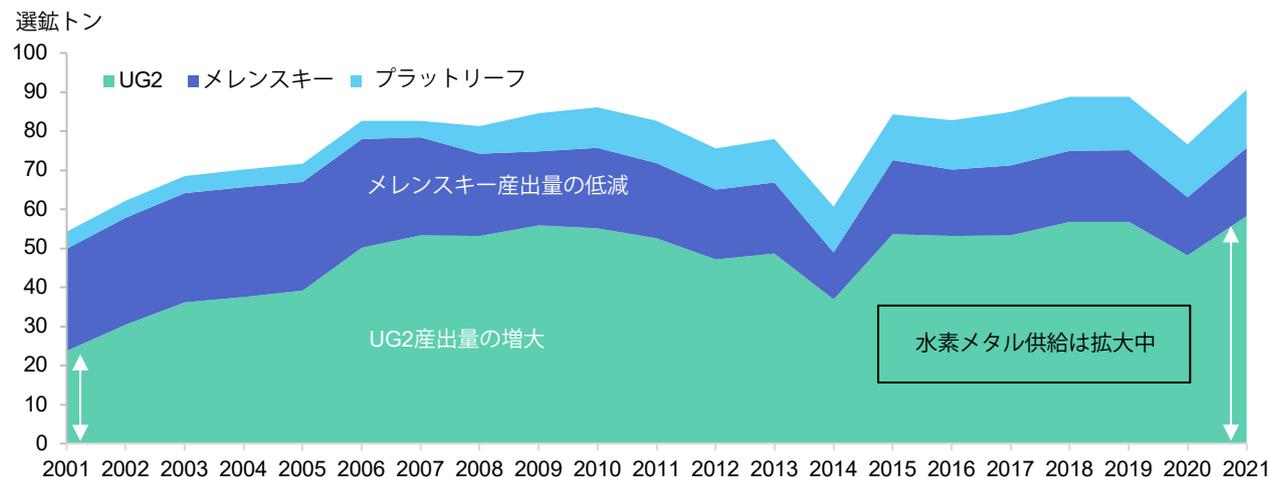
南アフリカのPGM生産者にとってメレンスキー産出鉱石が収入の主要な流れをつくっていた時期には、投資活動はほぼプラチナ市場のみに支配されていました。2019年にロジウムとパラジウムの価格が再び上昇に転じ、UG2産出金属が収入の中心となったとき、ロジウムとパラジウムは成長の主要なけん引力となり、そこにイリジウムとルテニウムの供給が付随することになりました。

UG2は「水素リーフ」だ

2000年代中期から、より古いメレンスキー事業が衰退し、新世代の立坑がより深くなってコストがかさむようになると、南アフリカの生産者たちは次第にUG2リーフからの採鉱に集中するようになりました。

UG2生産量は
上昇中・・・

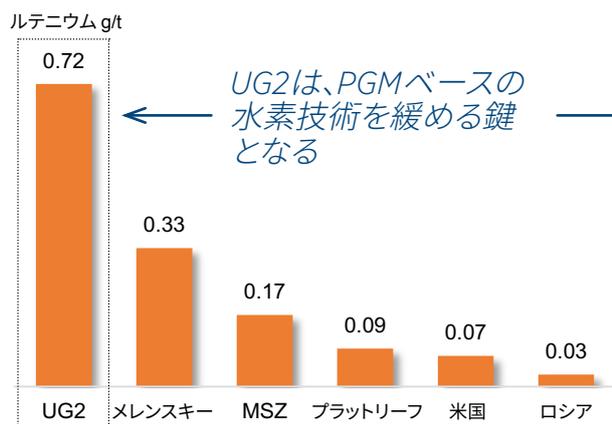
リーフ別南アフリカ生産量



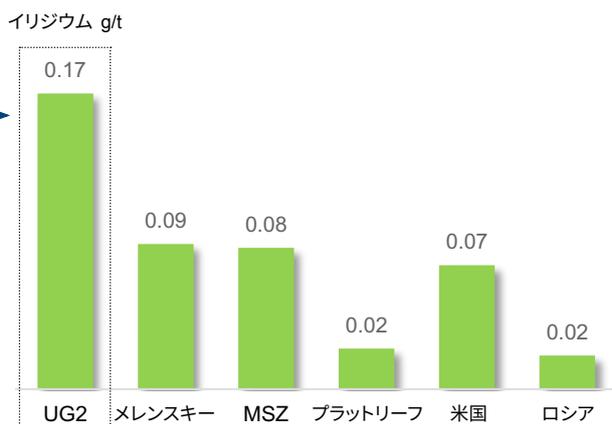
資料: SFA (Oxford)

その結果、UG2リーフのプリルスプリットは世界のいずれのPGM鉱体よりもイリジウムとルテニウムへの偏りが大きいことから、PGM生産ミックスは水素経済に必要な金属へとシフトしました。

鉱石タイプ別ルテニウムのグレード



鉱石タイプ別イリジウムのグレード



UG2は、PGMベースの水素技術を緩める鍵となる

資料: SFA (Oxford)

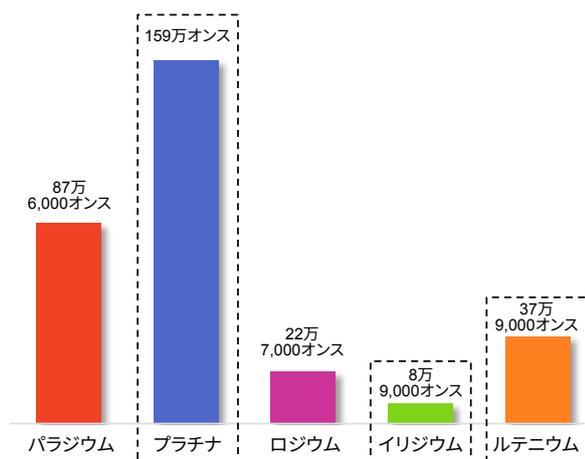
水素メタルスタンダード

ロジウム価格は2008年6月に最高価格であった1オンス当たり1万米ドル以上から暴落し、2011年には1オンス当たり2,000米ドル以下、2016年には693米ドルとなり、南アフリカでは数件のPGM鉱山が閉鎖されました。同時に開発中のプロジェクトも凍結されましたが、その大半はロジウム豊富で卑金属副産物に恵まれないUG2鉱山に関わるものでした。こうした立坑閉鎖のほとんどは南アフリカで起きたため、合計供給量に占める現在閉鎖中の能力は、水素メタルにかなりの割合を占めます（プラチナ26%、イリジウム30%、ルテニウム36%）。

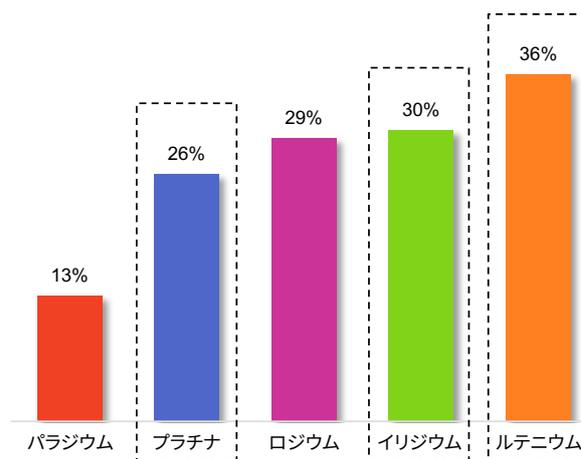
…そして現在の価格がUG2の凍結された鉱山再開の引き金になるか

すでに明らかな水素メタル能力の膨大な可能性

閉鎖PGM能力 (2021)



供給量合計に対する閉鎖PGM能力 (2021)



資料: SFA (Oxford)

プロジェクト再稼働が将来130万オンスの水素メタル供給を実現

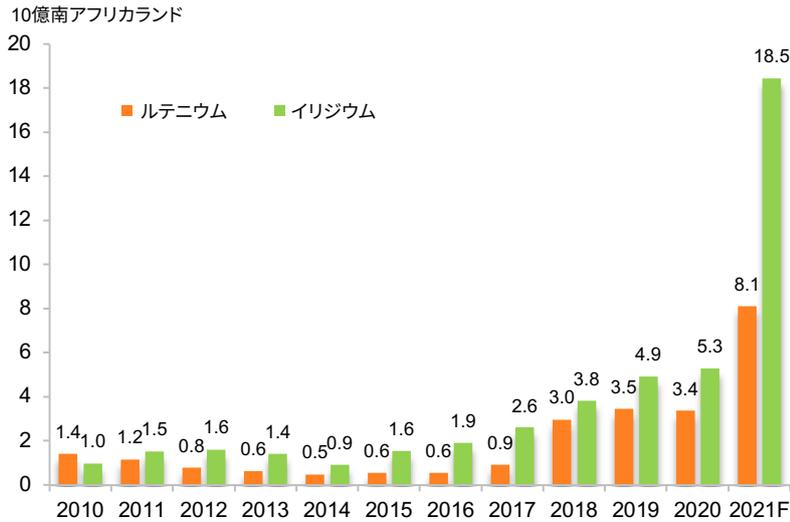
2009年以来行われた立坑閉鎖により、現在新規プロジェクトと比較して、比較的低い必要資本および短いリードタイム(1~2年)で再稼働可能な生産能力が存在します。生産者はポートフォリオの金属ミックスを水素経済による今後の需要と釣り合わせようと積極的に活動しています。また古くから稼働する採掘事業を延命するための代替わりプロジェクトにも本格的な投資が行われおり、これによりプラチナ、イリジウム、ルテニウムの供給予測が上向きになりました。南アフリカ産出品全体の最近の下落1にも関わらず、生産者利益は余裕をもって記録更新を続けており、旧設備再稼働の投資にまわす資金は潤沢です。

バスケット価格は、金属の合計収入を4E(プラチナ、パラジウム、ルテニウム、金)のオンスで割ったもの

鉱業収入は次第に水素メタル基準に

イリジウムおよびルテニウムによる収入は上昇しており、PGM収入バスケット中でも目立つ部分となってきました。本年南アフリカ生産者のイリジウム収入は、記録的な価格高騰を反映して185億南アフリカランドに達すると予測されます。ルテニウム収入も今年81億南アフリカランドに増加すると見込まれます。

南アフリカのルテニウムおよびイリジウム収入

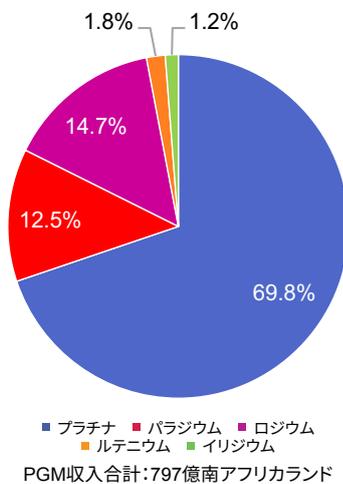


2016年から2020年にかけて、年間平均でルテニウム収入は59%、イリジウム収入は28%上昇

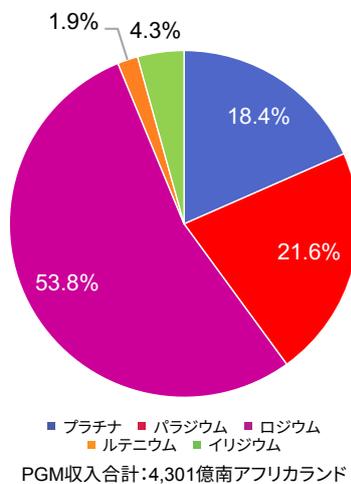
資料：SFA (Oxford)

今日の収入額には、高価格に加えて、南アフリカの鉱体の変化も反映されています。過去10年にわたり、南アフリカPGM鉱山の全収入に占める割合の成長率は、ロジウムが1,878%、イリジウムが1,777%という膨大なものです。

南アフリカ生産者のPGM収入 (2010)



南アフリカ生産者のPGM収入 (2021年予測)



資料：SFA (Oxford)

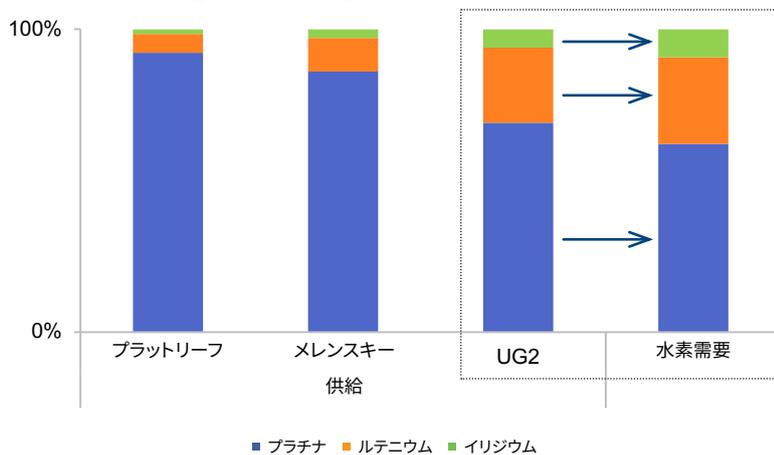
水素メタルスタンダード

鉱業収入への貢献の伸びにもかかわらず（現在のところロジウムに遅れをとっているとはいえ）、イリジウムとルテニウムが占める割合は、PGM市場と生産収入全体と比較すれば非常に小さなものです。とはいえ鉱業は戦略ゲームであり、イリジウムとルテニウムの長期的な可用性を確実にすることが生産者の最大のメリットとなります。それは究極的にはプラチナ市場に利益をもたらし、さらに生産者の長期的な収益性につながります。

水素産業のニーズに合わせた金属採掘

成長する需要要件を満たす最適なPGMミックスとともに、Der Brochen (Anglo American Platinum) や Marula (Impala Platinum) など、深度が小さく機械化された低予算のUG2プロジェクトが好感を呼んでいます。両プロジェクトともイリジウムとルテニウムの割合が高いため、鉱山の延命や衰退する産出品の代替などにしっかりした根拠が与えられています。Sibanye-StillwaterのK4立坑とTwo Rivers Merenskyの拡大プロジェクトはすでに承認を受け、Eastern Platinumは地下採掘の再開をめざしてクロコダイル川のZandfontein立坑の修復を続けています。African Rainbow Minerals (Anglo American Platinum および Atlatza Resourcesによる合併) へのBokoni鉱山の売り渡しも完了したとされ、稼働再開をめざすと考えられます。旧事業再開プロジェクトが実施されれば、長期的には、プラチナ100万オンス、ルテニウム22万オンス、イリジウム6万オンスの供給増大が可能になります。

南アフリカ供給比率vs水素需要



水素用金属の必要量比率で見ると、UG2の金属ミックスは最適

資料：SFA (Oxford)

南アフリカのサプライチェーンがよりグリーンな地球 へのユニークな回転軸となる

南アフリカのPGM産業は、プラチナ、イリジウム、ルテニウムが水素経済に不可欠な要素であることから、よりクリーンでグリーンな未来と本質的に結びついています。長期的な実行可能性はグリーン化に向けた実績に依拠しています。完全に「グリーンな」鉱山から市場へのバリューチェーンと、水素経済への移行による長期的な環境利益は、PGMがすでに自触媒用途により差引きプラスの環境インパクトを提供する中で投資を支援するものです。水素経済に不可欠な金属に富むUG2リーフを背景に、南アフリカPGM産業が急速に生まれつつある持続可能性重視の投資家たちから資金を取り付けるためには、ESGコンプライアンス向上とその実績を表明していくことが非常に大切な次のステップとなります。鉱業企業がこれを達成できれば、マイナーPGMの今後の生産を確保することができます。

自動車部門が使用金属を採掘金属とリサイクル金属のミックスに適合させたように、水素部門がそれに倣うのはまず間違いない

**PGM (白金族) 市場
2021**



PGM(白金族)市場2021

ラルフ・グリーンブル博士 SFA (Oxford)

概要

2021年のプラチナ市場では、投資部門を除き、130万オンス近い過剰が予想されます。2020年の投資需要が過剰分を吸収したものの、現在までのところ、今年の市場は軟調で推移してきました。ETF(上場投資信託)保有残高には変動があり、400万オンス近くまで上昇した後、再び減少に転じました。10月末時点では、南アフリカおよび日本のETF売り越しが他地域での取得を上回り、世界的な保有分は年初から6万4,000オンス低下しました。日本の投資家はまた本年前半期にプラチナバーを売り越し、価格がグラム当たり4,000円を越えたときに利益を確保しました。

プラチナ市場は大幅な供給過剰

コロナ感染症によるロックダウンの長期化に伴って、年初にはイリジウムとルテニウムの精錬供給が逼迫しました。2020年に南アフリカで鉱山が閉鎖され、精錬工場が操業停止したため、結果として精錬製品生産量と山積した貯蔵分の削減となりました。年初数か月間は精錬生産が需要に追いつかず、価格は急上昇して、イリジウム価格は過去最高を記録しました。その後南アフリカの生産レベルが通常に戻るとともに、貯蔵原料の処理が進んだこともあり、価格は後退しています。結果として、イリジウムとルテニウムの市場は、通年でみた場合、それぞれ4万4,000オンス、12万3,000オンスの過剰となると見込まれます。

年の初めはイリジウムとルテニウム供給は制約されていた...

...しかし南アフリカの生産により回復

供給

PGM市場は本年再び供給上の打撃を被りましたが、プラチナ、イリジウム、ルテニウムに関しては、影響は限定的でした。2月にNornickelの2鉱山が浸水し、コンセントレータ事故も発生しました。これによりプラチナ供給量が約11万5,000オンス、イリジウムとルテニウム生産量が数千オンスの打撃を受けたと考えられます。

ロシアにおける事故によりPGM供給減となる

本年プラチナの一次供給量は、Nornickelの問題によりロシアの生産量が17%減少したとはいえ、全体では26%上昇して620万オンスとなると予想されます。南アフリカの精錬量は42%の大幅上昇で460万オンスとなり、コロナ感染症流行以前のレベルに戻ろうとしています。2020年から停止していたAnglo Converter Plant (ACP) がフル操業に復帰し、貯蔵されていた製錬マットの処理も行われるようになって、精錬生産量のリバウンドを加速しています。北米の供給は昨年の感染症関連の業務停止から回復しつつあり、ジンバブエの生産量もゆっくり拡大しようとしています。

今年の世界적인イリジウム供給は、28%上昇して29万オンスに回復し、ルテニウムは31%と大きく伸びて100万オンスに達すると見込まれます。

2021年のプラチナ二次供給は、7%上昇して180万オンスと予想されます。宝飾品のリサイクリングもいくぶん回復し、44万オンスとなりそうです。自触媒リサイクリングは精錬所がほぼ最大能力で稼働しており、炭化ケイ素ディーゼル微粒子フィルター加工が困難である中でも、今年140万オンスに回復すると考えられます。

需要

今年自動車市場は需要ショックを経験しました。半導体チップ不足が次第に悪化するに伴い、軽量自動車生産高は2021年当初の予測を1,000万台以上下回りました。プラチナはパラジウムと比較して自動車産業需要への露出度が低いため、プラチナ需要の減少は27万5,000オンスと推定されます。とはいえ自動車産業用のプラチナ需要は、本年19%上昇して280万オンスとなると予想されます。これには、コロナ感染拡大に伴う昨年の低迷からの一定の回復だけでなく、代替需要と排気ガス規制の強化による影響も反映されています。本年、プラチナで三元触媒のパラジウムを部分的に代替する用途の影響は、限定的ながら全体的な需要改善に貢献しました。

サプライチェーン
における課題は残
るもの、本年の
自動車分野需要
は19%増加・・・

西ヨーロッパではディーゼル乗用車の売上は引き続き減少していますが、中国とインドで排気ガス規制強化が導入されたことにより、大型ディーゼル車からのプラチナ需要が増大しました。中国では大型ディーゼル車国家VI排出基準が施行され、初めて大型ディーゼル車にPGM充填触媒の装着が義務付けられました。中国の自動車向けプラチナ需要は、本年50%上昇し72万オンスに達すると予想されます。さらに本年4月には、インドが2020年に導入したバーラト排ガス規制ステージVIの施行1周年を迎えました。

・・・重量車燃費基準
による増加
によるもの

世界的なプラチナ宝飾品需要はいくぶん回復すると考えられますが、昨年の損失をすべて埋めるほどではなく、14%増の180万オンスとされます。北米の消費は、金に対するプラチナの割安感に助けられ、大きく回復しました。中国の実績も本年は予測を上回りましたが、使用量は87万5,000オンスと推定され、プラチナ宝飾品の最大市場としてはその最盛期には及びません。他の地域における新型コロナウイルス感染症の陽性者数増大と、特にインドのロックダウンによって、回復は限定的な範囲となりました。

工業用プラチナ需要は本年、16%の力強い伸びを示し、220万オンスに達すると見込まれます。感染症による2020年の低迷から回復するだけでなく、2019年度の消費レベルを軽く凌駕すると思われます。すべての産業需要がより高まると考えられる中でも、石油関連産業からの需要は特に高く、増大量の過半を占めでしょう。これは新設の石油精製・GTL(ガス液化)能力によるもので、一部は昨年から持ち越されたものです。中国のシリコン生産および新規パラキシレン設備による成長もあり、化学部門での回復も順調です。ガラス部門需要は政府方針の変更による中国の新設備により飛躍的に伸びました。また依然としてロジウムの儉約が続き、プラチナの代替需要につながりました。

プラチナはプロトン交換膜(PEM)電解装置(イリジウム併用)と燃料電池(ルテニウム併用)で触媒として使われます。水素技術用のプラチナ需要はまだ比較的軽微ですが、低レベルから急速に成長しつつあります。

ルテニウムの需要は、化学・電気・水素部門の成長によって、本年度4%増の93万9,000オンスとなると予測されます。ルテニウムは化学部門で2021年に8%成長すると予測されます。中国におけるカプロラクタム合成産業の拡大継続と、バラスト水処理規制による電気化学分野での需要がその要因です。

今年のルテニウム需要は4%の見込み

水素経済は、まだ発達初期であるにもかかわらず、今年大きな注目を浴びています。燃料電池車両の生産数がいまだに少ないことから、現在、水素経済におけるルテニウム需要の最大のセグメントは、産業用燃料電池(定置用および特定特殊自動車用)です。ルテニウムは特に、水素フィードガスが不純物を含むPEM燃料電池で特に重要となります。

ハードディスクドライブにおいては、ルテニウムを使わない技術が長く待たれていますが、相変わらず先送りされ、ルテニウムの電気需要を維持しています。その他の用途への需要は、本年7%落ち込むと予想されます。

ハードディスクドライブ分野におけるルテニウム需要は堅調

イリジウム消費は、主要エンドユーザーのわずかずつの使用量増加に伴い、本年8%増の25万2,000オンスと見込まれます。自動車部門でスパークプラグに使われるイリジウムは、軽量自動車の生産激減にもかかわらず、本年成長すると予想されます。PEM電解装置用のイリジウム需要は、ごく少量から急速に拡大中です。PEMは数種類の異なる電解装置技術(ALK・AEM・SOE)と競合していますが、イリジウムを利用するものは他にありません。しかしPEM電解装置は、非常に断続的になる再生エネルギーにうまく適合するため、グリーン水素生産にとっては理想的です。電気産業のイリジウム需要は、弾性表面波(SAW)フィルター用のタンタル酸リチウム結晶を製造する坩堝に由来し、スマートフォン売上と5G(第5世代移動通信システム)拡大に支えられています。

2021年のイリジウム需要は8%増加の見込み

PGM市場の 長期的展望

2031年に向けて変化
するPGM市場の本質

78

Pt

プラチナ
195.084

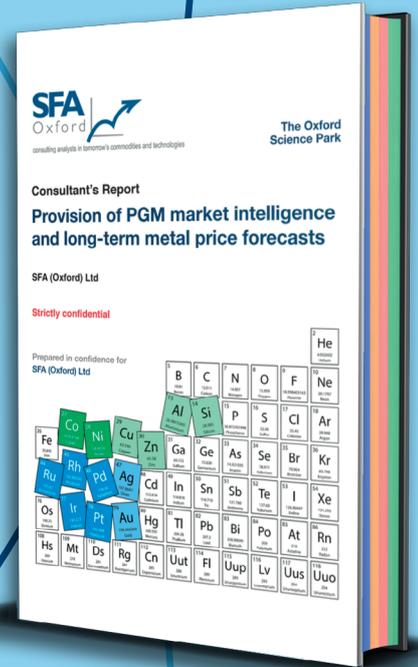
45

Rh

ロジウム
102.9055

Pd

パラジウム
106.42



PGM産業の上流・下流をつないでお届けする根拠ある
高付加価値の市場情報

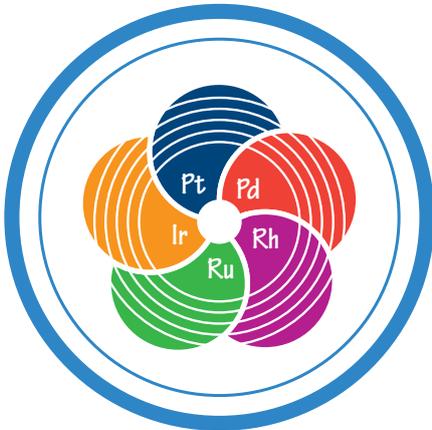
SFA (Oxford)の「PGM市場の長期的展望」は、世界的なPGM市場、需要源と供給源、投資手段の現在および長期的な動向とその影響について明らかにする、詳細かつ前向きなレポートです。

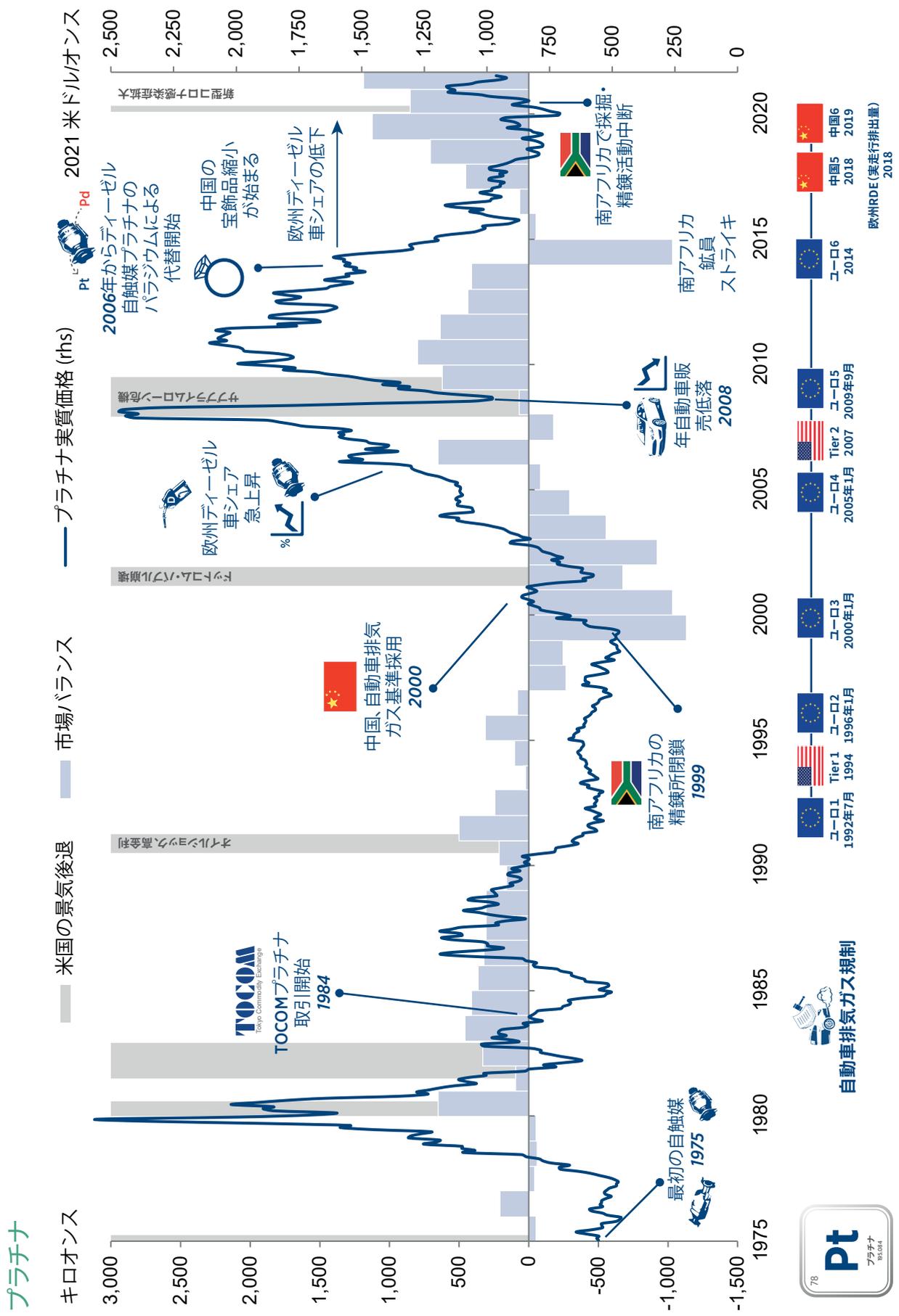
本書では2031年に向けて変化するPGM市場の本質を考察します。自動車排気ガス基準の強化、金属間で行う代替動向、パワートレーンにおけるシフト（パワートレーンの電化と二次電気式自動車の進化）、リサイクリングなどの結果、パラジウム、プラチナ、ロジウムの用途に変化が及びます。その正確な測定に不可欠な情報とともに、需要の長期的感度分析をお届けいたします。長期的な生産プロファイルを示しつつ、世界的な供給への変化とそのエコノミクスを分析します。また2031年に向けたPGM市場（金属価格と、宝飾品・産業・化学品・石油・投資など各セクターに及ぼす影響）の詳細な予測評価も掲載しています。

2021年10月号では、最近の半導体チップ不足、ハイブリッド、電気、燃料電池を含む車両のパワートレーン問題、最新の生産結果、鉱業経済・プロジェクトを考察して、最新情報を掲載しました。

- 電池式車両予測の変化は、今後10年間のパラジウムのファンダメンタルズと価格にどのように影響するか？
- 今後10年間のプラチナ／パラジウム、パラジウム／ロジウム、パラジウム／プラチナの代替問題と価格への影響に対するリアリスティックな視点とは？
- ユーロ7規制とPGMに対する意味について明らかな事実とは？
- PGM価格超高騰期間の持続を経た供給予測は？いまだに貯蔵量減少が問題なのか？今後10年間に注目されるプロジェクトとは、またPGM市場への影響は？
- 水素の普及とプラチナ要件に対する最新の見解は？
- 特別レポート：「南アフリカ：政治・新型コロナと今後の展望」ウィリアム・バイナート教授。

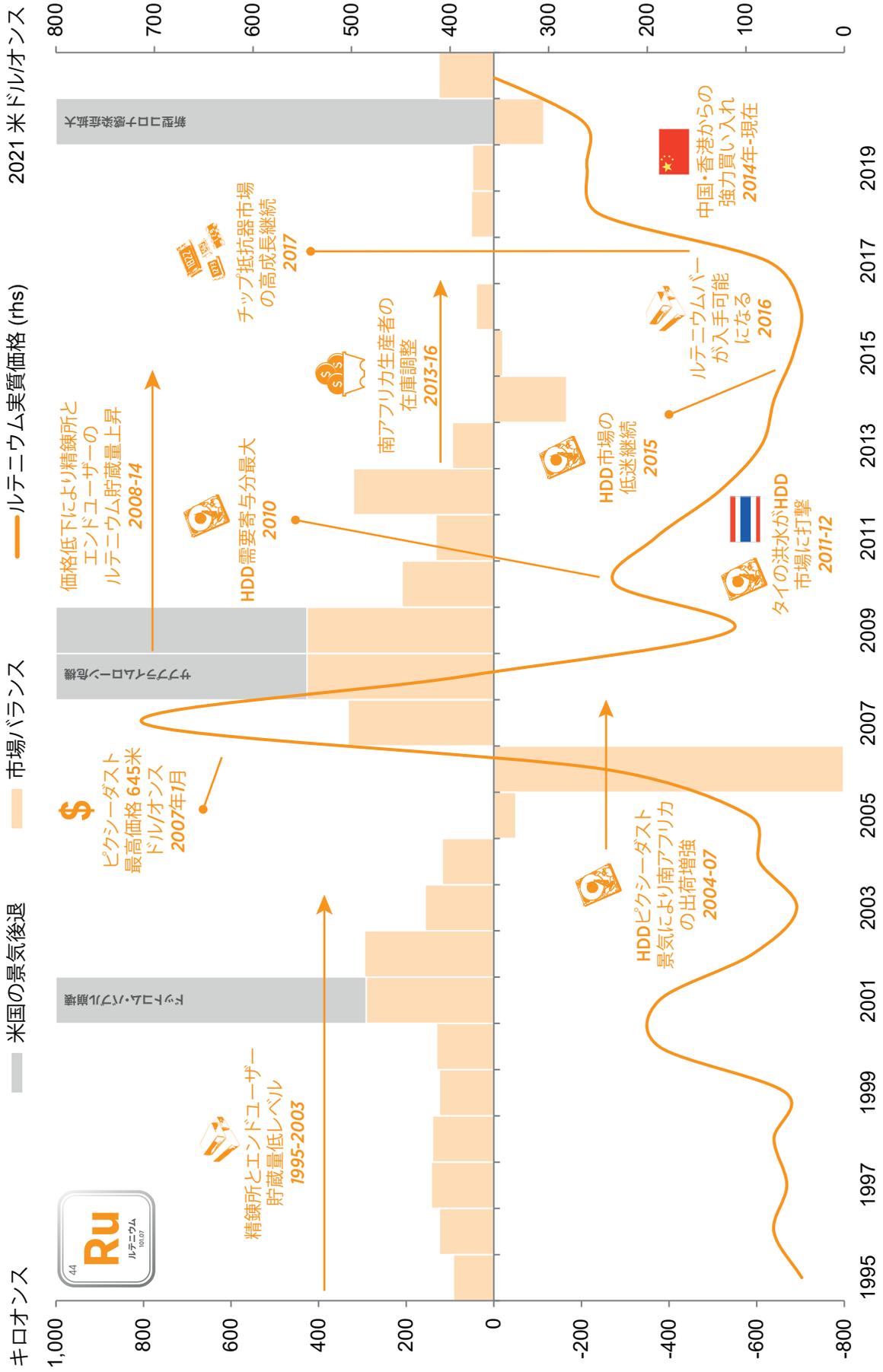
PGMの価格推移





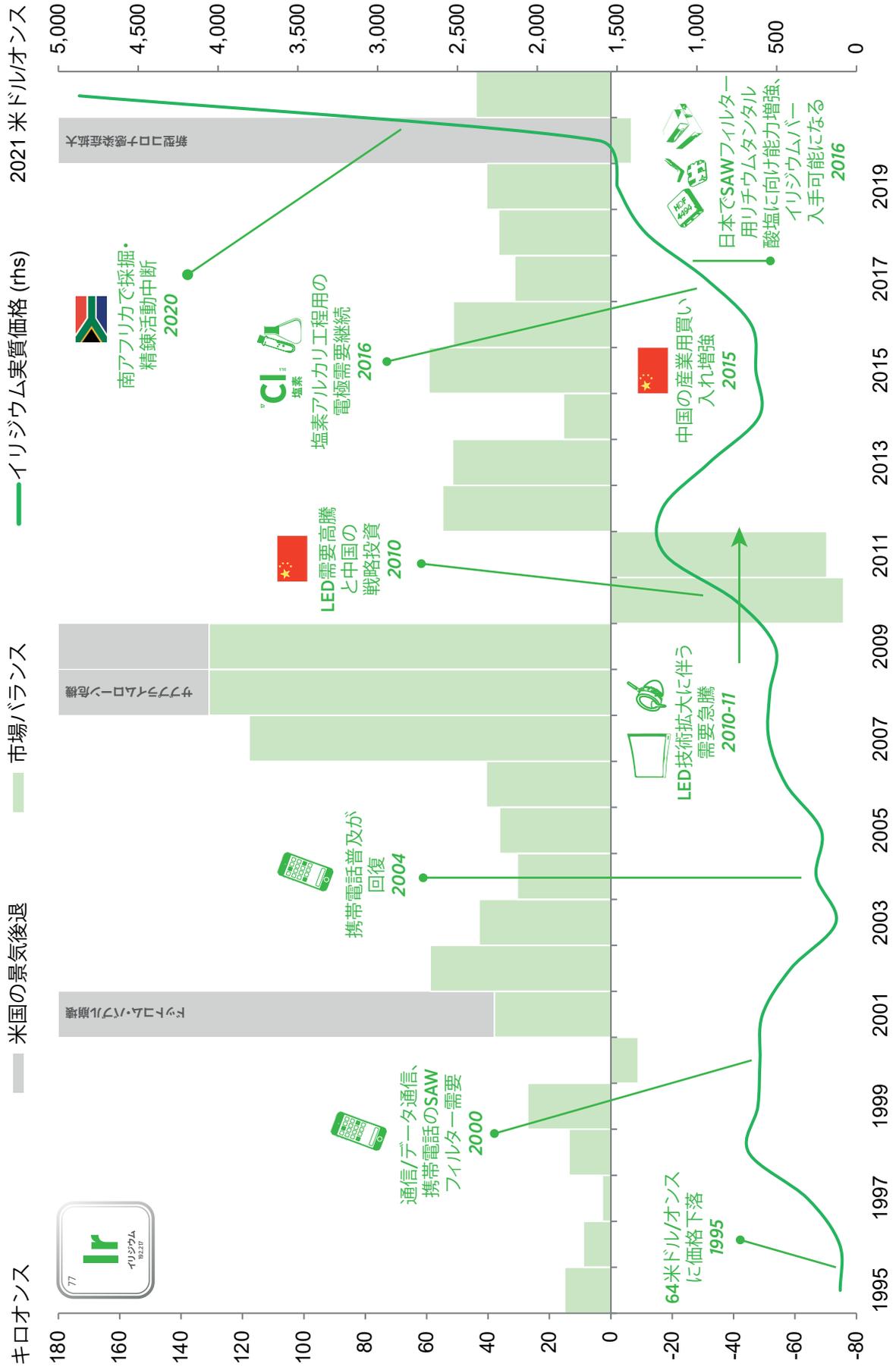
資料: SFA (Oxford), Bloomberg

ルテニウム



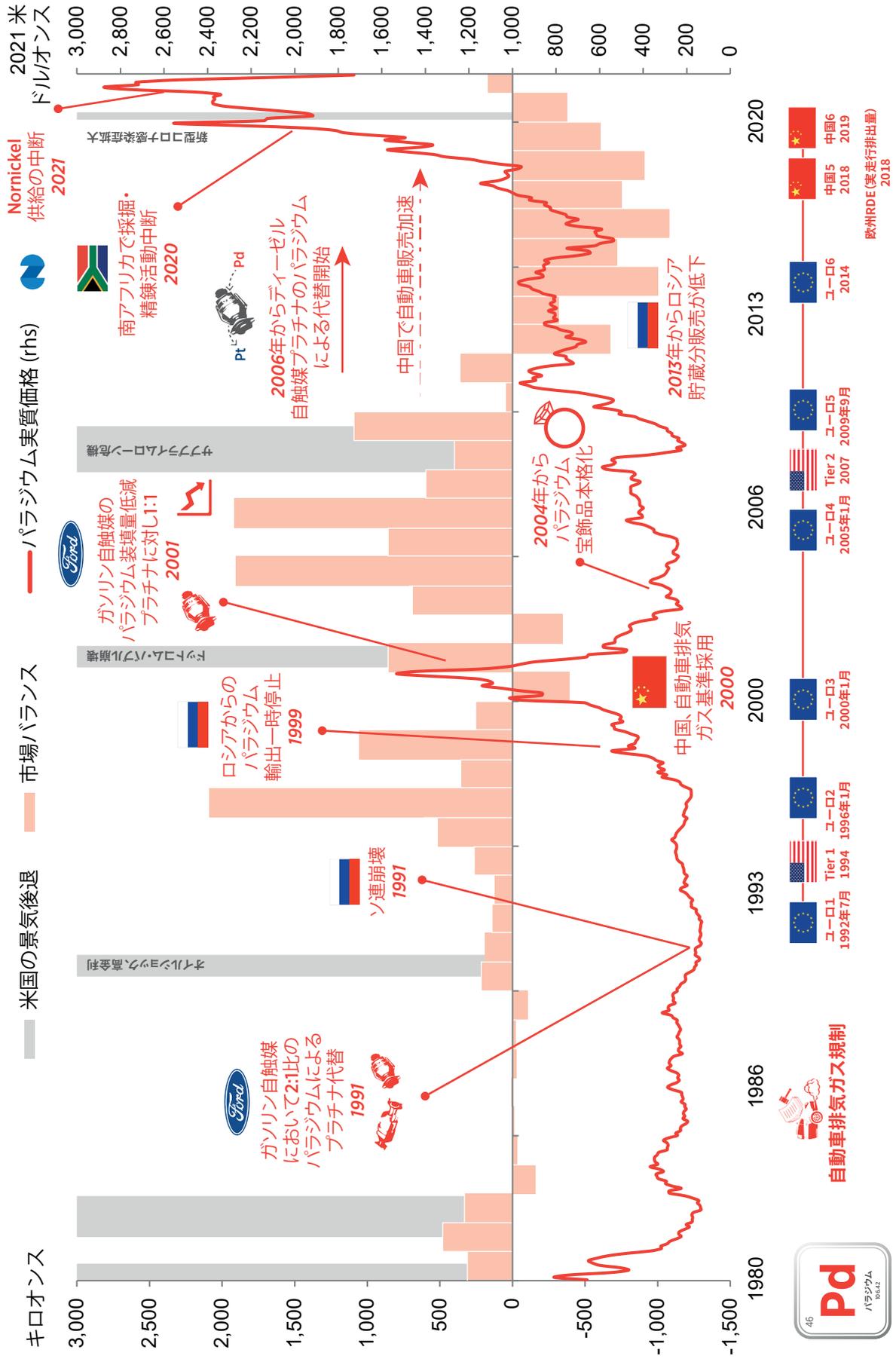
資料 : SFA (Oxford), Bloomberg

イリジウム

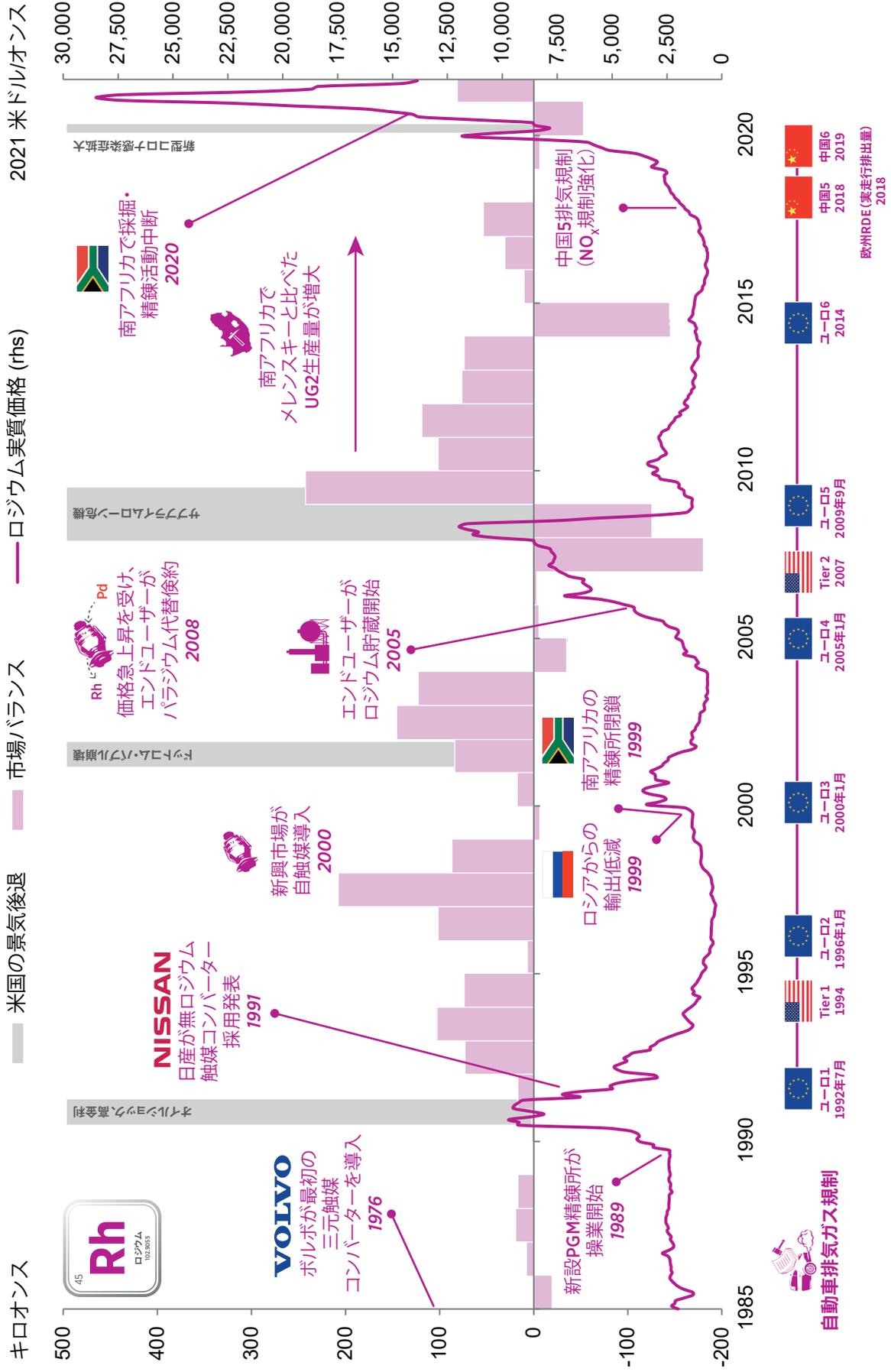


資料：SFA (Oxford), Bloomberg

パラジウム



ロジウム



資料 : SFA (Oxford), Bloomberg

付録



プラチナ需給バランス

キロオンス	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021f
一次供給									
地域									
南アフリカ	4,355	3,135	4,480	4,265	4,385	4,470	4,405	3,255	4,625
ロシア	740	740	710	715	720	665	710	705	590
ジンバブエ	405	405	405	490	480	465	460	480	495
北米	355	395	365	390	360	345	350	330	365
その他	215	200	200	185	185	180	185	175	160
合計	6,070	4,875	6,160	6,045	6,130	6,125	6,110	4,945	6,235
需要とリサイクリング									
自触媒									
総需要	3,130	3,240	3,250	3,360	3,295	3,105	2,830	2,320	2,745
リサイクリング	1,120	1,250	1,180	1,220	1,325	1,420	1,490	1,300	1,395
正味需要	2,010	1,990	2,070	2,140	1,970	1,685	1,340	1,020	1,350
宝飾品									
総需要	2,945	3,000	2,840	2,505	2,460	2,245	2,095	1,560	1,775
リサイクリング	855	775	510	625	560	500	500	415	440
正味需要	2,090	2,225	2,330	1,880	1,900	1,745	1,595	1,145	1,335
水素	5	25	25	45	45	70	40	40	75
産業用需要	1,565	1,665	1,805	1,905	1,760	1,940	2,025	1,900	2,210
その他リサイクリング	5	10	10	5	10	10	10	10	10
総需要	7,645	7,930	7,920	7,815	7,560	7,360	6,990	5,820	6,805
リサイクリング	1,980	2,035	1,700	1,850	1,895	1,930	2,000	1,725	1,845
正味需要	5,665	5,895	6,220	5,965	5,665	5,430	4,990	4,095	4,960
市場バランス									
バランス(ETF前)	405	-1,020	-60	80	465	695	1,120	850	1,275
ETF(貯蔵分割り当て)	905	210	-240	-10	100	-240	995	505	
バランス(ETF後)	-500	-1,230	180	90	365	935	125	345	

資料: SFA (Oxford)



プラチナ需要とリサイクリング概要

キロオンス	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021f
総需要									
自触媒									
北米	425	465	480	410	390	390	380	285	385
西ヨーロッパ	1,350	1,395	1,450	1,640	1,550	1,330	1,140	790	810
日本	585	585	510	450	435	430	400	310	295
中国	130	125	145	195	230	220	245	425	670
インド	165	170	180	170	175	195	155	110	150
その他世界	475	500	485	495	515	540	510	400	435
合計	3,130	3,240	3,250	3,360	3,295	3,105	2,830	2,320	2,745

プラチナ需要とリサイクル概要(続き)

キロオンス	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021f
総需要									
宝飾品									
北米	200	230	250	265	280	280	275	210	255
西ヨーロッパ	220	220	235	240	250	255	260	175	190
日本	335	335	340	335	340	345	330	245	260
中国	1,990	1,975	1,765	1,450	1,340	1,095	945	755	875
インド	140	175	180	145	175	195	210	120	135
その他世界	60	65	70	70	75	75	75	55	60
合計	2,945	3,000	2,840	2,505	2,460	2,245	2,095	1,560	1,775
水素									
北米	5	10	5	10	10	15	10	10	15
西ヨーロッパ	0	0	0	5	0	0	0	0	5
日本	0	5	15	25	30	35	15	20	40
中国	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他世界	0	10	5	5	5	20	15	10	15
合計	5	25	25	45	45	70	40	40	75
産業向け									
北米	335	330	260	400	345	350	300	235	325
西ヨーロッパ	200	245	310	285	280	315	300	280	270
日本	95	30	90	80	40	100	105	85	100
中国	535	500	585	650	590	510	620	725	825
その他世界	400	560	560	490	505	665	700	575	690
合計	1,565	1,665	1,805	1,905	1,760	1,940	2,025	1,900	2,210
総需要合計									
北米	965	1,035	995	1,085	1,025	1,035	965	740	980
西ヨーロッパ	1,770	1,860	1,995	2,170	2,080	1,900	1,700	1,245	1,275
日本	1,015	955	955	890	845	910	850	660	695
中国	2,655	2,600	2,495	2,295	2,160	1,825	1,810	1,905	2,370
その他世界	1,240	1,480	1,480	1,375	1,450	1,690	1,665	1,270	1,485
合計	7,645	7,930	7,920	7,815	7,560	7,360	6,990	5,820	6,805
リサイクル									
自触媒									
北米	560	560	505	535	585	640	645	575	565
西ヨーロッパ	365	465	370	400	440	465	505	425	495
日本	95	105	95	95	100	110	110	100	115
中国	20	30	55	40	40	35	40	30	35
その他世界	80	90	155	150	160	170	190	170	185
Total	1,120	1,250	1,180	1,220	1,325	1,420	1,490	1,300	1,395
宝飾品									
北米	0	0	5	5	5	5	5	5	5
西ヨーロッパ	0	5	5	5	5	5	5	5	5
日本	250	235	160	150	160	145	140	110	115
中国	600	530	335	460	385	340	340	285	305
その他世界	5	5	5	5	5	5	10	10	10
合計	855	775	510	625	560	500	500	415	440
WEEE (電気電子廃棄物指令)	5	10	10	5	10	10	10	10	10
リサイクル合計									
北米	560	560	510	540	590	645	650	580	570
西ヨーロッパ	365	470	375	405	445	470	510	430	500
日本	345	340	255	245	260	255	250	210	230
中国	620	565	395	500	430	380	385	320	345
その他世界	90	100	165	160	170	180	205	185	200
合計	1,980	2,035	1,700	1,850	1,895	1,930	2,000	1,725	1,845



ルテニウム需給バランス

キロオンス	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021f
一次供給									
地域									
南アフリカ	865	680	935	915	915	930	910	685	965
ロシア	40	40	40	40	40	40	45	45	35
ジンバブエ	35	40	40	45	45	45	45	45	50
その他	25	20	20	15	15	15	15	15	15
合計	965	780	1,035	1,015	1,015	1,030	1,015	790	1,065
需要									
水素	5	20	20	35	40	55	35	35	55
産業用需要									
化学品	420	465	540	465	465	460	460	435	460
電気	340	370	380	365	395	360	345	315	315
その他	100	90	120	105	110	100	130	115	110
総需要	865	945	1,060	970	1,010	975	970	900	940
市場バランス									
バランス	100	-165	-25	45	5	55	45	-110	125

資料 : SFA (Oxford)



イリジウム需給バランス

キロオンス	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021f
総需要									
地域									
南アフリカ	175	155	225	225	220	225	230	175	245
ロシア	25	25	25	25	25	25	25	25	20
ジンバブエ	20	20	20	20	20	20	20	20	25
その他	10	10	10	5	10	5	5	5	5
合計	230	210	280	275	275	275	280	225	295
需要									
宝飾品	15	15	15	15	10	10	10	10	10
水素	1	0	1	0	2	1	2	1	4
産業用需要									
自動車	25	25	25	30	30	30	30	30	35
化学品	70	75	70	75	80	80	80	85	85
電気	35	40	65	65	75	70	75	70	75
その他	35	35	35	40	40	40	45	40	45
総需要	180	190	210	225	235	230	240	235	255
市場バランス									
バランス	50	20	70	50	40	45	40	-10	40

資料 : SFA (Oxford)



用語集

AEM

アニオン交換膜

ALK

アルカリ水電解

BEV

二次電池式電気自動車

CAPEX

資本的支出

CCM

触媒被覆膜

CO

一酸化炭素

CO₂

二酸化炭素

COP 26

国連気候変動枠組条約第26回締約国会議

ESG

環境・社会・ガバナンス

ETF

上場投資信託

FCV/FCEV

燃料電池自動車

GDP

国内総生産

GHG

温室効果ガス

Gt

ギガトン

GW

ギガワット

HHV

高位発熱量

HRS

水素燃料ステーション

ICE

内燃機関

koz

1,000オンス

kt

キロトン=1,000トン

LCOE

均等化発電原価

LHV

低位発熱量

メレンスキーリーフ

南アフリカのブッシュフェルト複合岩体中にあるPGM含有層。ニッケルと硫化銅も含まれ、副産物として採掘される。

MJ

メガジュール

moz

100万オンス

MSZ

塊状硫化物帯

Mt

メガトン=100万トン

MW

メガワット

NDC

国の自主的貢献

NO_x

亜酸化窒素

PtX/P2X

Power-to-X(再生可能エネルギーを水素及び水素ベース、合成燃料及び基材に転換すること)

PEM

固体高分子電解質膜

PGM

プラチナ、パラジウム、ロジウム、イリジウム、ルテニウム、オスミウムを含む白金族金属

プラットリーフ

ブッシュフェルト複合岩体中にあるPGM含有層で、ノーザンリムのみが存在する。

R&D

研究開発

SCR

選択触媒還元

SMR

水蒸気メタン改質

SOE

個体酸化物電解装置

UG2リーフ

ブッシュフェルト複合岩体中にあるPGM含有層で、メレンスキーリーフ層の下にある。ブッシュフェルト複合岩体の主要なクロム鉄鉱含有リーフのひとつ。概してメレンスキーリーフに比して低位の卑金属を含有。

UNEP

国連環境計画

ZEV

ゼロエミッション車

通貨記号

\$ 米ドル

ZAR 南アフリカランド

メソドロジー

一次供給は実鉱業生産量から計算しますが、純粋な生産データを得るために貯蔵販売分は除きます。SFAのデータベースでは、貯蔵販売量は貯蔵分の動向として別個に扱います。したがって、ロシアの国家貯蔵販売量は表に掲載されません。

総需要は利用集約度の尺度となります。

正味需要は新規メタル(リサイクル正味)の理論的必要分の尺度となります。

自動車産業需要は車両の売上ではなく生産台数に依拠します。

謝辞

SFA (Oxford)は「グリーンメタルと水素」会議の成功に貢献して下さったみなさまに心から御礼申し上げます。

まず造詣深いスピーカー各位、中井徳太郎氏、ニール・フローニマン氏、古屋堯民氏、グレアム・クーリー博士、広瀬雄彦博士に深く感謝申し上げます。

Sibanye-Stillwater社には本イベントのスポンサーとなっただき、同社担当チームのヘンリカ・ニナム、ジェイムズ・ウェルステッド、クリス・ロー、キャロル・スミス、オウパ・ロニー・テレレから、開催に向けて大きな御助力をいただきました。

またフルヤ金属からも強力な支援を頂戴いたしました。特に桑原秀樹氏、石丸武氏のお力添えに感謝いたします。

さらに日本のイベント企画パートナーである浪漫堂チームの久保田将司氏、伊東聡氏、四方壘氏、そしてDNAの鹿山雄三氏、高久正義氏、フォスター・ジョシュア氏のみなさまに御礼を申し上げます。

SFA (Oxford) は、意欲的な考察をこの一冊にまとめ上げたみなさん全員の努力に感謝を表します。

特に貢献して下さった以下のチームのみなさんにお礼を申し上げます。

アシュリング・ヒューバート	アレックス・ビドル
ベレスフォード・クラーク	キャロル・ルー
デイビッド・モブズ	フランセスカ・プライス
ジェイミー・アンダーウッド	ジェニー・ワッツ
ジョー・ホームズ	ジョーダン・ロバーツ
カレン・ダーリー	ラクシャ・グプタ
オクサン・アティラン	ラルフ・グリブル
スティーブン・フォレスト	トーマス・チャンドラー
ヨシミ・ミゾグチ・オーウェン	

またアソシエイツ・コンサルタンツ・チームにも感謝いたします。その寄与なしには本書の出版はあり得なかったでしょう。特筆すべきは、このようなPGM産業レビューを編纂し、私たち全員が心から自負できる報告書にまとめ上げたジェレミー・クームズとアンディ・スミスの専門知識と経験であります。

水素メタルスタンダード

「水素メタルスタンダード」の製作過程を通じてジャニス・ハーストが校正を担当してくれました。また本書の装丁・写植・印刷を行ったHolywell Pressのトビー・マシューズ、ベン・バロウズ両氏が費やしてくれた時間と知見に感謝します。

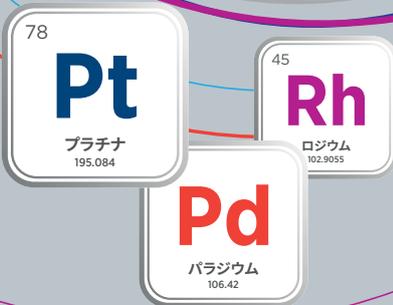
さらに日本のクライアントのために、翻訳と日本語写植に労力を厭わなかったNetwork Languages Limitedにも心から感謝いたします。

そして以下の第三者機関からは、貴重なデータを提供していただきました。LMCオートモーティブ、オックスフォード・エコノミクス、ブルームバーグ、トレード・データ・モニターからのデータは、本書中の図表の出所として利用させていただきました。

最後になりましたが、クライアントをはじめ常々お世話になっているみなさま方に、いつも変わらぬご支援への御礼の気持ちを込めて本報告書を献呈申し上げます。

The PGM Radar

市場展望2021年第4四半期



PGM市場の短期的動向と四半期最新情報
をお届けいたします

SFA (Oxford) は白金族金属の権威として世界的な評価をいただいております。PGM産業の動向に関する抜群の理解力を駆使し、鉱山からエンドユーザーまで、世界のPGM関連主要機関のほとんどと関係を構築してまいりました。

四半期ごとにお届けする「PGM市場展望」レポートは、PGM供給・需要・価格付けと市場に及ぼすそれらの影響に関し、現在進行中の事象や動向にSFAの実践的かつ前向きな解説と分析を提供するものです。

各号の内容は市場の事象と需要動向により様々ですが、PGM産業におけるクライアントの具体的な関心に適合する内容をお届けします。

特集記事：

- 需給のファンダメンタルズと技術に対するマクロ経済的展望と影響。
- 一次PGM需給の現在・将来の安定性と成長に関する最新情報。
- 市場における関連プロセスと技術開発の追跡・報告。
- 排出および環境問題に影響する全主要地域における規制の変更。
- 技術シフトおよび自動車パワートレーン開発とPGM需要への影響。
- 新規技術・衰退に向かう技術を含めた産業技術の動向と進展。
- 自触媒用途の膨大な過去データから導くリサイクリング予測。
- プラチナ宝飾ビジネスの社会的側面、購買層、マーケティングに関する考察。
- 一次供給に影響する政治的・社会経済的リスクの解説。
- 短期・中期的な金属価格展望。

免責事項・著作権・知的財産権

SFA (Oxford) Limitedは、本文中の情報源が信頼できるものであり、掲載データが作成時において正確であるよう、万全を期しております。本文中の分析と意見は、作成時の判断に基づくものであり、今後通知なく変更される場合があります。したがってSFAは、本文中のデータおよび分析の正確性と完全性を保証するものではありません。SFAは、不注意による、また時々の誤謬や正確性の欠如について責任を負うことはできません。SFAは、本文中に含まれるいずれかの情報の使用または情報への信頼を介して生じるいかなる原因であるにせよ、直接的・間接的、特異的または結果的に生じる損失や損害について、またその他いかなる損失や損害についても、責任を負うものではありません。本文中に掲載した情報は、特定の投資目的や金融状況、特定の受領者や機関のニーズに対応したものではありません。本文書は、いずれかの商品、証券、その他金融商品の売買を勧誘するものと見做されるべきではありません。受領者は、SFAが投資アドバイス提供について英国金融行動監視機構の認定を受けていないことをご承知おきください。本報告書は、いずれかの特定の投資に関するメリットについて、受領者またはその他いずれかの人物にアドバイスするものと見做されるべきではありません。投資を行うかどうかを判断するとき、受領者またはその他いずれかの人物とも、入手可能な情報のすべての発信元を考慮しなくてはなりません。本報告書は、受領者が英国の2000年金融サービス市場法 (Financial Promotion) Order 2005のArticle 19 (投資専門家) またはArticle 49 (大企業、非法人協会など) に定められた立場であると合理的に信じられることに基づき、受領者のみに提供されるものです。

© Copyright reserved. 時々作成される報告書すべての著作権およびその他知的財産権はSFAの所有に帰し、SFA以外の何人もいずれかの報告書について何らかの知的財産権を登録したり、報告書作成を根拠に報告書、情報、データに対するそのような権利を主張したりすることはできません。いずれの報告書のいかなる部分も、SFAの書面による許可なしに、いかなる形式にせよ複製・配布することはできません。特にSFAは、インターネットその他の手段により、専門家以外の人物や個人投資家に本文書を配布することを禁じます。本文書に依拠した第三者の行為に対し、一切責任を負うことはありません。

注記: 表データによっては、各数値の四捨五入により、必ずしも合計値とならない場合があります。© Published in November 2021 by SFA (Oxford) Ltd.



SFA (Oxford) Ltd
The Magdalen Centre
Robert Robinson Avenue
The Oxford Science Park
Oxford
OX4 4GA
英国

Tel: +44 1865 784366
info@sfa-oxford.com
www.sfa-oxford.com