

NSW州のパワー・ツー・エックス (P2X) 産業に関するプレ・フィージビリティ・スタディ

NSW州におけるP2X経済構築に向けたロードマップ

UNSWシドニー

本調査は、ニューサウスウェールズ(NSW)州主席科学工学官室の協力のもと、ニューサウスウェールズ大学(UNSWシドニー)が実施したものです。

引用文献

R. Amal, R. Daiyan, K. Polepalle, M. H.Khan.T. Gao.(2021). NSW Power to X (P2X) Pre-Feasibility Study.UNSW Sydney, Australia.

著作権

© UNSW Sydney 2021. 法律で認められている範囲において、すべての権利が留保されており、UNSWシドニーが書面にて許可した場合を除き、著作権保護の対象となる本書のいかなる部分についても、形態や手段を問わず、複製・複写することは一切禁じられています。

免責事項

本書はNSW州主席科学工学官室およびNSW州政府による利用のみを目的とし、委託事項の範囲に則して作成されたものです。UNSWシドニーとNSW州政府は本書に依拠したことから生じた結果について一切責任を負いません。いかなる場合も、依拠した方が単独で責任を負うこととなります。第三者による本書への依拠を理由とした損失、請求、費用、要求、損害、責務等いかなる法的手続きについても、NSW大学とNSW州政府は対象とはなりません。

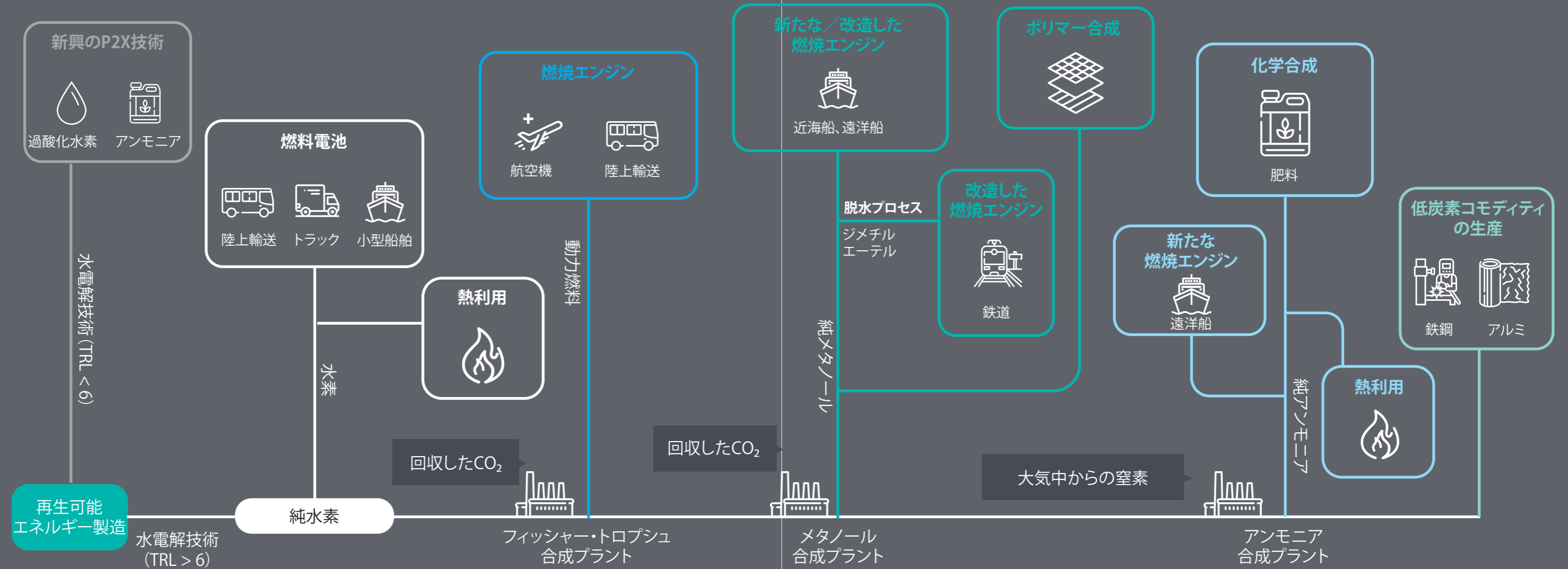
エグゼクティブサマリー

ニューサウスウェールズ (NSW) 州は、太陽光、風力資源のほか、水力資源における世界有数の再生可能エネルギーを有しています。豊富な天然資源と再生可能エネルギー発電・貯蔵技術の急激な価格の低下が相まって、NSW州は今や、世界におけるエネルギー産業の一大拠点となっています。NSW州は、大規模レベルおよび分散レベルでの再生可能エネルギー開発で飛躍的な進歩を遂げてきました。その結果、電力価格の引き下げとエネルギー部門の脱炭素化を順調に進めています。安価な再生可能エネルギーがその他の部門や産業にも広がれば、州の経済にも脱炭素化にも大きな機会をもたらされることになります。このため、州の再生可能エネルギー資源と安価な電力を最大限活用するセクターカップリングによる効果を生み出す包括的なソリューションを早急に策定する必要があります。

こうした解決策をもたらす可能性があるのが、パワー・ツー・エックス (P2X) 産業です。P2X 技術を使えば、安価な再生可能エネルギー、その他の豊富な資源や廃棄物資源を利用して、グリーン水素、アンモニア、合成炭化水素といったクリーン燃料や化学品を製造することができますようになります。P2X は水をグリーン水素へ変換することから始まり、このグリーン水素はクリーン燃料として直接使われたり、その他の動力燃料や化学品、グリーンコモディティを製造する二次工程の原料として使われます。P2X 経路 (図 A) は炭素循環のループを閉じ、あらゆる産業で化石燃料に取って代わる持続可能なクリーン燃料を生み出すことができます。P2X は、炭素排出量が多く、削減が困難な航空業界や海運業界にとって、代替策が限られている中で最も実現可能性の高い脱炭素化のソリューションを提供します。オーストラリアの再エネ資源を商品化し、海外市場に安全かつ経済的な方法で安定的に輸出するうえで、P2X 生成物は優れたエネルギーキャリアとなります。

オーストラリアでは、すべての州および準州が水素をめぐり、現地の生産能力を開発する競争に乗り出しています。将来の水素産業は、安価な電力と水素バリューチェーンにおける技術進歩によってオーストラリアが世界有数の水素生産国となれる見込みのある有望な産業です。水素の先を見据え、来たる水素経済を足掛かりにすることによって、P2X 産業は再エネ由来電力、グリーン水素、廃棄物資源からさまざまなクリーン動力燃料、化学品、製品への変換を NSW 州にもたらしてくれる可能性があります。P2X 産業の発展は知識の共有、変換可能な技術、総需要、スケールメリットを通じて水素経済を補い、さらに加速させることにもなります。

図A: セクターカップリングの機会を開き、脱炭素化を深く根付かせるP2X経路。なお、川下で動力燃料を利用すると、炭素排出につながる場合もありますが、P2X技術を利用してこれを止めることができます。



P2Xの可能性を認識し、NSW州主席科学工学官室に代わり、UNSWシドニーが中心となって本プレ・フィージビリティ・スタディを実施しました。本スタディの目的は、将来的にP2X経済を構築するというNSW州の機会について、独立した立場からエビデンスに基づく、産業を中心とした視点を提供することにあります。本スタディは、異なるP2X産業の技術的な経路を評価すること、また、事前の技術経済性分析により、NSW州において大規模なP2X生産を行うための候補地を特定することを目標としています。

NSW州には繁栄した新しい経済を構築するための成功要素が全て揃っており、P2Xに投資するための強力なビジネスケースを有しています。こうした成功要素として、P2X製品に対してすでに需要があることや需要が高まっていること、再エネゾーン (REZ) の導入と大規模な電力インフラに支えられた安価な電力、経済活性化特別区域 (SAP) と水素ハブによる組織的な計画と迅速な展開、P2X技術に関する世界屈指の研究開発能力のほか、これらを支援するNSW州政府の脱炭素化に向けた政策と財政支援などが挙げられます。

技術で可能になる新たな産業として、NSW州およびオーストラリア国内におけるP2Xの展開は、その技術的な経路によって決まってくるでしょう。本スタディでは、さまざまなP2X技術とそれらの開発状況/コスト、相対する化石燃料と同等価格にする上での主な推進力、NSW州内における用途およびエンドユーザーのほか、これらのP2X製品の現地の市場規模や世界的需要について系統的レビューを実施しました。本スタディで検討したP2X経路は、パワー・ツー・水素、パワー・ツー・アンモニア、パワー・ツー・メタン、パワー・ツー・メタノール、パワー・ツー・合成ガス他です。パワー・ツー・水素はあらゆるP2X技術経路の基本的なステップで、P2Xの技術的、経済的な実現可能性の重要な要素となります。NSW州やオーストラリア国内で破壊的なP2X技術が開発されており、中には、すでに商業化に成功したものや、産業用への変換や大量生産の初期段階にあるものもあります。

本スタディでは、NSW州において大規模なP2X生産を行うための候補地を特定しやすくするために、P2Xハブに関する評価の枠組みを作りました。*評価基準は、輸送インフラ要件、再生可能エネルギーおよび原料(水など)へのアクセス、既存の重工業および新たな工業地区の計画、国際市場への輸出の可能性を基にしています。この枠組みに沿って実施した定性的評価の結果、イラワラ、ハンター、パークス、ワガワガ、ダボ、バジェリーズクリークの6地域を最初のNSW州P2Xハブ候補地として特定しました(図B)。

* 本プレ・フィージビリティ・スタディにおける候補地分析は完全に網羅しているわけではなく、NSW州には他にもP2X経済の支えとなり得る有力地域があります。

† 提案した地域に関するさまざまなビジネスケースを策定することができますが、これにはステークホルダーのさらなるエンゲージメントが求められます。

本スタディでは、NSW州P2Xハブに関して、3段階の産業発展機会を提案しています。第1段階では、鉄鋼・化学品生産などの重工業によるグリーン製品や商品を対象とし、第2段階では、運輸業、鉱業、プロセス産業向け動力燃料に重点を置いており、第3段階では、分散型の小規模P2Xハブで現地の需要を満たすことを目指しています。選定したNSW州のP2Xハブと第1段階および第2段階の産業について、詳細なプレ・フィージビリティ評価を実施しました。これは、NSW州P2Xハブに関して、グリーンスチールの現地生産を行うためのパワー・ツー・水素(イラワラ)、日本へ輸出するためのパワー・ツー・アンモニア(ハンター)、内陸貨物鉄道向けパワー・ツー・燃料および化学品を製造するためのパワー・ツー・メタノール(いずれもパークス)という4つのビジネスケースを提示しています。† 各P2Xハブのビジネスケースは定量分析、原料要件やP2Xプロジェクト/インフラコストのモデル化、電力価格およびP2X製品価格の予測によって裏付けられています。

本スタディを実施するにあたっては、50を超える個人や企業・組織を対象にNSW州におけるP2X機会に対する意見を求めました。これらのステークホルダーは、NSW州政府、連邦政府、地元企業(スタートアップ企業や中小企業を含む)、NSW州の研究・技術開発機関、P2Xのグローバルサプライチェーン、多国籍企業、非政府機関を代表するP2Xバリューチェーンの主要プレーヤーおよび将来的な参加者です。意見を集約すると、NSW州は世界的なP2Xリーダーとしての地位につくための競争上の優位性を有しており、これを実現するためには、すべての参加者による連携的な取り組みとリソースの蓄積が必要だという点で一致しています。さらに、NSW州でのP2X経済構築に向けた技術開発や産業能力の開発における協力やパートナーシップについてステークホルダーから高い関心が示されました。こうした機運を捉えるために、産官学から40を超える参加者が集まったNSW州P2Xコンソーシアムが結成され、ネットワークが広がりつつあります。

ステークホルダーによる洞察とプレ・フィージビリティの結果を基に、本スタディでは、NSW州におけるP2X経済に向けた生産力および能力を構築するステップを示したロードマップを提案しています。

1. 技術の向上と産業の発展に向けた産官学による連携的な取り組みを実施する上で中心的な調整役を果たすP2X研究・革新ネットワークを形成する。
2. 商業化を重視した研究開発プロジェクトを支援するために、技術開発者およびエンドユーザーに研究インフラや専門知識、リソースを提供するP2X研究開発商業化ハブを創設する。
3. 商業規模で技術を採用する下地を作るために、実証実験やフィージビリティスタディなどの初期P2Xプロジェクトを実施する。

4. 投資への信頼を醸成し、長期的な大規模生産に向けたオフテイク契約を模索するためにP2X製品の輸出機会を見極める。
5. 太陽光発電の産業変換や事業展開の成功事例を再現するために、州内で開発された破壊的な技術に的を絞って投資を行う。
6. 垂直統合型P2Xバリューチェーン、および生産から利用に至る州内の生産能力を構築する。
7. NSW州におけるP2X経済の基礎を築くために、大規模生産と集中展開を行うP2Xエコ工業地区を導入する。

その他の技術主導型の産業転換と同じように、技術革新と商業化がNSW州において繁栄したP2X経済を構築する上での基盤となります。したがって、本スタディはP2X技術経路、ならびに、地域および産業レベルに至る技術経済的な実現可能性に重点を置いています。本プレ・フィージビリティ・スタディは、P2Xが州全体にもたらす多大な経済的メリットおよび脱炭素化のメリットを実現するために、NSW州におけるP2Xの機会と可能性を探る第一歩となります。本書はNSW州のP2Xにとって終わりではなく、出発点なのです。



図B: 選定地域の潜在的なP2X機会の開拓に関する適性のまとめ。

地域	原料の評価		既存産業の評価	第1・第2段階の機会評価	第1・第2段階の機会評価	第3段階の機会評価
	既存の重工業／軽工業	再生可能エネルギー発電へのアクセス	純水原料へのアクセス	P2Xが重工業／軽工業を脱炭素化する機会	港湾インフラへのアクセス	小規模なP2X経済を構築する機会
イラワラ・ショールヘイブン	●	●	●	●	●	●
ハンター	●	●	●	●	●	●
パークス	●	◐ 大きな貯水池が2カ所 (バレンドンとワイアンガラ) があるが、本地域は干ばつになりやすい	◐ 鉱業部門があり、今後、内陸貨物鉄道のインターモーダル拠点になる	◐ 内陸貨物鉄道と鉱業が動力燃料用途の機会になる	◐ 将来的に動力燃料を輸出する際、内陸貨物鉄道を利用することができる	●
ワガワガ	◐	●	◐ 大規模な農産物・食品加工部門がある	◐ 動力燃料は熱・輸送用途で利用することができる	◐ 貨物・物流経路を構築できる可能性がある	●
ダボ	●	◐	◐ 鉱業部門がある	◐ 鉱業がP2X用途の機会になる	◐ 貨物・物流の道筋を開くことができる	◐
バジェリーズクリーク	◐	●	◐ 航空産業を要する空港都市	◐ 航空産業と空港都市としての位置づけが動力燃料の導入機会となる	◐ 貨物・物流経路を構築できる可能性がある	●

- 凡例:
- 基準を満たす明確な機会あり
 - ◐ 基準を満たす潜在的な機会はあるものの、実現にはステークホルダーの援助が必要
 - ◑ 基準を満たすには不確実性が高いものの、ステークホルダーがさらなる貢献を果たせば実現できる可能性あり

目次

エグゼクティブサマリー	5
1. パワー・ツー・エックスの概説	16
1.1. なぜ今、P2Xが求められているのか	17
1.2. P2Xの実現可能性を促す要素	18
2. NSW州P2X産業の実態	23
2.1. 州が最優先する脱炭素化と経済機会	23
2.2. 拡大するクリーン動力燃料市場	23
2.3. 地元の化学産業による既存の需要	24
2.4. 電力インフラと再エネゾーン	24
2.5. 水素ハブと経済活性化特別区域	25
2.6. 研究開発／技術開発能力	25
2.7. 脱炭素化に向けた州の政策と助成プログラム	26
2.8. 企業、労働力、インフラ	26
3. P2X技術の経路	30
3.1 現在のP2X技術の概要	30
3.2 パワー・ツー・水素	31
3.3 パワー・ツー・アンモニア	35
3.4. パワー・ツー・メタン	38
3.5. パワー・ツー・メタノール	40
3.6. パワー・ツー・合成ガス(合成燃料)	44
3.6. フィッシャー・トロプシュ法による合成ガスの製造と変換	44
3.7. その他のP2X技術	47
3.7. その他のP2X経路	47
4.0. NSW州およびオーストラリアにおける破壊的なP2X技術	49
5.0. 「P2Xハブ」の開発に適した地域	53
5.1. NSW州における「P2Xハブ」機会を評価するための3段階の枠組み	53
5.2. NSW州内の主な「P2Xハブ」建設候補地の概要	53
5.3. イラワラ・ショールヘイブン地域	56
5.4. ハンター地域	61
5.5. パークス地域	64
5.6. その他の機会	70
6.0 NSW州P2Xエコ区域の設置に向けたロードマップ	74
フェーズ1 (2021～2022年) : 連携および知識共有	75
フェーズ2 (2023～2030年) : 技術の研究開発および商業化	76
フェーズ3 (2025～2030年) : 市場整備	77
フェーズ4 (2031～2050年) : 産業展開	78
付録A: 実施中または発表済みのP2Xプロジェクト	82
付録B: P2X生産を行うための原料技術	89
付録C: 謝辞	95
付録D: NSW州P2Xアライアンス加盟企業・団体	97
参考文献	98

図目次

図A: セクターカップリングの機会を開き、脱炭素化を深く根付かせるP2X経路。なお、川下で動力燃料を利用すると、炭素排出につながる場合もありますが、P2X技術を利用してこれを止めることができます。	7
図B: 選定地域の潜在的なP2X機会の開拓に関する適性のまとめ。	11
図1: 異なるエンドユーザーグループに基づいて分類したP2X技術。	20
図2: NSW州の各エネルギーゾーンにおける再生可能エネルギー発電の可能性。ハイブリッドとは、太陽光と風力の割合を50%ずつとした発電システムを指します。	28
図3: 水素が切り開く機会のネットワーク	30
図4: 現在の世界の水素バリューチェーンを表した図。水素の需要・供給量は百万トン／年 (Mt) の単位で表示していますが、製造用原料の需要量はエネルギー単位の石油換算百万トン (Mtoe) で表示しています。注: DRIとは、水素を用いて鉄鉱石を直接還元する方法を指します。CCUSを用いて製造したH2とは、利用・貯留のための炭素回収を伴う化石燃料からの水素を指します。表示されている数値は2018年における推測値です。図はIEAから引用したものです。無断複写・転載禁止。	31
図5: グリーン／ブルー／グレー水素の製造コスト予測。	32
図6: ジェメナ社が開発中の西シドニー・グリーンガス・プロジェクト。当プロジェクトは太陽光／風力発電を用いた水電解から水素を製造し、ガス供給網に注入する(容量にして約2%、250世帯分のエネルギー) 予定です。実施サイトには、送電網および将来の水素補給施設向けに発電を行うタービンも設置される予定です。画像はジェメナ社提供。	33
図7: オーストラリアで水電解による水素製造コストが低下する可能性。金額はすべて豪ドル。	34
図8: オリカ社のクーラガン島工場。写真はオリカ社提供。	35
図9: ハーバー・ボッシュ法の図解。	36
図10: NSW州を出発点とするエネルギー媒体としてのグリーンアンモニアの潜在的なサプライチェーン。	37
図11: 資源別に見た世界のエネルギー供給の内訳。データはIEAによる2018年の世界のエネルギー供給に関する分析から採用しました。	38
図12: 従来型メタネーションプロセスの概観的な図式。	38
図13: クイーンズランド州におけるAPAの再生可能エネルギーを用いたメタネーションプロジェクト。写真はAPA提供。	39
図14: 再生可能エネルギーによる電解および炭素回収を利用したクローズドループ型パワー・ツー・メタン (P2M) 工程。	40
図15: メタノールの従来の用途および新たな用途。	40
図16: 世界のメタノール需要の最終用途セクター別内訳。	41
図17: メタノールおよびメタノール由来燃料 (DME、オレフィン、パラフィン) 製造の商業化されている経路。	41
図18: 従来のエネルギーキャリアと新たなエネルギーキャリアのエネルギー密度の比較。本図において、M85はメタノール85%、ガソリン15%の混合燃料、E85はエタノール85%、ガソリン15%の混合燃料、DMEはジメチルエーテル、LOHCsは液体有機水素キャリア(本図ではトルエン)を意味します。	41
図19: アイスランドにあるCRIのプラントが世界初となるパワー・ツー・メタノールのプロジェクトです。	42
図20: ビクトリア州にある国内唯一の既存のメタノール製造プラント。ガス価格の高騰により、2016年に操業停止となりました。	42
図21: メタノール製造の潜在的なP2X経路。(A) 1つ目の経路では、回収したCO ₂ を熱触媒を用いてCOに変換した後、これを再エネ由来の水電解による水素と混合し、そこから生まれた合成ガス混合物(CO+H ₂)を二次変換反応器を使ってメタノールへと変換します。(B) 検討されている2つ目の経路(TRL:3~4)では、CO ₂ 電解装置内で廃棄されたCO ₂ と水から合成ガスを生成し、これを二次変換反応器を使ってメタノールへと変換することができます。(C) CO ₂ と水の直接電解からメタノールを生成する方法を開発するために研究が行われています。	43

図22:世界の合成ガス需要の最終用途セクター別内訳。	44
図24:サンファイア社が開発した合成ガスの直接合成を行うSynLink SOEC (固体酸化物形電解セル) システム	45
図23:合成ガスの割合 (H ₂ / CO比率) に基づく合成ガスの誘導体。	45
図25:循環ループを閉じるP2Xを用いた電気化学的な合成ガス製造。	46
図26:LAVOTMグリーンエネルギー貯蔵システム。LAVOTM提供。	49
図27:APAのメタネーションプロセスのイメージ。ARENA提供。	49
図28:アンモニア製造用ハイブリッドプラズマ電解システムの仕組み。当システムでは、プラズマを使って水と大気中の窒素からNO _x 中間体を生成(左側の反応器)し、そのNO _x を水電解装置(右側)内で水と共電解してアンモニアへと変換させます。	49
図29:HAZER® プロセスの流れ。ハイザーグループ提供。	50
図30:switch2社の試験システム。switch2社提供。	50
図31:アーデント・アンダーグラウンド社の水素貯蔵ソリューションと代替ソリューションのコスト比較。アーデント・アンダーグラウンド社提供。アーデント・アンダーグラウンド社提供。	51
図32:イラワラ・ショールヘイブン地域の地図。	56
図33:業界で行われている現在の製鋼プロセスの図解	57
図34:HYBRITプロジェクトの図解。当プラントはグリーン水素を使ったグリーンスチールの製造をテストするためにスウェーデンで開発されています。	57
図35:ショールヘイブンの水力発電容量の機会	58
図36:ハンター地域にある既存の輸出用インフラを示した地図	61
図37:NSW州におけるP2X経済構築に向けたロードマップ	74
図38:提案するP2X地区の図解	80
図39:アミンを用いた吸収プロセスの略図	89
図40:水素製造を行う水蒸気メタン改質施設に設置されたPSA装置。13本の小型円筒形容器は吸着剤層が内蔵されたPSA塔。リンデエンジニアリング社提供。	90
図41:CYNARATMプロセス(天然ガスからCO ₂ を分離する商用膜システム)の図解。シュルンベルジェ社提供。	90
図42:深冷蒸留法を利用して産業排煙からCO ₂ を分離させるプロセスの図解	90
図43:化学吸着剤を用いた直接空気回収プロセスの図解まずは、水性アルカリ吸着剤(KOH)がCO ₂ を吸収して炭酸塩(K ₂ CO ₃)が生成される。次に、この炭酸塩を水酸化カルシウム(Ca(OH) ₂)と反応させることで炭酸カルシウム(CaCO ₃)が生成され、これを熱分解することで回収したCO ₂ を放出できる。	91
図44:窒素・酸素製造向けにエアー・プロダクツ社が開発した商用の空気分離装置(ASU)プロセスの図解。エアー・プロダクツ社提供。...	93

表目次

表1:NSW州における「P2Xハブ」機会を評価するための枠組み	53
表2:NSW州の「P2Xハブ」候補地の概要	54
表3:低炭素鋼の製造を促す主な要素に関する評価	59
表4:イラワラ・ショールヘイブン地域における低炭素鋼の製造に関するプレ・フィージビリティ評価	60
表5:ハンター地域における水素輸出ハブ構築を促す主な要素に関する評価	62
表6:ハンター地域における水素輸出ハブ構築に関するプレ・フィージビリティ評価	63
表7:内陸貨物鉄道プロジェクトのDME混合ディーゼル燃料に関する基本シナリオの主要データ。	64
表8:NSW州政府の導入オプションとなり得る3つの混合シナリオ(水素混合率5%、10%、15%)における高位発熱量。	65
表9:NSW州政府向けの3つの水素混合シナリオにおける天然ガス消費量の減少率。	65
表10:NSW州全域でガス混合を促すために必要となる水素および再生可能エネルギーの量。	66
表11:パークス地域におけるP2X燃料の製造を促す主な要素。	66
表12:パークス地域におけるP2X燃料の製造に関するプレ・フィージビリティ評価。	67
表13:パークス地域におけるメタノール輸出経済の創出を促す主な要素	68
表14:パークス地域におけるメタノール輸出経済に関するプレ・フィージビリティ評価	69
表15:進行中または発表済みのグリーン水素プロジェクト一覧	82
表16:進行中または発表済みのグリーンアンモニアプロジェクト一覧	84
表17:進行中または発表済みのグリーンメタンプロジェクト一覧	86
表18:進行中または発表済みのグリーンメタノールプロジェクト一覧	87
表19:進行中または発表済みのグリーン合成ガスプロジェクト一覧	88
表20:CO ₂ 排出源の比較	92
表21:潜在的なCO ₂ 回収技術の概要	92
表22:異なる点源からの炭素回収コストの概要	92



クリーン技術を通じてネットゼロを達成することは、NSW州の経済を脱炭素化する上で極めて重要です。再生可能エネルギー、特に、太陽光および風力の導入の増加が発電コストを引き下げ、これによって、NSW州（およびオーストラリア）の国内・海外での競争力が高められていると同時に、川下の電力消費者の脱炭素化が促されていることに疑いの余地はありません。¹ 現在、NSW州における電力供給の21%は再生可能エネルギー資源による電力で、2020～21年度の平均卸価格は約70ドルMWh⁻¹（国内の州・準州の中で最も高額）です。² この市場シェアは公表済みの5つの再エネゾーンの導入（計画した容量12 GWを今後10年以内に提供することが提案されています）に伴い、増加するものと見られています。

しかし、再生可能エネルギーの不安定な出力や、一日のうち特定の時間帯しか利用できないという点を踏まえると、導入には課題もあり、こうした点が送電網への接続やその後の利用に関連する問題につながることになります。再エネゾーンと並び、州のエネルギー転換の枠組みにおけるその他の要素はこれらの問題に貯蔵（蓄電池としての揚水発電など）で対応するように設計されていますが、こうしたソリューションは、実施場所、規模、期間がかなり限定されるものです。こうした問題によって、オーストラリアで再生可能エネルギーをさらに導入していく動きが制限されているのです。

再エネ由来電力を用いたパワー・ツー・エックス (P2X) は、再生可能エネルギーを工業用原料や燃料として使いやすいさまざまな化学エネルギーキャリア（「X」と称されます）に変換させることができるプロセスや技術を網羅していることから、これらの問題に対する潜在的なソリューションとなります。^{3,4} さらに、環境面での利点として、P2X経路では、豊富に存在し、時として廃棄物になることもある水や排出物（特に、CO₂およびNO_x）といった分子が原料として活用されます。

このようにして、P2Xは出力が不安定な再生可能エネルギーを貯蔵すると同時に、現在、化石燃料資源から生成されている燃料や化学品を生み出す機会を提供してくれます。再生可能エネルギープロジェクトは接続性の問題や需要不足に悩まされがちですが、P2Xはこうしたプロジェクトのさらなる普及を促すことにもなります。

P2Xを利用すれば、排出量削減が難しい産業でも再生可能エネルギーを導入しやすくなります。産業排気ガスが世界におけるCO₂排出量の約40%を占めていることから重要産業とされている工業部門において、現時点で再生可能エネルギーは最低限の役割を果たしているに過ぎません。⁵ したがって、過度な改造を行う必要なく工業部門で再生可能エネルギーを利用できるようにする統合的なソリューションを考案することが急務となっています。

NSW州の再生可能エネルギーを利用したP2X経済が、化学品の形で再エネ由来電力（電子）を貯蔵する基盤を提供することができ、直ちに、もしくは近い将来、オーストラリアの再生可能エネルギーの可能性を開く機会を実際にもたらしていることは間違いありません。

P2Xは脱炭素化目標の達成だけでなく、NSW州に経済面でも大きなメリットをもたらす可能性があります。P2Xによって、産業界が必要とする化学品や燃料を現地で製造することにより、NSW州（およびオーストラリア）は輸入への依存度を引き下げることができます。さらに、その後、規模を拡大することにより、NSW州はこれらの動力燃料をアジア太平洋やEUの既存の貿易相手国に輸出できる可能性もあります。

P2X経済の主なメリットとして、再生可能エネルギーの高い可能性を秘めた地域への投資を呼び込むという点が挙げられます。こうした地域は遠隔地にあることが多いため、投資を呼び込むことで地域の発展や雇用拡大につながります。さらに、P2X産業に求められるインフラや支援技術を現地で開発、製造できれば、当然のことながら、NSW州や国にとってより大きな経済的メリットとなります。

NSW州政府は再生可能エネルギー産業への投資による経済活性化や持続的な雇用創出の重要性を認識しています。こうした再生可能エネルギーへの初期投資は、NSW州が低炭素経済に舵を切っていく土台となるでしょう。

重要なP2X技術のひとつが水電解による水素（H₂）の製造です。水素はその後、二次変換技術（ハーバー・ボッシュ法、メタネーション、メタノール合成など）によってアンモニアや炭素由来の製品へと変換することができます。

水電解による水素製造はすでに十分確立した技術（技術成熟度レベル [TRL] : 9）で、最近では1 GWを超える大規模な水電解プロジェクトも複数発表されています。⁶⁻⁹ 同様に、(1) H₂とCO₂や、(2) H₂と空気から分離した窒素（N₂）を組み合わせ、再エネ由来メタン（CH₄、TRL: 8～9）、メタノール（CH₃OH、TRL: 5～7）、アンモニア（NH₃、TRL: 5～7）を製造するプロジェクトも世界中で進められています。

さらに、電解によるアンモニアの直接合成、過酸化水素や酸水素炭素の生成（TRL: 3～5）といった新たなP2X経路についても開発が進められています。

1.1. なぜ今、P2Xが求められているのか

現在、ほぼすべての工業用原料や燃料は化石燃料から作られており、これが問題となっています。というのも、化石燃料の使用が環境負荷の増加につながっており、それによって気候の安定が損なわれているからです。こうした現実にはP2X経済にとって絶好の機会となり、以下を実現することにもなるでしょう。

持続可能なバリューチェーン

P2Xを使えば、自然界に豊富に存在する分子を活用して価値ある商品を生み出すことが可能になります。こうした分子の例として、水、空気中の窒素（周囲空気の78%）、排出ガス（現在、世界中で年間約30 GtCO₂が排出されています¹⁰）から、もしくは直接空気回収によって得られるCO₂などがあります。

1. パワー・ツー・エックスの概説

既存インフラ内での統合

P2X製品は相対する化石燃料で製造した製品と同一の組成を持つものが大半であることから、容易に利用することができます。このため、新興のP2X産業は、貯蔵、輸送、利用に際して既存の成熟したサプライチェーンを活用することができるのです。

雇用創出

P2X経済はオーストラリアに直接的、間接的に雇用を生み出します。アーンスト・アンド・ヤングが最近行った分析により、再生可能エネルギーへの投資額1ドル当たりの雇用創出効果は化石燃料プロジェクトへの投資額1ドル当たりの効果の3倍におよぶことが明らかにされました。¹¹ さらに、P2Xによる水素を用いたグリーンスチール製造やアンモニア製造に移行していくことによって、オーストラリア(およびNSW州)はさらに多くの雇用機会を生み出すことができます。これには、化石燃料分野の既存の労働力を活用できる雇用機会も含まれており、これは、多くの失業者を出さずにクリーンエネルギー分野へのスムーズな転換を果たすことにつながります。¹² また、デロイトの最近の報告書によれば、将来見込まれているオーストラリアの水素輸出産業だけでも、2050年までに最大16,900人分の新たな正規雇用を生み出す可能性があります。¹³

1.2.P2Xの実現可能性を促す要素

P2Xの実現可能性を促す主な要素は、安価な電力と水電解装置の資本コストです。再生可能エネルギー部門の拡大は、発電コストの引き下げのみならず、この安価な電力を長時間利用できること(設備利用率の向上)によって、確実にこの実現可能性を可能なものにしていきます。具体的に言えば、2010年以降、発電コストが太陽光発電は82%、風力発電は32%低下し、設備利用率はいずれも30%以上向上しています。¹⁴

また、水電解装置のコストも大幅に低下しており、水電解装置メーカー各社は資本コストが今後、40%(2030年までの短期)から80%(2050年までの長期)ほど低下すると予想しています。¹⁵ ノルウェーの水電解装置メーカーであるネルは最近、大規模な自動製造施設への切り替えが完了すれば、水電解装置のコストが75%削減できるだろうという見通しを明らかにしました。¹⁶

こうした発展は同時に、コスト競争力あるP2Xに道を開いています。特に水素の製造については、オーストラリア、チリ、サウジアラビアといった国々において近い将来、1kg当たり2~4ドルまで大幅にコストが低下すると見込まれており、早ければ2030年には化石燃料由来の水素のコストと肩を並べるものと見られています。¹⁷ こうした低コストの水素は、その後、製造した水素を動力燃料や他の化学品へ変換する事業のコスト競争力を高めることになるでしょう。

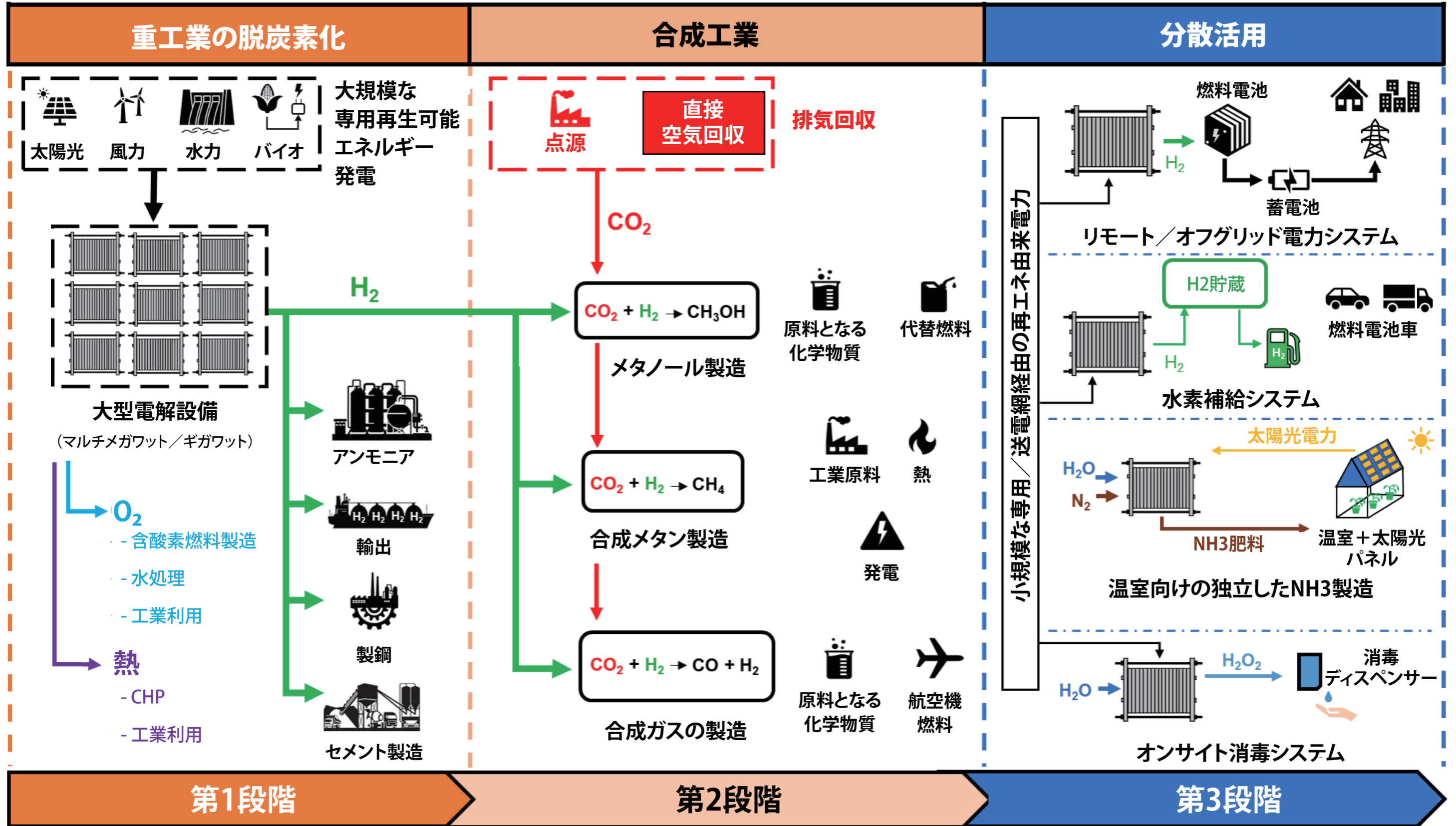
このように、再エネ由来のグリーン燃料や化学品は、経済全体にわたり相対する化石燃料に取って代わる大きな機会を秘めています。これらは、既存のサプライチェーンを大幅に変更せずに、ガス供給網、航空、製鉄、肥料製造などの排出量削減が困難な産業を脱炭素化する低コスト(再エネ由来水素の価格が低下すれば)の戦略となります。

NSW州によるP2X技術への投資は輸出経済の構築につながります。P2X技術はその後、異なる段階に広がっていく可能性があります(図1)。**第1段階**では、大規模な水電解装置が設置され、その後、製造された水素は輸出される、あるいはアンモニア製造(ハーバー・ボッシュ法)、製鉄、セメント製造などの既存の重工業で利用される、もしくは天然ガス供給網へ注入される可能性があります。**第2段階**では、さらなるP2Xプロセスの展開やインフラ整備が関わってくるものと思われ、そこで製造された水素は州内で利用するためのメタノール、メタン、合成ガスなどのグリーン媒体に変換されます。**第3段階**では、P2Xの分散型用途に伴う展開が想定されます。

世界各国が2050年までの低炭素経済実現に向けて舵を切っている中、NSW州にとっては今が、P2X燃料の大規模な導入を促すために必要なインフラ基盤を築く絶好の時なのです。



図1:異なるエンドユーザーグループに基づいて分類したP2X技術



2.NSW州 P2X 産業の実態

P2X産業の未来を築くためには、この技術分野に的を絞った組織的な投資を直ちに開始しなければなりません。NSW州には、今後の水素経済を成功に導くすべての条件とP2Xの発展をけん引する機会が備わっています。

2.1.州が最優先する脱炭素化と経済機会

NSW州の経済成長、新たな雇用創出、より持続可能で排出量を制限した経済への産業転換にとって最優先すべきものとして、P2X技術とその周辺産業が挙げられています。特に、水素は州政府の気候変動に関するアクションプランである「ネットゼロ計画」や経済戦略として掲げている「NSW2040経済青写真」でも優先項目とされています。

「2020年NSW州における脱炭素化イノベーション調査」は、排出量実質ゼロの実現に向けた州の脱炭素化への道のりにおける課題と機会について、州が初めて実施した調査で、2年おきにレビューを行います。本調査では、NSW州におけるP2Xがさまざまな部門にもたらす経済機会と排出量削減機会に焦点が当てられました。本調査で提案された65におよぶ経済機会の大半はP2X技術・産業に関わるものです。汎用性の高いエネルギーキャリアおよびさまざまな産業の原料であるP2X製品は、NSW州経済の電力、輸送、建造環境、農業、重工業にわり適用することができます。本調査では、P2X技術の経済および脱炭素化の観点における可能性を開くために、NSW州が積極的に開発、導入していくべき重要な技術としてP2X技術を位置づけています。

「NSW州:クリーンエネルギーの一大拠点(産業機会)」と題する報告書は、州のエネルギー計画の概略を示したNSW州電力インフラロードマップの中核を成すものです。本報告書は、クリーンで安価なエネルギーの活用に向けて、新たな産業を育成する機会を追求するようNSW州政府に提言しています。報告書では、さまざまな将来性のある産業が挙げられており、その多くはP2Xに関連する産業で、グリーン水素、鉄鋼、アルミニウム、アンモニア、持続可能な化学品・合成燃料、低炭素排出の輸送などがあります。これらの重点P2X産業はNSW州に新たな市場を育て、新規雇用を生み出すという大きな経済発展の可能性を有しています。例えば、NSW州のグリーンスチール産業において生産量が1パーセント増加することにより最大で2,700万ドルの年間収益と賃金の増加につながります。

2.2.拡大するクリーン動力燃料市場

現時点における世界の水素需要は70百万トンで、その大部分は石油化学製品の精製と肥料製造に使用されています。水素が低炭素動力燃料として、エネルギー、輸送、建造環境、農業、工業分野で幅広く使われるようになれば、世界の水素需要は大幅に拡大すると予想されており、多くの国際的なエネルギー関連機関や産業界、投資家がこうした拡大予想に同意しています。^{13,15,17-20}シナリオの中には、世界の水素需要が2050年までに696百万トンに達し、総エネルギー消費の24%に寄与すると予測しているモデルもあります。²⁰この需要は、電動化する可能性が低いと思われるすべての業界が水素をエネルギー源として使用した場合には、1,370百万トンまで達する可能性もあります。

オーストラリアは拡大する世界の需要を満たす上で、主要な水素生産国になり得る可能性を有しています。国家水素戦略が示唆するところによると、オーストラリアは石油換算で少なくとも年間100百万トンの水素生産能力を備えることになると見られています。²¹

NSW州内でも大きな水素需要が見込まれています。州政府は2030年までにガス供給網における水素の割合を最大10%にするという野心的な目標を掲げており、これは州内市場からの大きな水素需要につながります。NSW州では、家庭向けの地域ガス供給網で試験的に水素を注入、混合する国内初となる試験「西シドニー・グリーンガス・プロジェクト」が最大の商業規模で進められています。²²

国が低炭素経済へと移行する中、中長期的に見ると、NSW州やオーストラリア国内で水素以外のP2X動力燃料に対する需要も高まるものと思われます。排出量削減が困難な航空・海運などの運輸業界が脱炭素化するためには、年間約3,000 kt以上のP2X燃料が必要となります。^{23,24}この需要は、さらに年間400 ktの水素が必要となるガス注入などの取り組みに伴い、2030年に拡大すると予想されています。州内の確立した製造拠点、そしてP2X製品の海外市場への輸出から得られる膨大な経済的メリットが、NSW州における今後のP2X需要を後押しする要因となります。さらに、NSW州のP2X経済は海外からの燃料および化学品の輸入依存度を低下させ、貿易収支を改善し、エネルギー安全保障を強化することになります。

2.P2X 拠点としてNSW州が最適な理由とは

2.3. 地元の化学産業による既存の需要

オーストラリアが競争力を有する戦略的重点産業として、食品、農業、先端製造業、医療・製薬、再生可能エネルギー、鉱業などがあります。こうした重要産業の多くにとって必要不可欠な材料を製造するのが化学産業です。²⁵ オーストラリアの製造業のうち第3位の規模を誇る化学産業には、5,500社を超える企業、211,821人以上もの正規雇用者が属しており、国内経済への寄与額は280億～380億ドルにおよびます(2017～18年)。²⁶ NSW州において、化学産業は最大113億ドルの収益をもたらし、国内の化学産業で働く全労働者の3分の1超を州内で雇用しています(2017～18年)。²⁶ 化学産業はほぼすべての製造業バリューチェーンにおいて重要な役割を担っており、オーストラリアの111産業のうち109の産業に対して材料を供給しています。²⁷ オーストラリアおよびNSW州の化学産業は化石燃料原料に大きく依存しており、原料となる石油や原油の約75%は輸入品です(2017～18年)。²⁸ このことは、変動の激しい原油価格や世界的な脱炭素化への動きによる影響を受けながら化学産業が発展していく上で大きな課題となっています。

国内およびNSW州の化学産業は経済的、環境的な観点から、化石燃料に代わる選択肢を積極的に模索しています。これがNSW州およびオーストラリアの化学産業による既存のP2X需要に当たります。例えば、NSW州における化石燃料ベースのアンモニア製造業(オリカ社クーラガン島工場)は現在、年間360,000トンの生産能力を有しており、現在は硝酸アンモニウムの製造にこの生産能力が使われています。²⁹ NSW州におけるP2Xの発展は、生産コストおよびエンボディド・カーボン(内包二酸化炭素)の観点から、世界の取引市場における自己回復力と競争力を高めるために、州内の化学産業を活性化させる機会となります。これは、環境的、経済的な意味でより持続可能性が高いクリーンな次世代の化学産業の基盤を築くことになるかもしれません。さらに、近年、化学産業(一次化学製品および高価値化学製品)向けのP2X需要はオーストラリア国内でも世界でも堅調に伸びており、今後数十年にわたって拡大し続けると見込まれています。³⁰ これはNSW州のP2Xにとって、他の地域や国に輸出し、化学産業と製造業を脱炭素化する機会となります。

2.4. 電力インフラと再エネゾーン

P2X生産はエネルギーを大量に必要とするため、化石燃料と比較した場合、電力価格がP2X製品のコスト競争力を決定づける重要な要因となります(*P2Xの経済性に影響を及ぼすその他の要因については後述します*)。NSW州には、広範囲にわたって太陽光や風力のエネルギー資源があり(図2)、新たに12 GW相当の発電容量を持つ再生可能エネルギープロジェクトの数々が2030年までに稼働する予定です。州の再生可能エネルギー発電の構成は、太陽光発電、風力発電に加え、大規模なエネルギー貯蔵としての揚水発電から成っており、比較的バランスが取れています。全国電力市場(NEM: National Electricity Market)において、NSW州は最も強力な送配電網を誇り、公表されたシステム強度不足の件数が最も少ない州です。州の電力網は今後、送電網拡大や相互接続の数々のプロジェクトによってさらに強化されていく予定です。NSW州の高度な計画と大規模な電力インフラへの巨額の投資は、再生可能エネルギー資源を信頼できる安価な電力に変換させ、これによって将来のP2X産業が活気づくことにもなります。

NSW州政府の電力インフラロードマップは、再生可能エネルギー資源の開発、電力システムの近代化、信頼できる安価な産業／家庭向け電力を長期的に供給することを目指した州の計画を定めています。このロードマップの重要な要素のひとつが電力インフラ投資セーフガードです。これは、出力が変動する再生可能エネルギー、エネルギーの長期貯蔵、NSW州における需給調整分野への投資を支援し、投資家に再生可能エネルギープロジェクトに関する長期的なオフテイク契約を提供するものです。これは投資誘致への強い意欲を示すもので、安価な電力が持つ機会を生かしながら、P2X投資家を州に呼び込むことにつながります。

NSW州は再エネゾーン(REZ)整備プログラムにも先頭を切って取り組んでいます。国内で最も計画が進んでいるプロジェクトが複数あり、2022年末までには、国内初の再エネゾーンの開発がNSW州内で開始される予定です。NSW州電力インフラロードマップでは、再エネゾーン開発に対する州の位置づけが再確認され、5つの再エネゾーン(中西部オラナ、ニューイングランド、南西部、ハンター・セントラルコースト、イラワラ)に重点的に取り組むことが記されています。いずれの地域も優れたエネルギー資源を有しており、既存の電力網インフラの近くに立地するという利点があるほか、すでに民間部門から投資が行われています。重要なこととして、これらの再エネゾーンは州内の他の地域(新たなプロジェクトに接続するかなりの送電容量をすでに有している可能性がある地域)における再生可能エネルギープロジェクトの開発を妨げることはありません。州内で最も先進的な中西部オラナ再エネゾーンとニューイングランド再エネゾーンでは、州の電力網に新たに11 GWの容量をもたらすことが提案されています。

いずれの再エネゾーンも市場エンゲージメントを完了し、業界から高い関心を集めており、間もなく具体的な計画・設計段階に入る予定です。NSW州政府は中西部オラナとニューイングランドの再エネゾーン開発を加速させるために1億2,000万ドルの資金を割当てており、州内の再エネゾーン開発を統括するNSW州エネルギー公社を最近設立しました。

2.5. 水素ハブと経済活性化特別区域

NSW州政府はグリーン水素の大規模生産を行う水素ハブの役割を果たす2つの地域を特定し、その開発に向けて7,000万ドル以上の資金を投じることを約束しています。いずれの水素ハブも計画された再エネゾーンや工業地区へのアクセスに加え、P2X産業の発展に欠かせない既存の水素サプライチェーン、水深の深い港湾、物流インフラへのアクセスを備えています。

ー **ハンター地方ニューカッスル港水素ハブ** ハンター・ニューカッスル地域は鉱業・製造業にとって戦略的に重要な重工業拠点です。この地域はグリーン水素の製造を拡大するための理想的な立地で、開発段階へと進んでいるプロジェクトが複数あり、一例として、エナジーエステート、AGL、APA、ITMパワーの各社が参画する20億ドル規模のハンター水素ネットワークプロジェクトが挙げられます。ニューカッスル港は年間で4,400隻を超える船舶の入出港と164百万トンの貨物を扱っています。

ー **イラワラ地方ポートケンブラ水素ハブ** ポートケンブラ工業地区は水素の製造・輸送・活用における実績と、1世紀超にわたる重工業での実績を有しています。ポートケンブラには、水素サプライチェーンのさまざまな参加者や顧客が存在します。コアガス社、ブルースコープ・スチール社、ウーロンゴン廃水処理施設、エナジーオーストラリア社タラワラ水素ガス混焼発電所、スクアドロン・エナジー社が計画中の水素ガス混焼発電所、オーシャネックス・エナジー社が提案した洋上風力発電所がその例です。ポートケンブラはオーストラリア東岸の主要工業港で、海外市場向けに商品を輸出しています。

NSW州の水素ハブに加え、数か所ある経済活性化特別区域(SAP)も水素・P2X産業の立地として有望です。SAPはNSW州が地域計画や新たな産業の育成に向けて導入した新たな取り組みです。現在までに6つのSAPが州政府によって公表されており、地方雇用拡大区域としてさらに4つの区域に拡大しています。これらの区域には、州政府による組織的な計画と投資サービスが提供されます。

42億ドルに上るスノウイー水力発電所レガシー基金の支援を受けているこれらのSAPは、公的資金による調査、迅速な計画の承認、政府主導の開発、共有インフラへの投資によってリスクを回避した投資から恩恵を受けることになります。多くのSAPはそれぞれの強みと機会を生かして、どのようにしたら水素およびP2Xのプロジェクトを新たな工業地区の開発に統合できるか模索しているところだ。

例えば、ワガワガSAPには、現地の大量の太陽光エネルギーにアクセスできるインターモーダルの貨物・物流ハブを運用している工業地区がすでに存在します。パークスSAPには、国の2つの基幹鉄道である内陸貨物鉄道とトランスオーストラリア鉄道の唯一の交差点に戦略的に置かれた全国物流ハブがあり、水素を燃料とした鉄道輸送の燃料補給ステーションにもなり得ます。モーリーSAPには、アグリビジネスの最も穀物生産量が多い地域があり、肥料としてのグリーンアンモニアに対する高い需要があります。これらのSAPは、機関投資家や産業界にとって、現地の需要を満たす上でP2Xサプライチェーンを構築するための魅力的な区域です。さらに、これらの立地は陸上／鉄道輸送を利用して国内の他の地域へも行きやすく、水深の深い港湾にも接続できます。

2.6. 研究開発／技術開発能力

NSW州には、P2X分野の技術開発・商業化に関する優れた能力を持つ優秀な大学、研究開発機関、研究所が複数存在します。世界的な水素イノベーション拠点として認知されているNSW州は、水素バリューチェーン全体にわたる高い研究開発能力を有しています。いくつか例を挙げると、国立オーストラリア研究会議(ARC)世界水素経済に向けた訓練センター(GlobH2E)、産業界主導の水素エネルギー研究センター(HERC)、ニューカッスルエネルギー・リソース研究所(NIER)などがあります。NSW州産業の研究開発部門は研究者や技術開発者と密に連携しながら、インフラを活用してP2X技術の実験を積極的にを行っています。中には、商業規模での技術導入に向けた試験プロジェクトを展開している先行者もいます。

NSW州の優れた研究機関と大学はクリーン技術の研究開発と商業化を加速させる組織的かつ連携的な取り組みに向け、協力関係を築いています。例えば、ニューサウスウェールズ大学(NSW大学)、ウーロンゴン大学、ニューカッスル大学が共同で創設したNUWアライアンスは、エネルギー技術に取り組んでいるオーストラリアで最も有力な国内最大の研究集団です。NSW州政府はオーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)とイノベーションパートナーシップを締結しています。その目的は、州内での技術進歩や新たな産業の発展を推進することであり、重点分野のひとつとして水素が含まれています。

NSW州は技術革新や開発における優れた実績を誇ります。最近発表した「アクションプラン: アイデアを雇用に変わる—NSW州における研究開発の推進」は、研究能力を新たな産業・製品・サービス・雇用に変換する取り組みを加速化するための州のアクションプランです。³¹ そこで提言された最優先する5つの行動とそれを支える16の行動は、的を絞った財政支援、データの公開、区域ベースの投資、州内の大学に対する戦略的支援を通じてP2X産業が発展するさらなるきっかけとなるかもしれません。³¹

2.7. 脱炭素化に向けた州の政策と助成プログラム

オーストラリア最大の経済規模を誇り、国の総炭素排出量の25%超を排出している³² NSW州は今後、低炭素社会に移行しつつ、継続的な発展を確実なものとしていかなければなりません。NSW州政府は炭素排出量を2005年比で35%削減し、2050年までに排出量ネットゼロを達成することを公約しています。NSW州の「ネットゼロ計画ステージ1: 2020~2030年」(以下、「ネットゼロ計画」)は、2030年までに35%の排出量削減目標を達成し、2050年までに排出量ネットゼロとする目標に向けて前進するための州政府のアクションプランです。本計画では、気候変動や排出量削減に取り組む上での優先分野が4つ定められており、次世代および実証済みの低排出技術への投資を通じた技術主導型の排出量削減に重点が置かれています。

本計画に基づく一連のプログラムや政策の一環として、州政府はクリーン技術開発や脱炭素化を加速させる産業を支援するために、7億5,000万ドルの助成プログラム「ネットゼロ産業革新プログラム」を発表しました。このプログラムは以下の3つの重点分野から成り、各分野は助成金プログラムにより支援されています。

- **クリーン技術イノベーションプログラム(1億9,500万ドル)**: 新たなクリーン技術の開発および継続的イノベーションに対する支援。
- **新たな低炭素産業の基盤構築プログラム(1億7,500万ドル)**: 必要なインフラの構築とサプライチェーンの機能強化による低排出産業の基盤づくり。
- **排出量の多い産業向けプログラム(3億8,000万ドル)**: 排出量の多い産業の既存設備に関連する排出量を削減するための低排出技術/インフラの導入。

ネットゼロ産業革新プログラムに基づくこれら3つのプログラムはすべて、P2X技術/産業の発展に深く関わるものです。技術主導型の脱炭素化の原則と厳密に足並みを揃えたこれらの助成プログラムは、新たなP2X産業を構築する組織的かつ連携的な取り組みに向け、NSW州に研究、産業、投資を呼び込むことができます。中でもクリーン技術イノベーションプログラムは動力燃料と水素を注力分野のひとつとするもので、連携、研究開発プロジェクト、研究インフラ、試験/商業規模プロジェクト、規格基準という5つの流れがあります。これら5つの補完的な流れはNSW州におけるP2Xイノベーションエコシステムの土台を築くことにもなります。このエコシステムにより、NSW州は商業化されたP2X技術や、新たな低排出産業を構築する、あるいは排出量削減が困難な州内の産業を脱炭素化するためにすぐ導入できるP2X技術を確保することができます。

さらに、NSW州政府は低排出の計画やインフラ開発にも取り組んでおり、多くの地域が2036年までの地域成長計画に持続可能な開発を取り入れています。³³ こうした州政府による明確なメッセージ発信に続き、地方自治体や市議会がそれぞれの脱炭素戦略やアクションプランを設定しました。例えば、シドニー市が環境行動³⁴を定めたり、ニューカッスル市が排出量削減に向けた気候変動対策5カ年計画を定めています。³⁵ NSW州のSAPをはじめとする新たな工業地区の開発は、持続可能性、グリーンインフラ、技術主導の投資を重視する国際連合のエコ工業団地開発の枠組みを採用しています。例えば、パークスSAPは国内初のカーボンニュートラル地域となることを目指しています。³⁶ こうした各地域の政策や取り組みは産業や投資家にとって、NSW州にP2Xの生産・利用設備を設置するためのさらなるインセンティブになるかもしれません。

2.8. 企業、労働力、インフラ

NSW州はオーストラリア経済の原動力です。NSW州の経済はダイナミックかつ多面的で非常に発達しており、GDP成長率2.3% (新型コロナウイルス感染拡大前) に示されるように安定的に成長しています。オーストラリアの民間の大企業500社のうち175社が、また、600社を超える多国籍企業がNSW州に本社を構えています。こうした経済的に持続可能で、かつ、企業に有利な環境は投資家や産業界にNSW州でP2Xバリューチェーンを開始するための自信を与えています。さらに、NSW州政府が近年設立した「インベストメントNSW」は、貿易促進および投資誘致に向けて、企業、産業、研究機関、政府間の調整や支援を行う州政府の中央機関としての役割を果たします。

NSW州はアジア太平洋諸国の市場に地理的に近いことから、これらの国々と強力な貿易関係を築いています。現在、NSW州は日本、韓国、中国へ約76億ドル規模の製品を輸出しています。³⁷ これらの国々はいずれもエネルギー輸入国で、自国経済を脱炭素化するために、クリーンな動力燃料や化学品に対する大きな需要があると見られています。

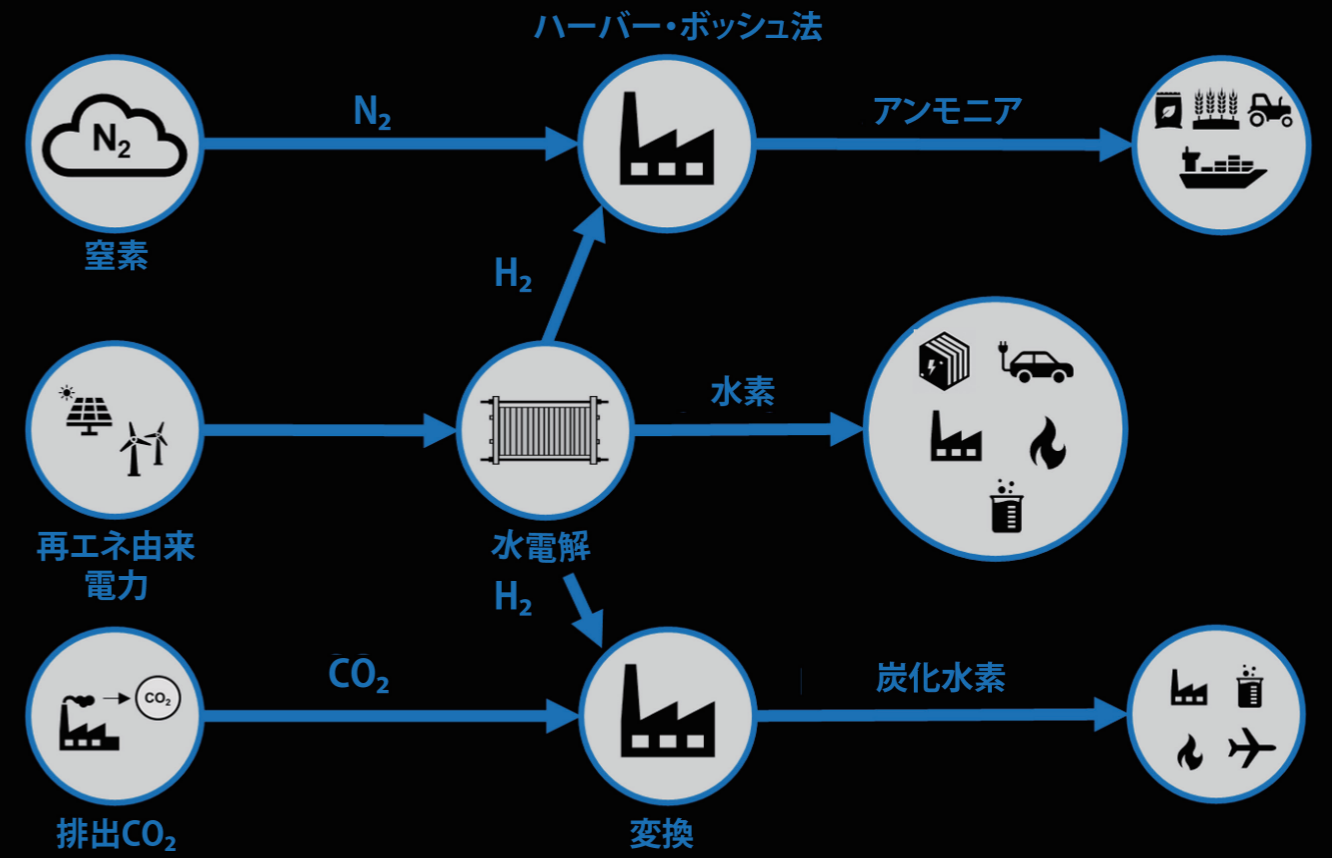
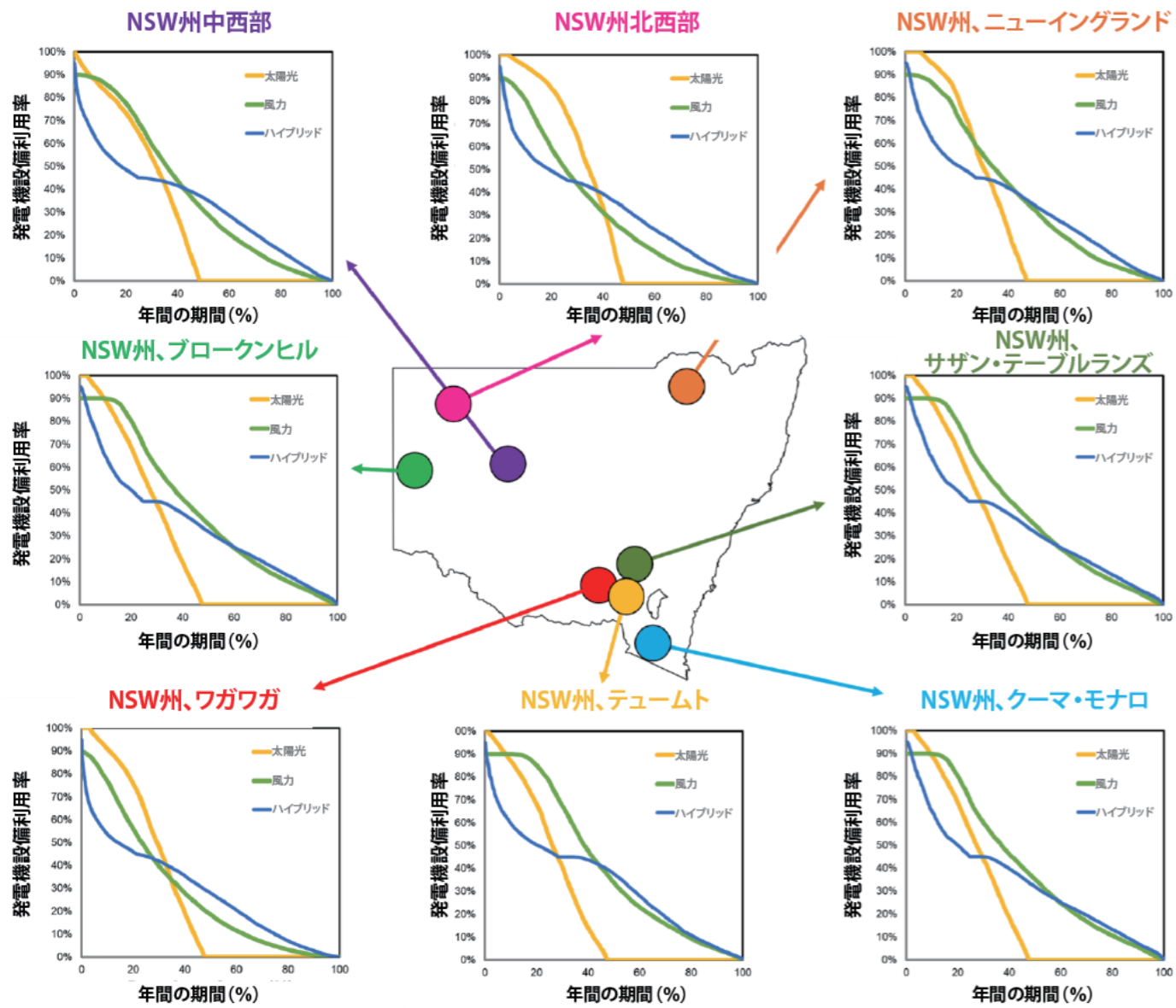
NSW州で製造したP2X製品をアジア諸国に輸出するために、既存の自由貿易協定やサプライチェーンも利用することができます。州内には200を超える商工会議所があり、これらが諸外国とP2X産業の開発パートナーシップを築くためのパイプ役を果たす可能性もあります。

NSW州の人口は790万人(2017~18年)で、国内人口の3分の1近くが住んでいます。州内の20~34歳の人口比率はオーストラリア全般の地域よりも高く、労働年齢に達している、高度な教育を受けた独創性のある若い年齢層を示しています。こうしたスキルの高い多様な人材プールは、潜在的な労働力という意味において、NSW州における新たなP2X事業/産業にとって力強い将来性を表しています。

NSW州が持つ広範囲におよぶ海上/陸上/鉄道/航空輸送ネットワークと最先端の物流サービスへのアクセスによって、NSW州はP2Xの製造・流通にとって最適の産業拠点となっています。NSW州が開発を進めている870億ドル規模の数々のインフラプロジェクトは将来のP2Xサプライチェーンの物流、輸送をさらに支えるものとなるでしょう。



図2: NSW州の各エネルギーゾーンにおける再生可能エネルギー発電の可能性。ハイブリッドとは、太陽光と風力の割合を50%ずつとした発電システムを指します。



3.P2X 技術の現状評価

3.P2X 技術の経路

3.1 現在のP2X技術の概要

P2Xは独自のセクターカップリング機会を提供しています。というのも、**図3**に示されているように、水素は排出量削減が困難なエネルギー用途の大規模な脱炭素化だけでなく、グリーン化学品(アンモニア、メタノール、航空燃料など)を実現するものでもあるからです。

本セクションでは、NSW州に適した主要なP2X技術をいくつか取り上げ、現状とコスト、実現可能性に向けた主な経済的/技術的要因、州内における適用性を概説していきます。商業規模の現在および将来におけるP2Xプロジェクトについては、**付録A**で詳細をまとめています。

図3:水素が切り開く機会のネットワーク



3.2 パワー・ツー・水素

世界における水素の用途で圧倒的に多いのは工業プロセスにおける用途で、その代表がアンモニア合成(55%)、原油精製(25%)、メタノール製造(10%)です。³⁸ また、規模は小さいものの、水素は鉄鉱石還元やポリマー合成でも使用されています。³⁸

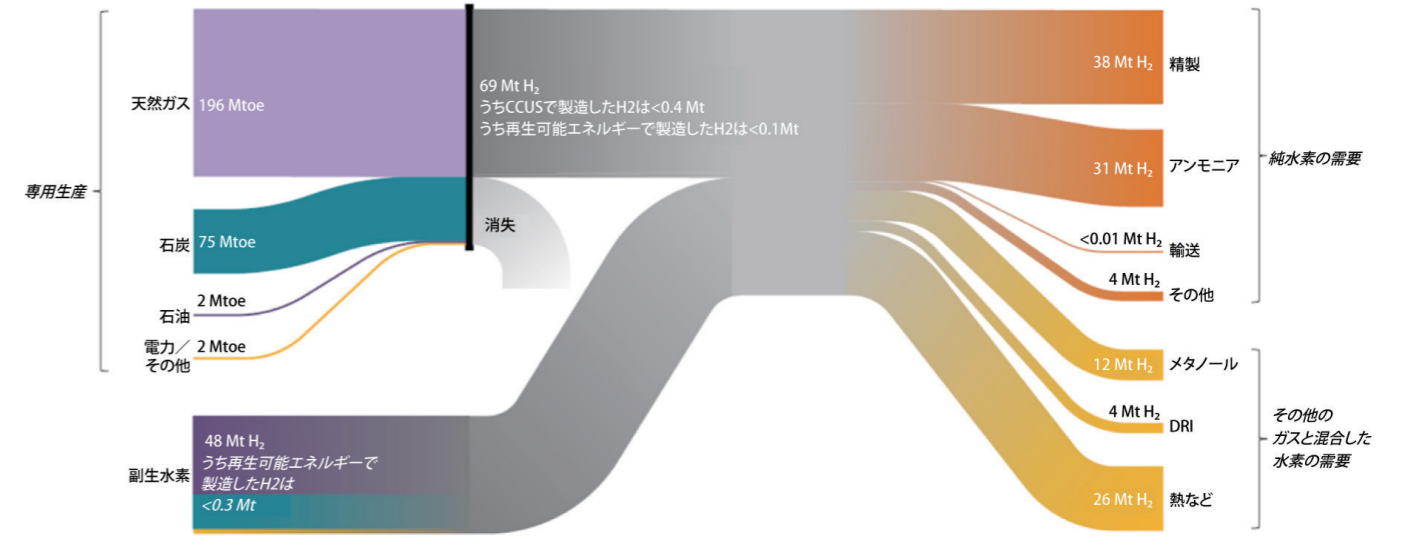
水素市場の展望

現在、世界では年間115百万トン近くの水素(図4)が製造され、そのうち75百万トンはそのまま純水素としてアンモニア製造や石油精製工程で使用されています。¹⁸ 残りの45百万トンは化学品製造で使われる合成ガス(CO + H₂)などの気体混合物や、メタノールをはじめとする燃料として用いられます。こうした水素需要は1975年以降、着実に伸び続けており、年平均成長率は4%に上ります。¹⁸

脱炭素化のきっかけとなる水素

特にエネルギー生成する際、ほとんどの化石燃料とは異なり、燃焼時に有害物質を一切排出しないことが水素を利用する最大の利点です。そのため、水素は熱用途(天然ガスの代替として)、および燃料電池を用いた電力発電の力強いキャリアとして活用できる可能性を有しています。いずれの用途においても共通しているのは、副生物が水と熱だけに限られることです。したがって、持続的に製造できれば、水素はクリーンなエネルギーキャリアとしても、化石燃料の代替としても活用することができます。

図4:現在の世界の水素バリューチェーンを表した図。水素の需要・供給量は百万トン/年(Mt)の単位で表示していますが、製造用原料の需要量はエネルギー単位の石油換算百万トン(Mtoe)で表示しています。注:DRIとは、水素を用いて鉄鉱石を直接還元する方法を指します。CCUSを用いて製造したH₂とは、利用・貯留のための炭素回収を伴う化石燃料からの水素を指します。表示されている数値は2018年における推測値です。図はIEAから引用したものです。無断複写・転載禁止。¹⁸



脱炭素化を促すものとしての水素の可能性に対する認識はさまざまな領域に広がっています。水素は化学原料やエネルギーサプライチェーンの脱炭素化を加速させることができるため、次第に「21世紀の燃料」と呼ばれるようになりつつあります。²¹ 国際エネルギー機関(IEA)は、世界が「持続可能な開発シナリオ」(気候の安定化を損なわないエネルギー安全保障)を実現するためには、2070年までに毎年およそ500百万トンの水素が必要となると予想しており、これは世界の総エネルギー需要の13%を満たす量になります。この量を実現するためには、2020年以降、世界における水素生産能力を約5倍ほど拡大していかなければなりません。¹⁹

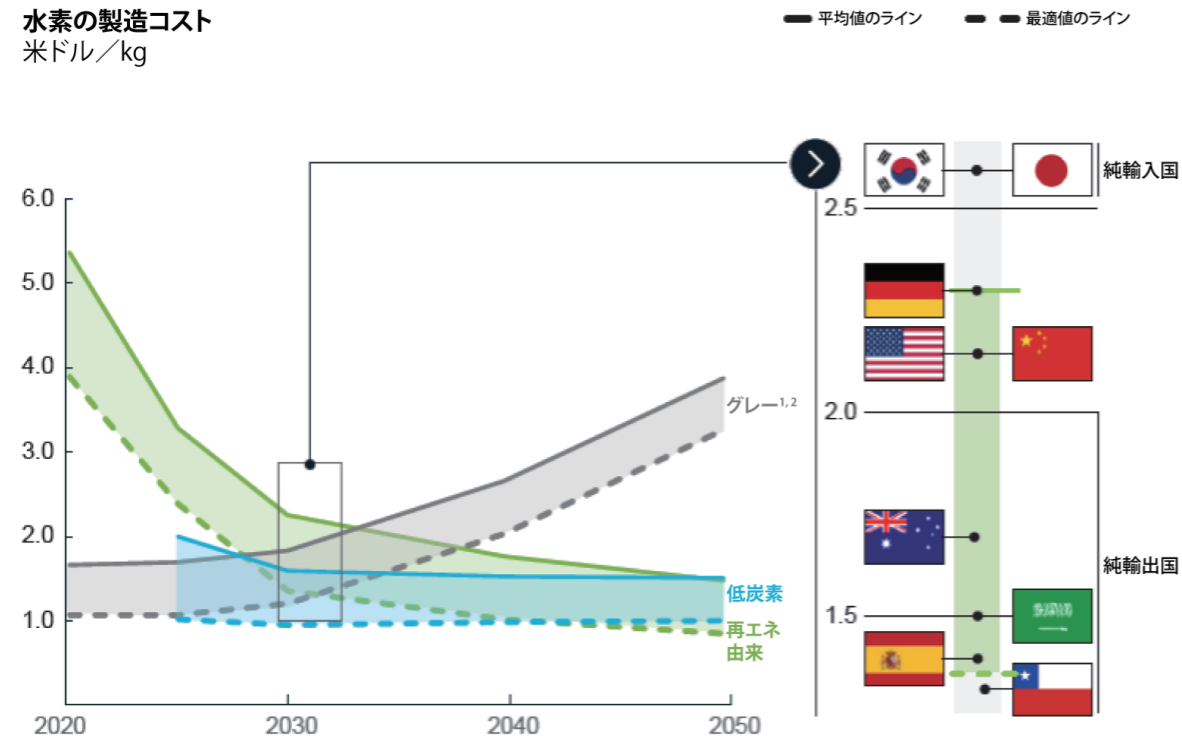
水素製造の経路—ブラック、グレー、ブルー、グリーン水素?

現在、商業的に製造されている水素のほぼすべて(約97%)は化石燃料から製造されたもので、特に多いのが天然ガス(世界の天然ガス需要の6%)と石炭(世界の石炭消費量の2%)です。¹⁸ これらのうち、天然ガスを使った水蒸気メタン改質法(SMR)が水素製造の主な経路となっており、世界の水素生産量の約70%を占めています。これらの技術が広く採用されている理由は、大規模生産における高い歩留まり(1日当たり500トン超)と低コスト(1~3米ドル/kg)にあります。^{18,21}

しかし、こうした化石燃料を用いた製法には、約830百万トンのCO₂ (2018年における世界の炭素排出量の約2%に相当)¹⁸を排出するという大きな環境負荷がある点を考慮することが重要です。

このため、こうした製法は「ブラックまたはブラウン」、「グレー」な水素製造法と呼ばれることがよくあります。石炭や天然ガス、その他の化石燃料を原料として使用することが、大気中に追加されるCO₂ 排出量につながるためです。これらの製造施設を「**ブルー水素**」プラントに変換すれば、水素関連の環境負荷を低減することにつながると期待されています。ブルー水素プラントでは、製造過程で排出された炭素をその後、回収・地下貯留 (CCS) するか、回収・利用 (CCU) するか、もしくは回収・地下貯留・利用 (CCUS) しています。しかし、炭素回収・貯留のためのインフラを追加で整備する必要性があるため、必然的に、これは製造コストの上昇につながるでしょう。IEAの分析によれば、化石燃料ベースの水素プラントとCCSを統合させるための投資を促すには、CO₂ 排出量1トン当たり50米ドル以上の割増が必要になります。¹⁸ また、CCSの導入には現実的な課題が伴うことが一般的です。特定の立地条件が求められ、環境面や安全面での懸念を引き起こしやすいからです。

図5: グリーン/ブルー/グレー水素の製造コスト予測。¹⁷



これに代わる選択肢である「グリーン水素」は、再生エネルギー由来電力を利用して、純水を電気化学的に水と酸素に分解する水電解によって製造されます。現在、この製法は世界の水素需要の約1%を供給しているに過ぎませんが、将来的には大きな可能性を秘めています。というのも、太陽光や風力エネルギーを利用して、燃料電池車向け水素ステーションのような小規模な各種分散型用途のほか、化石燃料に取って代わるアンモニアやその他の合成燃料を製造するためのグリーン水素を提供する大規模な用途向けの大型水素プラントを開発するために、この製法を利用することができるからです。再生可能エネルギーによる電解から生成された水素は、2070年までに、水素供給量の約60%を占めることになると予想されています。¹⁹ しかし、グリーン水素の製造コストが大幅に低下しなければ、これを実現することはできないでしょう。

現在のグリーン水素の製造コストは4~6米ドル/kgとなっており、化石燃料ベースの水素の製造コストより2~3倍高くなっています (図5)。¹⁷ しかし、特に、自国の再生可能エネルギーの可能性を生かして水素製造向けに有利な電力の価格設定を行うことができるオーストラリアでは、2030年までに、グリーン水素の製造コストが化石燃料ベースの水素と同等 (2 kg⁻¹米ドル以下) になると見られています。¹⁷

オーストラリアにおける新興の水素経済

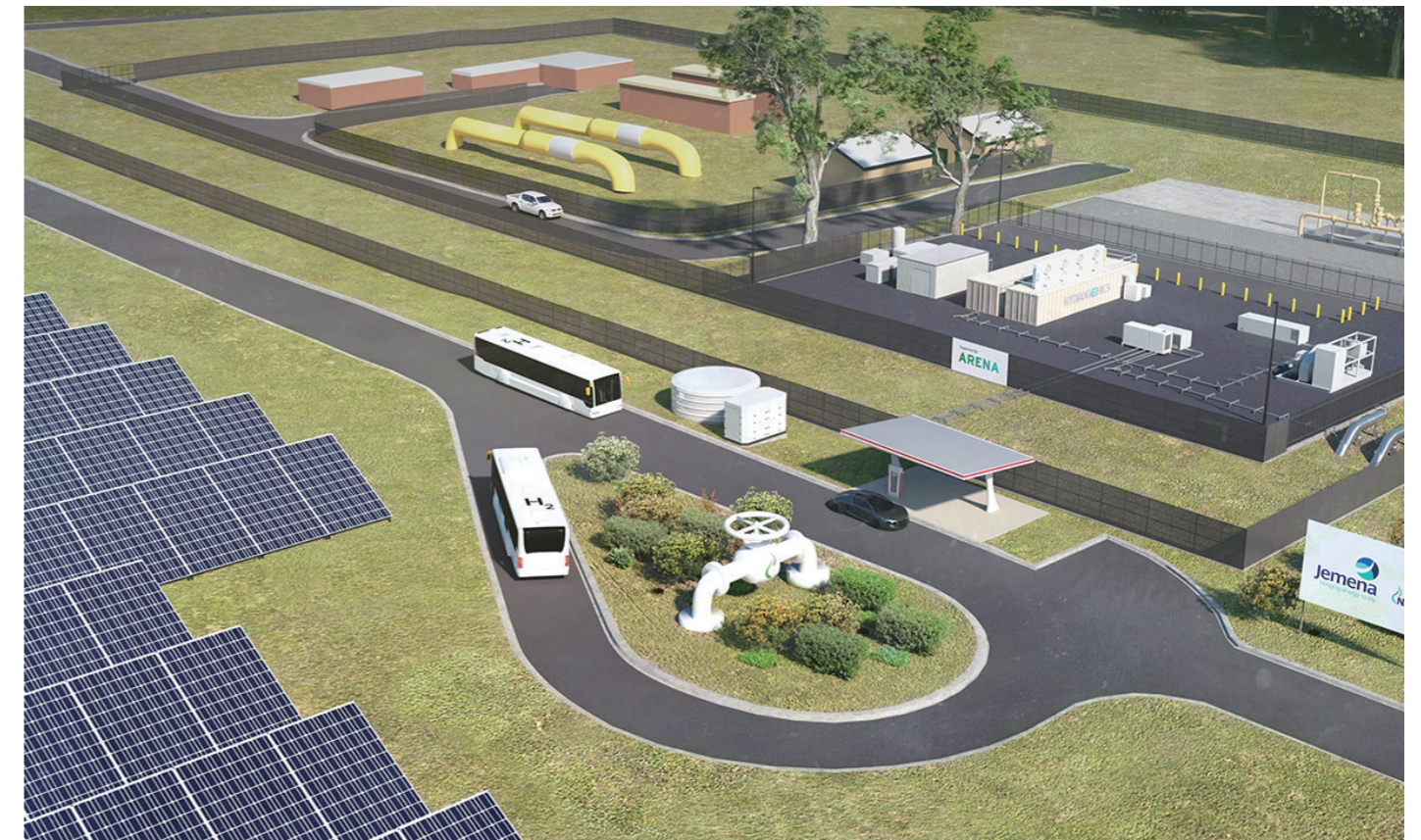
オーストラリア国内では、現在の水素需要の大半はアンモニア製造によって後押しされており、年間350,000トンの水素が消費されています。¹³ この水素需要の大半は天然ガスから生成されていますが、近い将来、再生エネルギー由来の水素が化石燃料由来の水素を補完するようになり、いずれはこれに取って代わることになるでしょう。オーストラリアはすでに「水素輸出大国」候補として支持されつつあります。というのも、オーストラリアには、自国のエネルギーおよび産業バリューチェーンを脱炭素化するための、また、アジア太平洋地域やそれ以外の地域に水素およびアンモニアを輸出する、より大きな輸出国になれるだけの大量の水素を製造する能力が本質的に備わっているからです。^{39,40}

オーストラリアにおけるこの新興の水素経済は、2050年までに国内で最大1万6,900人分の直接雇用と数万人分の間接雇用を生み出し、年間260億ドルの収益をもたらすと予想されています。¹³ 中でも、今後のアジア太平洋諸国向けの水素輸出産業が単独で2030年までにオーストラリア経済に寄与する金額は22億ドル (水素500,000トン/年) にも上り、2040年までには57億ドルまで増加する可能性があります。⁴¹ オーストラリアの水素生産能力はEU諸国にも認められており、特に、ドイツ政府はオーストラリア政府との間で水素貿易の可能性を探るための合意文書ならびにフィージビリティスタディ実施に署名しています。^{42,43}

NSW州における再生エネルギー由来水素の機会

NSW州はオーストラリアにおける水素市場開発の一端を担うことで利益を享受することができます。NSW州は水電解による再生エネルギー由来のグリーン水素をエネルギーキャリアとして活用する可能性も模索しています (図6)。NSW州は、再生可能エネルギーの可能性を生かして、グリーンスチール、アルミニウム (合算した予想収益額: 7,000万ドル) やグリーンアンモニア (同1億2,000万ドル) を製造するための (エネルギー源、原料のいずれかとしての) 水素を製造することによって、本質的に「クリーンエネルギーの一大拠点」になり得ると見込まれています。⁴⁴ こうした製造施設を複数擁しているNSW州は、オーストラリア全土における脱炭素化の取り組みを推し進めていく州として期待されています。

図6: ジェメナ社が開発中の西シドニー・グリーンガス・プロジェクト。当プロジェクトは太陽光/風力発電を用いた水電解から水素を製造し、ガス供給網に注入する (容量にして約2%、250世帯分のエネルギー) 予定です。実施サイトには、送電網および将来の水素補給施設向けに発電を行うタービンも設置される予定です。画像はジェメナ社提供。



グリーン水素のコストを低下させる主な要素

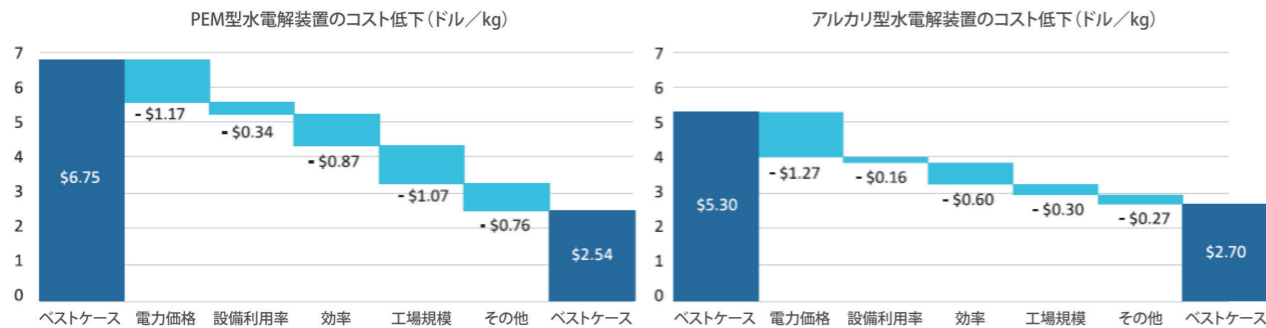
国家水素ロードマップによると、現在の水素の製造コストは、ブルー水素が2~3ドル/kgであるのに対し、水電解による水素は5~6ドル/kgとなっています。グリーン水素にとっての現在における主な障壁には、以下のようなものがあります。

- 1. 再エネ由来電力の価格:** 現在商用化されているアルカリ型 (AE) 水電解装置と固体高分子 (PEM) 型水電解装置はいずれも、水素を製造するためには約50~60kWh/kgの電力を必要とします。したがって、その他の条件が等しければ、電力価格が0.01ドル/kWh低下すると、1kg当たりの水素コストが約6~8%下がることになります。²¹ CSIROが最近行った分析によれば、現在、建設費が最も安いのは太陽光および風力発電所で、特に、新たな太陽光発電所の建設費は2030年までに最大約35%下がるだろうと予想されています。⁴⁵ このため、新設の太陽光および風力発電所の稼働に伴い、オンサイトの水素製造コストが大幅に低下する可能性もあります。[‡]
- 2. 設備利用率:** 発電コストに加え、安価な電力を利用できる点も水素の製造コストに影響を及ぼします。太陽光および風力発電所は安価な電力を供給しているものの、出力が不安定で、太陽が照っている間や風が吹いている時にしか発電できません。オーストラリア・エネルギー市場オペレーター (AEMO) によれば、国内発電所の設備利用率は、太陽光発電所が約30%、風力発電所が約40%となっています。⁴⁶ しかし、新設の太陽光および風力発電所の稼働に伴い、再生可能エネルギーの利用可能性がさらに高まる可能性があり、エネルギー供給会社との特別な電力購入契約や蓄電技術の活用によって、大量の再生可能エネルギーが利用できるようになります。NSW州において、再生可能エネルギー発電量 (太陽光および風力) はすでに2018年以降、40%増加しています。⁴⁷ 州は再生可能エネルギーの発電能力を12 GW増やす計画も策定済みで、州内においてP2Xを導入するさらなる機会を提供しています。⁴⁸

- 3. 水素の製造規模の拡大:** 低コストの水素に対する関心や需要の高まりを受け、水電解装置のコスト削減や効率性改善に関する大規模な研究開発が推し進められています。特に、大規模な水素プロジェクトに対する需要が高まりつつある中、製造業者によるサプライチェーン強化や最適な製造技術への投資が促されています。先述したように、水電解装置メーカーであるネルは製造施設の規模拡大によって、水電解装置の資本コストが75%低下すると見込んでいます。¹⁶ 専門家による詳細な調査もこうした資本コストの低下を予測しており、これによって、再エネ由来水素の実現可能性が高まることになります。^{15,49,50}
- 4. 水の利用可能性:** 現在の技術では、水電解を用いて水素を1 kg製造するのに約9~10 Lの水が必要となります。⁵¹ これはオーストラリアで水素を製造する上で主な懸念となるでしょう。このため、淡水化や廃水の再生など、従来とは異なる手段を用いた水の調達が求められることになります。こうした水資源は、特に、淡水化 (約5ドル/kL⁵²) のコストが高くつくと見られているものの、水原料コストが水素の最終的な製造コストに占める割合はわずか2%程度にすぎません。²¹ NSW州は州全域から供給される低品質の廃水や塩水から恩恵を受けており、州地方部にある塩水帯水層がP2Xの機会をもたらしていると同時に、農業との淡水の奪い合いに関する懸念を軽減しています。

これらすべてを勘案すると、こうした発展は水素の製造コストが大幅に低下する方向を指しています (図7)。

図7: オーストラリアで水電解による水素製造コストが低下する可能性。金額はすべて豪ドル。²¹



[‡] 遠隔地での再エネ由来電力供給を用いて水素の製造コストを見積もるには、将来の送電料金のモデル化が必要となります。

3.3 パワー・ツー・アンモニア

アンモニアは尿素や硝酸アンモニウムなどの代表的な化学品を製造するのに使用される基本構成要素で、世界の生産量の90%は肥料を製造するために使用されています。アンモニアのその他の小規模な用途としては、洗浄剤の製造やエアコンの冷媒ガスとしての用途などが挙げられます。

世界のアンモニア需要—増加傾向

世界のアンモニア市場 (500億米ドル規模) は約5~7%を超える安定した年平均成長率を維持しています。アジア太平洋地域からの需要が中心で、南アジアおよび中国において拡大している農業市場に後押しされている形です。他にも、ロシア、ブラジル、サハラ以南アフリカからの需要もあります。⁵³ 主な製造国はロシア、中国、米国、インドとなっています。

オーストラリアのアンモニア市場

オーストラリアでは、約2百万トン/年 (Mtpa) のアンモニアが製造されており、全国で7つの製造施設 (ほとんどがクイーンズランド州や西オーストラリア州にあります) が稼働中です。

NSW州では、クーラガン島にオリカ社のアンモニア製造施設があり、年間360 ktのアンモニアが製造されています。本施設には、3つの主な処理プラントがあり、アンモニア、硝酸、硝酸アンモニウムの製造プラントが図8の写真で見取れます。⁵⁴ 最近では、パーダマン・インダストリーズ社によって、硝酸アンモニウムの製造プラントを新たにナラブライに建設する案が提案されています。このプラントは計画されたナラブライ・ガスプロジェクト (年間14.5 PJ) からの天然ガスを使用して、年間300,000トンの肥料を製造する予定です。⁵⁵

図8: オリカ社のクーラガン島工場。写真はオリカ社提供。



肥料を超えるアンモニアの利用機会

アンモニア (NH₃) は特に広域輸送向け水素の有益なエネルギー媒体となる可能性を秘めています。これは、アンモニアが圧縮しやすく、また、圧縮または液化させた水素に比べ、液化燃料として輸送しやすいためです。アンモニアは、室温では圧力10バール、または大気圧下マイナス33°Cで液化させることができます。液化アンモニアのエネルギー密度 (15.6 MJ L⁻¹) は液化水素 (5.6 MJ L⁻¹) の3倍に上るため、1L当たりにしてより多くの水素を貯蔵することになります。加えて、アンモニアは100年以上にもわたり世界中で頻繁に輸送されていることから、既存のアンモニア供給網を活用することにより、水素を大量に移送するための競争力のある手段になると見られています。

利用については、アンモニアはその後、直接消費できる物質です。直接消費の例としては、肥料、化学品製造における原料、発電や輸送向け燃料などが考えられます。最近においては、三菱重工が世界で初めてアンモニアを燃料として100%直接消費するガスタービンの開発に着手していることを発表し、この40 MW級のガスタービンは2025年までに実用化されると見られています。⁵⁶ また、欧州や日本では、石炭とアンモニアの混焼発電に向けた実証実験も進められています。⁵⁷

アンモニアは、副生物として窒素と水が発生するアンモニア燃料電池を用いた発電にも利用することができます。⁵⁸ MAN エネルギーソリューションズ社は船舶に据えつけるためのアンモニア燃料電池/エンジンを開発中で、2025年の実用化を目指しています。⁵⁹

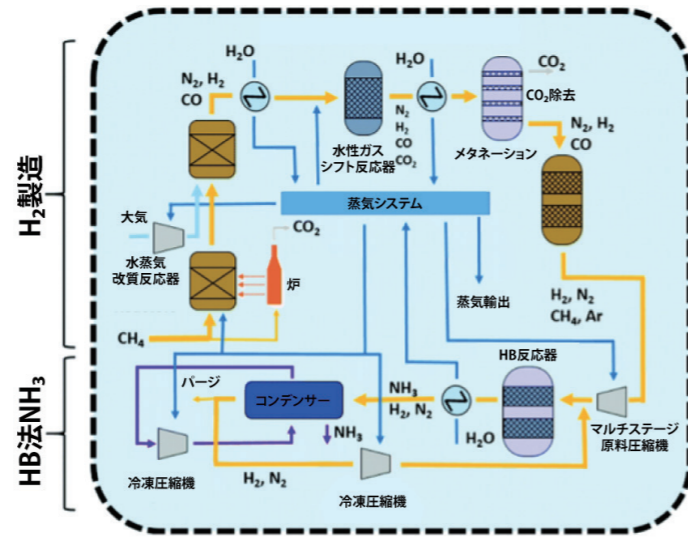
しかし、アンモニアを輸送用エンジン、発電システム、タービン向けの燃料として直接利用すると、窒素酸化物 (NO_x) が排出され、この点に対処しなければならない環境面での懸念となっています。現在の技術では、NO_x を不活性な形に変換させたり、特殊な吸収剤や吸着剤に排出物を回収することができます (付録B)。また、これらの排出されたNO_x は、電気化学的な硝酸塩/亜硝酸塩還元によって再生エネルギー由来のアンモニアに変換させることもでき、P2X 技術を展開する別の機会を提供しています (後述)。

アンモニアを再び水素と窒素に分解することもでき、その後、それらを利用することができます。現在、アンモニアを水素に分解する方法が開発されており、例えば、熱分解 (300~700°C、圧力1~10バール) や電気化学的分解 (250°C) などが挙げられます。^{58,60} アンモニアの高温分解 (700°C超) はすでにTRLが7~9レベルに達していますが、450°C未満の低温分解を開発する取り組みも行われており、現段階でのTRLは2~4レベルとなっています。⁶¹ 一方、電気化学的分解も現在、かなり初期の開発段階にあります (TRLは2~4レベル)。

現在のアンモニア製造プロセス

世界におけるほぼすべての商業的なアンモニア製造はハーバー・ボッシュ (HB) 法を用いて行われています。これは20世紀初頭に開発され、今なお使用されている方法です。このプロセス (図9) では、空気分離装置から抽出した窒素を用いて、天然ガスの水蒸気改質により得られた水素を合成します。アンモニアへの変換は、500°Cの温度、150~200バールの圧力で鉄系触媒を用いて行われます。⁶²

図9:ハーバー・ボッシュ製法の図解。⁶³



ハーバー・ボッシュ法における主な問題

HB法は環境負荷とエネルギー需要が高いため、将来の脱炭素化された経済におけるHB法の持続可能性が疑われています。

HB法による反応を引き起こすために必要な水素は、現在、天然ガスや石炭の水蒸気改質によって得られるものだけで、上述したように大きな環境負荷を伴います。実際、アンモニア生産量1トン当たり約2~3トンのCO₂が排出され、世界の温室効果ガス排出量の約1%に相当する環境負荷を生み出しています。^{64,65} これを地域的に見た場合、オリカ社のクーラガン島工場 (年間350千トン) だけで年間約0.7~1百万トンのCO₂を排出しています。

また、HB法によるアンモニア製造は大量にエネルギーを消費するもので、世界のエネルギー需要の1%を占めています。例えば、アンモニアを1トン生産するためには最大30~50 GJの天然ガスが必要となります。⁶⁶ 世界におけるアンモニア生産量の72%は天然ガスを用いて行われているため、この製法は持続可能なガスの供給に対する大きな圧力となります。⁶⁷

グリーンアンモニアへの移行

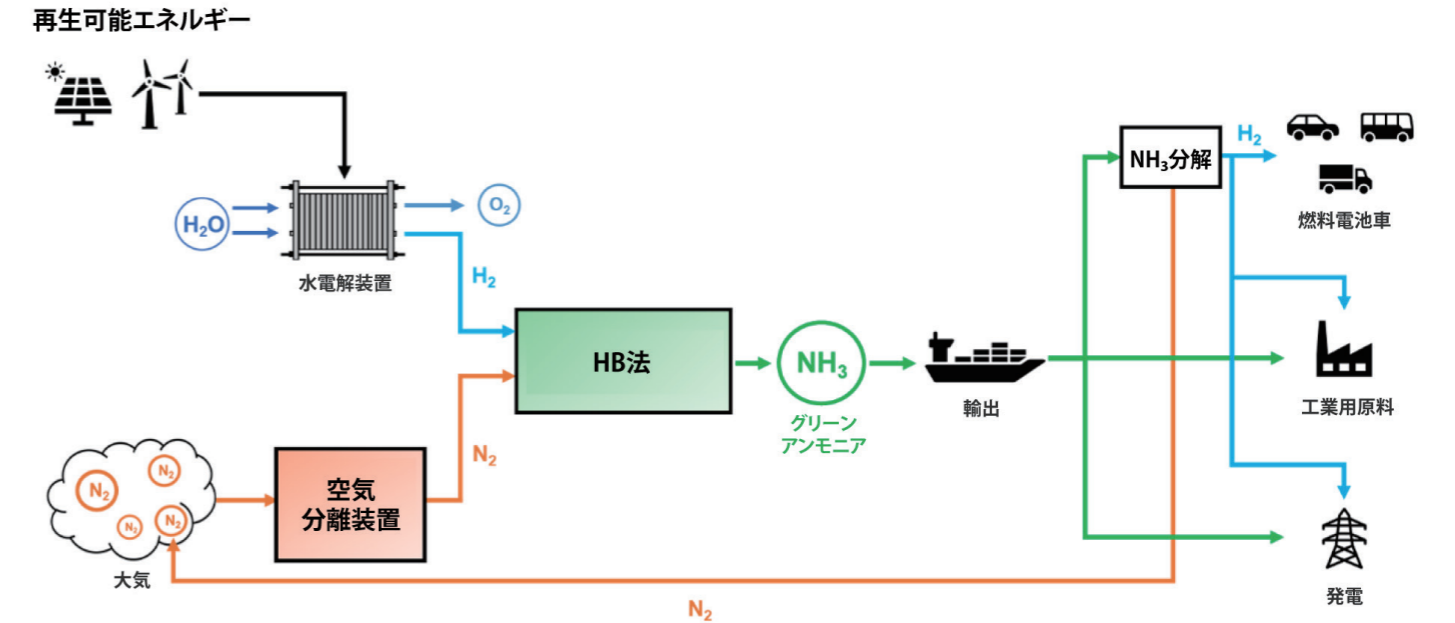
グリーン水素の製造は近い将来、グリーンアンモニアの大規模な製造を行う上での重要な鍵となります。グリーン水素は再生エネルギー由来電力を使った純水の電解を利用して製造されます。(図10) 現在のアンモニア製造プロセスにグリーン水素を投入することにより、多用途のグリーンコモディティを生産する機会が開かれます。排出されたNO_xをアンモニアに変換する技術、プラズマハイブリッド電解法、窒素の直接還元反応などの代替P2X技術も、グリーンアンモニアの製造に向けて規模が拡大されつつあります。⁶⁸⁻⁷¹ 世界におけるグリーン水素の需要は約55%の年平均成長率で、2030年までに約8億5,000万米ドルに達するものと見込まれています。⁷²

オーストラリアにおけるグリーンアンモニア

オーストラリアは自国の再生可能エネルギーを生かすことにより、国内の肥料市場および輸出向けのグリーンアンモニアを製造することができます。国家水素ロードマップは、オーストラリア国内で輸出向けに製造された水素の貯蔵・輸送を可能にする上での重要な媒体としてアンモニアを位置付けています。²¹ こうした機会を追求するための、以下に挙げられるような複数の取り組みが進められています。

- ヤラ・オーストラリア社はすでに、西オーストラリア州ピルバラにある自社のアンモニア製造プラントをグリーンアンモニア製造施設に変える可能性を模索しています (2028年までに年間800千トン)。

図10: NSW州を出発点とするエネルギー媒体としてのグリーンアンモニアの潜在的なサプライチェーン。



- クイーンズランド・ナイトレイツ社も同様に、水電解による水素を調達するために自社のアンモニア製造プラントを転換させる機会を模索しています (年間20千トン超)。
- アジア再生可能エネルギーハブ (西オーストラリア州)、マーチソン再生エネルギー水素プロジェクト (西オーストラリア州)、エア半島プロジェクト (南オーストラリア州) といったその他の大型グリーン水素プロジェクトはすべて、輸出向けのグリーンアンモニアを製造するものと見られています。

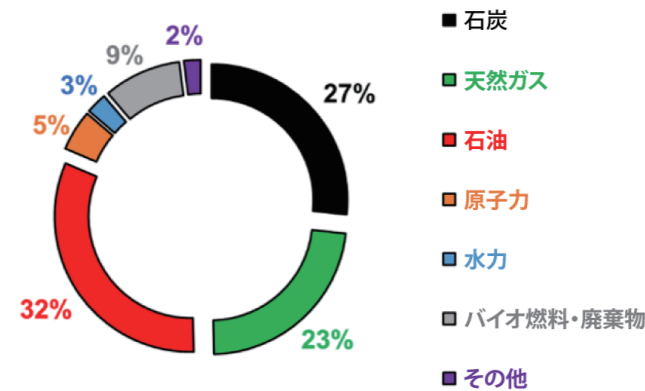
NSW州もこうしたグリーンアンモニア市場に向けた動きの一端を担うことができ、世界需要の1%を供給することにより、1億200万ドルの収益を上げることができます。⁴⁴ 当面の機会として、オリカ社のニューカッスル工場の改造、および、イラワラ・ショールヘイブン地域もしくはニューカッスル/ハンター地域における再生エネルギー由来水素主導型のモジュール式ハーバー・ボッシュ製造プラントの建設によって、NSW州はグリーンアンモニア市場の機会をうまく活用することができます。当面の脱炭素化のステップに向けて、NSW州は石炭火力発電所で混焼させる再生エネルギー由来アンモニアを利用することもできます。

3.4. パワー・ツー・メタン

天然ガスの形でメタンは主要なエネルギー源(天然ガスの約95%はメタン)となっており、現在、世界のエネルギー需要の23%は天然ガスでまかなわれています。(図11)

図11: 資源別に見た世界のエネルギー供給の内訳。データはIEAによる2018年の世界のエネルギー供給に関する分析から採用しました。⁷³

世界のエネルギー需要: 14,282 Mtoe



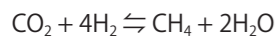
拡大するメタン需要

IEAの推計によれば、2019年における世界の天然ガス需要は約4兆m³に達し、2009年以降、2.7%の年平均成長率を記録しています。⁷⁴ このように、2022年までに天然ガス市場は年間1兆310億米ドル規模に達すると予測されています(年平均成長率7.7%)。⁷⁵ さらに、主要なエネルギー輸出品である液化天然ガス(LNG)だけでも、2027年までに市場規模が180億米ドル、量にして530百万トンに達する可能性があります(年平均成長率約6%)。⁷⁶ 短期的に見ると、新型コロナウイルスのパンデミックが原因で天然ガス需要は減少すると見られているものの、力強い回復を果たさざらうとIEAは予想しています。というのも、天然ガスはクリーンな化石燃料として石炭に取って代わることが期待されており、ますます多くのアジア諸国が国内の埋蔵量の減少により、輸入LNGに依存すると見られているためです。^{77,78}

合成メタンの製造

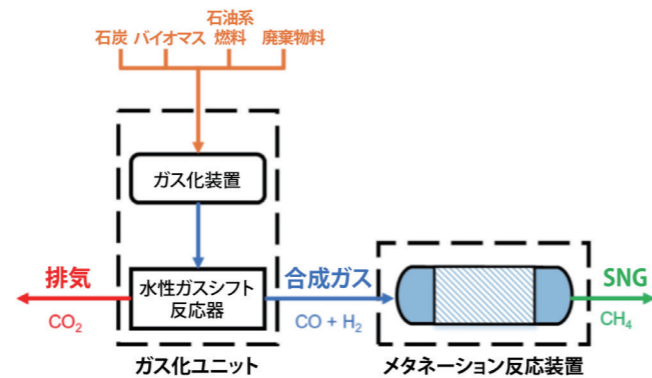
現在、ほぼすべてのメタンは天然ガスを処理することから得られています。しかし、メタンを生成するための合成の道筋は、早くも1902年には、フランスの化学者であるサバティエとサンドランが「メタネーション触媒」を編み出した頃に考案されていました。⁷⁹

サバティエのメタネーションプロセスは、二酸化炭素と水素の触媒変換(温度150~550°C、圧力1~3バール)によってメタンを生成するもので、以下の式で表されます。⁷⁹



これは8~9レベルの高いTRLを誇るプロセスです。⁸⁰ 現在、リンデ、ハルダートブソー、クラリアント、フォスターウィラー、エトガス、MANエネルギーなどの企業が既製の商業用途向けメタネーション反応装置を提供しています。⁷⁹ こうした商業用途では、石炭、石油系燃料、廃棄物、またはバイオマスから発生したCO₂をメタネーション反応装置でメタン、つまり合成天然ガス(SNG)に触媒変換します。(図12)

図12: 従来型メタネーションプロセスの概観的な図式。



再生可能エネルギーを用いたメタネーション:P2Mの役割

現在のメタネーション技術が抱える主な課題として、水素源、高温・高圧の要件のほかに、CO₂原料源が挙げられます。現在、ほぼすべての商用水素は化石燃料から製造されており、これは世界のCO₂排出量の約2%に相当する大きな環境負荷となっています(セクション3.1)。

パワー・ツー・メタン(P2M)は再生可能エネルギーによる電解から得たグリーン水素を利用することができるため、現在の製法に代わる選択肢を提供しています。さらに、今では、工業プロセスから排出されるCO₂を回収することができる技術(TRL:7~9、付録Bを参照)や、大気からCO₂を分離させる技術(直接空気回収など)も整っています。これらの技術を使えば、商用のメタネーションプロセスにより、グリーン水素を組み合わせることで、排出されたCO₂をメタンに変換することができます。生成されたメタンはその後、合成天然ガス(SNG)としてガス供給網に注入したり、燃料や工業用原料として川下で利用することができます。さらに、メタンを燃焼させることでその後排出されたCO₂を回収し、P2M工程で再利用することができ、実質的には炭素循環のループを閉じることになります(図14)。

P2Mはこのように、環境問題のソリューションのみならず、ガスサプライチェーンにおける再生可能エネルギーの浸透度を高めるための手段も提供しています。

P2Mの活用

世界では、EUを中心に、すでに稼働中もしくは開発されているP2M施設が数か所あります。⁸¹ P2Mプロジェクト第1号はドイツのアウトディ社によるもので、2015年に稼働開始して以来、1,000トンの再エネ由来メタンを製造しており、製造されたメタンは同社の天然ガスを燃料とする自動車で使用されています。⁸¹ 最近では、中国の陝西省にある工業地区において年間350万m³規模の合成メタン製造施設が開発されています。⁸² この施設はサバティエ反応による方法を利用して、地元の発電所から回収されたCO₂と工業区で製造された余剰水素(電解ベースの水素を含む)を変換していく予定です。稼働開始となれば、当施設は世界最大のメタネーション施設となる見込みです。

サザングリーンガス社と、天然ガス供給事業者の国内最大手の1社であるAPAグループは、大気中のCO₂と再エネ由来電力を使ってメタン製造を行う予定の実証施設(サザングリーンガスプロジェクト)をクィーンズランド州に建設中です(図13)。⁸³ 同様に、ATCOオーストラリア社も再エネ由来メタンの製造施設を西オーストラリア州に建設するという実現可能性を検証中で、今年中に検証結果が出ると思われます。⁸⁴

図13: クィーンズランド州におけるAPAの再生可能エネルギーを用いたメタネーションプロジェクト。写真はAPA提供。⁸³

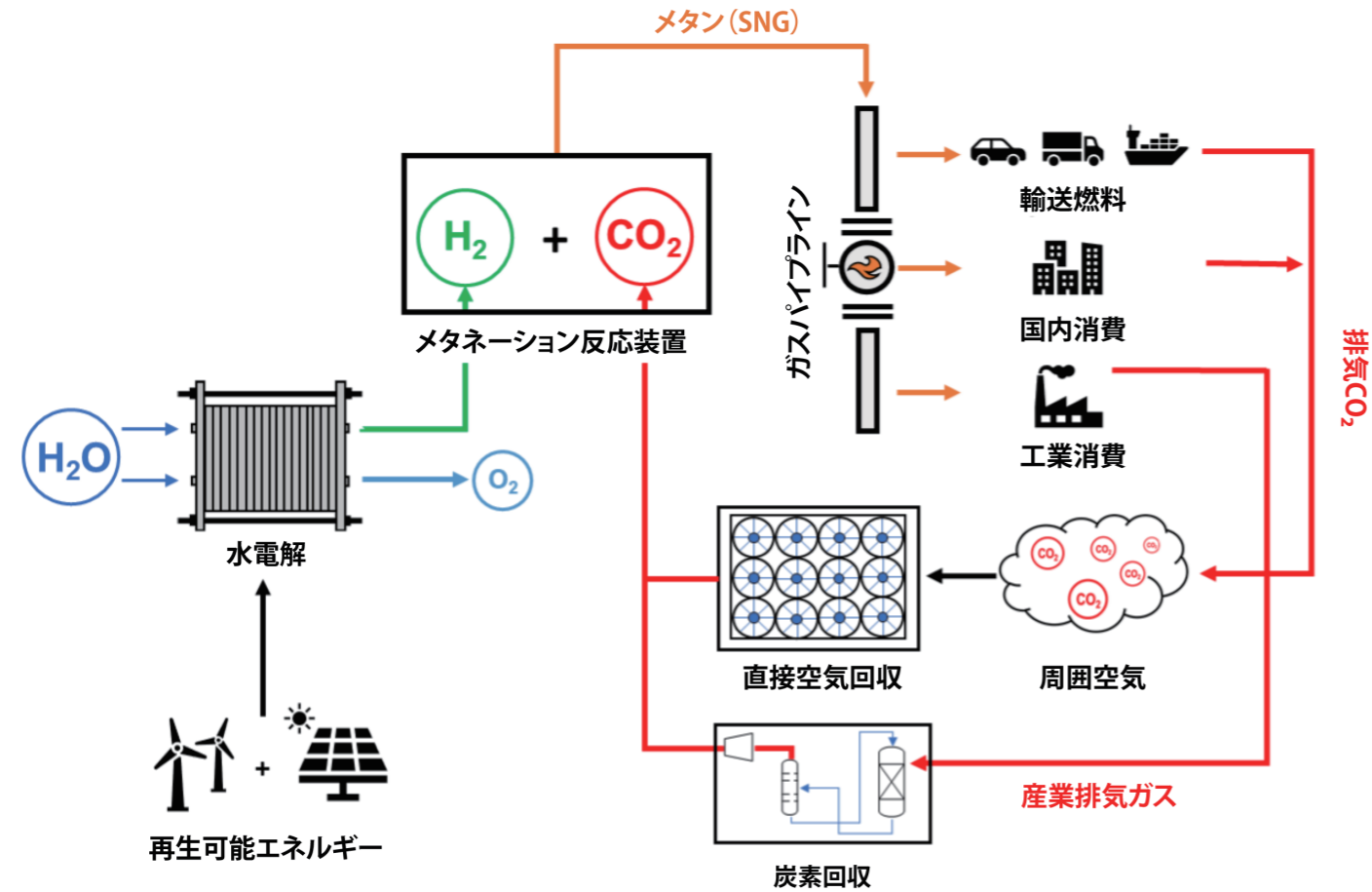


さらに、シドニーでは、オーストラリア初のバイオメタンプロジェクトが進められています。このマラバーバイオメタンプロジェクトは、NSW州マラバーにあるシドニー水道公社の水処理施設で発生する有機物を嫌気性消化処理することでバイオメタンを生成するものです。本プロジェクトによって95 TJ⁻¹のバイオメタンがNSW州ガス供給網に追加されることになり、将来的には年間200 TJに増加すると見込まれています。⁸⁵ 800万ドルを投じて建設された当施設は2022年までに操業を開始する予定です。ニューカッスルを拠点とするCSIROエネルギー部門も再エネ由来メタン(148m³/時)製造の実現可能性を検証中です。これは、再エネ由来水素(2.7MWの水電解装置)と、アミン溶液ベースの独自プロセスを利用して大気中から回収したCO₂(0.29tCO₂/時を回収)を用いるものです。⁸⁶ 製造規模が拡大すれば、合成メタンを5.3ドル/GJのコストで製造できるようになり、CO₂回収量は1百万トン/年(メタン0.4百万トン/年)になることが示されています。⁸⁶

NSW州における合成天然ガスの機会

既存のガス層からの生産量が激減していること、また、未利用資源からの今後の供給量が不透明であることから、NSW州はガス不足に直面するものと予想されています。⁸⁷ AEMOの予測によれば、NSW州は2024年までに14 PJの天然ガス不足に直面し、不足量は2030年までに70~128 PJまで増加する可能性もあります。⁸⁸ 州の現在の天然ガス需要が年間約131 PJ(2018~2019年)であることを考えると、これはかなりの不足量だと言えます。⁸⁹ LNGを輸入することによって供給量が増えるという楽観的なシナリオの下であつてもなお、70 PJは不足するとされています。このため、NSW州の拡大する再生可能エネルギーの可能性を生かして合成天然ガスや、天然ガスに混入させるためのグリーン水素(70 PJ = 水素5 Mt(LHV:120 MJ kg⁻¹))を製造することによって天然ガスを補うために合成メタンを生成することは、大きな市場機会になるものです。

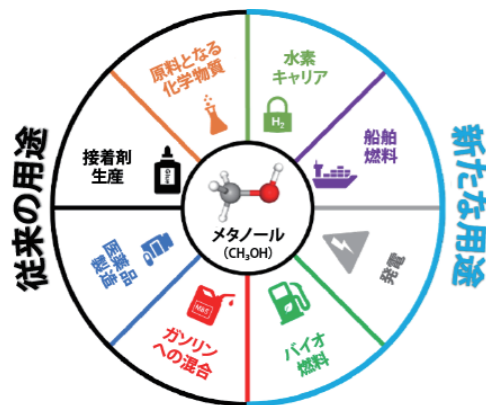
図14: 再生可能エネルギーによる電解および炭素回収を利用したクローズドループ型パワー・ツー・メタン (P2M) 工程。



3.5. パワー・ツー・メタノール

メタノール (CH₃OH) は汎用性の高い化学品で、すぐに産業に利用することができます (図15)。メタノールの主な特徴のひとつはメチル基 (CH₃-) を導入できる点です。これにより、ホルムアルデヒド (原料となる化学物質)、酢酸 (製薬用途)、エーテル (接着剤に使用) のような化学構造を生成する前駆体としてメタノールを利用することができます。また、メタノールはエンジン性能を向上させるためにガソリンと混合される物質でもあり、世界の大半の国々は異なるメタノール混合燃料の使用を認める規制を整備しています。⁹⁰

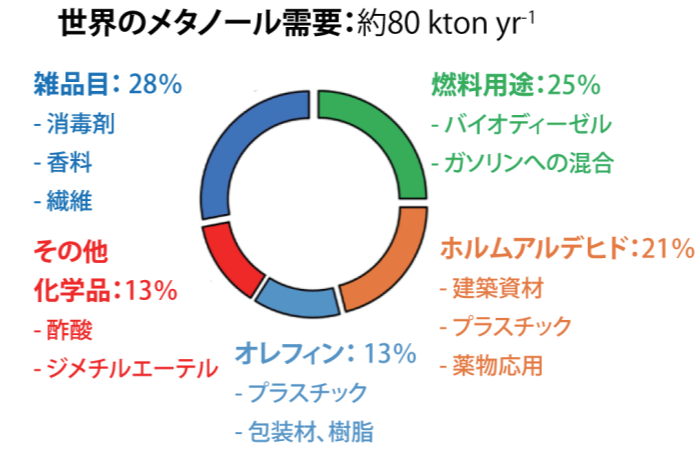
図15: メタノールの従来の用途および新たな用途。



拡大するメタノール需要

メタノールは世界で最も取引されている化学品の上位5つに入ります。世界のメタノール市場は2027年までに規模が2倍になると見られており、2016年以降、年平均成長率5%を維持する形で成長を続けています。⁹¹ 年間78,900千トンにおよぶ世界の需要 (図16) の大部分はホルムアルデヒド (21%) とオレフィン (13%) 製造向けとなっている一方、最大の割合を占めているのは燃料としての利用 (約25%) です。⁹² 全体的に見ると、アジア太平洋地域がメタノール市場の主な原動力になると予想されています。⁹³ メタノールは (以下で詳しく述べるように) 水素の再生可能エネルギーキャリアとして利用されることが見込まれており、重要な役割を担う可能性があります。そのため、世界各国が水素ベースの経済へ転換を図るのに伴い、こうした需要が大幅に拡大していくと考えられます。

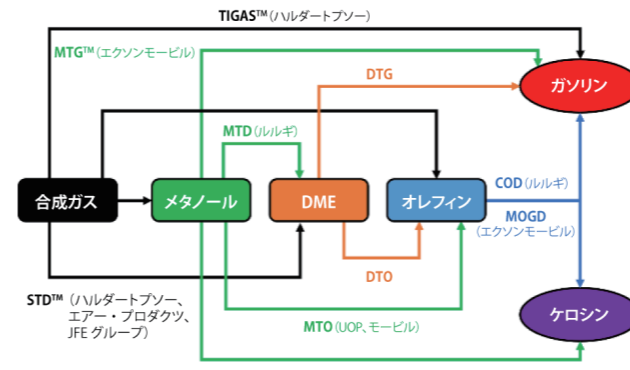
図16: 世界のメタノール需要の最終用途セクター別内訳。⁹²



メタノール製造

従来のメタノール製造法では、最初に合成ガスを製造し、その後、これをCO₂/CO水素化と呼ばれる熱触媒変換を用いてメタノールに変換します。この変換プロセスは通常、CuO/ZnO/Al₂O₃金属系触媒 (温度200~250°C、圧力5~10 MPa) 存在下で行われます。⁹⁴ すでにさまざまな企業がこのプロセス (TRL:6~7) を実用化しています (図17)。⁸⁰ メタノールはフィッシャー・トロプシュ法を用いて合成される場合もあり、これについてはセクション3.5で詳述します。

図17: メタノールおよびメタノール由来燃料 (DME、オレフィン、パラフィン) 製造の商業化されている経路。⁹⁵



再生可能エネルギー由来メタノール

メタノール製造のP2X経路については、再生可能エネルギーを用いた電解による水素と産業排気ガスから回収したCO₂を使って、商用の触媒反応器でその後メタノールに変換する実証実験がすでに活発に行われています。

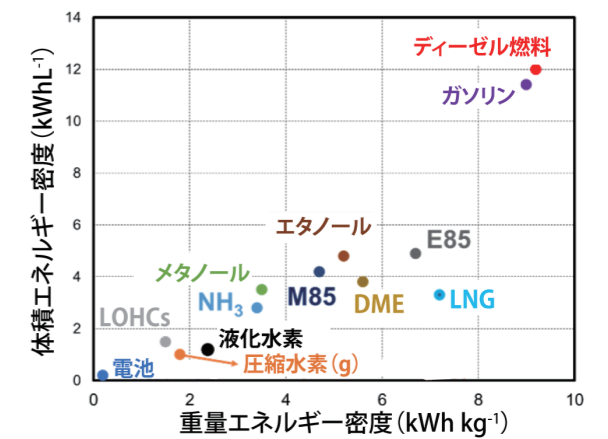
さらに、近年における電極触媒の進歩によって、水素とCO₂を共電解する道が開かれつつあります。この共電解は (メタノールに変換するための) 合成ガスの直接合成だけでなく、再エネ由来電力を使ったメタノールの直接合成をも可能にすることになります。(図21)⁹⁶ これらの技術はまだ開発の初期段階 (TRL:2) にありますが、国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) は、これらの技術が完全に持続可能なメタノールのバリューチェーンを構築する上で重要な役割を果たすと期待を寄せています。⁹⁷

再生可能エネルギー由来メタノールの用途

メタノールは「水素経済」における水素キャリアとして重要な役割を果たすと予想されています。メタノールはエネルギー密度が比較的高いことから、アンモニアなどの他の水素キャリアに比べて大きな利点があり (図18)、これによって、単位質量でも単位体積でもより多くのエネルギーを貯蔵することができるのです。メタノールはその後、単純な一段変換を通して、エネルギー密度がさらに高い (エネルギー優位性のある) エタノールやジメチルエーテル (DME) に変換することもできます。

再生可能エネルギー由来メタノールは (燃料としても工業用原料としても) 用途が広く、需要が伸びている上、持続可能な生産の可能性も秘めていることから、「将来も長続きする燃料」として支持されています。⁹⁸ このことから、特に、重工業用途や航空産業、電池の利用に限られていると見られる船舶用などのセクターにおける発電源および輸送燃料としてメタノールを利用できる可能性が見て取れます。⁹⁷

図18: 従来のエネルギーキャリアと新たなエネルギーキャリアのエネルギー密度の比較。本図において、M85はメタノール85%、ガソリン15%の混合燃料、E85はエタノール85%、ガソリン15%の混合燃料、DMEはジメチルエーテル、LOHCsは液体有機水素キャリア (本図ではトルエン) を意味します。



再エネ由来メタノールプロジェクトの状況

世界初となる再エネ由来メタノール製造プラントはアイスランドのカーボン・リサイクル・インターナショナル (CRI) グループによって開発されました (図19)。2011年に操業を開始したこの施設は、必要な水電解による水素を製造するための電力も供給している近隣の地熱発電所から排出されたCO₂を用いてメタノールを製造 (年間4,000トン) しています。⁹⁷ CRIはまた、自社の技術をターンキーソリューションとして、商業用途向けに年間50,000~100,000トンの生産能力を持つプラントに提供しています。⁹⁹

図19:アイスランドにあるCRIのプラントが世界初となるパワー・ツー・メタノールのプロジェクトです。



IRENAの分析によれば、生産能力を合算すると年間700,000トンに及ぶ複数の再エネ由来メタノール製造プラント (P2X) の開発がすでに確定しています。⁹⁷ これには、スウェーデンにおける大型プロジェクト (年間45,000トン)、ABEL エナジー社のオーストラリアにおけるベルベイ・プロジェクト (年間60,000トン)、CRI社のノルウェーにおけるプロジェクト (年間100,000トン) が含まれており、2024年までに稼働開始となる予定です。

オーストラリアにおけるメタノールの可能性

オーストラリア唯一のメタノール製造プラントは1994年にクージー・ケミカルズ社がビクトリア州に建設したもので、国内のメタノール需要に年間70,000トンのメタノールを供給していました (図20)。¹⁰⁰ 2016年以降、天然ガスを低価格 (10ドル/GJ以下) で調達できなくなったことから、当プラントは操業を停止しており、今後、閉鎖される見込みです。¹⁰¹

図20:ビクトリア州にある国内唯一の既存のメタノール製造プラント。ガス価格の高騰により、2016年に操業停止となりました。¹⁰²



クージー・ケミカルズ社は2019年、ノーザンテリトリーに別の新たなメタノール製造プラントを建設するためのフィージビリティ分析を実施する計画を発表しました。発表の中で、同社はノーザンテリトリーで望ましいガス供給コストを確保できると述べています。¹⁰³ しかし、5億ドルが投じられる当プラント (2024年までに稼働開始となる見込み) の建設はまだ決定されていません。

ABEL エナジー社の動力燃料プロジェクト

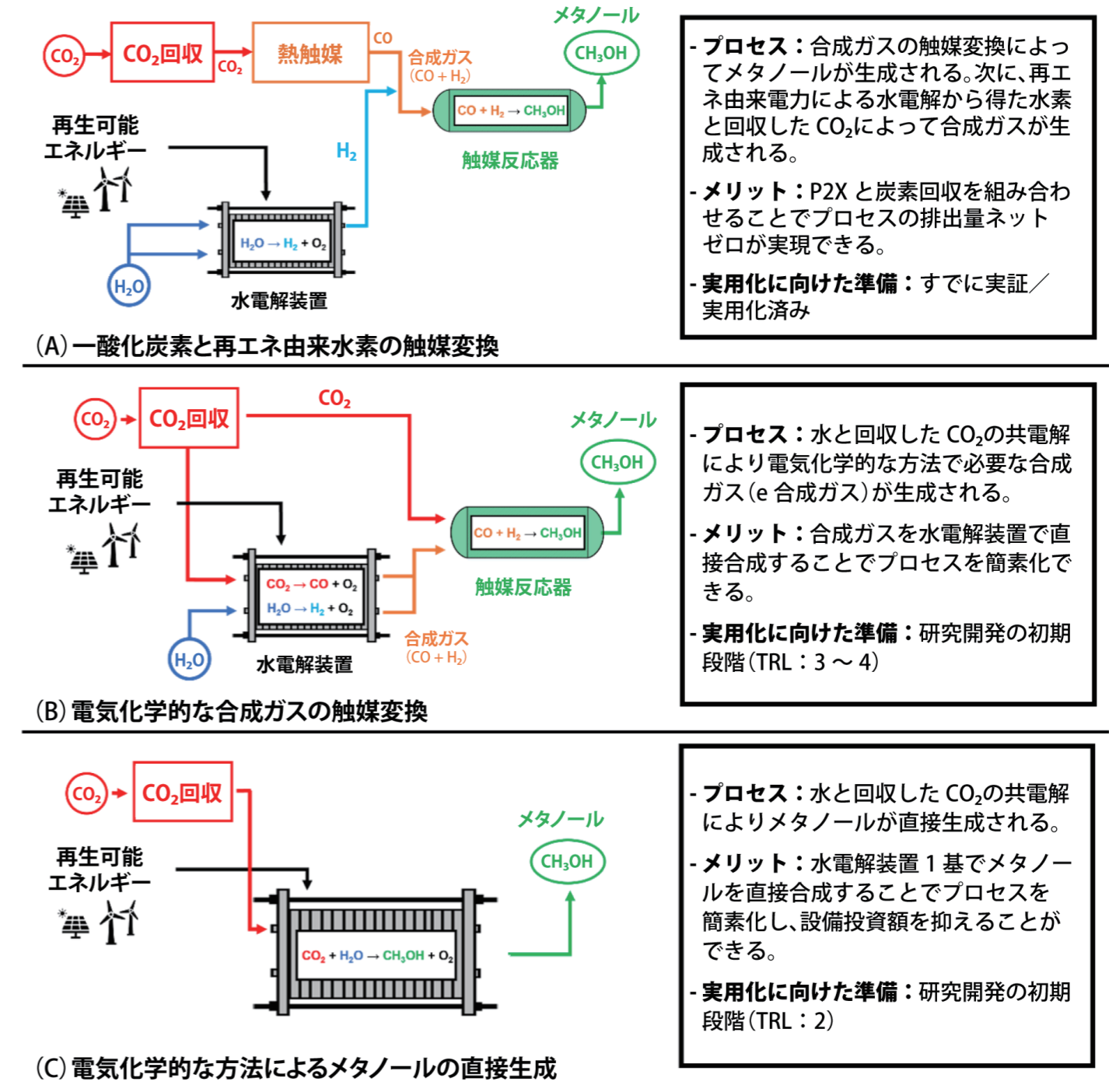
ABEL エナジー社はタスマニア州ベルベイに再エネ由来メタノール製造プラントを建設する計画を立てています。当プラントはタスマニア州の再生可能エネルギー (特に水力発電) の可能性を生かして、100 MWの再エネ由来水素電解装置に電力を供給し、主に輸出向けに年間60,000トンのメタノールを製造する予定です。¹⁰⁴ 将来的な展開として、現地の需要を満たすためにメタノールの一部をDMEに変換させるプラントなどが提案されています。計画中の当プロジェクトには約2億7,000万ドルの費用がかかるものと見られ、30人分の雇用創出が見込まれています。¹⁰⁵

NSW州における再エネ由来メタノールの機会

NSW州は発電所やバイオマス資源から排出される既存のCO₂と再エネ由来水素を活用して、再エネ由来メタノールを製造することができます。このメタノールは原料や燃料として現地市場向けに利用される場合があるほか、圧縮水素よりエネルギー密度が高いとされていることから、輸出時の再エネ由来水素の媒体としての役割を果たす可能性もあります。

さらに、メタノールは混合燃料としても使えるため、段階的な低炭素経済への転換を促す独自の機会も提供しています。メタノールとガソリンの混合は、ゼロエミッションモビリティ実現に向けた中間ステップとして、アジア太平洋諸国における脱炭素化への道筋と見なされています。

図21:メタノール製造の潜在的なP2X経路。(A)1つ目の経路では、回収したCO₂を熱触媒を用いてCOに変換した後、これを再エネ由来の水電解による水素と混合し、そこから生まれた合成ガス混合物 (CO+H₂) を二次変換反応器を使ってメタノールへと変換します。(B)検討されている2つ目の経路 (TRL:3~4) では、CO₂電解装置内で排出されたCO₂と水から合成ガスを生成し、これを二次変換反応器を使ってメタノールへと変換することができます。(C)CO₂と水の直接電解からメタノールを生成する方法を開発するために研究が行われています。



3.6. パワー・ツー・合成ガス (合成燃料)

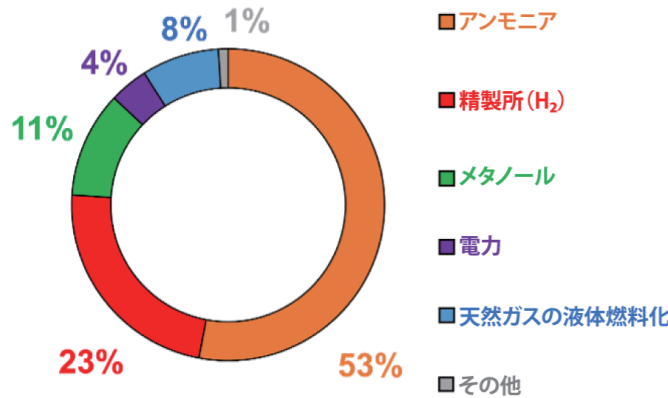
3.6. フィッシャー・トロプシュ法による合成ガスの製造と変換

合成ガス (シンガス) は重要な混合燃料ガスで、主にさまざまな割合の水素と一酸化炭素で構成されています。現在、合成ガスは、アンモニア製造 (一酸化炭素を CO₂ に変換し、大気中に排出されます)、石油化学産業、メタノール製造において工業用の水素を製造するための中間体として利用されています (図22)。また、合成ガスは石炭ガス化の主要製品であることから、発電、とりわけ石炭火力発電所においても間接的に利用されています。別の新たな用途として、フィッシャー・トロプシュ (FT) 法によって合成ガスを液体燃料 (特に航空燃料) や化学品へ変換するという用途があります。

FT法について特筆すべきは、高い商業化レベルに達しており、世界中で積極的に導入されているという点です (TRL: 5~9)。⁸⁰ 商用システムもゼネラル・エレクトリック、ルルギ、シェル、シーメンスといった大手企業からすでに提供されています。大規模FTプロジェクトとして、300,000バレル/日 (bpd) を超える合成燃料を製造しているサソール社の南アフリカにおけるプラントなどが挙げられます。2005年時点で、当プラントは南アフリカにおけるディーゼル需要の28%を満たす燃料を製造しており、他にもさまざまな製品を提供していました。¹⁰⁶ また、カタールではシェル社が190億米ドルを投じたパールGtL (ガス・ツー・リキッド: 天然ガスの液体燃料化) プラントを操業しており、2011年以降、製品の生産能力は140,000 bpdに上ります。¹⁰⁷

図22: 世界の合成ガス需要の最終用途セクター別内訳。¹⁰⁸

世界の合成ガス需要: 6 EJ yr⁻¹



世界の合成ガス需要

世界の合成ガス需要は年間約6 EJ (6*10¹² MJ) で、これは世界における一次エネルギー消費量の2%に相当します。¹⁰⁸ 合成ガスとその誘導体の世界市場は2022年までに年間6.6 EJほどに達すると予測されており、2016年以降10%を超える年平均成長率を示しています。¹⁰⁹

オーストラリアにおける需要

オーストラリアにおいて、合成ガスの大半はアンモニア製造向けに水素を製造する際に間接的に生成されたものです。これ以外には、石炭ガス化から生成した合成ガスを燃料に変換 (FT変換) するプロジェクトが南オーストラリア、ビクトリア、クイーンズランドの各州で検討されてきましたが、いずれも実用化には至りませんでした。¹¹⁰ しかし、南オーストラリア州におけるリー・クリーク・エナジー社のプロジェクトは現在、同州の石炭埋蔵量を活用して合成ガスを製造する可能性を、アンモニアや尿素の製造において利用するために模索しているところ。当プロジェクトは石炭地下ガス化施設を開発するもので、これにより、地下で石炭がガス化されて合成ガス (その後、利用するために取り出すことが可能) となります。リー・クリーク・エナジー社は、2030年までにカーボンニュートラルを実現できる可能性を秘めた計画中の当施設 (26億ドル) について、「確実に利益をもたらす」フィージビリティ分析を実施することを目指しています。¹¹¹

AgBioEn社はバイオマスからグリーンディーゼル燃料を製造する、FT合成による液体燃料化施設 (20億ドル) をビクトリア州に建設中です。当プロジェクトは年間45 ktの排出量を削減し、最大1,500人分の雇用を生み出すと見られています。¹¹²

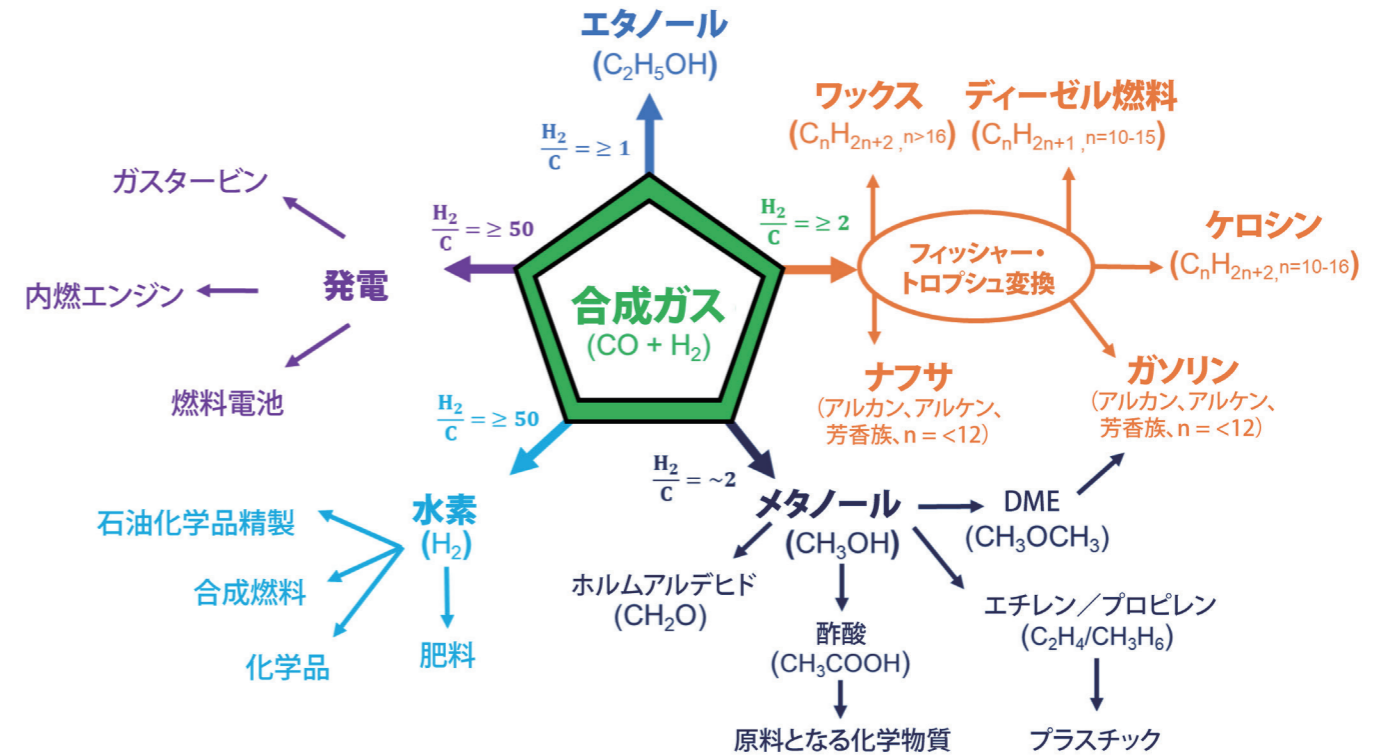
合成ガスの主な特徴

合成ガスは化学品の「レゴブロック」のようなものと見なされています。基本構成要素である一酸化炭素と水素をさまざまな構造で組み合わせ、大量の製品を生み出すことができるためです。この機能は合成ガスの割合、つまり、合成ガス混合物における水素と一酸化炭素のモル比によって決まります。エネルギー源や、直接利用またはFT法によってさまざまな化学品や燃料を製造する際の原料として用いることを想定し、中間体として合成ガスを利用するためのさまざまな合成ガスの割合がすでに定められています (図23)。¹¹³

合成ガスの製造

現在、大半のFTプロセスはガス・ツー・リキッド (GtL: 天然ガスの液体燃料化) プラントに分類されており、こうしたプラントは天然ガスや石油原料を使用しています。中国と南アフリカでは、大量の合成ガスを製造する上でコール・ツー・リキッド (CtL: 石炭の液体燃料化) プラントが容易に利用されています。¹¹⁴ その他の新たな手法としては、バイオマスや都市固形廃棄物を使用して合成ガスを製造する方法もあります。¹¹⁵ 合成ガスを製造する一般的な産業技術は、触媒を用いる水蒸気メタン改質法 (SMR)、自己熱改質法 (ATR)、部分酸化法 (POX) です。

図23: 合成ガスの割合 (H₂/CO比率) に基づく合成ガスの誘導体。¹¹³



合成ガスの製造におけるP2Xの役割

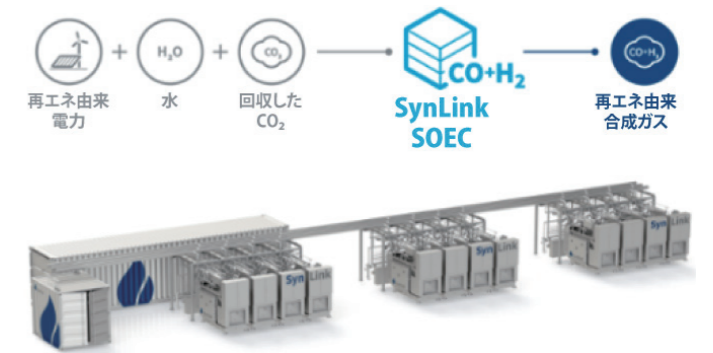
P2X技術は再生可能エネルギーを使うことで、脱炭素化した合成ガス製造における機会を提供することにもなり得ます。

1. 再エネ由来水素を排出されたCO₂と混合すれば、FT反応器で使われる合成ガスを製造することができます。この方法は「パワー・ツー・リキッド (PtL: 再生可能エネルギーの液体燃料化)」と呼ばれることが多く、再エネ由来メタノールやその他のFT法による燃料を製造する上で支持されています。¹¹⁶ 南アフリカの化学企業であるサソール社は先述した同国における石炭ベースのFTプラントを再エネ由来水素ベースのPtLプラントに転換させる可能性を検証しています。¹¹⁷ 後述するように、EU諸国でも複数のプロジェクトが開発されています。
2. 遷移金属触媒を用いて、CO₂と水の直接電解によって合成ガスを製造することもできます。¹¹³ 触媒の調整によって合成ガスの割合を容易に変更することができ、これにより、その後のFT変換で製造できるさまざまな合成炭化水素製品をいろいろな形でコントロールできるようになります。また、合成ガス用触媒の開発 (NSW州内の複数の大学) や、海外でのシステムの規模拡大に向けた多大な努力も費やされています。

ドイツに拠点を置くサンファイア社は合成ガスを直接合成するための水電解装置 (最大750 Nm³ hr⁻¹) を実用化しました (図24)。この水電解装置を用いれば、水と回収したCO₂排出物の共電解により、ガスの割合を選択する形で合成ガスを製造できるようになります。

サンファイア社は現在、CO₂の回収事業を行っているクライムワークス社と提携し、「Norsk e-Fuel (ノルスク e-フューエル)」試験プロジェクトをノルウェーにおいて開発しています。このプロジェクトでは、両社の技術を活用し、2026年までに100百万リットルの合成燃料を製造する予定です。¹¹⁸

図24: サンファイア社が開発した合成ガスの直接合成を行うSynLink SOEC (固体酸化物形電解セル) システム。

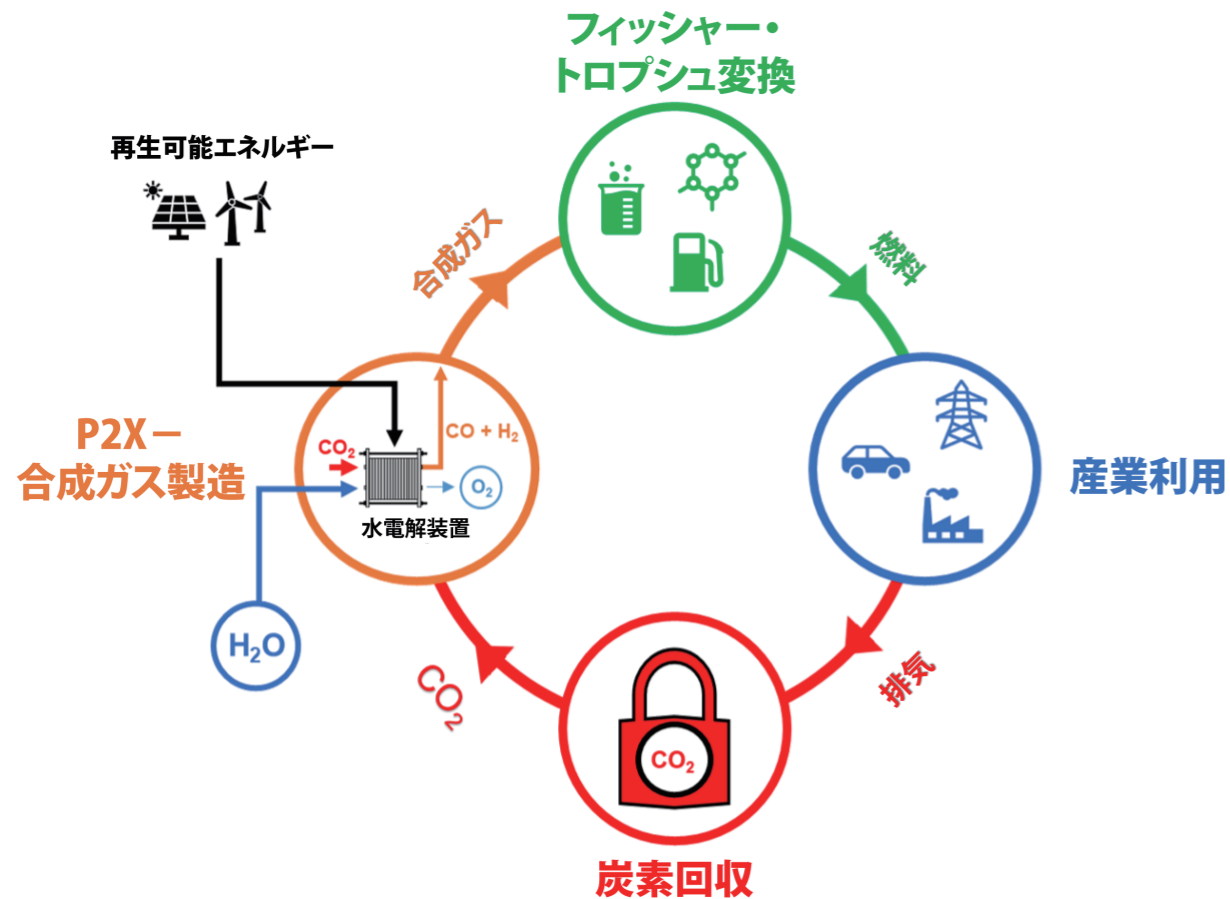


こうした発展は、回収したCO₂から合成燃料を製造することができるクローズドループ型PtLシステムを構築するための道を開いています。(図25) IEAによれば、こうした合成炭化水素の需要(特に、航空燃料としての合成ケロシンの需要)は2070年までに250 Mtoe/年に達する見込みです。¹⁹ これは約1,340億ドル規模の市場(現在の航空燃料の価格:68ドル/bbl)につながるものです。¹¹⁹ オランダの大手航空会社KLMは最近、世界で初めてPtLによる合成ケロシンを使って商用旅客便を運航したと発表しました。¹²⁰ 現在、アムステルダムとロッテルダムの空港で運航されるフライト向けに合成ケロシンを提供するためのPtLプラントを建設するプロジェクトが進められていますが、KLMはこれらのプロジェクトの主要ステークホルダーでもあります。

NSW州におけるパワー・ツー・合成ガスの機会

NSW州には、合成ガスからのメタノール製造(セクション3.5に記載)に加え、合成ガスからさまざまな動力燃料を製造する市場機会があります。見通しがたっている機会のひとつとして、西シドニー空港都市における合成航空燃料の製造が挙げられます。さらに、オレフィンやポリマーの製造向けに再生エネルギー由来合成ガスを利用することは州内の製造業界にとっての経済機会となる可能性もあります。

図25: 循環ループを閉じるP2Xを用いた電気化学的な合成ガス製造。



3.7. その他のP2X技術

3.7.1. その他のP2X経路

これまでに説明した経路に加え、その他のいくつかのP2X技術についても研究がなされています。そのひとつが、直接CO₂を電解還元して、ギ酸、エタノール、メタノールやその他の複雑な炭化水素製品を生み出す技術です。¹²¹ 実際、柔軟性を高めるために単一のシステムにおいて異なる電気化学的な方法を組み合わせるという可能性も残されているという報告がなされています。Naやその他の研究者が発行した最近のレポートでは、最大で295通りの電気化学的な方法の異なる組合せを作ることができ、これによってさまざまな気体/液体製品が生み出されることが示されています。¹²² こうしたP2X技術の一部について、以下で取り上げていきます。

再生エネルギー由来電力からのH₂O₂製造

過酸化水素(H₂O₂)は商品化された酸化剤として利用されている貴重な化学品で、特に、紙・パルプ産業で利用されており、世界の過酸化水素需要の60%を占めています。また、過酸化水素は水の処理や殺菌を行うための消毒剤としても使われています。現在のパンデミック環境を考えると、この特性は極めて重要で、米国疾病予防管理センターは安全に使用できる強力な消毒剤のひとつとして過酸化水素を挙げています。¹²³ 現在、過酸化水素はアントラキノン法(酸化還元触媒でアントラキノンを変換して過酸化水素を製造する方法)によって製造されています。この工程における一般的な前駆体となるのが、水蒸気メタン改質から生成される水素です。この水素はアントラキノンに水素化するために用いられた後、過酸化水素を生成する酸化過程で取り除かれます。¹²⁴

しかし、近年における電極触媒の進歩を受けて、1基の水電解装置で発生する大気中からの酸素と水からの水素を用いて過酸化水素を製造する道も開かれています。¹²⁵ このことは、シンプルで持ち運び可能な低価格の装置につながる可能性があり、こうした装置を使えば、空港、病院、スポーツ競技会場などで、その場にある空気と水と電力だけを利用して継続的に過酸化水素を製造することもできます。

バイオマスからの水素製造

水電解から再生エネルギー由来水素を製造する代替手段として、バイオマスから製造する方法があります。バイオマスから熱化学的に水素を製造する方法はすでに定着しているアプローチで、この方法では、バイオマスが石炭や天然ガスと混合されたり、ガス化または熱分解のプロセスで直接用いられて水素を製造します。これに代わるものとして、現在研究が進められているのが、特別に設計された生体触媒を用いて生体物質を水素に分解する特殊な生物学的プロセスです。¹²⁶ バイオマスは水素製造にとって膨大な再生可能エネルギー資源となるものの、水素への変換プロセスは時間がかかり、水素の大規模生産にはバイオマスを栽培し、反応器を開発するための広大な土地が必要となるため、現時点では規模が限られています。¹²⁷

CO₂の鉱物化

CO₂の鉱物化は有望なP2X技術で、排出されたCO₂をセメントや建設資材などの付加価値の高い材料に変換するものです。こうした材料が世界経済の中で使用されている量を踏まえ、CO₂の鉱物化は大量のCO₂を利用・貯留できる可能性がある技術として支持されています。¹²⁸ CO₂の鉱物化は大量のエネルギーが必要な上に反応速度が遅いことから、現時点では限定的に行われています。¹²⁹ 再生可能エネルギーは、直接空気回収などを通じてエネルギーを提供することで鉱物化プロセスを促したり、拡大させることによって、鉱物化を拡大させていく上で役割を果たす可能性があります。

オーストラリアのミネラル・カーボネーション・インターナショナル(MCI)社はすでに7年前から、鉱物化技術の実用化を目指して開発を続けています。同社は政府と産業界から2,000万ドルを超えるシード資金を調達し、その資金をニューカッスル大学における試験プラントの設計と建設に投じています。^{130,131}



4.0.NSW州およびオーストラリアにおける破壊的なP2X技術

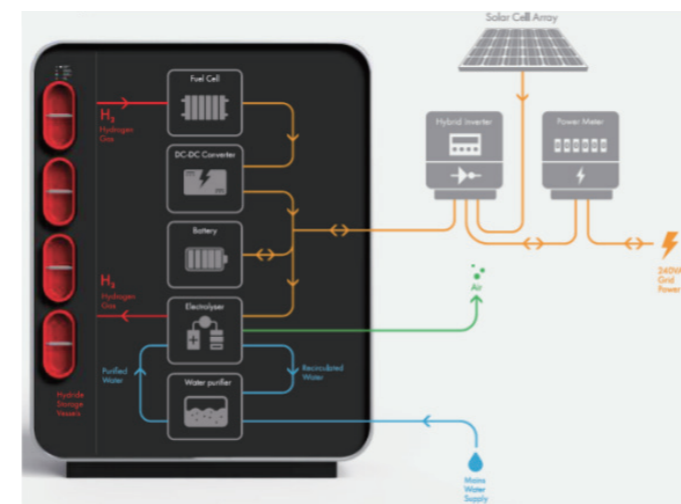
NSW州(およびオーストラリア)はP2X分野の優れた研究開発能力を誇ります。これを後押ししているのが、工学や応用科学(特に重点が置かれているのは再生可能エネルギー、エネルギー変換、ナノテクノロジー、触媒、プロセス設計・工学、生産性・製造効率向上など)および混合エネルギー化学システム分野で行われている質の高い研究の数々です。

以下に紹介するのは、NSW州およびオーストラリアで生み出されたP2X分野のスピノフ技術の一例です。

水素貯蔵システム(LAVO社)

UNSW(NSW大学)のスピノフ企業であるLAVO™は独自の水素ベースのハイブリッドエネルギーシステム(容量40kW)を住宅や企業向けに開発しました。このシステム(図26)には水電解装置が備えられており、水道水と屋上太陽光パネルからの電力で動かすことができます。製造された水素はその後、水素吸蔵合金システムに蓄えられ、貯蔵された水素は太陽光が利用できない時間帯に燃料電池を使って発電するために利用することができます。同社は現在、2021年7月までの出荷に向けて発注を受けています(単価:29,450ドル)。

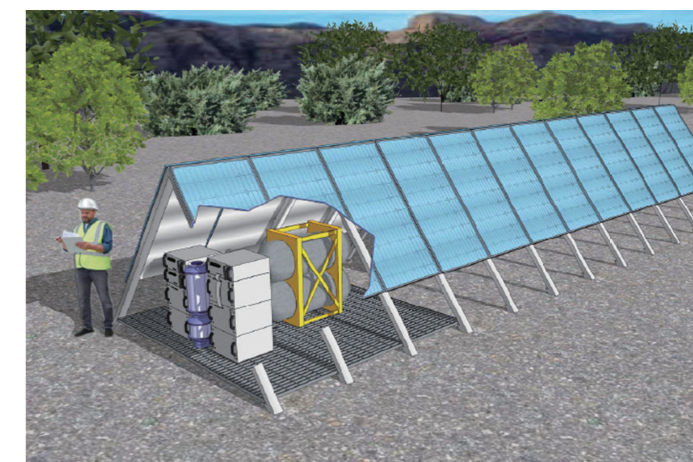
図26:LAVO™グリーンエネルギー貯蔵システム。LAVO™提供。



メタネーションと組み合わせた直接空気回収(サザングリーンガス社)

先述したように、APAグループとサザングリーンガス社はオーストラリア再生可能エネルギー機関(ARENA)からの資金提供を受け、クイーンズランド州において再エネ由来メタンを製造する最先端の施設を建設中です。CO₂原料は、シドニー大学が開発した特許取得済みの直接空気回収技術を用いて大気中から回収します。水原料は、ニューカッスル大学が開発した水素採集装置の技術を用いて大気中から抽出します。実証プラント(図27)は毎年74GJの合成メタンを製造できると見込まれています。当プラントはクイーンズランド州のウォランビーラにあるガスハブに建設される予定で、合成したメタンは既存のガス供給網に注入されます。

図27:APAのメタネーションプロセスのイメージ。ARENA提供。



プラズマによる水素とアンモニアの製造(プラズマリープ社およびUNSW)

プラズマリープ・テクノロジーズ社(シドニー大学のスピノフ企業)はプラズマを極めて高いエネルギー効率で生成できる独自システムを開発しました。UNSW内にある粒子・触媒研究所は本システムを使ってNO_xを生成し、その後、それを特許取得済みのハイブリッド水電解装置を使ってアンモニアに変換しています(図28)。

これまで、NO_x中間体の生成は技術的に非常に難しいものでしたが、こうした開発によって、HB法に取って代わる拡張性のある電気化学的なアンモニア製造への道が開かれるだろうと期待されています。

図28:アンモニア製造用ハイブリッドプラズマ水電解システムの仕組み。当システムでは、プラズマを使って水と大気中の窒素からNO_x中間体を生成(左側の反応器)し、そのNO_xを水電解装置(右側)内で水と共電解してアンモニアへと変換¹³²させます。

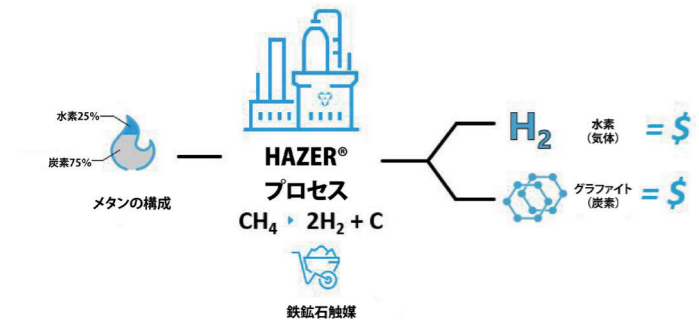


4.NSW州およびオーストラリアにおける破壊的なP2X技術

HAZER® プロセス (ハイザーグループ)

ハイザーグループはシドニー大学と協力し、天然ガスから炭素を排出しない水素を製造することを目指したHAZER®プロセスを開発しました。当プロセス(図29)は鉄鉱石触媒を使い、天然ガスを炭素(小売りもできる高品質なグラファイトとして取り出す)に変換して水素ガスを発生させるものです。当プロセスは水蒸気メタン改質法(SMR)に比べ、環境的(排出量が50%少ない)、経済的に見て競争力があります。

図29:HAZER®プロセスの流れ。ハイザーグループ提供。

**固体酸化物形水電解装置による合成ガスと水素の製造 (CSIRO)**

CSIROは概念実証段階にある固体酸化物形水電解装置(SOE)を開発しています。これは太陽光を利用することで、排出炭素と水から合成ガスと水素への変換を可能にするものです。SOEを用いる主な利点は、プロセス効率を向上させる電気化学反応を促すために、太陽光を電力だけでなく熱としても使用できることにあります。生成された合成ガスはその後、触媒コンバーター(これもCSIROが開発中)を使って液体燃料に変換されます。当プロセスは経済的な競争力を確保できるだけの規模に拡大すると見込まれており、その規模になれば、水電解プロセスを促し、最大8トン/時間のCO₂排出量を消費するのに必要な電力を40%削減することができると見られています。

廃水電解による水素製造 (switchH2社)

switchH2社は触媒と水電解装置から成るシステムを開発しました。当システムは食品・飲料業界(醸造所、ワイナリー、蒸留所)から出る有機物に富んだ廃水の一部を酸化させて水素を製造することができます。当システムがNSW州にもたらす主なメリットのひとつとしては、水素を製造する際の上水への依存を減らし、不足している純水量を家庭用に利用できるようになる点が挙げられます。同社は図30に示した試験システムをすでに開発済みです。

図30:switchH2社の試験システム。switchH2社提供。

**HERO®:水素エネルギー最適化装置**

水素エネルギー最適化装置HERO®は、スター・サイエンティフィック社がニューカッスル大学と協力して発明した独自の触媒システムです。この触媒は水素と酸素を使って(3分以内で温度が700°C近くに達する)熱エネルギーを発生させることができるもので、有害な副生物が一切出ません。¹³³ 同社は他にも、(石炭ベースの蒸気発生に取って代わる)特殊な熱交換器の開発を行っており、これは発生させた熱を発電など、大量のエネルギーを消費するプロセスに使うことができるものです。また、家庭向け暖房システムや、商業用途、特に淡水化プロセス用の産業エネルギーを満たすための加熱装置も開発しています。

触媒は水素の大口のオフテイク契約機会を提供することにより、水素経済を促す重要な要素として支持されています。スター・サイエンティフィック社は最近、フィリピンにおける水素経済の発展を支援するために同社の技術を活用する契約をフィリピン政府と締結しました。¹³⁴

アクアハイドレックス社

アクアハイドレックス社はウーロンゴン大学(UOW)における研究から生まれた技術系スタートアップ企業です。同社は商業利用向けに低コストで効率性の高い独自の水電解装置の開発に取り組んでいます。これは、水素を製造して天然ガス供給網に注入することで、再エネ由来電力の貯蔵手段として活用できるものです。同社は2017年、この電解装置を開発するための資金援助をARENAから受け¹³⁵、その後、事業拠点を米国に移しています。

ハイドジーン・リニューアブル社

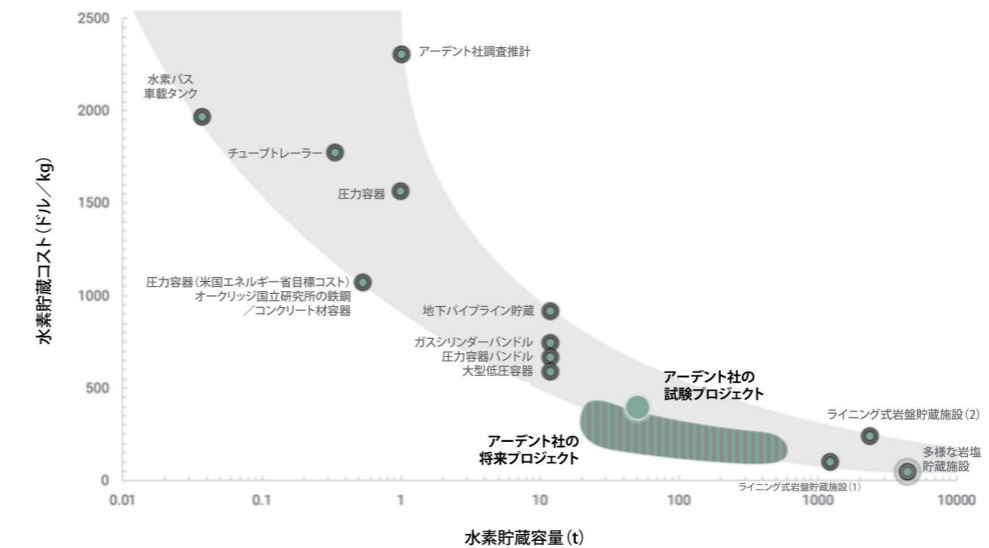
ハイドジーン・リニューアブル社はマッコーリー大学のスピノフ企業で、特許取得済みのバイオリクターをオンサイト利用してバイオマスから水素を製造するシステムを実用化しています。燃料電池の電力で製造された水素を使うことによって、同社のシステムがディーゼル燃料を用いたシステムに取って代わるオフサイトのエネルギー製造システムとして利用されることを同社は期待しています。このシステムの最大の利点は同じ現場で水素を製造、利用できる点で、これにより、水素の製造・供給コストを押し上げる主な要因である輸送・貯蔵コストが削減されます。

水素採集装置

水素採集装置は太陽光や熱を使って空気を温め、周囲の空気よりも水分量が多い空気にさせることで大気から水を抽出できるよう設計された技術です。その後、温められた空気を冷却して吸収した水分を凝縮させ、それを抽出して利用できるようにします。現在、この技術は試作品の段階ですが、すでに実用化されている採集装置(水を取り出すために空気を冷却するケースが多く、高コストで比較的効率性が低い方法)とは本質的に異なります。太陽光や廃熱を使用しているこの水素採集装置はよりコスト効率が高く、水を1リットル当たり5セント未満で製造することができます。

開発者は水素製造でもこのシステムを利用できると見越しています。この技術は電解用の純水を供給することができ、余分な太陽光エネルギーとシステムから発生した熱エネルギーが水の分解に利用されます。開発企業はサザングリーンガス社と連携し、クィーンズランド州で合成メタンを製造する同社のプロジェクト(先述)を支援しています。

図31:アーデント・アンダーグラウンド社の水素貯蔵ソリューションと代替ソリューションのコスト比較。アーデント・アンダーグラウンド社提供。アーデント・アンダーグラウンド社提供。¹³⁸



また、商業向けデモ装置の実験を行うために、NSW州物理科学基金からシード資金(33万ドル)を調達しています。¹³⁶

ミネラル・カーボネーション・インターナショナル社(MCI)

MCIはCO₂を回収して建築資材に変える技術の開発に取り組んでいるオーストラリア企業です。同社は2,000万ドルを超える研究開発資金を調達して7年間にわたり開発に取り組んでおり、ニューカッスル大学に試験プラントを建設しました。開発中のプロセスは回収したCO₂をセメント、コンクリート、骨材、石こうボードに変換させることができるもので、現在、難燃剤などの先端材料や衣類への変換についても研究が進められています。同社は候補となる工業用地の評価を行い、CO₂変換の実現可能性を検証できる段階にまできたと断言しており、現在、自社の技術を実用化する機会の可能性を模索しているところです。^{130,131}

ハイサタ社

ウーロンゴン大学のスピノフ企業であるハイサタ社は、2ドル/kg未満のコストで水素を製造することを目標とする「高度な」水電解装置技術を開発しています。同社は最近、自社の水電解装置の設計を実用化するために、クリーンエネルギー金融公社(CEFC)からの出資を受け、IPグループからも500万ドルの資金を調達しました。¹³⁷

アーデント・アンダーグラウンド社

水素サプライチェーンの主な側面として、製造段階と利用段階の間に中間貯蔵が必要となる点が挙げられます。これに対処するために、アーデント・アンダーグラウンド社はITPリニューアブルズ社と連携し、シャフトに穴を開けて施設の地下に水素を貯蔵する方法の実用化に取り組んでいます。水素を密封したり、水素の流出を防止したり、高圧を維持する上では、天然に存在する岩盤を利用するため、コストの高い貯蔵タンクの必要性がなくなります。(図31)

5.0. 「P2Xハブ」の開発に適した地域

本セクションでは、NSW州のさまざまな地域にP2Xハブを構築する可能性について検討しています。なお、ビジネスケースは仮定に基づいた代表的なP2X展開シナリオとして作成されたもので、個別企業の意向や計画は反映していない点に留意する必要があります。

5.1. NSW州における「P2Xハブ」機会を評価するための3段階の枠組み

表1: NSW州における「P2Xハブ」機会を評価するための枠組み。

段階	対象市場	NSW州経済にとってのメリット
第1段階: P2X原料の重工業への組み込み (アンモニア、製鉄、ガス混合)	NSW州内のガス混合、重工業、鉱物処理産業	「グリーン化学品」原料を重工業の化学プロセスに組み込むことにより重工業を活性化し、グリーンコモディティの生産につなげる。東アジア諸国(日本、中国、韓国)や英国、米国、EU諸国におけるグリーンコモディティに関する要求の高まりは、NSW州がグリーンコモディティ(グリーンスチール、アンモニア、メタノール、エタノール)の一大輸出拠点となれる機会を示している。 重工業と鉱物処理産業は大量のP2X製品の製造/生産を必要とすることから、州の地方で新たな雇用が生み出されることになる。
第2段階: NSW州の「グリーン燃料」への移行 (鉱業、運輸産業、プロセス産業の動力燃料)	運輸産業、化学産業、鉱業、熱利用産業	P2Xから製造される水素、アンモニア、メタノール、メタンなどのグリーン燃料はNSW州の輸送インフラを低炭素/排出量ゼロに向けた代替策に移行させる機会となる。これにより排出量ゼロ目標の達成がより現実的になるため、NSW州にとっては大きなステップとなる。あるいは、州内の鉱業を燃料電池自動車に移行させる際にグリーン燃料を直接利用することもできる。 熱利用は州内の食品・飲料産業にとってP2X製品の魅力的な用途となる。乳製品や食肉/養鶏といった産業では、熱用途として天然ガスが圧倒的に利用されている。 グリーン燃料が大規模生産され、州内の交通網や熱源網に供給されれば、地域雇用を生み出す可能性にもつながる。
第3段階: 地域のエンドユーザー向け分散型小規模P2Xハブ	小規模経済を生み出すためにNSW州内に設ける区域	地域雇用の創出を促し、P2X技術の導入を早めるさまざまな小規模プロジェクトに州の資金が行きわたるようにする。つまり、小規模ハブの近くに点在している企業がオフテイカーとなるような、NSW州の地方部に(輸送用)水素や(肥料用)アンモニアの小規模ハブを整備する。

5.2. NSW州内の主な「P2Xハブ」建設候補地の概要

P2X導入の最大の機会となる立地を把握するために、予備調査を実施しました。立地はまず、製造能力の開発(経済活性化特別区域)、再エネゾーン、インフラ投資(バジェリーズ・クリークの空港都市)など、NSW州政府による既存の取り組みに基づいて選定しました。次に、原料の利用可能性(純水など)、既存産業の存在、輸出を想定した港湾インフラへのアクセスの点から定性的評価を行いました。表2は、こうした評価の結果をまとめたものです。

本プレ・フィージビリティ・スタディで重点的に取り上げるのは、イラワラ・ショールヘイブン、ハンター、パークスの3地域です。これらの地域には、再生可能エネルギー発電と既存産業や政府が促進する新興産業との相乗効果があり、P2X導入の機会が直ちにもたらされるためです。このほか、ワガワガ、ダボ、ボタニー、バジェリーズ・クリークといった地域についても机上調査を行いました。これらの市場はごく初期の発展段階にあり、P2X導入の機会に関しては、より長期的な展望を示しているため、今回の報告書では詳細調査は実施していません。

5. 「P2Xハブ」の開発に適した地域

表2: NSW州の「P2Xハブ」候補地の概要

地域	原料の評価		既存産業の評価	第1・第2段階の機会評価	第1・第2段階の機会評価	第3段階の機会評価
	再生可能エネルギー発電へのアクセス	純水原料へのアクセス	地域の既存産業	P2Xが重工業／軽工業を脱炭素化する機会	港湾インフラへのアクセス	小規模なP2X経済を構築する機会
イラワラ・ショールヘイブン						
ハンター						
パークス		 大きな貯水池が2カ所 (バレンドンとワイアンガラ) があるが、本地域は干ばつになりやすい	 鉱業部門があり、今後、内陸貨物鉄道のインターモーダル拠点になる	 内陸貨物鉄道と鉱業が動力燃料用途の機会になる	 将来的に動力燃料を輸出する際、内陸貨物鉄道を利用することができる	
ワガワガ			 大規模な農産物・食品加工部門がある	 動力燃料は熱・輸送用途で利用することができる	 貨物・物流経路を構築できる可能性がある	
ダボ			 鉱業部門がある	 鉱業がP2X用途の機会になる	 貨物・物流の道筋を開くことができる	
バジェリーズクリーク			 航空産業を要する空港都市	 航空産業と空港都市としての位置づけが動力燃料の導入機会となる	 貨物・物流経路を構築できる可能性がある	

5.3. イラワラ・ショールヘイブン地域

イラワラ・ショールヘイブン地域は州内第3位の経済規模を誇る地域で、歳入は155億ドルに上ります。¹³⁹ 当地域の経済に寄与している主な部門として、以下が挙げられます。

- 州内最大の穀物輸出ハブで、石炭輸出では州内第2位の規模を誇るポートケンブラの積出港。ポートケンブラはこの港を通じて、5億4,300万ドルの歳入を州にもたらしています。¹⁴⁰
- 国内最大の製造拠点となっており、製鉄や燃料生産といった主要産業が集結しています。¹⁴¹

図32: イラワラ・ショールヘイブン地域の地図。



イラワラ・ショールヘイブン地域 (図32) は、ブルースコープ・スチールやマニドラ・グループといった重工業を代表する大手企業の集合体でエコシステムを支えています。これら2つの企業は当地域で「第1段階のP2Xハブ」を構築する大きな機会をもたらします。私たちは資源の利用可能性とP2X価格を調査し、当地域でP2Xハブを構築する適切性について評価を行っています。

ポートケンブラ地域での水素ハブ構築には、NSW州政府も高い関心を示しています。州政府はつい最近、300 MW規模の水素・天然ガス混焼による火力発電所を当地域に建設するというエナジー・オーストラリア社の計画に対して資金援助を行いました。¹⁴² フォーテスキュー・メタルズ・グループ社も子会社スクアドロン・エナジーを通じ、州内の産業に電力を供給する10億ドル規模の発電所の建設に関心を示しました。¹⁴³ これらの企業は当地域において「第2段階のP2Xハブ」も構築する機会をもたらします。

「グリーンスチール」を推進する機会

ブルースコープ・スチール社のオーストラリアにおける事業は年間50億ドル相当の鉄鋼を製造しており、その多くはポートケンブラ製鉄所で製造されています。¹⁴⁴ この製鉄所は年間2.6百万トンの鉄鋼を製造しており、イラワラ地域において1万人の雇用を支えています。

ブルースコープ社は持続可能性への取り組みの一環として、製鉄所におけるスコープ1とスコープ2の温室効果ガス排出原単位を2030年までに12%削減することを発表しています。同社は太陽光による再生可能エネルギー電力88 MWを調達するESCOパシフィック社との7年間の電力購入契約 (PPA) を通して、上記目標の達成に向けて大きく前進しました。2019年に締結したこのPPAはブルースコープ社のエネルギー需要の20%を満たす電力を供給するものです。¹⁴⁵

ブルースコープ社は製鋼作業の脱炭素化についても模索しています。同社は製鉄業にとっての機会のひとつとして、「アーキ式電気炉 (EAF) を備えた直接還元鉄 (DRI) プラントを利用した一次鋼材の生産増加」(2020年サステナビリティレポート) を挙げています。¹⁴⁶ この製鋼プロセスへの移行は、グリーン水素に完全に移行する前に、まずは水蒸気メタン改質法で得られた化石燃料由来水素とグリーン水素の混合物を使用することで実現していく可能性が高いと思われます。

現在の製鋼プロセス

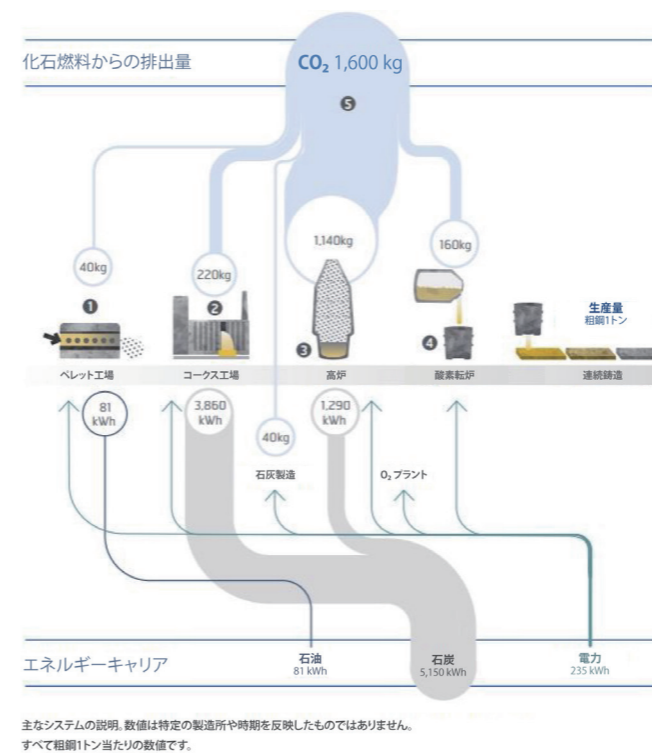
現在の製鋼／製鉄プロセス (図33) には、以下のプロセスが含まれます。

1. 高品位の鉄鉱石の塊鉱 (赤鉄鉱などの酸化鉄) を高炉 (BF) で製錬し、銑鉄 (炭素で飽和した溶銑) を製造します。このプロセスでは、直接・間接還元が行われ、その大半は冶金用コークスやその他の補助化石燃料から得た炭素を使用しています。¹⁴⁷
2. 転炉 (BOF) を使い、「銑鉄」を炭素含有量が少ない鋼に変換させます。熱の存在下で酸素を吹き込むプロセスにより、銑鉄内の残留炭素 (やその他不純物) との反応が促され、一酸化炭素が発生します。

ステップ1とステップ2のプロセスは鉄鋼1トンを製造するのに約24.5 GJのエネルギー (熱および電力) を消費します。したがって、イラワラ地域にあるブルースコープ社の製鉄所は、すべての鉄鋼が一次工程から製造されたもの、つまり、最初の鉄鉱石に由来するものと仮定した場合に、64 PJのエネルギーが必要となります。¹⁴⁸

加熱と還元化石燃料を使う現在のプロセスでは、大量の炭素が絶え間なく排出されます。高炉ガスは一般的に22~23%のCO₂、22~23%の一酸化炭素、4~6%の水素を含んでおり、残りは窒素から成ります。

図33: 業界で行われている現在の製鋼プロセスの図解。¹⁴⁹



主なシステムの説明。数値は特定の製造所や時期を反映したものではありません。すべて粗鋼1トン当たりの数値です。

鉄スクラップを原料とする製鋼

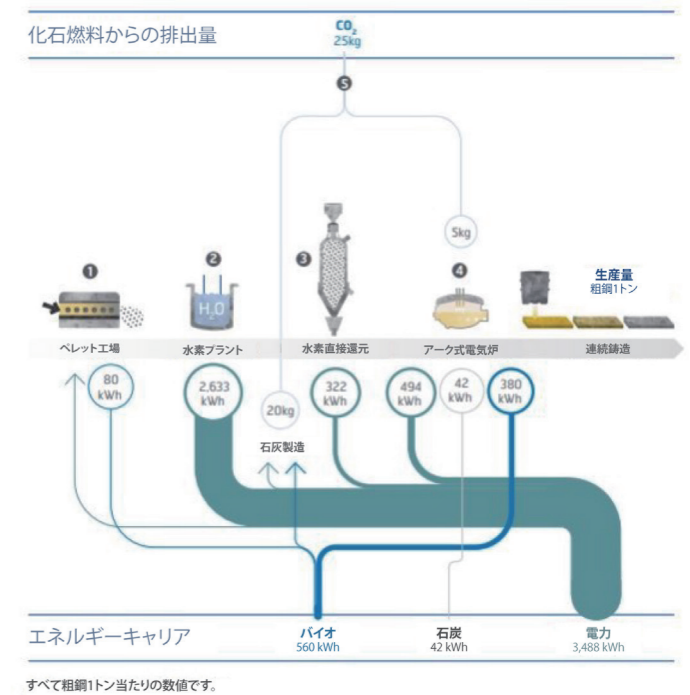
鉄スクラップを鋼鉄に変換させるために、アーキ式電気炉 (EAF) を導入するケースが増えています。基本的な原理としては、処理された鉄スクラップと直接還元鉄 (DRI) の混合物を熔解するもので、鉄スクラップには炉内に流れる電流からのエネルギーが用いられます。鉄スクラップには平均0.2%の銅が含まれており、仮に直接還元鉄の追加によってこれを除去できなければ、熱間圧延プロセスで鋼の表面に亀裂が生じることとなります (高温脆性)。¹⁵⁰

現在の直接還元鉄の生産 (2019年における世界の生産量の約76%) はガス炉を用いたものが中心で、ここでの鉄鉱石の還元には、水蒸気メタン改質法によって天然ガスから変換された合成ガス (一酸化炭素と水素) の成分が使われます。¹⁵⁰ 投入するガスを合成ガス成分からグリーン水素のみへと切り替えることが、二次鋼材産業の低炭素製法への移行を可能にする鍵のひとつなのです。

ブルースコープ社にとっての意味合い

ブルースコープ社は現在、鉄スクラップを用いて年間生産量の15~20%の鉄鋼を生産しています。¹⁵¹ 同社が2020年サステナビリティレポートで概説したように、中期的には、「業界では、特定の市場で鉄スクラップの供給量が増加するのに伴い、二次鋼材用のアーキ式電気炉施設がこれまで以上に大きく貢献するほか、アーキ式電気炉を備えた直接還元鉄プラントによる一次鋼材の生産増加が見られる」といったような転換が見込まれています。同社は、グリーンスチールの展開を実証することを目指したスウェーデンで進められているHYBRITプロジェクト (図34) の成果を待つこととなります。¹⁵²

図34: HYBRIT プロジェクトの図解。当プラントはグリーン水素を使ったグリーンスチールの製造をテストするためにスウェーデンで開発されています。¹⁵³



すべて粗鋼1トン当たりの数値です。

ブルースコープ社のイラワラ施設と同規模の低炭素の二次鋼材施設に必要な水素の量

二次鋼材用のアーキ式電気炉は通常、75%の鉄スクラップと25%の直接還元鉄を混ぜて使用することで、銅含有率を業界で必須とされている0.15%未満にしています。¹⁵⁴ 例えば、ブルースコープ社のイラワラ施設では約390 kTの鉄鋼 (同社の年間生産量の15%相当) を二次鋼材製造プロセスで生産しており、これには約97.5 kTの直接還元鉄が必要となります。現時点では、粗鋼を1トン製造するのに、還元プロセスで54 kgの水素が必要になると見積もられています。したがって、ブルースコープ社のイラワラ施設のような低炭素の二次鋼材施設を稼働させるには、年間約21 kTのグリーン水素が必要となります。¹⁴⁷

イラワラ・ショールヘイブン地域における「低炭素鋼」施設の原料に関する評価

グリーンスチール製造の中核的なP2X経路はグリーン水素の製造が伴います。したがって、この機会の実現可能性を判断する上では、水と再生可能エネルギーへのアクセスが重要な要素のひとつとなります。

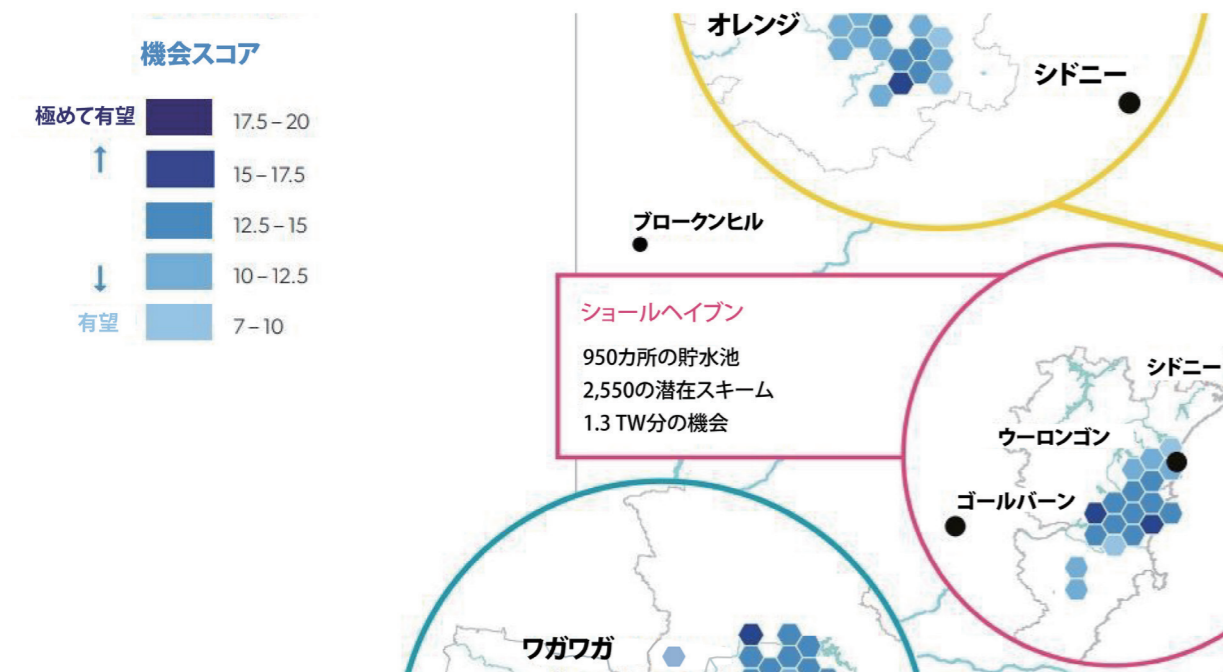
再生可能エネルギーへのアクセス: 1977年、イラワラ・ショールヘイブン地域に水力電気を提供するためショールヘイブン・スキーム (水力発電プロジェクト) がサザン・ハイランズで開始しました。現在、本スキームには、カンガルー・バレーとベンディーラにある相互接続された2つの発電所が含まれています。これらの発電所を保有するオリジン・エナジー社はイラワラ・ショールヘイブン地域への240 MWの電力供給を支えてきました。¹⁵⁵

2020年5月、同社は新たな235 MWの発電容量の拡大に関するフィージビリティ・スタディを完了しました。当スタディの結果を受けて、同社はこのプロジェクトに関して次のように発表しています。「*技術的には実現できるものの、現在の経済環境下では商業的に実現不可能です。当社は将来のポートフォリオに向け、引き続きこの拡張プロジェクトについて検討していきます。*」¹⁵⁶

現段階では、オリジン・エナジー社はコロナ後の経済的な不透明感の中、同社のバランスシートに負荷がかかることを最も懸念しています。この地域に第1段階のP2Xハブを構築することは、NSW州政府にとって、州内の電力網に水力発電の容量を追加するというオリジン社の計画を再開させる機会となります。グリーンスチール製造施設をはじめとする各種用途向けの水素を製造するために必要となる水電解プラントからのエネルギー需要が発生するためです。

NSW州政府の「揚水発電ロードマップ」は、イラワラ・ショールヘイブン地域で必要に応じて利用できる、未開発の1.3 TW分の水力発電容量がさらにある可能性を示しています (図35)。¹⁵⁷

図35: ショールヘイブンの水力発電容量の機会。¹⁴⁵



ハンター地域およびイラワラ・ショールヘイブン地域における「低炭素鋼」以外の重工業脱炭素化の機会

マニルドラ・グループ社は世界最大規模の小麦澱粉・グルテン製造プラントを有しています。このナウラ工場の製品は主に日用消費財の生産や製紙産業で使われています。¹⁶¹

この未開発の水力発電容量はブルースコープ・スチール社の再エネ由来水素への完全移行や長期的な目標を実現することにも利用できます。

水素を製造するための淡水へのアクセス:

イラワラ・ショールヘイブン地域の水需要は現在、ネピアン・ショールヘイブン水系と6カ所の水処理施設によって支えられています。¹⁵⁸ タロウアダムはフル稼働時(8.5 GL)に当地域のすべての水素生産活動を可能にできるよう戦略的な立地に置かれています。¹⁵⁹

グリーンスチールを製造する大規模な二次製鋼所(ブルースコープ社が保有する既存の二次製鋼所に匹敵する規模)が当地域に設置された場合、これによって年間約211 MLの水が必要となります。この水量はエイボンダム(貯水容量:147 GL、現在の貯水率83%)とタロウアダムからの供給に加え、運用上の負担軽減のためにウーロンゴン廃水処理施設(処理容量:15 ML/日)から生み出される再利用水でまかなうことができます。¹⁶⁰ なお、当地域におけるP2X経済を後押しして将来の要件に合うよう、脱塩した海水を利用することもできます。

マニルドラ・グループは小麦を原料として最大限活用するために、バイオリファイナリーのプロセスを取り入れ、バイオエタノールの製造を始めました。ナウラ工場は今や、年間110 MLのバイオエタノールを製造する国内最大の供給元となっています。¹⁶² 現在、エタノールの消費者は食品・飲料産業や製薬業、輸送燃料産業にわたって広がっています。¹⁶³

バイオエタノールの製造プロセス: 中心となる製造プロセスから出た残留澱粉に水を加えてスラリーにします。その後、スラリーを加熱して、さらに細かい鎖に分解します。これを酵素を使ってグルコース、つまり糖に変換します。¹⁶⁴ この糖は、酵母が発酵段階で生物学的に「粗バイオエタノール」に変換する際に用いる主な原料となります。生成された溶液には濃度10~15%のバイオエタノールが含まれています。¹⁶⁵ マニルドラ社では、7つの蒸留塔を使い、蒸留によってこの溶液を脱水し、バイオエタノールを純度100%になるよう濃縮しています。¹⁶⁵

エタノール製造プロセスからの炭素排出量: バイオエタノール製造過程において最も炭素を排出するのが発酵です。バイオエタノールに関する現在の研究が示すところによると、バイオエタノール1リットル当たり1.5 kgのCO₂が排出されます。¹⁶⁶ これを基に推計すると、マニルドラ社のバイオエタノール製造施設は年間165 ktのCO₂を排出していることとなります。

同社がこうしたCO₂を価値のあるものへと変換させるために開発できる重要なP2X燃料がメタノールです。「低炭素メタノール」はセクション3.5で説明したように、CO₂と「グリーン水素」を一緒に反応させることによって生成されます。マニルドラ社の施設は年間約120 ktのメタノールを製造することが可能で、メタノールは付加価値のある化学製品として販売できるものです。

メタノール製造に向けたNSW州における再生可能エネルギー電子の範囲拡大: NSW州には国内最大規模のバイオディーゼル産業があり、バイオディーゼルの合成に用いられる主な化学品のひとつがメタノールです。バイオディーゼルの製造プロセスでは、合成バイオディーゼル100 kg当たり20 kgのメタノールが使われます。¹⁶⁷

エステル交換反応のプロセスはメタノールと植物油をバイオディーゼルとグリセリンに変換するものです。通常、このプロセスのメタノール回収率は80%となっています。

例えば、年間20 MLのバイオディーゼルの製造しているNSW州北部にあるバイオディーゼル・インダストリーズ・オーストラリア社の施設では、年間約2.7 ktのメタノール需要があり、この需要はパワー・ツー・メタノールで満たすことが可能です。これは、「低炭素メタノール」をバイオディーゼルのサプライチェーンに組み込み始めるための絶好の試験的な取り組みになる可能性があります。

注: 低炭素鋼製造のケーススタディについては、事業規模やNSW州にとっての社会経済的なメリットを鑑み、実現可能性の評価およびプレ・フィージビリティ評価を実施しています。低炭素の二次鋼材施設の規模については、オリジン・エナジー社の拡張プロジェクト(現在は保留中)の再エネ発電容量を基に見積もっています。「ビハインド・ザ・メーター」の再生可能エネルギーを利用できることから、それが二次鋼材の実現可能性に影響を及ぼすためです。年間生産量が約230 kt規模の二次鋼材施設をイラワラ・ショールヘイブン地域に建設することが可能で、この施設はブルースコープ社の現在の二次鋼材生産の約60%に匹敵する生産能力を持つこととなります。

イラワラ・ショールヘイブン地域における低炭素鋼製造施設の実現可能性に関する評価

表3: 低炭素鋼の製造を促す主要要素に関する評価

基準	現状	評価
P2X製品の必要性	✓	グリーン水素は低炭素鋼の製造に必要となります。
P2X製品のオフテイカーである重工業	✓	グリーン水素は鉄鉱石を還元して直接還元鉄を製造する際に必要となり、製造した直接還元鉄を鉄スクラップと混合して「二次鋼材」を製造することができます。
当地域における再生可能エネルギー資源	✓	ショールヘイブン・スキーム(水力発電所)はさらに発電容量を235 MW増やせる可能性を有しています。
「P2Xハブ」の再生可能エネルギー供給事業者	!	経済的見通しが不透明であることから、オリジン・エナジー社は2020年5月以降、ショールヘイブン・スキームの拡張計画を保留にしています。なお、イラワラ再エネゾーンがこのP2Xハブに電力を供給することも考えられます。
原料の利用可能性ー水	✓	年間約12 ktの水素を製造するには、約124 MLの水が必要となります。ショールヘイブンのタロウアダムはこの需要に対処しやすい格好の場所にあります。当地域では、海から水を取り入れることもできます。

イラワラ・ショールヘイブン地域における低炭素鋼の製造に関するプレ・フィージビリティ評価。

表4: イラワラ・ショールヘイブン地域における低炭素鋼の製造に関するプレ・フィージビリティ評価

年間約230 ktの「二次鋼材」製造にサービス提供するためのプレ・フィージビリティ評価	
原料に関する要件	
固定項目	値
水素需要	年間12 kt (現在の再エネ発電容量によって制限される)
エネルギー需要	1,298 GWhpa
水需要	124 MLpa
水力発電所の設備利用率	37%
水力発電所の発電容量	235 MW
必要な水電解容量	84.5 MW
「グレー水素」の調達価格	1 kg 当たり2ドル
「ブルー水素」の調達価格	国家水素ロードマップはブルー水素 (水蒸気メタン改質法とCCS) の製造コストを1 kg 当たり2.27~2.77ドルとしており、本書では比較のために平均製造コストを1 kg 当たり2.5ドルと想定しています。
「グリーン水素」の推定調達価格	1 kg 当たり4.39ドル
P2X技術の推定コスト概要	
設備投資額 (CAPEX) 合計	5,170万ドル
(10 MW 規模の水電解装置のCAPEXを1 kW 当たり750ドルとし、容量が10倍増加することに10%低下)	
総運営費 (OPEX)	年間4,710万ドル
フィージビリティ評価の推定結果	
「グレー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg 当たり2.39ドル
「ブルー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg 当たり1.89ドル
プロジェクトの実現に求められる電力価格	
現在の電力価格	1 MWh 当たり60ドル
二次鋼材の製造施設にとってNSW州の「グリーン水素」が「グレー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	1 MWh 当たり4ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり2,000ドルの場合) 1 MWh 当たり11ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,500ドルの場合) 1 MWh 当たり18ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,000ドルの場合) 1 MWh 当たり21ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり750ドルの場合) 1 MWh 当たり25ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり500ドルの場合)
二次鋼材の製造施設にとってNSW州の「グリーン水素」が「ブルー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	1 MWh 当たり12ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり2,000ドルの場合) 1 MWh 当たり19ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,500ドルの場合) 1 MWh 当たり26ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,000ドルの場合) 1 MWh 当たり29ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり750ドルの場合) 1 MWh 当たり33ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり500ドルの場合)

5.4. ハンター地域

ハンター地域はNSW州内最大の経済規模を誇る地域で、州の歳入に347億ドル寄与しています。¹⁶⁸ 当地域の経済は、鉱業、先端製造業、食品加工業、観光業などさまざまな部門にわたる多様性のある経済です。

ハンター地域には、国内で3番目に大きいニューカッスル港があり、12億ドルの収益と約8,000人分の雇用を生み出しています。¹⁶⁹ ニューカッスル港はアジア太平洋市場向けに石炭を輸出する際の主要港となっています。

NSW州政府は、先端製造業、再生可能エネルギー、インフラへの投資を通じてハンター地域の経済成長を促進する戦略的な20カ年計画を導入しています。¹⁷⁰ この経済成長に向けた移行の大部分は水素によって推し進められる可能性があり、州政府は最近、7,000万ドルを投じたNSW州の水素ハブ施策の一環として、ハンター地域に水素ハブを構築すると発表しました。¹⁷¹ こうした計画によって、ハンター地域の製鉄業の復活やアンモニアの製造拡大が期待できます。グラットン研究所の報告書が示すところによると、水素由来のアンモニア製造と製鉄業はハンター地域における最大数万人分の雇用創出に寄与する可能性があります。¹²

図36: ハンター地域にある既存の輸出用インフラを示した地図。¹⁷²



ハンター地域における主なP2X導入機会

ニューカッスル港を通じた輸出サプライチェーンが既にあることから、ハンター地域はP2X経済の流通を支える理想的な足場を提供します (図36)。

ハンター地域にあるオリカ社クーラガン島工場は年間360 ktの生産能力を有する国内最大規模のアンモニア製造施設です。セクション3.3で述べたように、アンモニアはP2X技術を世界の化学品サプライチェーンに組み込むという独自の機会を提供するものです。

オリカ社工場では現在、鉱業や建設業で産業用爆薬として使われる硝酸アンモニウムの製造にアンモニアを使用しています。現時点では、同社はサステナビリティレポートの中で、硝酸アンモニウム事業向けに「グリーンアンモニア」を製造する方向に切り替えていく必要性について明確に示していません。しかし、「グリーンアンモニア」はオリカ社にとって、世界市場向けの輸出品としてグリーンコモディティを製造するという独自のバリュープロポジションを示すものとなります。

輸出向けの再エネ由来アンモニアを製造するというこのバリュープロポジションは、(本書作成にあたって実施したステークホルダーとの意見交換によって明らかになったように) 特にアジア市場をターゲットとした新たなプロジェクトにまで及びます。

アンモニア製造プロセスの概要

オリカ社は水蒸気メタン改質法を使って天然ガスから水素を得ています。⁵⁴ このプロセスでは、最初に脱硫を行った後、水蒸気メタン改質法を用いて水素、一酸化炭素、二酸化炭素を生成します。

その後、変成器を使い、発生した一酸化炭素と残った水をフィッシャー・トロプシュ法 (セクション3.6で詳述) により水素と二酸化炭素に変換します。このプロセスによって確実に水素の製造を最大化することができます。

二酸化炭素はハーバー・ボッシュ法で用いる触媒を腐食させる恐れがあるため、改質プロセスで排出された気体はアミン溶液を用いて二酸化炭素を除去する必要があります。

改質器から発生した水素を圧縮し、これを合成反応器内で圧縮窒素と混合することで、アンモニアが生成されます。水素と窒素の理論混合比は3対1となります。⁶²

NSW州政府がハンター地域で「P2X輸出経済」を発展させていくべき理由とは

オリカ社をはじめとする業界のステークホルダーが「グリーンアンモニア」の輸出ネットワーク構築を通じて新たな価値創造ビジネスを動かしていく上で、ハンター地域は理想的な支柱となる地域です。日本は「グリーンアンモニア」を購入する最初の顧客としてふさわしいと考えられます。「日本版水素ロードマップ」においてアンモニアの需要が見込まれているためです。日本は2050年以降、年間30,000 ktのアンモニアを必要としています。¹⁷³ この再エネ由来アンモニアに関して、日本は1対1の割合でアンモニアと石炭を混焼させて発電することを目指しています。

日本の現在のアンモニア輸入量のうち10%を「グリーンアンモニア」にすることが、NSW州と日本の貿易関係を発展させる上で理想的な第一歩となるでしょう。日本の現在のアンモニア需要の10%を「グリーンアンモニア」でまかなえば、約20 ktの炭素排出量削減につながります。^{174,175} 日本の産業界は日本政府の施策が強いインセンティブとなって「グリーンアンモニア」を購入するようになるでしょう。「グリーンアンモニア」によって、確実に低炭素原料が農業/化学品サプライチェーンに組み込まれるようになるためです。

日本は現在、年間213 ktのアンモニアを主にインドネシアから輸入しています。うち10%をハンター地域で製造する「グリーンアンモニア」に置き換えるという当面の目標を達成するには、年間約3.8 ktのグリーン水素が必要です。

NSW州から日本への輸出に際して利用されている既存の輸送拠点を活用されることになるため、ニューカッスル港がこの輸出ネットワークの中心地となり得ます。2018年、日本は一般炭需要の約70%をオーストラリアから輸入しており、ニューカッスル港は一般炭輸出に際して中心的な港としての役割を果たしていました。¹⁷⁶

NSW州政府の支援がもたらし得る成果

この輸出経済を発展させる上でNSW州政府が行う支援は以下のメリットをもたらします。

- バリューチェーン全体にわたる地域雇用の創出。
- 日本との長期的な貿易関係の構築。これは州政府に入る経常収益を促すこととなります。

ハンター地域の原料に関する分析

こうした輸出経済の構築を促す上で重要な要素となるのが、安価な再生可能エネルギーへのアクセスです。「P2Xハブ」は約3.8 ktの水素を製造するのに年間約233 GWhのエネルギーが必要となります。

当地域のP2Xエネルギー需要を満たすために、エピュロン社が建設中のボウマンズ・クリーク風力発電所(風力タービン60基で出力約300 MW)を活用することもできます。

水素を製造するには89 MW、また、アンモニア製造プロセスにはさらに122 MWの風力発電容量が必要となります。合計すると、この

ハンター地域における輸出ハブ構築の実現可能性に関する評価

表5:ハンター地域における水素輸出ハブ構築を促す主な要素に関する評価

基準	現状	評価
P2X製品の必要性	✓	NSW州政府は「グリーンアンモニア」輸出経済の構築においてオリカ社などの企業を支援することができます。日本の現在のアンモニア輸入需要の10%を当面の目標とするのが望ましいでしょう。これには年間約21 ktのアンモニアが必要となります。
P2X製品のオフテイカーである重工業	✓	日本政府は「水素ロードマップ」の中で、火力発電所で混焼させるための燃料として「グリーンアンモニア」を輸入していきたいとの意向を示しています。
当地域における再生可能エネルギー資源	✓	2025年までに操業開始予定のボウマンズ・クリーク風力発電所の発電容量は300 MWとなります。年間約21 ktの「グリーンアンモニア」を製造するのに必要とされる3.8 ktの水素を製造するには、この発電容量の70%が必要となります。
「P2Xハブ」の再生可能エネルギー供給事業者	!	データ未公開。注:ニューイングランドと中西部オラナの再エネゾーンはこのハブに再生可能エネルギー資源を提供することができます。
原料の利用可能性ー水	✓	約3.8 ktのアンモニア製造用グリーン水素を製造するには、38 MLの水が必要となります。ハンター地域のトマゴダムはこの需要に対処しやすい格好の場所にあります。なお、当地域は海岸に近いため、海水も利用することができます。

風力発電所の発電容量の約70%をクーラガン島で必要とされるアンモニアの製造にあてる必要があります。

水の必要性

ハンター地域の水需要は、グラハムズタウン、トマゴ、チチェスターという3つの大型ダムによって支えられています。港湾施設に最も近い場所にあるのはトマゴダムで、現在の貯水容量は54 GLです。約3.8 ktの水素を製造するためには約37 MLの水が必要となり、これは同ダムの貯水容量の0.6%に相当します。なお、ハンター水処理施設で処理された適切な廃水を利用できる可能性も考えられます。ハンター地域は海岸に近いため、当地域のP2X経済を支えるために、将来的には海水を淡水化して利用することも可能です。

ハンター地域にとってのさらなる機会

ハンター地域は鉱山、鉱物、製鉄、製錬分野における数々の有名企業を擁しており、P2X燃料を使った脱炭素化の機会をもたらしています。

BHP社のマウントアーサー炭鉱は燃料電池で動く採掘用の軽量機器や重機へ移行していく可能性があります。これらは、操作性に関しては化石燃料で動く機器と同じ柔軟性が備わっていながらも、運転時に炭素を一切排出しません。世界最大手の鉱業会社の1社であるアングロ・アメリカン社は水素を燃料とする鉱山トラックを2021年に配備する準備を進めています。¹⁷⁷

BHP、ヤンコール、グレンコア、センテナリアル・コール、ピーボディ、トマゴといった企業の事業を化石燃料型の採掘機器からP2X燃料で動く低炭素の代替機器へ切り替えさせるインセンティブプログラムの導入は、NSW州政府にとって、鉱業部門を低炭素経済へと徐々に移行させていく絶好の機会となります。

ハンター地域における日本向けアンモニア輸出ハブ構築に関するプレ・フィージビリティ評価

表6:ハンター地域における水素輸出ハブ構築に関するプレ・フィージビリティ評価

ハンター地域における日本向けアンモニア輸出ハブ構築に関するプレ・フィージビリティ評価	
原料に関する要件	
固定項目	値
水素需要	年間 3.8 kt
エネルギー需要	233 GWhpa
水需要	年間37.8 ML
風力発電所の設備利用率	30%
風力発電所の発電容量	235 MW
必要な水電解容量	26.7
「グレー水素」の調達価格	1 kg当たり2ドル
「ブルー水素」の調達価格	国家水素ロードマップはブルー水素(水蒸気メタン改質法とCCS)の製造コストを1 kg当たり2.27~2.77ドルとしており、本書では比較のために平均製造コストを1 kg当たり2.5ドルと想定しています。
「グリーン水素」の推定調達価格	1 kg当たり4.98ドル
P2X技術の推定コスト概要	
設備投資額 (CAPEX) 合計	1,730万ドル
(10 MW規模の水電解装置のCAPEXを1 kW当たり750ドルとし、容量が10倍増加することに10%低下)	
総運営費 (OPEX)	年間1億4,330万ドル
フィージビリティ評価の推定結果	
「グレー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg当たり2.98ドル
「ブルー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg当たり2.48ドル
プロジェクトの実現に求められる電力価格	
現在の電力価格	1 MWh当たり69ドル(設備利用率30%での風力の均等化発電原価)
ハンター地域のクリーンアンモニア輸出施設にとって「グリーン水素」が「グレー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	1 MWh当たり2ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり2,000ドルの場合) 1 MWh当たり10ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり1,500ドルの場合) 1 MWh当たり17ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり1,000ドルの場合) 1 MWh当たり21ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり750ドルの場合) 1 MWh当たり25ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり500ドルの場合)
ハンター地域のクリーンアンモニア輸出施設にとって「グリーン水素」が「ブルー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	1 MWh当たり11ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり2,000ドルの場合) 1 MWh当たり18ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり1,500ドルの場合) 1 MWh当たり25ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり1,000ドルの場合) 1 MWh当たり29ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり750ドルの場合) 1 MWh当たり33ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW当たり500ドルの場合)

5.5. パークス地域

パークス地域には盛況な鉱業部門と農業部門があることから、「第2段階P2Xハブ」を構築する重層的な機会があります。さらに、この地域における新たな「貨物ハブ」の誕生はP2X合成燃料産業の発展を支える格好の足掛かりとなります。

P2X経済は州地方部における雇用創出の機会を促し、民間部門の投資を刺激し、州全体の脱炭素化を推進することから、NSW州における「P2Xハブ」の構築は、州政府が掲げている「経済活性化特別区域」の主要目標に対処するものです。³⁶

パークスは再エネゾーン (REZ) である中西部オラナの中心に位置する地域です。¹⁷⁸ NSW州政府は石炭火力発電からの移行を円滑に進めるために、クリーンエネルギーの送電インフラへの導入を押し進めるよう、州内に5つの主要再エネゾーンを設けています。この再エネゾーンは今後5〜10年で3 GWの再エネ発電容量を導入するものと見られており、州の低炭素社会への移行を後押ししています。こうした安価な再エネ由来電力へのアクセスはNSW州におけるP2X経済の基盤となるでしょう。

パークス地域の原料に関する分析

再エネゾーンのインフラの大半は開発の初期段階にあるため、パークス地域における「第2段階P2Xハブ」の構築に関する「基本シナリオ」の設計にあたっては、完了間近のプロジェクトをベースにしています。

189 MW規模の太陽光発電所から生み出される発電容量は395 GWhに達する可能性があることから、現在、カナディアン・ソーラー社が建設中のサントップ太陽光発電所は「P2Xハブ」に電力を供給するのに理想的な再生可能エネルギー施設になると見られます。¹⁷⁹ この発電所は2021年第3四半期に稼働開始となる予定で、その後数カ月でフル稼働していくと見られてます。この発電所から生み出される再生可能エネルギーのすべてが水素の製造に使われることになれば、パークス地域では年間約6.4 ktの水素を製造することができます。

年間6.4 ktの水素を製造するためには約64 MLの水が必要となり、これはエンデバーダム湖 (現在の貯水容量は1.8 GL) から調達することができます。¹⁸⁰ この場合、このダムの貯水容量の4%がグリーン水素の製造に毎年使われることになります。

しかし、この地域では10年ごとに湯水の懸念が生じるため、パークス地方自治体は水の消費量に関して強い権限を有しています。このことから、エンデバーダム湖が危険水位に達したというシナリオの下、州内にある他の2つの主要な貯水池 (パレンドンダム¹⁸¹とワイアンガラダム¹⁸²) から水を調達する可能性に備えた緊急時対応計画を策定しておく必要があります。なお、エンデバーダム湖の現在の貯水率は80%で、近年はこの水準を保っています。これらの水源に加え、当地域の塩水帯水層を水原料のために利用できる機会もあります。

「第2段階P2Xハブ」の機会－内陸貨物鉄道向け燃料

パークス地域はオーストラリアの東海岸部と相互連結するのに理想的な機会をもたらすため、NSW州政府は「全国物流ハブ」の構築に向け、パークス地域の主要目標を設定しています。パークス地域で現在進められているプロジェクトのひとつが、メルボルンとブリスベンを結ぶ「内陸貨物鉄道」の開発です。内陸貨物鉄道は、現在は一般道や高速道路を使って輸送されている貨物の負担を減らすために開発が進められています。¹⁸³ 上記区間の貨物輸送量は2030年までに32百万トンに達すると見られており、オーストラリア鉄道線路会社 (ARTC) が作成したビジネスケースは陸上輸送から鉄道輸送への切り替えによって35〜43%のコスト削減が実現できると示しています。¹⁸³

国内の鉄道産業では主にディーゼルが燃料として使用されており、2012年における使用量は10億リットルに上ります。¹⁸⁴ ジメチルエーテル (DME) はディーゼルとの混合燃料として、ますます検討されるようになりつつあります。DMEを最大13%混合したディーゼル燃料を導入できるように現行のディーゼルエンジンを改造することもできます。¹⁸⁵ DME混合燃料は、鉄道産業にとって厄介な課題となっている硫黄酸化物 (SO_x) やNO_xなどの微量の排出物を削減することから、燃焼時のメリットがあります。さらに、DME混合燃料の熱効率は燃料効率を高めます。

DMEはメタノールを中間原料として製造される主要製品です。低炭素メタノールは、**セクション3.5**で説明したように、CO₂と「グリーン水素」との反応によって製造されます。メタノールの脱水が行われる第2段階の反応でDMEが生成されます。現在の工業プロセスは、反応に二元機能触媒を用いるひとつのプロセスにおいて、これらの反応を促しています。¹⁸⁶

内陸貨物鉄道は現在、建設中のため、この鉄道の消費データはまだ明らかにされていません。よって、以下の表を基に予想シナリオを作成していきます。

表7:内陸貨物鉄道プロジェクトのDME混合ディーゼル燃料に関する基本シナリオの主要データ。

項目	数値
平均鉄道燃料効率 (km / L)	0.06 ¹⁸⁷
内陸貨物鉄道の往復距離 (km)	3,400 ¹⁸⁸
DMEのディーゼル燃料への混合率 (%)	13
1往復に必要なDME (kg)	15.5
1往復分のDME製造に必要なメタノール (kg)	25.4

基本シナリオでは、新たに敷設される内陸貨物鉄道の線路を使って、2日おきに10本の列車が往復運行する、あるいは1列車あたり往復運行を年間約180回行うと想定しています。これには年間約28トンのDMEが必要となり、その製造には年間約45トンのメタノール (年間約9トンの水素、約63トンのCO₂) が必要となります。本プロジェクトに必要な再生可能エネルギーは約530 MWhとなります。これはNSW州政府にとって、貨物鉄道を徐々に脱炭素化していくのを支援できる機会となります。

「第2段階P2Xハブ」の機会－NSW州におけるメタノール輸出経済の構築

パークス地域において合成化学品の輸出経済を構築することは、P2X技術を興味深い形で活用することになる可能性もあります。メタノール製造は、炭素回収および再生可能エネルギーが化学合成産業と結びつくための格好の手段となります。パークス地域では、サントップ太陽光発電所からの発電容量だけを使って年間約34キロトンのメタノールを製造することができます。これはさらに、年間約46.6キロトン分のCO₂の有効利用にもつながります。

メタノール経済はアジア市場で着実に拡大しつつあり、主にホルムアルデヒドや酢酸の製造用途、また、最近ではガソリンとの混合燃料としての用途があります。日本は自国の化学産業を脱炭素化するために組み込む物質として「グリーンメタノール」の利用を増やしています。¹⁸⁹ 2020年における世界のメタノール輸入量のうち60%は中国が消費したものであることから、¹⁹⁰ 中国も「グリーンメタノール」輸出先の選択肢のひとつです。2020年、中国はメタノールを約12,000 kt輸入しました。最近における貿易摩擦を踏まえると、中国とオーストラリアの貿易関係はP2X経済にとって最良の出発点とはならないかもしれませんが、将来的な選択肢になるかもしれません。

P2Xハブの機会－NSW州ガス供給網への水素ガス混合

水素のガス混合は再生可能エネルギーをガス用途に組み込むためのセクターカップリング手段として世界中で検討されるケースが増えています。天然ガスによる発電は、グリッドを通じて供給される再生可能エネルギーの不安定な出力を補うエネルギー源として利用されています。太陽光や風力といった再生可能エネルギー資源は1年間のうち15〜40%しか活用できないことから、電力需要をヘッジするために、ガスによる発電が行われます。

2020年におけるNSW州の天然ガス消費量は約1,400 PJとなっており、今後10年間で約3%増加するものと見られています。¹⁹¹ 水素と天然ガスの混合はNSW州政府にとって、ガス供給網を徐々に脱炭素化していく機会となります。

水素の混合率の上限および最適な混合率を特定するため、また、既存のガスインフラを通して混合ガスを供給するのに必要となる改造を把握するために、世界各国で研究が進められています。また、天然ガスは体積当たりのエネルギー密度が水素の約3倍あるため、水素と天然ガスの混合は他のさまざまな課題も生み出します。

さらに、合成した混合ガスを均質化して安定した発熱量を確保するためには、混合設備のインフラも必要です。

本書では、天然ガスとの3つの水素混合シナリオ (水素混合率5%、10%、15%) を基に、州全域でガス混合事業を促すために必要な原料を算出していきます。

NSW州は現在、年間37 GLの天然ガスを消費しています。天然ガスは体積当たりのエネルギー密度が高いため、水素と天然ガスの混合によって高位発熱量 (HHV: 本来含まれている水分および生成した水分が凝縮した状態にある場合の燃料燃焼から放出される熱量) は低下します。したがって、同じエネルギー出力を得るためには、より多くの混合ガスが必要となります。**表8**は、天然ガスの高位発熱量の変化を、水素と天然ガスを混合したものと比較して示しています。**表9**は、水素を混合することにより、天然ガスの消費量がどの程度減少するかを示しています。

表8:NSW州政府の導入オプションとなり得る3つの混合シナリオ (水素混合率5%、10%、15%) における高位発熱量。

ガス	高位発熱量 (MJ / L)
天然ガス	約0.038
水素ガス	約0.013
水素ガス5%と天然ガス95%の混合	約0.036
水素ガス10%と天然ガス90%の混合	約0.035
水素ガス15%と天然ガス85%の混合	約0.034

表9:NSW州政府向けの3つの水素混合シナリオにおける天然ガス消費量の減少率。

ガス	天然ガス消費量の減少率
水素ガス5%と天然ガス95%の混合	約1.8%
水素ガス10%と天然ガス90%の混合	約3.6%
水素ガス15%と天然ガス85%の混合	約5.7%

NSW州でのこの3つの水素混合の基本ケースシナリオは、エネルギー容量の需要から判断すると、パークス地域では現時点では実現可能ではありませんが、5つの再エネゾーンで分散型の水素混合モデルを採用すれば、近い将来、水素の混合を視野に入れることもできるでしょう。ガス供給網にグリーン水素を組み込む上で必要となる主な原料を**表10**に示しています。

表10: NSW州全域でガス混合を促すために必要となる水素および再生可能エネルギーの量。

シナリオ	水素需要 (kt/年)	再エネ発電量 (GW)	水需要 (GL yr ⁻¹)
水素ガス5%と天然ガス95%の混合	約173	約5.1	約1.7
水素ガス10%と天然ガス90%の混合	約359	約10.6	約3.6
水素ガス15%と天然ガス85%の混合	約558	約16.5	約5.6

注: NSW州のガス供給網へのグリーン水素の混合を検討するにあたっては、原料、特に水に関するより慎重な分析が求められます。塩水帯水層や廃水の利用機会についても詳しく検証していく必要があります。また、現在の再エネゾーン計画は、必要な規模のグリーン水素を製造するには十分ではないと見られます。そのため、本書では、「内陸貨物鉄道」および「メタノール輸出経済」のケーススタディについてのみ実現可能性評価とプレ・フィージビリティ評価を実施していきます。

パークス地域における内陸貨物鉄道向けP2X燃料の製造に関する実現可能性評価

表11: パークス地域におけるP2X燃料の製造を促す主な要素。

基準	現状	評価
P2X製品の必要性	✓	DMEは鉄道用ディーゼル燃料に最大13%まで混合して利用することができます。DMEはメタノールの副生物です。
P2X製品のオフテイカーである重工業	✓	現在、メルボルンからブリスベンまでの貨物輸送向けに建設が進められている「内陸貨物鉄道」は、P2X技術を用いて製造した混合燃料のオフテイカーとなる可能性を秘めています。現在の基本シナリオは10本の列車(1列車あたり年間180回の往復運行)を支えるよう設計されています。
当地域における再生可能エネルギー資源	✓	パークス地域に建設中のサントップ太陽光発電所は本プロジェクトにとって理想的な太陽光電力供給源となります。本プロジェクトで必要となる太陽光エネルギーはわずか約530 MWhです。
「P2Xハブ」の再生可能エネルギー供給事業者	!	※エネルギー供給事業者を本プロジェクトと結びつけるためには、パートナーが必要となります。
原料の利用可能性ー水	✓	本プロジェクトには年間約90 MLの水が必要となり、これは1.8 GLの貯水容量があるエンデバーダム湖から調達することができます。

パークス地域における内陸貨物鉄道向けP2X燃料の製造に関するプレ・フィージビリティ評価

表12: パークス地域におけるP2X燃料の製造に関するプレ・フィージビリティ評価。

パークス地域における内陸貨物鉄道向けP2X燃料の製造に関するプレ・フィージビリティ評価	
原料に関する要件	
固定項目	値
水素需要	年間9 t
エネルギー需要	年間530 MWh
水需要	年間90 ML
太陽光発電所の設備利用率	24%
太陽光発電所の発電容量	189 MW
必要な水電解容量	60 kW
「グレー水素」の調達価格	1 kg 当たり2ドル
「ブルー水素」の調達価格	国家水素ロードマップはブルー水素(水蒸気メタン改質法とCCS)の製造コストを1 kg 当たり2.27~2.77ドルとしており、本書では比較のために平均製造コストを1 kg 当たり2.5ドルと想定しています。
「グリーン水素」の推定調達価格	1 kg 当たり4.46ドル
P2X技術の推定コスト概要	
設備投資額(CAPEX)合計	約6万ドル
(10 MW規模の水電解装置のCAPEXを1 kW 当たり750ドルとし、容量が10倍増加することに10%低下)	
総運営費(OPEX)	年間1万4,000ドル
フィージビリティ評価の推定結果	
「グレー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg 当たり2.26ドル
「ブルー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg 当たり1.96ドル
プロジェクトの実現に求められる電力価格	
※現在の電力価格	1 MWh 当たり57ドル(設備利用率24%での太陽光の均等化発電原価)
パークス地域のP2X燃料充填施設にとって「グリーン水素」が「グレー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	実現不可 (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり2,000ドルの場合) 1 MWh 当たり3ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,500ドルの場合) 1 MWh 当たり12ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,000ドルの場合) 1 MWh 当たり17ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり750ドルの場合) 1 MWh 当たり22ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり500ドルの場合)
パークス地域のP2X燃料充填施設にとって「グリーン水素」が「ブルー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	実現不可 (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり2,000ドルの場合) 1 MWh 当たり11ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,500ドルの場合) 1 MWh 当たり21ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり1,000ドルの場合) 1 MWh 当たり26ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり750ドルの場合) 1 MWh 当たり31ドル (水電解装置のCAPEXが1 kW 当たり500ドルの場合)

パークス地域におけるメタノール輸出経済の構築に関する実現可能性評価

表13: パークス地域におけるメタノール輸出経済の創出を促す主要要素

基準	現状	評価
P2X 製品の必要性	✓	メタノールはホルムアルデヒドや酢酸の化学合成の基礎原料として利用されています。化学産業を脱炭素化する上での基礎原料として「低炭素メタノール」の需要が高まっています。
P2X 製品のオフテイクである重工業	✓	メタノールは化学合成の基礎原料としてアジア市場で需要が拡大しています。日本は「低炭素メタノール」の主な消費国で、中国は世界最大のメタノール輸入国です。
当地域における再生可能エネルギー資源	✓	パークス地域に建設中のサントップ太陽光発電所は本プロジェクトにとって理想的な太陽光電力供給源となります。189 MW 規模のこの発電所は年間約 34 kt のメタノール (中国の年間輸入量の 0.28%) 製造を支えることができます。
「P2X ハブ」の再生可能エネルギー供給事業者	!	※エネルギー供給事業者を本プロジェクトと結びつけるためには、パートナーが必要となります。
原料の利用可能性ー水	✓	本プロジェクトには年間 64 ML の水が必要となり、これは 1.8 GL の貯水容量があるエンデバーダム湖から調達することができます。



パークス地域におけるメタノール輸出経済の構築に関するプレ・フィージビリティ評価

表14: パークス地域におけるメタノール輸出経済に関するプレ・フィージビリティ評価

パークス地域におけるメタノール輸出経済の構築に関するプレ・フィージビリティ評価	
原料に関する要件	
固定項目	値
水素需要	年間 6.4 kt
エネルギー需要	年間 395 GWh
水需要	年間 64 ML
太陽光発電所の設備利用率	24%
太陽光発電所の発電容量	189 MW
必要な水電解容量	45 MW
「グレー水素」の調達価格	1 kg 当たり 2 ドル
「ブルー水素」の調達価格	国家水素ロードマップはブルー水素 (水蒸気メタン改質法と CCS) の製造コストを 1 kg 当たり 2.27~2.77 ドルとしており、本書では比較のために平均製造コストを 1 kg 当たり 2.5 ドルと想定しています。
「グリーン水素」の推定調達価格	1 kg 当たり 4.22 ドル
P2X 技術の推定コスト概要	
設備投資額 (CAPEX) 合計	2,840 万ドル
(10 MW 規模の水電解装置の CAPEX を 1 kW 当たり 750 ドルとし、容量が 10 倍増加することに 10% 低下)	
総運営費 (OPEX)	年間 2,400 万ドル
フィージビリティ評価の推定結果	
「グレー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg 当たり 2.22 ドル
「ブルー水素」と「グリーン水素」との現在の価格差	1 kg 当たり 1.72 ドル
プロジェクトの実現に求められる電力価格	
現在の電力価格	1 MWh 当たり 57 ドル (設備利用率 24% での太陽光の均等化発電原価)
パークス地域のメタノール輸出にとって NSW 州の「グリーン水素」が「グレー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	1 MWh 当たり 3 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 2,000 ドルの場合) 1 MWh 当たり 11 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 1,500 ドルの場合) 1 MWh 当たり 18 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 1,000 ドルの場合) 1 MWh 当たり 21 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 750 ドルの場合) 1 MWh 当たり 25 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 500 ドルの場合)
パークス地域のメタノール輸出にとって「グリーン水素」が「ブルー水素」に対抗できる競争力を持つために求められる電力価格	1 MWh 当たり 3 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 2,600 ドルの場合) 1 MWh 当たり 11 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 2,000 ドルの場合) 1 MWh 当たり 19 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 1,500 ドルの場合) 1 MWh 当たり 29 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 750 ドルの場合) 1 MWh 当たり 32 ドル (水電解装置の CAPEX が 1 kW 当たり 500 ドルの場合)

5.5. 水素貯蔵と輸送の機会

5.6. その他の機会

5.6.1.NSW州地方部の新興技術地区

セクション4で示したように、NSW州はP2Xエコシステムにおけるイノベーション豊富な環境から恩恵を受けています。これらの技術の多くは商業化間近の段階にあり、今後10年のうちに国内市場に組み込まれていくものと見られます。

NSW州の地方経済はこうした企業が発展する上で最適な出発点を提供してくれます。新興企業にとって大きな負担となる借地や労働力などのコストが、大都市よりも安価だからです。

NSW州政府が中心となって、地方産業による新興P2X技術の導入／支援や、こうした新興産業による州地方部への移転を奨励するような地方産業と新興産業とを結びつける機会を生み出すこともできます。

リベリナ地域における農業廃水のクリーンエネルギー化

switch2社は商用廃水電解システムを2024年までに市場投入することを目指し、事業規模を急速に拡大しています。このスタートアップ企業は、農業廃水を水素に変換させることにより、多くの農産業にとって、処理にコストがかかる廃水を有効活用し、循環経済の構築を実現させるという独自の事業を展開している企業として位置づけられています。

この「循環水素」は「再生可能エネルギー電子」に関する不安定性の制約を打破することになるため、農業部門にとって独自の機会をもたらします。農業現場において、余分な太陽光を水素に変換させることができ、その水素を燃料電池車（トラクター、トラック、フォークリフト）の基礎燃料やボイラー用熱源として、あるいはエネルギー貯蔵として利用することができます。このように水素を循環活用すれば、これらの農家は「オフグリッド」の状態になれることから、送電網による電力／ガスの料金変動に対する「独自のヘッジ」手段を農業部門に与えるものになります。また、これはNSW州にとって、送電網の負荷管理や廃水処理を行う上での素晴らしい選択肢となります。

switch2社やハイドジーン・リニューアブルズ社（その他のスタートアップ企業を含む）の事業を開始するのに有望だと思われる地域はリバリーナおよびワガワガ／モーリー経済活性化特別区域です。これらの地域では、ブドウ、サトウキビ、米、野菜などの農業が行われており、廃水電解技術に最適な原料があります。2018～19年における当地域の廃水使用量は220 GLでした。使用量のリサイクル率を75％と仮定した場合、年間約2,750 ktの水素を製造するのに十分な量となります。

リバースサプライチェーンを支える革新的な組み合わせ
再エネ由来水素の製造とLAVO社の水素吸蔵合金技術、もしくはアーデント社の地下貯蔵技術を組み合わせれば、大規模な水素貯蔵が可能です。こうした組合せはNSW州で「リバースエネルギー／化学品サプライチェーン」を生み出す上で重要な要素となるでしょう。

農業部門は従来から「資源の実質の消費者（資源を生み出すより消費する量が多い）」と見なされているため、これは農業部門にとっては特に朗報です。廃水を有効活用して水素を製造することによって、逆に資源の実質の生産者になりえます。

LAVO社の水素吸蔵合金、もしくはアーデント社の地下貯蔵技術と再エネ由来水素の製造を組み合わせれば、「循環水素」を最大限利用できるようになります。両社は従来の貯蔵技術に破壊的な影響を与える代替技術をもたらしています。

- LAVO社の技術により、エネルギー貯蔵規模を最大化することができます。

- アーデント社の技術により、水素の貯蔵コストが最小限に抑えられます。

なお、こうしたビジネスモデルは本書で取り上げた技術に限られているわけではありません。

NSW州の過剰送電網に対する「ヘッジ」としての水素
500 kW未満のシステムを組み込んだ「分散型ハブ」を構築する上で新興のP2X技術を導入することもできます。これらのシステムは非常に汎用的な機能を有しています。つまり、運用にあたって、さまざまな原料特性を活かすことができ、これは、余った再生可能エネルギーを「循環水素」の製造に向け直す上で極めて重要となります。スマートメーターを補完する形でこうしたシステムを使えば、エネルギー運用事業者はシステムを稼働させるべきタイミングを指示できるようになるでしょう。また、これらの資産は、地方自治体が保有、運用するというのが意図するところになります。余分な再生可能エネルギーを大量に保有している州内の各地域にこうしたハブを分散させる形で置くことが可能です。

製造した水素はその後、低炭素輸送車両（バス）や現地向けのガス混合といった地方自治体のエネルギー需要に役立てることができます。このプロジェクトは脱炭素化の機会を深く根付かせるものであると同時に、NSW州政府が長期的な視点で送電網管理の問題に取り組む（供給調整など）のを支える上で極めて重要になってくるかもしれません。

メタン製造に向けたCO₂の有効活用
APAグループとサザングリーンガス社は、セメント、鉱業、食品加工などの産業向けに、大量に排出されるCO₂を合成メタン製造に活用するソリューションを開発しました。両社が開発したプロセスは大気から回収したCO₂を直接メタンに変換することができるものです。

この技術は現在、年間27 MLの合成メタンを製造することを目指した大規模な実験が行われています。試験プラントはクイーンズランド州のウォランビーラにあるガスハブに建設される予定で、合成したメタンは既存のガス供給網に注入されます。

この技術の大規模化が実現すれば、カーボンフットプリントの削減課題に直面している産業にとって「分散的低炭素循環ループ」を生み出すことができます。熱燃料産業は天然ガスからの転換がいまだに経済的な制約となっている主な部門のひとつです。そのため、「分散的低炭素循環ループ」は、今後、NSW州が排出量ゼロ経済へと移行していく際の間ステップとしてのメリットがあります。中西部オラナの乳製品産業やペットフード産業などは、この新たなソリューションを導入する短中期的な市場として最適な産業です。

さらなる機会
HEROをはじめとする技術は水素の燃焼効率を向上させることで化石燃料からの転換を促す独自の機会をもたらします。この技術はNSW州の熱燃料産業の長期的な脱炭素化にいてますます大きな役割を果たしていくでしょう。NSW州の鉱業部門は、この技術の規模を拡大し、長期的に導入していく部門として理想的です。

中期的に見ると、UNSWのハイブリッドアンモニア技術は集中型アンモニア製造から分散型アンモニア製造への移行を促すものとなります。現状ではハーバー・ボッシュ法の小規模な導入について実現可能性は限られており、これはアンモニア業界にとって大きな壁となっています。UNSWのハイブリッドアンモニア技術の効率性を最適化し、規模を拡大する上でさらなる進展が見られれば、NSW州の「再生可能エネルギー電子」がさらに浸透していくこととなります。

これらの技術を大規模化し、州内に導入することによって、P2X技術における市場リーダーとしてのNSW州の地位が確立するでしょう。これによって、NSW州はクリーンエネルギーイノベーションの「先導役」となることができ、州政府に經常収益がもたらされ、引き続き地域市場に雇用が生まれることとなります。

5.6.2.NSW州北部におけるバイオマスを使った再エネ由来水素製造の機会

NSW州のノーザンリバーズ地域には、クラレンス川、リッチモンド川、ツイード川が支える貯水池と肥沃な渓谷があり、北はツイードヘッズ（クイーンズランド州との境界に隣接）から南はクラレンス川貯水池まで広がっています。およそ30万人の人口を擁し、320億ドルの経済活動が営まれている当地域は10万7,411人分の雇用を支えています。

ノーザンリバーズ地域では、ケープ・パイロン・マネジメント社（CBM）がコンドンとブロードウォーターの2カ所で30 MWのバイオマス発電所を運営しています。これらの発電所は年間350 GWhの電力を生み出し、農業、水産業、観光業をはじめとする地元産業を支えています。

いずれの発電所も地元の製糖所に付属する形で設置されており、全国電力市場（NEM）に通年ベースロード電力を提供しています。また、砂糖の精製を行う時期には、全国電力市場に供給する電力に加えて、2つの製糖所が砂糖の精製に使用する中圧／低圧蒸気も生成しています。CBMから2つの製糖所に供給される電力と蒸気は地元の製糖産業と関連する2,500人分の雇用にとって欠かせないものです。

CBMは現在、バイオマスを使ったグリーン水素の製造について実現可能性を検証しており、地方部における輸送車両や物流の補給燃料の選択肢としてこの水素を活用できることを実証しようと目指しています。これらの発電所は主要輸送・産業ルート上に位置しています。ノーザンリバーズ地域における補給燃料の鍵となる選択肢がもたらされれば、これはNSW州全域で輸送に利用できる水素ネットワークの拡大を後押しすることにもなるでしょう。現在、同様のプロジェクトの実証試験を行っている企業のひとつがニュージーランドのヒリンガ社で、ニュージーランド全土の商業、工業、農業ルートを支えることを目指しています。

CBMの試験拠点はNSW州の地方部全域に小規模な水素製造施設を設置するためのモデルを確立する上で絶好の機会となります。現在の試験はバイオマスに重点を置いていますが、廃水を含むさまざまな燃料をグリーン水素を製造する電力源として活用できるかどうかについても研究することができます。このプロジェクトは、他の地方自治体に対しても、開発された技術と各自が有しているバイオマス（家庭ごみ、埋立地ガス、植物性廃棄物など）を水素製造に活用する道を開き、州全域の輸送ネットワークを支える上で役立つでしょう。また、埋め立てごみを削減するという点においても貢献する可能性があります。

5.6.3. ボタニー港における機会
NSW州の石油化学産業の一大拠点であるボタニー工業団地はボタニー湾の北東側バンクスメドウにあり、ボタニー港に隣接しています。当工業団地で操業中の主な企業には、ケノス社、インドラマ・ベンチャーズ・オキサイズ・オーストラリア社、イクソム社があります。その他にも、エア・リキード・オーストラリア社やエルガス社などの中小企業も軒を連ねています。¹⁹²

操業中の企業
ケノスはオーストラリア最大のプラスチック製造企業で、当工業団地の施設では、ムーンバ・シドニー間エタンパイプラインによってボタニー湾に送られてくるエタンから年間約290 ktのエチレンを製造しながら、オレフィンを生産しています。¹⁹³ 南オーストラリア州ムーンバでは、サントスが天然ガスの処理を行っており、その他の成分からエタンを分離させ、全長1,375 kmに及ぶパイプラインで運ばれます。¹⁹⁴ その後、ボタニー拠点で水蒸気分解、さらなる処理、分留などのプロセスを経て、エチレンが製造されています。¹⁹⁴ このエチレンはその後、Alkathene® もしくは Alkatuff® の生産用として利用されたり、酸化エチレン製造向けにインドラマ・ベンチャーズ・オキサイズ・オーストラリアのプラントに輸送されたり、あるいは、輸出向けにボタニー港に輸送されます。¹⁹⁴

合計では年間88キロトンの低密度ポリエチレン (Alkathene®) が高圧オートクレーブ処理を用いて製造されています。¹⁹³ さらに、UNIPOL™ 気相プロセスを用いて年間100キロトンのリニア低密度ポリエチレンと高密度ポリエチレンが製造されており、これらを組み合わせて Alkatuff® を生産しています。^{194,195} ケノスもボタニー工業団地のユーティリティ設備を提供する役割を担っています。団地内の石炭ボイラー2基と天然ガスボイラー1基は蒸気を生成するためのものです。また、冷却水や廃水処理もその他の立地企業に提供されています。¹⁹⁶ 電力は団地の外から供給されています。

インドラマ・ベンチャーズ・オキササイズのプラントでは、ケノスのプラントで製造されたエチレンとエア・リキードから調達した酸素を原料に酸化エチレンを年間40キロトン製造しています。^{197,198} 酸化エチレンの製造で発生したCO₂はエア・リキード社やBOC社で利用するために輸送されます。酸化エチレンはその後、原料として利用され、水と反応させることでエチレングリコールが年間16,000トン製造されています。¹⁹⁷ また、アルコールと反応させることで年間5,000トンのグリコールエーテル製造にも利用されています。¹⁹⁷ さらに、脂肪族有機化合物と反応させて年間35,000トンの非イオン界面活性剤も製造しています。¹⁹⁷ 当プラントでは、こうしたさまざまな化学製品を製造した後、それらを原料として他の特殊化学製品も製造しており、製品ラインナップは300以上に及びます。¹⁹⁸

ボタニー工業団地の主要企業として最後に紹介するのはイクソムです。同社は2015年にオリカ社から分離し、独立企業となりました。当工業団地にある同社の塩素アルカリ工場では、水銀を使用しない膜技術を用いて海水から得た塩水を電解し、年間31キロトンの塩素を製造しています。^{199,200} 電解の副生物として生成された水素を塩酸バーナー内で塩素と結合させることで年間55,000キロリットルの塩酸を製造しています。¹⁹⁹ また、塩素を鉄および塩化第一鉄と反応させることで年間21,200トンの塩化第二鉄を製造しています。¹⁹⁹ 苛性・次亜塩素酸ソーダは年間36,000トン規模で製造されています。¹⁹⁹

P2X がボタニー工業団地の脱炭素化に果たす役割

ボタニー工業団地における既存事業は長期的に見て持続可能なものではありません。団地内の化学産業は製造の基礎原料として、また、ユーティリティ設備の供給源として石油化学品に大きく依存しています。当団地では、化石燃料由来のエタンが主な製造原料である一方、石油と天然ガスは蒸気を生成するための熱エネルギー源として不可欠なものです。推定では、当団地で製造される製品1トン当たり0.3トンのCO₂が排出されています。¹⁹⁸ プロセスの効率性が向上したことから、この排出量は1996年比で半数にまで低下していますが、今後、化学産業を転換させていくためには、排出量を大幅に削減していかなければなりません。¹⁹⁸

現在、ケノス社によるエネルギー総使用量および現場の温室効果ガス排出量のうち90%超を占めているのが、炉やボイラーで使用される燃料です。²⁰¹ 特に、同社のエネルギーとしての天然ガス使用量 (エチレン製造用エタンを除いたもの) は年間8 PJと推定され、これは2015年におけるアルトナ工場 (年間205キロトン) とボタニー湾工場 (年間290キロトン) を合計した数値です。^{193,202}

各工場の天然ガス使用量をそれぞれのエチレン生産能力に比例させて分割したと控えめに仮定しても、ボタニー工業団地におけるすべてのユーティリティ設備には年間4.69 PJが必要とされます。天然ガスの発熱量と水素の密度を基に推定すると、天然ガスエネルギー源を完全に置き換えるためには、年間9,600トンの水素が必要となります。なお、さらに多くの水素を使用して石炭ボイラーを置き換えることもでき、また、排出量をさらに削減するためには、再生エネルギー由来電力が必要となるでしょう。²⁰¹

ボタニー港からの再生エネルギー由来水素の輸出機会

ボタニー港の2021年5月における化学品取扱量は、TEU (20フィートコンテナ1個を単位としたコンテナ数量) で見ると、輸入が9,141 TEU、輸出が2,304 TEUとなっており、NSW州のバルク化学品の90%に相当します。²⁰³ ボタニー港にある2つの液体バルクバースは現在、精製油、ガス、化学品、ビチューメン用に使われています。²⁰⁴ ボタニー港は年間550万キロリットルの液体バルクやガスを扱っているほか²⁰⁴、近隣工業地区と直結するパイプライン、貯蔵施設 (エルガス社の65,000トン規模の液化石油ガス地下貯蔵施設²⁰⁵など) を備えています。また、ボタニー港発着の鉄道もあります。²⁰⁴

こうした理由から、ボタニー港は水素輸出ハブとしての可能性を秘めています。しかし、この可能性を促していくためには、既存の港湾インフラや隣接する工業に対して大幅な調整を行う必要があるでしょう。例えば、液化水素をそのまま輸出するには、液化施設や極低温に適したインフラの建設が必須となります。また、既存のムーンバ・シドニー間パイプラインをグリーン水素供給源に接続させることも可能です。代替策としては、水素を供給するために南オーストラリア州のムーンバにブルー水素施設を建設する必要があります。²⁰⁶ さらに、アンモニアやメタノールといった液化水素キャリアについては、これらを製造するための新たな現場工業プロセスが必要となります。こうしたさまざまな変更点はボタニー湾地区に環境面や安全面で新たな脅威をもたらす恐れがあり、また、その結果、ボタニー港近くにある人口密集地域の存在がハブ候補地としての適性を弱めることになるかもしれません。

代わりに、既存のインフラや工業を原料と燃料の両方の用途で水素を取り扱うよう方向転換させることがボタニー工業団地の脱炭素化に大きく貢献する可能性もあります。しかし、現在の取扱製品を維持するためには、新たな技術や革新的な技術を使って既存の施設にコストのかかる改良を加える必要があるでしょう。



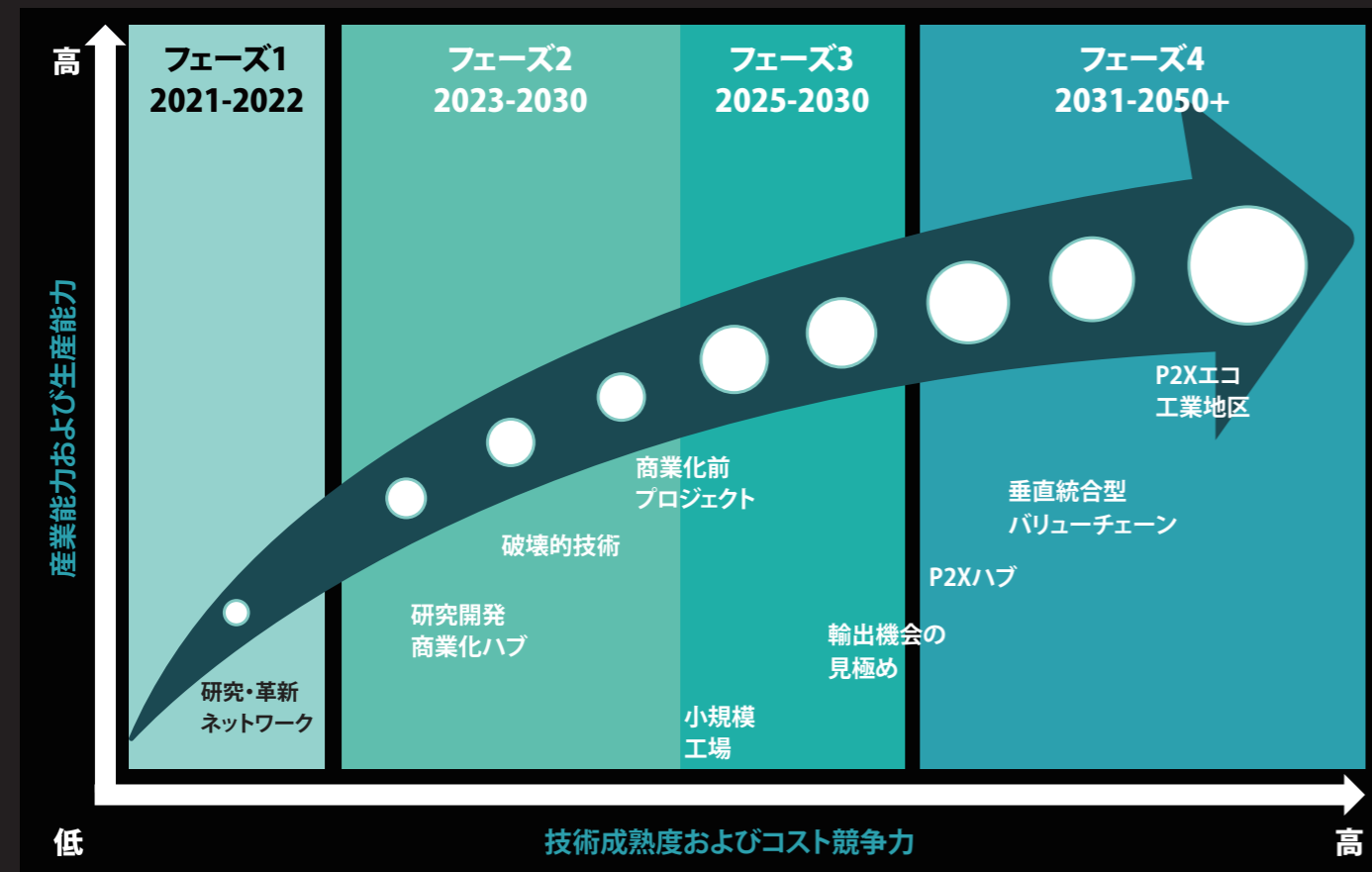
6.NSW州 P2X エコ区域の設置に向けたロードマップ

6.0 NSW州 P2Xエコ区域の設置に向けたロードマップ

NSW州は膨大な経済的、環境的メリットを享受するため、P2X経済を構築する強力なビジネスケースを有しています。NSW州はP2X産業化を先導していくのに有利な立場にあり、成功に必要な要素をすべて備えています。第5章のシナリオ分析は複数のP2Xハブを構築できるNSW州の可能性を示しました。これらのP2Xハブは国内需要を満たし、グローバル市場に輸出できるほどの産業規模の生産能力を有することになるでしょう。こうしたハブの構築は一朝一夕では実現しません。長い時間をかけて技術経路を進み、必要な段階を踏んで能力や生産力を構築していく必要があります。

本書では、プレ・フィージビリティ・スタディの結果およびステークホルダーから得た洞察を基に、NSW州が今後P2X経済を構築していくための一連のステップを記載した4つのフェーズから成るロードマップを提案しています。このロードマップは、研究開発における連携および集团的取り組みから始まり、技術の商業化および需要の集約、最終的には、確実に利益をもたらす技術として産業界で幅広く導入されクリティカルマスに達する、というP2X技術経路を採用しています。ロードマップは図37に示しており、各フェーズで踏んでいくステップを以下に詳述しています。

図37: NSW州におけるP2X経済構築に向けたロードマップ



フェーズ1 (2021~2022年) : 連携および知識共有

1 技術進歩における産官学での連携的な取り組みの中心的な調整役となるNSW州P2X研究・革新ネットワークを創設する

研究・革新ネットワークはイノベーションを支援、統合するコミュニティ、物理的/バーチャルな場や、研究、開発、商業化の専門家集団です。通常、新たな革新ネットワークというのは、新たに発生している問題に対処したり、能力開発や連携的な取り組みに向けて独立したフォーラムを提供するために設立されます。こうしたネットワークがうまく機能すると、革新的な技術・サービスの商業化や普及の加速化、共通の関心を持つ者同士での新たなパートナーシップの構築、産業界や政府に対する実践的なエビデンスに基づく助言の提供、官民投資の誘致、経済的、社会的、環境的な利益の創出といった具体的な成果がもたらされます。

NSW州政府はこれまで、州が高い研究開発能力を有し、新たな産業を育成する上で戦略的に重要な分野において研究・革新ネットワークのモデルを採用してきました。例えば、NSW州主席科学工学官室は先端センシング、防衛、循環経済の分野で革新ネットワークを立ち上げており、また、NSW州計画・産業・環境省は森林火災、エネルギー効率、気候変動の分野で研究ハブを設立しています。成熟したネットワークの中には、研究開発の調整や州に大規模な投資を呼び込むことにおいて成果を挙げているネットワークもあります。例えば、防衛革新ネットワークはNSW州政府から受けた350万ドルの資金を生かし、すでに2,200万ドルを超える研究開発投資を州の革新エコシステムに呼び込んでいます。³¹

NSW州P2X研究・革新ネットワークは組織的な基盤を提供してステークホルダーや関連団体をまとめることにより、技術経路を促すことができるものです。こうした基盤を通して、技術開発者と産業界のエンドユーザーが連携し、技術開発や産業変革にとっての個別の障壁および体系的な障壁に対処するためのソリューションを生み出すことができます。このネットワークは産業界および政府における幅広い「問題保有者」に対し、それ以外の企業や起業家、研究者、ソートリーダー(思想的リーダー)、科学者、エンジニア、投資家、政策立案者を含む幅広い「問題解決者」と連携する機会を提供します。ネットワークが提供するこうした連携・調整サービスは技術経路を促し、将来の産業のために、影響力のある実用的な、破壊的とも言えるP2X技術をもたらすことにもなります。さらに、ネットワークがもたらす公式・非公式のチャネルを通じた知識共有や情報発信は、ステークホルダーが行う研究開発投資の利益を最大化することにもつながる可能性があります。

本プレ・フィージビリティ・スタディの中でステークホルダーに意見を求めた際、NSW州のP2Xステークホルダーは州内での技術開発および能力開発における協力やパートナーシップに高い関心を示しました。こうした機運を捉えるために、40を超える参加者(付録D)が集まったコンソーシアム(NSW州_{P2X})が結成され、ネットワークが広がっています。現在のメンバーは連邦やNSW州の政府機関、スタートアップ企業や中小企業を含む州内産業、州の研究者や技術開発者、世界のP2Xサプライチェーン、多国籍企業、非政府組織で構成されています。このNSW州_{P2X}コンソーシアムはNSW州P2X研究・革新ネットワークの会員基盤を形成しています。このネットワークは、効果的な運用と長期的に持続可能な成長を果たすために、明確な目標、堅固なガバナンス体制、目に見える成果を伴う形で正式なものにできる可能性があります。

フェーズ2 (2023～2030年) : 技術の研究開発および商業化

2 商業化を重視した研究開発プロジェクトに向け、技術開発者およびエンドユーザーに研究インフラ、専門知識、リソースを提供する P2X 研究開発商業化ハブを設置する

研究用の設備、施設、インフラは技術開発や商業化にとって極めて重要です。研究者や開発者が基礎研究を商業化前プロジェクトに変換させるためには、こうしたハード面の整備が欠かせません。将来の P2X 産業に必要とされる優れた研究をもたらすためには、P2X 向けの新たな研究インフラへの投資が不可欠です。これは技術開発者に研究開発の結果の試作品化、試験的製造、評価、検証を行う施設を提供するものです。こうした生産準備や商業化前の試験を通して得られた知識やデータは、技術を産業用に変換させる際の金銭的、技術的な観点におけるリスクを低減させることにもつながります。研究施設はエンジニア、科学者、技術者、会計責任者、プロジェクトマネジャーを雇用し、育成する場となります。こうした高度な技能と専門性を備えた人材は、P2X 分野の産業プロジェクトで活かせるのに十分な経験と専門知識を身につけることになり、州の能力を向上させていくでしょう。さらに、P2X バリューチェーン全体における海外の事業者および機関投資家を NSW 州に呼び込む上での州の P2X 能力を高めるためには、利用しやすくて質の高い研究インフラを整備することが重要となります。研究インフラへの投資は長期的な産官学による協力体制の基礎を築き、P2X 産業の育成においてさらなる連携をもたらすことになるかもしれません。P2X 研究・革新ネットワークを通じて連携やパートナーシップが十分に深まれば、研究開発事業化ハブを構築する上での追い風となります。

3 技術的な経路を促し、世界のバリューチェーンに破壊的な影響をもたらす可能性を秘めた州内で開発された P2X 技術に投資する

「ディープテック」と呼ばれる先端技術のインキュベーション期間は非常に長期にわたり、クリーン技術分野では30年を超えることが一般的です。IEA は「2050年ネットゼロ報告書」の中で、2030年までの排出量削減に向けたクリーン技術の大半はすでに実用化され、現在、市場で利用されていると述べています。しかし、2050年(あるいはそれ以前)までにネットゼロ目標を達成するためには、脱炭素化施策のおよそ半分は、P2X のように現時点ではまだ実証実験／試作品の初期段階にある新興技術によるものでなければなりません。こうした現実には P2X 分野の研究開発を加速させるための官民両方による投資の必要性を引き出しています。NSW 州は P2X 分野で高い研究開発能力を誇っており、すでに知識の蓄積や基礎研究の段階を終えた技術が数多くあります。開発・実証段階(すなわちTRL3～6のレベル)にある P2X 技術に的を絞った投資を行えば、インキュベーション期間を早め、商業化のスケジュールを前倒しして早期に産業に導入できるようになる可能性もあります。第4章で紹介したように、NSW 州およびオーストラリアは世界の動力燃料およびクリーン化学品市場の状況を変えるほどの破壊的な影響力を秘めた P2X 技術を有しています。こうした破壊的な技術が商業化されれば、バリューチェーン全体にわたり新たな製品、サービス、顧客が生み出されることとなります。これは NSW 州にとって、市場をリードしている確立された技術や企業に取って代わる可能性を秘めた地元開発の破壊的な P2X 技術に投資する機会となります。研究開発商業化ハブは研究インフラ、専門知識、リソースを提供する形で、こうした破壊的な P2X 技術の開発を支えるものとなります。

4 事業規模で技術を早期に導入、展開する道を開くためのフィージビリティスタディや実証プロジェクトなどの商業化前プロジェクトを実施する

第3章や付録 A で紹介しているように、P2X 分野では、実証プロジェクトやフィージビリティスタディを含む数多くのプロジェクトが NSW 州(および世界各地)で進行中です。フィージビリティスタディは P2X 技術のエンドユーザーにとっての技術的、経済的な実現可能性に関する初期評価を通して、投資判断におけるリスクを低下させることにもつながります。実証プロジェクトの実施は P2X 技術を管理された研究所環境から実際の産業環境に移すこととなります。こうした商業化前プロジェクトは P2X 技術の商用的導入に向けて、これらの技術を試したり、実証したり、改善できる可能性があります。これによって、本格的な商業化プロジェクトに向けて、技術的、金銭的な側面においてのみならず、ソーシャルライセンス(社会的営業免許)を得る観点からも重要なデータや知識を得ることができます。こうしたプロジェクトを展開する上では、P2X 研究・革新ネットワークや研究開発商業化ハブを通じて確立されたパートナーシップ、インフラ、初期投資が役立ちます。

フェーズ3 (2025～2030年) : 市場整備

5 現地の需要を満たすための P2X の小規模生産に向け、分散型の小規模な製造施設を設置する

商業規模で P2X を導入する NSW 州の動きの中で最初の波になると予想されるのは、小規模な分散型プロジェクトです。フェーズ 2 における商業化前プロジェクトを基にしたこれらのプロジェクトは、生産規模が比較的小規模(水電解装置の容量で言えばおそらく 10 MW 未満)で、動力燃料やクリーン化学品の現地需要を満たすためのものです。地理的に分散しているという特性があることから、これらのプロジェクトは、現在は輸送コストが伴う化石燃料を調達している遠隔地の鉱業や農業に代替エネルギーを供給する理想的なプロジェクトとして位置づけられます。モジュール式のモビリティ設計を行えば、需要に応じて、こうした小規模な製造施設の稼働場所を移すこともでき、また、柔軟な製造を行うこともできます。小規模ゆえに物流の必要性も原料需要も小さいため、環境負荷は最小限で済みます。つまり、承認プロセスが早く、建設・設置スケジュールも短期間で済み、設備投資と運営コストが比較的少額になる可能性があるということです。新たな計画と既存のインフラを活用した小規模製造施設については、いちら建設する形、利用されなくなった設備を改造する形の両方の稼働パターンが想定されます。

6 P2X 製品の輸出機会を見いだして投資に対する信頼を醸成し、長期にわたる大規模生産のオフテイク契約獲得を目指す

NSW 州はエネルギー資源分野において、アジア太平洋地域の主要国と確固たる貿易関係を築いています。日本、韓国、インドネシアをはじめとするこれらの国々の多くは国内の再生可能エネルギー資源に限りがあり、国内経済を脱炭素化するために P2X に対する強い需要を示しています。さらに、シンガポール、ドイツ、オランダ、英国でもグリーン動力燃料やグリーン化学品に対する需要が生まれつつあります。P2X サプライチェーン、ならびに、NSW 州とこれらの P2X 「バイヤー」候補との間にある技術、規制、物流面での関連課題について理解を深めておくことが大規模な生産プロジェクトのリスクを低下させることにつながります。グローバル NSW などの NSW 州政府の貿易や投資に関する取り組みを活用しながら、これらの「バイヤー」政府／企業と P2X 製品の長期契約について交渉すれば、オフテイク契約につながる可能性もあります。これによって、必然的に大規模 P2X プロジェクトのリスクがさらに低下し、その結果、より多くの産業が NSW 州内での P2X 事業開始に踏み切るようになるでしょう。

フェーズ4 (2031~2050年) : 産業展開

7 大規模生産に向けてP2Xハブを構築する

集中型の大規模生産 (水電解装置の容量で数十 MW から GW を想定) に向け、P2Xハブが構築されます。こうしたP2Xハブは第5章で記したように、主要輸送インフラ、低コストの電力を伴う再生可能エネルギー、豊富な原料 (水) を利用することができ、既存の重工業地区や新興の工業地区に隣接している場所にあり、望ましくは、海外市場への輸出の可能性を有している中心拠点です。ハブ・アンド・スポーク方式を採用し、フェーズ2で設置した小規模施設や分散型の小規模P2X生産施設がスポーク (ハブの周辺拠点) に発展して集中型P2Xハブを支える形となります。これらのハブとスポークはP2X製品を継続的に動かし、インフラ、顧客基盤、専門知識、リソースを共有する形で生産性を高めていきます。P2Xハブは地域の需要を満たし、大量の化石燃料に取って代わるのに十分な量の動力燃料とクリーン化学品を製造できる可能性があり、また、輸出を重視した一部のハブでは海外市場への出荷も模索していくでしょう。

8 垂直統合型P2Xバリューチェーンおよび州内の製造能力を構築する

P2Xを利用した再生可能エネルギーによる鉱業は、採掘して出荷するという鉱業・鉱物産業の従来の事業モデル以外を採用するべきでしょう。NSW州は、生産、輸送、利用にわたってP2X産業に関する州内の製造能力を構築する上で州が比較優位を持つ分野を探っていきます。州内の製造能力をバリューチェーンの上流工程にまで高められれば、より幅広い経済的メリットや雇用が生まれるだけでなく、P2X技術、サービス、技能における新たな市場や輸出機会の開拓にもつながります。例えば、P2X生産には、水電解装置、反応器、重要鉱物加工機、圧縮機、分離機、純化装置などのさまざまな機器や機械が必要となります。短期的には、海外のサプライヤーからこれらを輸入できるかもしれませんが、NSW州はこうした技術や機器を州内で製造する能力を開発する可能性を有しています。州内で開発、商業化されたP2X技術は官民両方からの多額の投資やリソースを呼び込むことになるでしょう。先端製造、自動化、センシング、デジタル化の技術分野における高い能力を支えに、NSW州は州に最大の経済的メリットや雇用拡大をもたらすこれらの技術や部品を州内で製造する機会を模索することもできます。

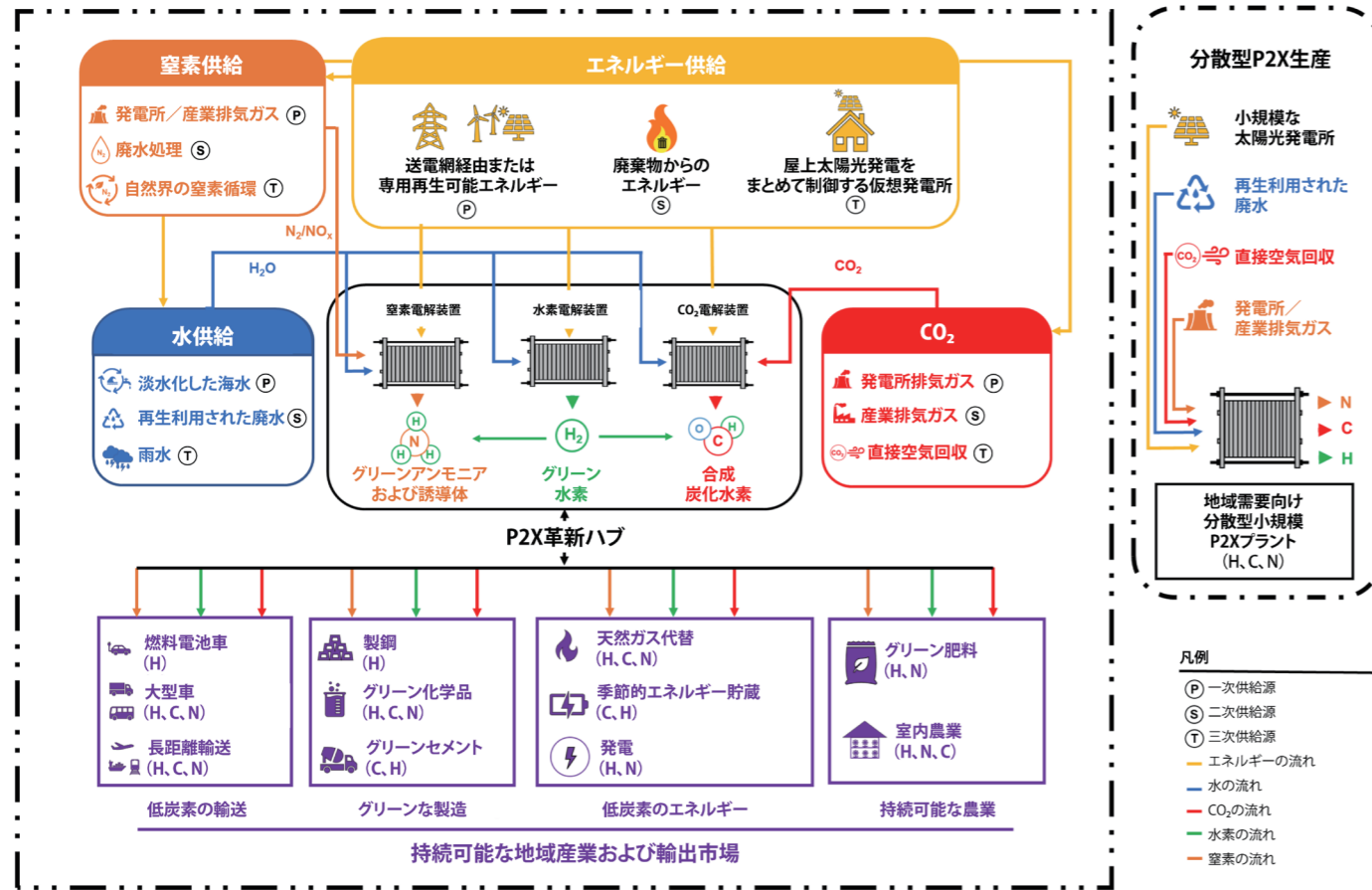
9 P2Xエコ工業地区を設置する

P2Xハブを基盤としたP2Xエコ工業地区はP2Xバリューチェーン全体における産業や企業を誘致して、産業の発展に向け、同一地区内での操業、連携する場となります。これらの地区は、動力燃料生産、グリーンスチール、化学品や肥料の製造といったP2X集約型産業向けに設計されます。これらの重工業はP2Xエコ工業地区の中核的テナントになると見込まれています。生産業者、原料の供給業者、設備メーカーやサービスプロバイダー (水電解装置など)、川下の顧客を含む幅広いP2X産業が地区の誘致対象となります。地区のテナントは低コストのP2X製品、共有インフラ、熟練した労働力を利用することができます。これらの地区はP2X産業の共生によって、生産性の向上やコスト削減を果たせるかもしれません。つまり、ひとつのコミュニティとして包括的で持続可能な発展を果たすために、テナントはP2X製品、サービス、原料、副生物の物理的なやり取りを通じて競争優位性を獲得できるということです。図38に示すように、これらの地区はP2X技術の活用によって、自立して排出量の削減やネットゼロを達成できるだけでなく、エネルギー、工業、運輸、農業部門に大きな経済的メリットや雇用機会をもたらせる可能性もあります。



図38: 提案するP2X地区の図解

P2Xエコ工業地区



付録A: 実施中または発表済みのP2Xプロジェクト

A.1. グリーン水素プロジェクト

表15: 進行中または発表済みのグリーン水素プロジェクト一覧

プロジェクト名	地域	生産能力	現状	P2X原料	投資額	プロジェクトの種類	参考文献
オーストラリア							
ジェメナ社 西シドニー・ グリーンガス・ プロジェクト	NSW州 西シドニー	500 kWの PEM型 水電解装置	建設中 (2021年半ばに 稼働予定)	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	1,500万ドル	実証プロジェクト (天然ガス供給網 への水素ガス注入)	²²
プロジェクトNEO (インフィニット・ ブルー・エナジー社)	NSW州 ハンター・バレー	1,000 MW	プレ・フィージ ビリティ分析 (2027年までに 稼働予定)	水、専用再生 可能エネルギー	予想コスト: 27億ドル	商用プラント (ベースロード電力 発電所)	²⁰⁷
ネオエン・ オーストラリア社 水素スーパーハブ	南オーストラリア州 クリスタルブルック	50 MW	建設中 (2023年第2四半期 に稼働予定)	水、専用再生 可能エネルギー	2,400万ドル	実証プラント (送電網安定化)	²⁰⁸
マーチソン 再エネ由来 水素プロジェクト	西オーストラリア州 カルバリ	不明	開発段階 (試験プラント)	水、専用再生 可能エネルギー	100億ドル (3段階で完了)	商用プラント (シーメンスのPEM 技術を用いて水素を 製造するための5000 MWの太陽光・風力 発電容量)	²⁰⁹
AGIG 南オーストラリア 水素パーク	南オーストラリア州 トンズリー地区	1.25 MWの PEM型 水電解装置	稼働中 (2021年第1四半期 ～)	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	1,140万ドル	商用プラント (シーメンス製のPEM 型水電解装置 Silyzer で製造した水素を ガス供給網に注入)	²¹⁰
グラッドストーン 水素パーク	クイーンズランド州 グラッドストーン	175 kWの PEM型 水電解装置	プロジェクト 開発の最終段階	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	420万ドル (クイーンズランド 州政府からの 助成金170万ドル)	実証プラント (天然ガス供給網 への水素ガス注入)	²¹¹
マレー・バレー 水素パーク	ビクトリア州 ウォドング	10 MWの水 電解装置	開発中	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	3,210万ドル (ARENA再エネ 由来水素導入ファ ンドによる資金)	実証プラント (天然ガス供給網 への水素ガス注入)	^{212,213}
クリーンエネルギー・ イノベーション パーク	西オーストラリア州 ワラダージ	10 MWの 水電解装置	開発中	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	2,870万ドル (ARENA再エネ 由来水素導入 ファンドによる資金)	実証プラント (天然ガス供給網 への水素ガス注入)	^{212,213}

アジア

福島水素 エネルギー研究 フィールド	日本、 福島県	10 MWの 水電解装置	稼働中 (2020年～)	水、専用オン サイト再生可能 エネルギー	2億4,300万ドル	商用プラント (燃料電池車に補給 する水素の販売)	²¹⁴
--------------------------	------------	-----------------	-----------------	----------------------------	------------	---------------------------------	----------------

欧州

H&R エールヴェルケ社 ハンブルク・ ノイホーフ・ プロジェクト	ドイツ、 ハンブルク	5 MWの PEM型 水電解装置	稼働中 (2017年～)	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	1,500万ドル	商用プラント (近隣の製油所が 利用する水素の製造)	²¹⁵
---	---------------	------------------------	-----------------	---------------------------	----------	----------------------------------	----------------

H2フューチャー・プ ロジェクト	オーストリア、 リンツ	6 MWの PEM型 水電解装置	稼働中 (2020年～)	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	2,900万ドル	試験プラント (製鉄向けに シーメンス製の PEM型水電解装置 Silyzer 300を使用)	²¹⁶
---------------------	----------------	------------------------	-----------------	---------------------------	----------	---	----------------

エナジーパーク・ マインツ・ プロジェクト	ドイツ、 マインツ	6 MWの PEM型 水電解装置	稼働中 (2017年～)	水、余剰再生 可能エネルギー	2,600万ドル	試験プラント (シーメンス製の PEM型水電解装置 を使った水素貯蔵)	²¹⁷
-----------------------------	--------------	------------------------	-----------------	-------------------	----------	--	----------------

リンデ社 ロイナ化学 コンビナート	ドイツ、 ロイナ	24 MWの PEM型 水電解装置	建設中 (2022年第3四半期 に稼働予定)	水、送電網に よる再生可能 エネルギー	非公開	商用プラント (ITM製のPEM型 水電解装置を使った 燃料電池車向け 水素供給)	²¹⁸
-------------------------	-------------	-------------------------	------------------------------	---------------------------	-----	---	----------------

西海岸 100プロジェクト	ドイツ、 西海岸	第1段階: 30 MW (最終的には 700 MW)	プロジェクト 開発の最終段階	水、専用再生 可能エネルギー	初期投資: 4,600万ドル (最終投資額: 1億3,600万ドル)	商用プラント (ティッセンクルップ 製の水電解装置を 使用した水素製造 プラント)	²¹⁹
------------------	-------------	-------------------------------------	-------------------	-------------------	---	---	----------------

米州

エア・リキード社 ケベック工場	カナダ、 ベカンクール	20 MWの PEM型 水電解装置	稼働中 (2021年～)	水、再エネ 由来電力	非公開	商用プラント (カミンズ製の 水電解装置 HyLYZER で製造した水素を 販売)	²²⁰
--------------------	----------------	-------------------------	-----------------	---------------	-----	---	----------------

ニコラ社 プロジェクト	米国、 ユタ州	85 MW	水電解装置 購入済み	水、再エネ 由来電力	1億900万ドル	商用プラント (ネル製のアルカリ型 水電解装置を使用 した燃料補給用途 向け水素製造)	²²¹
----------------	------------	-------	---------------	---------------	----------	---	----------------

フロリダ・パワー & ライト社 プロジェクト	米国、 オキーチョビー	20 MW	提案段階	水、余剰再生 可能エネルギー	8,300万ドル	試験プラント (水電解装置で製造 した水素を天然ガス 火力発電所での 混焼用に供給)	²²²
------------------------------	----------------	-------	------	-------------------	----------	--	----------------

A.2. グリーンアンモニアプロジェクト

表16: 進行中または発表済みのグリーンアンモニアプロジェクト一覧

プロジェクト名	地域	生産能力	現状	P2X原料	投資額	プロジェクトの種類	参考文献
オーストラリア							
QNP社プレ・フィージビリティ・スタディ	クイーンズランド州、モウラ	年間20 kt	スタディ完了 (2020年第2四半期)	水素(水電解)、窒素(大気)	提案額: 1億5,000万~2億ドル	試験プロジェクト (既存HBプラントを改造するための30 MWの水電解装置を用いた水素製造)	223
プロジェクトGERI フィージビリティスタディ (BP社、GHD社)	西オーストラリア州、ジェラルトン	第1段階: 年間20 kt 最終段階: 年間1,000 kt	プレ・フィージビリティ分析 (時期不明)	水素、送電網による再生可能エネルギー、水、窒素	スタディ費用: 440万ドル (ARENAおよびBP社)	試験/商用プラント (輸出用グリーンアンモニアを水電解による水素とHB法で製造)	224
エア・ペニンシュラ・ゲートウェイ™ (H2Uグループ)	南オーストラリア州、エア半島	120 tpd	建設中 (2022年まで試験段階)	水素、送電網による再生可能エネルギー、水、窒素	2億4,000万ドル	試験/商用プラント (輸出用グリーンアンモニアを75 MWの水電解装置とHB法で製造)	225
YURIグリーンアンモニアプロジェクト (ヤラ・ピルバラ・ファーターライザー社)	西オーストラリア州、ピルバラ	フェーズ0: アンモニア供給量の1% (2023年) フェーズ1: アンモニア供給量の2~6% (2026年) フェーズ2: 年間800 ktのグリーンアンモニアを製造するプラントの新設 (2028年) フェーズ3: アンモニア供給量の80~100% (2030年)	試験プラント建設中 (2023年第2四半期に稼働予定)	水素、送電網による再生可能エネルギー、水、窒素	7,000万ドル (フェーズ1での想定費用) ARENA再エネ由来水素導入ファンドから、フェーズ1(10 MWの水電解装置)に充てる資金4,250万ドルを調達済み	実証プラント (10 MWの水電解装置から現行HBプロセスに水素を供給し、アンモニア総生産量の1%に当たる3.5 ktpaのアンモニアを製造)	212, 213, 226
オリジン・エナジー社再エネ由来アンモニア製造プラント	タスマニア州、ベルベイ地区	420 ktpa	FEEDスタディ (2022年第1四半期)	水素、水力発電エネルギー、水、窒素	現時点: 320万ドル	商用プラント (輸出用グリーンアンモニアを500 MWの水電解装置とHBプラントで製造)	227
フォーテスキュー・メタルズ・グループ社グリーンアンモニア製造プラント	タスマニア州、ベルベイ地区	250 ktpa	2030年までを想定	水素、水力発電エネルギー、水、窒素	5億ドル	商用プラント (輸出用グリーンアンモニアを250 MWの水電解装置とHBプラントで製造)	228

エコ・エナジー・ワールド社グリーンアンモニアプロジェクト	クイーンズランド州、グラッドストーン	不明	不明	水素、専用再生可能エネルギー、水、窒素	5億ドル	商用プラント (300 MWの太陽光発電所、200 MWの水電解装置、100 MWの貯蔵設備を利用して輸出向けグリーン水素/アンモニアを製造)	229
アジア再生可能エネルギーハブ	西オーストラリア州、ピルバラ	不明	不明	水素、専用再生可能エネルギー、水、窒素	不明	商用プラント (26 GWの太陽光・風力発電を利用して輸出向け水素およびアンモニアを製造)	7
H2-Hub™ グラッドストーン	クイーンズランド州、グラッドストーン	不明	プレ・フィージビリティ段階 (商用プラント)	水素、専用再生可能エネルギー、水、窒素	不明	商用プラント (3 GWの水電解装置で輸出向けグリーンアンモニアを製造)	230, 231
アジア							
NEOMグリーンアンモニア・プロジェクト (エア・プロダクツ社)	サウジアラビア、ネオム	年間1.2 Mt	建設中 (2025年稼働予定)	水素、専用再生可能エネルギー、水、窒素	65億ドル	商用プラント (水素をアンモニアに変換し、日本で燃料電池車の補給燃料として使用される輸出向け水素を販売)	232
欧州							
ボルスグルン工場の改造 (ヤラ社)	ノルウェー、ボルスグルン	500 ktpa	建設中 (2026年稼働予定)	水素、送電網による再生可能エネルギー、水、窒素	15億ドル	商用プラント (天然ガスを利用する現在のHBプロセスをネル製の水電解装置に変換)	233, 234
プエルトリャノ・プラント・プロジェクト (イベルドロラ社)	スペイン、シウダ・レアル	20 ktpa (20 MWの水電解装置)	稼働中 (2021年~)	水素、専用再生可能エネルギー、水、窒素	2億3,000万ドル	商用プラント (年間200 ktの生産能力を持つプラントの10%を、100 MWの太陽光発電、5 MWの蓄電池、20 MWのネル製水電解装置を利用してグリーンアンモニア製造に変換)	235
米州							
ドナルドソンビル窒素コンビナート (CFインダストリーズ社)	米国、ルイジアナ州	年間20 kt	建設中 (2023年稼働予定)	水素、再エネ由来電力、水、窒素	5億8,000万ドル	商用プラント	236

A.3. グリーンメタンプロジェクト

表17: 進行中または発表済みのグリーンメタンプロジェクト一覧

プロジェクト名	地域	生産能力	現状	P2X原料	投資額	プロジェクトの種類	参考文献
オーストラリア							
APAグループおよびサザングリーンガス社の再エネ由来メタン試験プラント	クイーンズランド州、ウォランビーラ	メタンの年間生産量35 GJ	建設中	専用再生可能エネルギー、大気中のCO ₂ と水	220万ドル	試験プラント(大気中からCO ₂ と水を分離させる直接空気回収、水電解による水素、反応器を利用する独自設計)	²³⁷
ATCO社再エネ由来メタンプロジェクト	西オーストラリア州、アルバニー	不明	プレ・フィージビリティ分析	再エネ由来電力、CO ₂ 、水	フィージビリティスタディ費用: 西オーストラリア州政府から2万ドル	実証プラント(ATCO所有パイプラインへの再エネ由来天然ガスの注入)	⁸⁴
アジア							
日立造船の陝西省プロジェクト	中国、陝西省	年間350万 m ³	稼働中(2020年～)	再エネ由来電力、CO ₂ 、水	不明	実証プラント(日立造船の技術を用いて排出されたCO ₂ をメタンに変換)	²³⁸
欧州							
アウディ社 e-ガス工場	ドイツ、ヴェルルテ	325 Nm ³ /h (最大1,000ty ⁻¹)	稼働中(2013年～)	バイオマス由来CO ₂ (2,800 t)、再エネ由来電力、水	不明	実証プラント(アウディの天然ガス自動車で利用する天然ガスの生産)	²³⁹
STORE&GOプロジェクト実証施設(EUが支援する27のパートナー企業/組織が参加)	施設1: スイス、ソロトゥルン 施設2: ドイツ、ファルケンハーゲン 施設3: イタリア、トロイア	スイス施設: 173 MWh (LNG) ドイツ施設: 192 MWh (LNG) イタリア施設: 33 MWh (LNG)	稼働中(2019年～) 稼働中(2019年～) 稼働中(2019年～)	水、送電網による再生可能エネルギー、大気中のCO ₂	4,300万ドル(合計)	余剰再生可能エネルギーを合成天然ガスとして貯蔵する実証実験	²⁴⁰

A.4. グリーンメタノールプロジェクト

表18: 進行中または発表済みのグリーンメタノールプロジェクト一覧

プロジェクト名	地域	生産能力	現状	P2X原料	投資額	プロジェクトの種類	参考文献
オーストラリア							
アベル・エナジー社のベルベイ動力燃料プロジェクト	タスマニア州、ベルベイ	60,000 t yr ⁻¹	建設中	バイオマスおよび回収した産業排気ガスから得たCO ₂ 、再エネ由来電力を用いた水電解による水素	フィージビリティスタディ(タスマニア州政府から提供された2,000万ドルの助成金)	商用プラント(輸出用メタノール)	²⁴¹
欧州							
ジョージ・オラーCO ₂ ・再エネ由来メタノール変換プラント(カーボン・リサイクリング・インターナショナル社)	アイスランド、グリンダヴィーク	年間5百万リットル	稼働中(2012年～)	地熱発電所から回収したCO ₂ 、再エネ由来電力を用いた水電解による水素	1,000万ドル	実証プラント(メタノールの製造方法に関する研究開発、およびメタノール製造・輸送の実現可能性についての検証)	²⁴²
MefCO ₂ プロジェクト	ドイツ、ニーダーアウセム	1 tpd	稼働中(2019年～)	CO ₂ 、再エネ由来電力を用いた水電解による水素	1,200万ドル	実証プラント(メタノール製造用の熱触媒を開発するプロセスに関する研究開発)	²⁴³
FReSMeプロジェクト	スウェーデン	1 tpd	稼働中(2019年～)	製鋼所から回収したCO ₂ 、再エネ由来電力を用いた水電解による水素	1,700万ドル	実証プラント(現在、TRL6レベルにある技術の規模拡大)	²⁴⁴
スイス・リキッド・フューチャー社	ノルウェー、モー・イ・ラーナ(モー工業団地)	年間1百万リットル	不明	バイオマスプラントや産業部門から回収したCO ₂ 、再エネ由来電力を用いた水電解による水素	4億6,000万～5億4,000万ドル	商用プラント(燃料補給および工業用途)	²⁴⁵
リキッドウインド社プロジェクト	スウェーデン、ヨーテボリ	50 kt(プロジェクト期間全体の合計)	建設中(2024年稼働予定)	バイオマスプラントから回収したCO ₂ 、再エネ由来電力を用いた水電解による水素	2億2,500万ドル	実証プラント	²⁴⁶
Power2Metプロジェクト-再生可能エネルギーによるグリーンメタノール製造	デンマーク、オールボー	年間30万リットル	稼働中(2020年～)	バイオマス由来CO ₂ 、太陽光/風力由来電力を用いた水電解による水素	300万ドル	実証プラント	²⁴⁷

アジア							
KISTプロジェクト	韓国	1日当たり 100 kg	稼働中 (2004年～)	発電所からのCO ₂ 、 水電解による水素	不明	実証プラント	97
三菱重工グループ 会社によるメタノール プロジェクト	日本、 北海道	20 tpd	不明	回収したCO ₂ 、 水電解による水素	不明	商用施設	248
大連化学物理研究所 プロジェクト	中国	不明	不明	回収したCO ₂ 、 水電解による水素	不明	商用施設	249

A.5. グリーン合成ガスプロジェクト

表19: 進行中または発表済みのグリーン合成ガスプロジェクト一覧

プロジェクト名	地域	生産能力	現状	P2X原料	投資額	プロジェクトの種類	参考文献
欧州							
ノルスク e-フューエル (クライムワークス社 とサンファイア社)	ノルウェー、 オスロ	年間10百万 リットル (100百万 リットルまで 規模拡大予定)	建設中 (2023年まで に稼働予定)	DACから得たCO ₂ と 再生エネルギーを用いた水電解から 得た水素の共電解 によるメタノール 製造	7億7,500万ドル (規模拡大後の 想定コスト総額)	商用プラント (小売向け液体燃料 の製造)	250

付録B: P2X 生産を行うための原料技術

本セクションでは、P2Xの原料を調達する際に利用できる技術とそのコストに焦点を当てています。ここまで概説してきたように、水素の製造(セクション3.2)には持続的に利用できる水と再生可能エネルギーが必要となる一方、製造した水素をメタン(セクション3.4)、メタノール(セクション3.5)、合成ガス(セクション3.6)に変換するにはCO₂が必要となります。さらに、再生エネルギー由来アンモニアの製造には水と窒素が必要です(セクション3.3)。ここでは、P2X用途でのNSW州における水の利用可能性について、さらに詳しく解説していきます。

先にケーススタディで説明したように、NSW州には利用できる原料が多くあり、これらの調達コストは低下傾向にあります。さらに、回収技術の規模拡大が原料コストを低下させています(スケールメリット)。これらの要素が相まって、P2X技術のビジネスケースおよびその経済的な展望がさらに確かなものとなっています。

B.1. P2X向け炭素原料製造技術の概要

必要なCO₂原料の調達の一部はP2X経路の重要な側面です。この点に関し、工業部門や発電部門から排出されるCO₂はP2Xを通じて活用できる大きな機会となり、また、炭素の循環ループを閉じることによって排出量の削減を実現することができます。IEAは、燃料や工業用原料を製造する際の炭素回収・利用(CCU)技術が気候変動に関する長期的な目標を達成する上で重要な役割を果たすと予想しています。¹⁹

CO₂排出源

CO₂排出源は炭素回収技術確立の際の重要な検討事項となります。排出源によってCO₂を含む気流および圧力の構成が決まってくるためです。経験則として、CO₂濃度および分圧の低い気流が排出される場合は、比較的大規模な回収インフラが必要となるため、下流用途の純水な気流を発生させるためにはより多くの投入エネルギーが必要になります。このため、CO₂濃度が高い気流は前処理の必要性がなく、P2Xでの直接利用により適しています。

表20は、排出気流のCO₂濃度、潜在的な不純物、条件(温度および圧力)の点から潜在的なCO₂排出源を比較したものです。発電所や工業プロセスから排出される炭素を回収できるCO₂回収技術は複数あります(TRL:5~9)。表21および表22はこれらの回収技術について、それぞれ概要を比較したもの、参考コストを示したものになります。

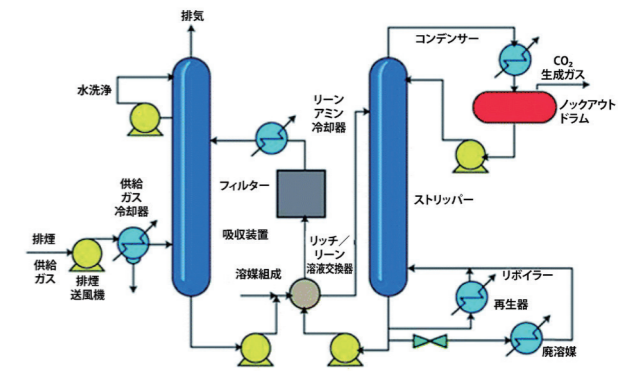
吸収技術

CO₂吸収技術はCO₂濃度の高い気流(排煙)をCO₂親和性の高い溶液(通常はアミン)と反応させるものです(図39)。これにより、排煙中のCO₂を溶液に吸収し、その後、溶液から分離して利用や貯留することができます。現時点では、モノエタノールアミン(MEA)が90%を超える高い回収効率を示すとされています。²⁵¹

これはかなり成熟した技術で、発電所や工業プロセスで燃焼後回収するのに広く活用されています。また、ガス処理施設で排出されたCO₂を回収する際にも積極的に用いられており、例えば、西オーストラリア州のゴーゴンLNGプロジェクトでは、3~4 MtpaのCO₂を天然ガスから分離して貯留しています。

吸収技術の主なデメリットとして、吸収剤を再生させる必要があり、これによってエネルギー消費量が増えることになる点や、吸収剤が経年劣化しやすい傾向にある点が挙げられます。

図39: アミンを用いた吸収プロセスの略図。²⁵²



吸着技術

CO₂吸着技術は吸収技術と同様の原理で作用するものですが、溶液ではなく、固相吸着剤の表面にCO₂を物理的に吸着させる点が異なります。これらの吸着剤は通常、広い表面積とCO₂選択性を持つように作られています。よく使われている吸着剤としては、分子ふるい、活性炭層のほか、ゼオライトのような多孔質材料が挙げられます。

商業上、こうした吸着剤層は圧カスイング吸着法 (PSA) または温度スイング吸着法 (TSA) に組み込まれます。これらは圧力や温度の変化によって回収 CO₂ の吸着・脱着を促進するものです。PSA では、圧力を上昇させると吸着につながるのに対し、圧力を低下させると脱着につながります。TSA では、低温時に吸着が促され、温度が上昇すると脱着につながります。PSA (図40)、TSA のいずれも商業的に活用されており、CO₂ 回収効率は80~85%、回収純度は90%を超えています。²⁵³

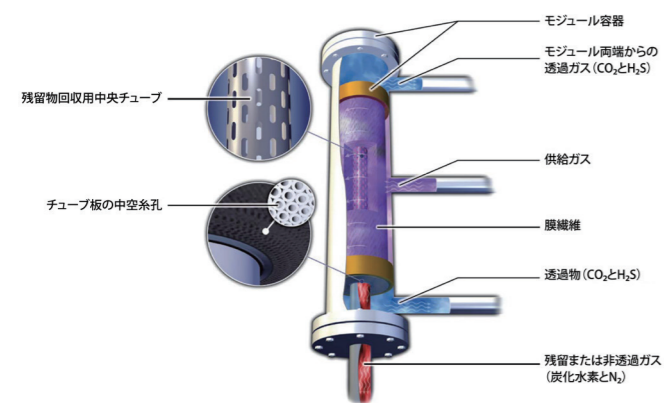
図40: 水素製造を行う水蒸気メタン改質施設に設置された PSA 装置。13本の小型円筒形容器は吸着剤層が内蔵された PSA 塔。リンデエンジニアリング社提供。



膜分離法

膜分離法で使用する選択膜は CO₂ を透過させる一方、排気中のその他の成分は除去します。これは発電所や天然ガス処理施設のような高圧下の用途でよく利用されています。例えば、シュルンベルジェ社が開発した CYNARA 膜システム (図41) では、高圧によって CO₂ の膜透過が促進されます。

図41: CYNARATM プロセス (天然ガスから CO₂ を分離する商用膜システム) の図解。シュルンベルジェ社提供。

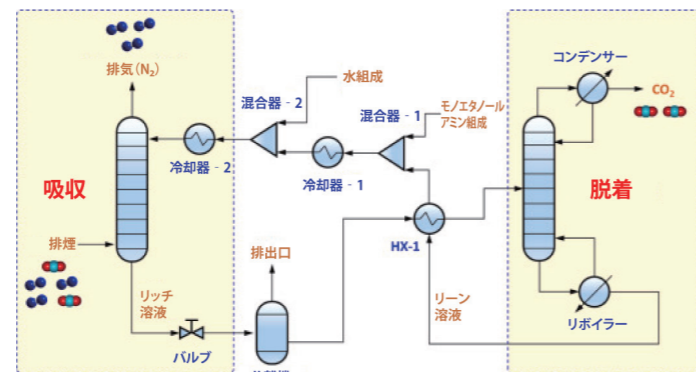


深冷蒸留法

深冷蒸留法では、従来の蒸留法と同様、構成成分の沸点を利用して混合物を分離します。ただし、気体の分離に用いる際は、気体を液化させた後、それを沸点 (周囲条件では非常に高くなります) で分離させることができるよう、超低温かつ高圧下で行う必要があります。CO₂ を分離するためには、空気を高圧下 (100~200気圧) でマイナス110°Cから135°Cまで冷却します。こうすることで、排煙に含まれるその他の成分より重い (沸点が高い) CO₂ は液化/固体化します (参考: NO_x の沸点はマイナス152°C、一酸化炭素はマイナス192°C)。その後、液化/固化した CO₂ を分離させて、減圧して気化させることができます。深冷蒸留法は排煙から最大90~95%の CO₂ を分離させることができます。²⁵³ しかし、最大のデメリットは、低温高圧にするために必要なエネルギー消費量が多い点で、CO₂ を1トン回収するのに約600~660 kWh のエネルギーが必要となります。²⁵³

商業的には、深冷蒸留法は大気から酸素や窒素を分離する際に広く使われているものです。しかし、同じ原理は産業排気ガスから CO₂ を分離させるプロセスにまで拡大利用されつつあります。(図42)

図42: 深冷蒸留法を利用して産業排煙から CO₂ を分離させるプロセスの図解。²⁵⁴



直接空気回収

新たな CO₂ 回収技術となっているのが、周囲空気からの直接回収です。IEA の分析によれば、世界のエネルギー関連の排出量が2019年には年間33 GtCO₂ を超えるまで増加したことから、大気中の CO₂ 濃度は約400 ppm に達しました。²⁵⁵ こうした状況を考えると、直接空気回収 (DAC) 技術は大気中の CO₂ を削減する機会をもたらすものとなり、循環経済を生み出すことにつながります。IEA は持続可能な開発において、2070年までに年間約10 GtCO₂ 回収する必要があると予測しています。¹⁹ このうち年間およそ2 Gt が直接空気回収によって除去されるものと見られます。回収量全体の90%は地下に貯留されると予想されていますが、残りの10% (年間1 GtCO₂) は航空機用合成ケロシンのような動力燃料に変換される見込みです。¹⁹

直接空気回収では、大型送風機を用いて気流を CO₂ 分離システムへと誘導した後、可逆的な化学・物理吸着剤を使って捕捉します。化学吸着剤には、水酸化ナトリウム (NaOH)、水酸化カリウム (KOH)、水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) などの水性水酸化物や、酸化カルシウム (CaO) といった炭酸塩を形成する溶剤があります。²⁵⁶ これらの化学物質は空気との相互作用によって CO₂ と結合した後、加熱によって再生され、CO₂ を放出することができます (図43)。

図43: 化学吸着剤を用いた直接空気回収プロセスの図解。始めに、水性アルカリ吸着剤 (KOH) が CO₂ を吸収して炭酸塩 (K₂CO₃) が生成される。次に、この炭酸塩を水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) と反応させることで炭酸カルシウム (CaCO₃) が生成され、これを熱分解することで回収した CO₂ を放出できる。²⁵⁷

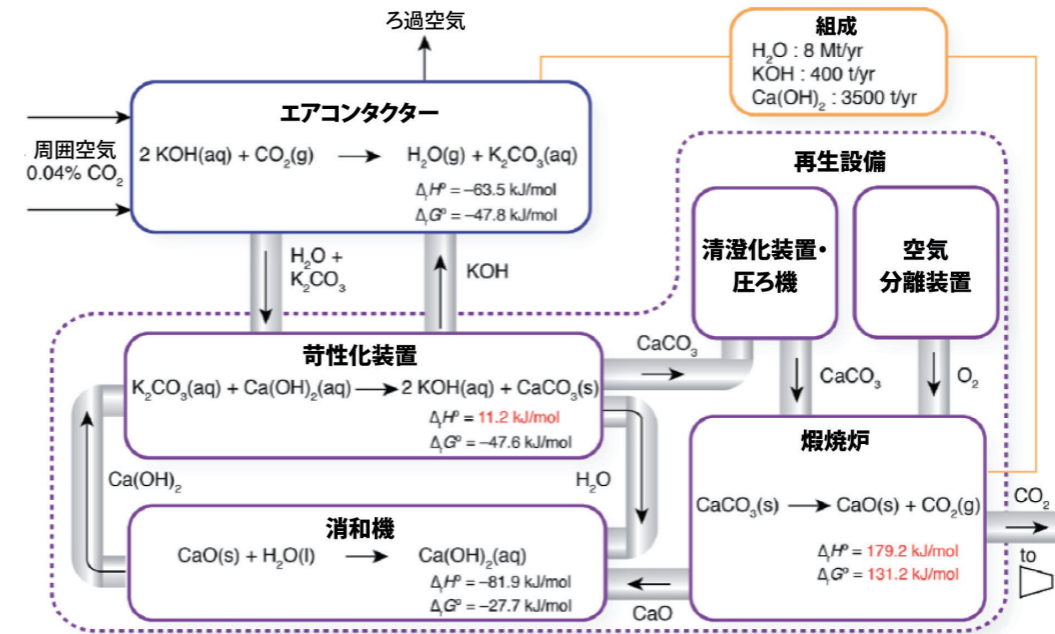


表20: CO₂排出源の比較²⁵⁸

供給源	排ガス中の CO ₂ 濃度 (%)	主な不純物	少量の不純物	圧力	温度
発電部門					
ガス火力発電所	7~8%	H ₂ O, O ₂ , NO ₂	CO, NO _x	1バール	50~75°C
石炭火力発電所	12~20%	H ₂ O, O ₂ , NO ₂	CO, SO ₂ , NO _x		
酸素燃焼発電所	75~85%	H ₂ O	NO _x , SO _x		
石炭ガス化複合発電所	約40%	O ₂ , CO, N ₂	H ₂ , N ₂ , CO		
工業部門					
製鋼所	20%	CO, N ₂	CO, N ₂	33バール	37°C
セメント工場	14~33%	H ₂ O, O ₂	H ₂ O, O ₂	1バール	50~75°C
水素製造プラント (水蒸気メタン改質法)	70~90%	CO		15~40バール	40~450°C
ガス化プラント	約10%	N ₂ , H ₂	CH ₄ , CO		
大気					
周囲空気	約400 ppm	N ₂ , O ₂		1バール	周囲温度

表21: 潜在的な CO₂回収技術の概要²⁵⁹⁻²⁶⁴

プロセス	メリット	デメリット	TRL
アミン	・成熟した技術	・腐食、アミン分解、エネルギー消費量が多い	9
活性炭	・反応速度が速い、熱安定性が高い、低コスト	・低圧下では CO ₂ 吸着容量が少ない	3
ゼオライト	・速い反応速度	・再生するには多くのエネルギーと時間が必要となる	5
金属有機構造体	・熱安定性が高い、調整可能な化学官能性	・その他の要素と混合する場合の CO ₂ の選択性が低い、長期にわたる実績データがない	3
膜	・再生の必要がない、資本コストが低い、コンパクト設計	・分離前にガス圧縮が必要 (15~20バール)、高温による膜劣化、効率性維持には複数段階プロセスの導入が必要	5~7
深冷蒸留法	・再生の必要がない、回収した CO ₂ を高压で分離	・エネルギー消費量が多い	5~7
直接空気回収	・拡張性がある ・点源を必要としない	・多くのエネルギーが必要 ・初期資本コストが高い	6

表22: 異なる点源からの炭素回収コストの概要

炭素排出源	CO ₂ 回収コスト (回収1 tCO ₂ 当たり米ドル)
石炭ガス化発電所	34~48
石炭火力発電所	37~60
ガス火力発電所	57~110
製油所、天然ガス処理施設	22~86
製鉄所	85~89
セメント工場	70~105
バイオガスプラント	0~110
直接空気回収	270~325

注: 上記コストは、Dieterich やその他によるレビュー¹¹⁶を基に、記載された2020年のユーロ建てコストを1ユーロ=1.22米ドルのレートで米ドル建てに換算したものです。

B.2. アンモニア製造に用いる窒素および NO_x 原料

アンモニア製造に必要な窒素は空気分離装置 (ASU) を使って大気中から得ているのが現状です。ASUは現在、以下の2つの原理に基づいています。

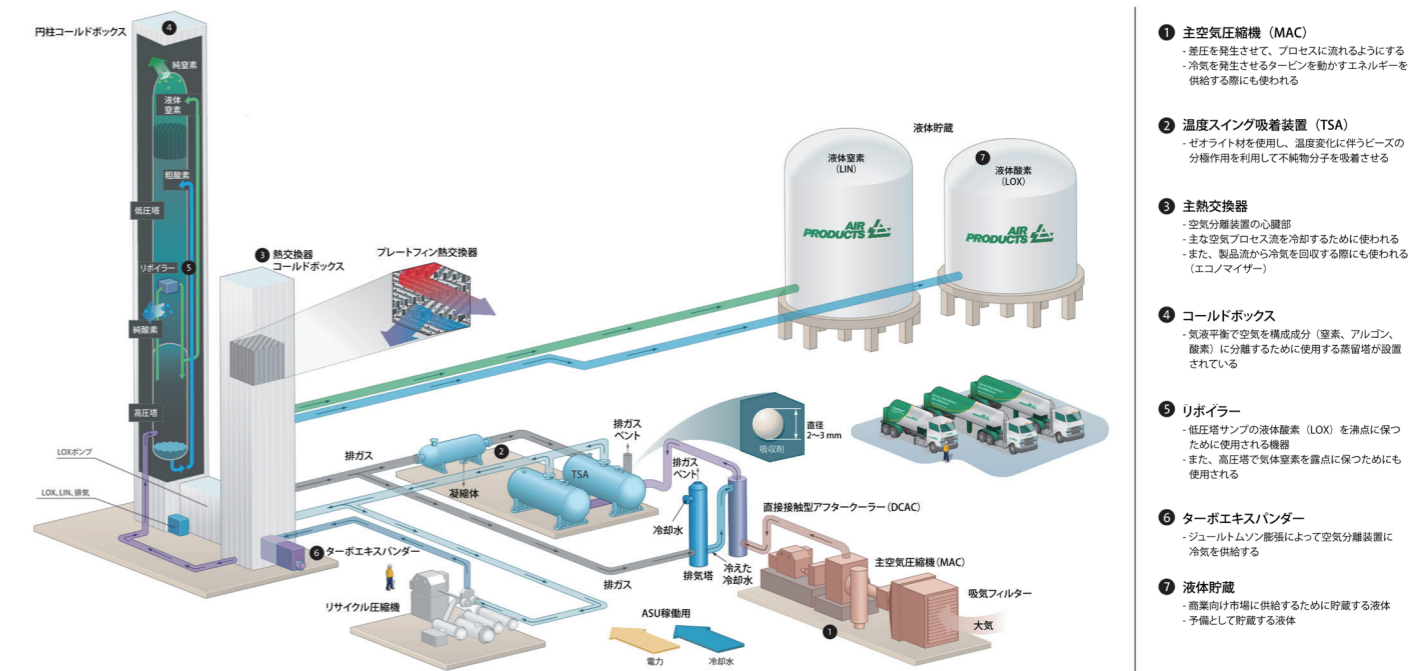
- ・ 深冷蒸留: 深冷蒸留は空気中の構成成分間の凝縮温度の違いを利用する方法です。このプロセスでは、周囲空気を一連の冷却器や圧縮機を通過させることで、成分を液化させるのに求められる温度まで低下させます。液化した成分は、その後、蒸留により個々の気体に戻すことができます。商業的に見ると、100~1,000 tpdの生産能力を持つ ASU プラントが世界各国で稼働しています (図 44)。深冷プラントは高純度 (99%超) の窒素を生み出しますが、窒素1トン当たり約175~280 kWh という大量のエネルギーを使用し、その大半は圧縮機を動かすための電力によるものです。²⁶⁵
- ・ 吸着: 窒素分離に代わるプロセスとなるのが、PSA 装置や膜などを一般的に使用する吸着法です。これらの装置は窒素の生産能力が約30 tpdと限定的な場合が多く (これを超える場合には深冷蒸留の方がより現実的)、窒素の純度も比較的低くなる (約95%) 傾向があります。²⁶⁵ 吸着法は通常、膜を使って、または特殊設計の吸着層を組み込んだ PSA 装置を用いて行われます。

平均135 tpdの生産能力を備えた工業用 ASU の価格は、PSA が250万米ドル、膜分離が480万米ドル、深冷蒸留が950万米ドル程度と言われています。²⁶⁶

他の窒素供給源としては、工場や発電所から NO_x の形で排出される窒素も考えられます。これらの排出された NO_x は周囲空気の存在下でエネルギーを生成するために燃料を燃焼させる際、結果的に空気や燃料の窒素成分が酸化して発生するものです。この NO_x をその後、窒素に再び変換し、それを使ってアンモニアに変換すれば、循環ループを閉じることができます。

これに代わる方法として、NO_x の電気化学的な直接還元法でもアンモニアを製造することができ、現在、UNSW とシドニー大学によって積極的に研究が進められています。排出された NO_x は従来の炭素回収技術でも回収可能であることから、工業部門または発電所から直接 NO_x 原料を得ることができます。²⁶⁷ このように、アンモニア分解による水素の製造やアンモニア燃焼による発電は窒素および NO_x の生成につながり、その後、P2X 技術を使ってこれらの物質を再利用して再びアンモニアを製造することができることを踏まえると、P2X 技術はアンモニアをエネルギー源とする経済において極めて重要となる可能性があります。

図44: 窒素・酸素製造向けにエアール・プロダクツ社が開発した商用の空気分離装置 (ASU) プロセスの図解。エアール・プロダクツ社提供。²⁶⁸



- 1 主空気圧縮機 (MAC)**
- 差圧を発生させて、プロセスに流れるようにする
- 冷気を発生させるタービンを動かすエネルギーを供給する際にも使われる
- 2 温度スイング吸着装置 (TSA)**
- ゼオライト材を使用し、温度変化に伴うヒーズの分極作用を利用して不純物分子を吸着させる
- 3 主熱交換器**
- 空気分離装置の心臓部
- 主な空気プロセス流を冷却するために使われる
- また、製品流から冷気を回収する際にも使われる (エコマイザー)
- 4 コールドボックス**
- 気流平衡で空気を構成成分 (窒素、アルゴン、酸素) に分離するために使用する蒸留塔が設置されている
- 5 リボイラー**
- 低圧塔の液体酸素 (LOX) を沸騰に保つために使用される機器
- また、高圧塔で液体窒素を沸騰に保つためにも使用される
- 6 ターボエキスパンダー**
- ジョウルトン膨張機によって空気分離装置に冷気を供給する
- 7 液体貯蔵**
- 商業向け市場に供給するために貯蔵する液体
- 予備として貯蔵する液体

B.3.P2Xにおける水の必要性

水もまた、検討されているすべてのP2X経路において、グリーン水素を製造する際、もしくは二次変換プロセスにとって重要な原料のひとつです。一般的に、商用の水電解装置は最適な効率性を実現し、水電解システムの寿命を維持するために高純度の水を使用して稼働させています。これらのシステムの大半は浄水装置と併せて設置されますが、原料水は飲料に適した品質 (WHO基準: 溶解性物質が1 L当たり1,000 mg未満) 以上のものでなければなりません。これはオーストラリアのような水不足の国にとって課題となる可能性があります。水電解の規模拡大が国内の飲料水および農業需要の充足と競合してしまうためです。

水電解を用いて水素を製造するには、水素1 kg当たり約9 Lの水が必要となります。これはつまり、国家水素ロードマップで強調されている通り、想定されている2030年までの水素需要 (水素輸出市場) 0.5 Mtpaを満たすためには、年間4.5 GL (ギガリットル= 1×10^9 リットル) の水が必要になるということです。²¹しかし、現在オーストラリアが輸入している39百万トンの液体燃料に取って代わる合成燃料を製造するために工業部門が規模拡大を迫られた場合、水需要は年間990億リットル (170万人分の水需要に相当) まで大幅に増加すると見られています。⁵²したがって、水電解経済の維持は、廃水を再生利用する、もしくは海水淡水化能力を拡大することにより調達する水に依存せざるを得ません。これらの方法で調達する水は淡水より高くつくとはいえ、水の費用が水電解コストに占める割合はわずか2%程度に過ぎないと見られています。²¹本プレ・フィージビリティ・スタディで検討されている具体的な地域に必要な水原料については、各地域のセクションで詳述しています。なお、NSW州は期待できる飲料水源や地方部に点在する塩水帯水層を有しており、P2X経済を構築する上で、これらの資源を考慮に入れることもできます。

**付録C：謝辞**

本プレ・フィージビリティ・スタディの初稿執筆に際し、以下のステークホルダーの皆さまから助言やご意見、知見を賜りました。

ヒュー・F・デュラントホワイト教授

NSW州主席科学工学官室

クリス・アームストロング博士

NSW州主席科学工学官室

ジョン・オブライエン氏

デロイトオーストラリア

バート・コロジェイチェク博士

フォーテスキュー・メタルズ・グループ

ベフダッド・モグタデリ教授

ニューカッスル大学

ロバート・キャッチポール氏

オリジン・エナジー

イズミット・ジャンブラット教授

UNSWシドニー 鉱物エネルギー資源工学科

ロバート・リトル氏

NSW州政府 地方部 NSW省

ポール・フェロン博士

CSIROエネルギー部門燃焼後回収リサーチプログラム

ポール・ズリ教授

ウーロンゴン大学 ARCオーストラリア製鉄リサーチハブ

ティム・ストック氏

NSW州政府 水素タスクフォース

ゲルハルト・スウィガース教授

ウーロンゴン大学

ハイサタ

エイミー・フィルブルック博士

オーストラリア再生可能エネルギー機関 (ARENA)

マット・ウォルデン氏

オーストラリア再生可能エネルギー機関 (ARENA)

ウィル・レイワードスミス博士

デロイトオーストラリア

アン・フォスター氏

クインブルック・インフラストラクチャー・パートナーズ

アレックス・トラジコフ氏

H2UTM

ダニエル・クロッシュ氏

GPAエンジニアリング

セルカン・サイダム教授

UNSWシドニー 鉱物エネルギー資源工学科

デイビッド・シェイプリー氏

MANエネルギーソリューションズ・オーストラリア

P・J・カレン教授

プラズマリープ

シドニー大学 化学生体分子工学科

リー・ケネディ氏

オーストラリア全国エネルギー資源 (NERA)

アリックス・ジーベル氏

オーストラリア技術・工学会 (ATSE)

ピーター・ベニヨン氏

GHD

ティモシー・メイヤーズ氏

MAN エネルギーソリューションズ・オーストラリア

サミュエル・フリスビー氏

NSW 州政府 水素タスクフォース

レイチェル・ルイ氏

クインブルック・インフラストラクチャー・パートナーズ

マーク・グリーンウェイ氏

ケープ・パイロン・パワー

サミ・カーラ教授

UNSW シドニー 機械工学科

イアン・マクギル准教授

UNSW シドニー 化学工学科

ブレトン・クーパー氏

サザングリーンガス

ニコラス・グリエフ博士

ニューカッスル大学 ニューカッスルエネルギー・リソース研究所

チュン・ヒン・ウン博士

ビヨンド・ゼロ・エミッションズ

サム・メラ氏

ビヨンド・ゼロ・エミッションズ

ミハエル・ファン・バールレ氏

アベル・エナジー

キース・ラブグローブ博士

ITP リニューアブルズ

アーデント・アンダーグラウンド

クリスチャン・フィニ氏

アイアンサイド・キャピタル

ダン・フレイザー氏

アイアンサイド・キャピタル

エイドリアン・ピア氏

METS 成長センター

イアン・ドーバー氏

METS 成長センター

サム・ブリッジ氏

オリジン・エナジー

トーマス・ウッド氏

UNSW シドニー

クラウス・レゲナウアーリーブ教授

UNSW シドニー 鉱物エネルギー資源工学科

コナー・カー氏

NSW 州政府 水素タスクフォース

付録 D: NSW 州 P2X アライアンス加盟企業・団体

加盟企業・団体	部門 / P2X への関与
アベル・エナジー	工業 / ディベロッパー
アグバイオエン	工業 / 発明者
アーデント・アンダーグラウンド・水素・ストレージ	工業 / スタートアップ
オーストラリア再生可能エネルギー機関 (ARENA)	政府 / 投資家
ビヨンド・ゼロ・エミッションズ	NGO / コミュニティおよび政策
BOC	工業 / 発明者
CNF & アソシエイツ	工業 / ディベロッパー
CSIRO	研究 / ネットワーク
デロイト	コンサルティング / ネットワーク
エナジーエステート	工業 / 投資家
フォーテスキュー・メタルズ・グループ	工業 / 投資家およびエンドユーザー
ドイツエネルギー機構 (dena)	政府 / 投資家
GHD	技術コンサルタント
動力燃料グローバルアライアンス	工業 / ネットワーク
GPA エンジニアリング	技術コンサルタント
H2U™	工業 / ディベロッパーおよび投資家
ハイサタ	工業 / スタートアップ
インフィジェン・エナジー	工業 / ディベロッパーおよび投資家
IP グループ	工業 / 投資家
アイアンサイド・キャピタル	工業 / 投資家
ITP リニューアブルズ	工業 / ディベロッパー
MAN エネルギー	工業 / 技術
METS 成長センター	工業 / エンドユーザー
三菱デベロップメント	工業 / エンドユーザー
ネピアン・エンジニアリング & イノベーション	工業 / メーカー
オリジン・エナジー	工業 / エンドユーザー
ブラズマリーブ	工業 / スタートアップ
ケノス	工業 / エンドユーザー
クインブルック・インフラストラクチャー・パートナーズ	工業 / 投資家
サントス	工業 / エンドユーザー
シーメンス・エナジー	工業 / 技術
サザングリーンガス	工業 / スタートアップ
スクアドロン・エナジー	工業 / エンドユーザー
スター・サイエンティフィック	工業 / スタートアップ
ARC 鉄鋼リサーチハブ	研究 / 発明者ネットワーク
switch ₂	工業 / スタートアップ
東芝	工業 / 技術
ニューカッスル大学	研究 / 技術
シドニー大学	研究 / 技術
シドニー工科大学	研究 / 技術
ウーロンゴン大学	研究 / 技術

参考文献

- IRENA. *Renewable Energy Benefits: Measuring the Economics*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf (2016).
- Australian Energy Regulator. *State of the Energy Market 2021*. <http://www.aer.gov.au/node/18959> (2021).
- de Vasconcelos, B. R. & Lavoie, J. M. Recent advances in power-to-X technology for the production of fuels and chemicals. *Front. Chem.* **7**, 1–24 (2019).
- IRENA. Solution XI: Power-to-X solutions. in *Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables* 120–126 (International Renewable Energy Agency, 2019).
- IEA. *Statistics report: CO2 Emissions from Fuel Combustion. CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview* (IEA, 2020).
- Hydrogen Renewables Australia. Hydrogen Renewables Australia and Copenhagen Infrastructure Partners announce partnership on the Murchison Renewable Hydrogen Project. *Media Release* (2020).
- Matich, B. WA Govt approves 15 GW Asian Renewable Energy Hub, whole project now expanded to 26 GW. *PV Magazine Australia* [https://www.pv-magazine-australia.com/2020/10/17/wa-govt-approves-15-gw-asian-renewable-energy-hub-whole-project-now-expanded-to-26-gw/\(2020\)](https://www.pv-magazine-australia.com/2020/10/17/wa-govt-approves-15-gw-asian-renewable-energy-hub-whole-project-now-expanded-to-26-gw/(2020)).
- Peacock, B. Australian green hydrogen project grows from 1 GW to 8 GW, following commitment from Total Eren. *PV Magazine Australia* <https://www.pv-magazine.com/2021/04/20/australian-green-hydrogen-project-grows-from-1-gw-to-8-gw-following-commitment-from-total-eren/>.
- Maisch, M. Gladstone to run on gas-green hydrogen blend as gigawatt-scale plans take shape – pv magazine Australia. *PV Magazine Australia* [https://www.pv-magazine-australia.com/2020/02/27/gladstone-to-run-on-gas-green-hydrogen-blend-as-gigawatt-scale-plans-take-shape/\(2020\)](https://www.pv-magazine-australia.com/2020/02/27/gladstone-to-run-on-gas-green-hydrogen-blend-as-gigawatt-scale-plans-take-shape/(2020)).
- IEA. *Global Energy Review 2020. Global Energy Review 2020* (IEA, 2020). doi:10.1787/a60abbf2-en.
- Morton, A. Renewable energy stimulus can create three times as many Australian jobs as fossil fuels. *The Guardian* (2020).
- Wood, T. & Dundas, G. *Start with steel: A practical plan to support carbon workers and cut emissions*. (2020).
- Deloitte. Australian and Global Hydrogen Demand Growth Scenario Analysis COAG Energy Council – National Hydrogen Strategy Taskforce. (2019).
- Renewable Power Generation Costs in 2019.
- IRENA. *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.50C Climate Goal*. (2020).
- Collins, L. Nel to slash cost of electrolysers by 75%, with green hydrogen at same price as fossil H2 by 2025. *Recharge News* <https://www.rechargenews.com/transition/nel-to-slash-cost-of-electrolysers-by-75-with-green-hydrogen-at-same-price-as-fossil-h2-by-2025/2-1-949219> (2021).
- McKinsey & Company & Hydrogen Council. Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investments, market development and cost competitiveness. (2021).
- IEA. *The Future of Hydrogen*. IEA (2019).
- IEA. *Energy Technology Perspectives 2020*. (IEA, 2020).
- Bloomberg New Energy Finance. *Hydrogen Economy Outlook*. (2020).
- Bruce S et al. *National Hydrogen Roadmap*. https://www.csiro.au/~/-/media/Do-Business/Files/Futures/18-00314_EN_NationalHydrogenRoadmap_WEB_180823.pdf?la=en&hash=36839EEC2DE1BC38DC738F5AAE7B40895F3E15F4 (2019).
- Jemena. Welcome to Jemena’s Western Sydney Green Gas Project. <https://jemena.com.au/about/innovation/power-to-gas-trial>.
- The Coal-To-Liquids Imperative For Australian Fuel Security*. The Coal-To-Liquids Imperative%0AFor%0AAustralian Fuel Security.
- Emissions from ships operating in the Greater Metropolitan Area NSW Environment Protection Authority. 1–114 (2015).
- Chemistry Australia. The Industry. <https://chemistryaustralia.org.au/the-industry>.
- ACIL Allen Consulting. *Chemical Industry Economic Contribution Analysis, 2017-2018*. http://www.chemistryaustralia.org.au/docs_mgr/ACILAllenChemistry2017-2018_FINAL.pdf (2019).
- Cook, H., Hajkowicz, S., King, S. & Cox, F. *Elements in Everything: Current profile and future trends for the Australian chemicals and plastics industry*. (2013) doi:<https://doi.org/10.4225/08/584c4456f2418>.
- Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources. Energy trade. [energy.gov.au https://www.energy.gov.au/data/energy-trade](https://www.energy.gov.au/data/energy-trade) (2020).
- Orica. Operations - Orica Kooragang Island. <https://www.orica.com/Locations/Asia-Pacific/Australia/Kooragang-Island/Operations#ammonia>.
- IEA. Chemicals – Tracking Industry 2020. (2020).
- Accelerating R&D in NSW Advisory Council. *Action Plan: Turning ideas into Job - Accelerating reserach and development in NSW*. (State of New South Wales Department of Premier and Cabinet, 2021).
- Clean Energy Regulator. *National Greenhouse and Energy Reporting 2019-20 Highlights*. http://www.cleanenergyregulator.gov.au/DocumentAssets/Documents/NGER_highlights_infographic_2019-20.pdf (2021).
- NSW Government. Regional Growth Plans . <https://www.planning.nsw.gov.au/Plans-for-your-area/Regional-Plans>.
- City of Sydney. Environmental action. <https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/environmental-action>.
- City of Newcastle. City of Newcastle sets its five-year climate plan . <https://www.newcastle.nsw.gov.au/council/news/latest-news/city-of-newcastle-sets-its-five-year-climate-plan> (2020).
- NSW Government. Parkes Special Activation Precinct. <https://www.nsw.gov.au/snowy-hydro-legacy-fund/special-activation-precincts/parkes-special-activation-precinct>.
- NSW Department of Primary Industries. *NSW Primary Industries Performance, Data & Insights 2018*. <https://www.dpi.nsw.gov.au/about-us/publications/pdi/2018/exports#:~:text=Livestock meat and other products,wool and sheep meat respectively.> (2018).
- Hydrogen Europe. Hydrogen Applications. <https://hydrogeneurope.eu/index.php/hydrogen-applications>.
- World Energy Council & Frontier Economics. *International Aspects of A Power-to-X Roadmap*. (2018).
- World Energy Council. New Hydrogen Economy-Hope or Hype. *Innov. Insights Br.6* (2019).
- ACIL Allen Consulting. Opportunities for Australia from Hydrogen Exports. 1–114 (2018).
- Australian Renewable Energy Agency. Australia and Germany come together to assess hydrogen supply chain. *ArenaWire* [https://arena.gov.au/blog/australia-and-germany-come-together-to-assess-hydrogen-supply-chain/\(2020\)](https://arena.gov.au/blog/australia-and-germany-come-together-to-assess-hydrogen-supply-chain/(2020)).
- Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources. Australia, Germany working together on renewable hydrogen. (2020) doi:<https://www.industry.gov.au/news/australia-germany-working-together-on-renewable-hydrogen>.
- KPMG, NSW Office of Chief Scientist & NSW Department of Planning Industry and Environment. NSW : A Clean Energy Superpower. (2020).
- Graham, C., Hayward, P., Foster, J. & Havas, J. GenCost 2020-21 Consultation draft. 2020–2041 (2020).
- Aurecon & AEMO. 2020 Costs and Technical Parameter Review. (2019).

47. Australian Government. *Australian Energy Update 2020* | [energy.gov.au](https://www.energy.gov.au/publications/australian-energy-update-2020). *Australian Energy Statistics* <https://www.energy.gov.au/publications/australian-energy-update-2020> (2020).
48. NSW Department of Planning Industry and Environment. *NSW Electricity Infrastructure Roadmap*. (2020).
49. Schmidt, O. *et al.* Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *Int. J. Hydrogen Energy* **42**, 30470–30492 (2017).
50. Proost, J. State-of-the art CAPEX data for water electrolyzers, and their impact on renewable hydrogen price settings. *Int. J. Hydrogen Energy* **44**, 4406–4413 (2019).
51. Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S. & Ulgiati, S. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments* **5**, 24 (2018).
52. Shwisher, H., Poon, J., Hatt, B., Gerardi, W. & Millar, R. *Australia's pursuit of a large scale Hydrogen Economy*. (Jacobs, 2019).
53. Globenewswire.com. Ammonia Market Research Report by Product Form, by Application - Global Forecast to 2025 - Cumulative Impact of COVID-19. *2020* <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/07/28/2068463/0/en/The-Global-Ammonia-Market-is-expected-to-grow-from-USD-44-751-20-Million-in-2019-to-USD-68-249-82-Million-by-the-end-of-2025-at-a-Compound-Annual-Growth-Rate-CAGR-of-7-28.html>.
54. Orica. Operations - Orica Kooragang Island. <https://www.orica.com/Locations/Asia-Pacific/Australia/Kooragang-Island/Operations#ammonia> (2020).
55. Jasi, A. Santos and Perdaman sign HoA for an ammonium plant. *The Chemical Engineer* <https://www.thechemicalengineer.com/news/santos-and-perdaman-sign-hoa-for-an-ammonium-plant/> (2019).
56. Patel, S. Mitsubishi Power Developing 100% Ammonia-Capable Gas Turbine. *Power Mag* <https://www.powermag.com/mitsubishi-power-developing-100-ammonia-capable-gas-turbine/> (2021).
57. Komagai, T. Japan to introduce ammonia for thermal power, shipping fuels in late 2020s. *S&P Global* <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/coal/120720-japan-to-introduce-ammonia-for-thermal-power-shipping-fuels-in-late-2020s> (2020).
58. RenCat. Rencat technology. <https://rencat.net/Technology/index.html>.
59. Lindstrand, N. Unlocking ammonia's potential for shipping. *Man Energy Solutions* <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>.
60. Lim, D.-K. *et al.* Solid Acid Electrochemical Cell for the Production of Hydrogen from Ammonia. *Joule* **4**, 2338–2347 (2020).
61. Royal Society. *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. *The Royal Society Policy Briefing* (2020).
62. Leigh, G. J. Haber-Bosch and Other Industrial Processes BT - Catalysts for Nitrogen Fixation: Nitrogenases, Relevant Chemical Models and Commercial Processes. in (eds. Smith, B. E., Richards, R. L. & Newton, W. E.) 33–54 (Springer Netherlands, 2004). doi:10.1007/978-1-4020-3611-8_2.
63. Smith, C., Hill, A. K. & Torrente-Murciano, L. Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy Environ. Sci.* **13**, 331–344 (2020).
64. Brown, T. Ammonia production causes 1% of total global GHG emissions. *Ammonia Industry* <https://ammoniaindustry.com/ammonia-production-causes-1-percent-of-total-global-ghg-emissions/> (2016).
65. Boerner, L. K. Industrial ammonia production emits more CO₂ than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that. *Chemicals and Engineering News* <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Industrial-ammonia-production-emits-CO2/97/i24> (2019).
66. Capdevila-Cortada, M. Electrifying the Haber Bosch. *Nat. Catal.* (2019).
67. Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G. & Raso, F. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *J. Clean. Prod.* **135**, 1379–1395 (2016).
68. Sun, J. *et al.* hybrid plasma electrocatalytic process for sustainable ammonia production. *Energy Environ. Sci.* **14**, 865–872 (2021).
69. MacFarlane, D. R. *et al.* A Roadmap to the Ammonia Economy. *Joule* **4**, 1186–1205 (2020).
70. Abghoui, Y. *et al.* Enabling electrochemical reduction of nitrogen to ammonia at ambient conditions through rational catalyst design. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17**, 4909–4918 (2015).
71. Long, J. *et al.* Direct Electrochemical Ammonia Synthesis from Nitric Oxide. *Angew. Chemie Int. Ed.* **59**, 9711–9718 (2020).
72. Dongre, S. Green Ammonia Market: a New Era for Energy and Power Industry. *Energypost.eu* <https://energypost.eu/green-ammonia-market-a-new-era-for-energy-and-power-industry/> (2020).
73. IEA. *Global share of total energy supply by source 2018*. (2020).
74. IEA. *Natural Gas Information: Overview*. (IEA, 2020).
75. Natural Gas Global Market Report 2020. *The Business Research Company* <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/natural-gas-global-market-report> (2020).
76. Global Liquefied Natural Gas Market Size Report, 2020-2027. vol. GVR-1-6803 <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/liquefied-natural-gas-Ing-market> (2020).
77. IEA. *The Role of Gas in Today's Energy Transitions*. (IEA, 2019).
78. IEA. *Gas 2020*. (IEA, 2020).
79. Rönsch, S. *et al.* Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel* **166**, 276–296 (2016).
80. Jarvis, S. M. & Samsatli, S. Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **85**, 46–68 (2018).
81. Thema, M., Bauer, F. & Sterner, M. Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **112**, 775–787 (2019).
82. Ogawa, K. Japan to help build giant methane production plant in China - Nikkei Asia. *Nikkei Asia* <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Japan-to-help-build-giant-methane-production-plant-in-China> (2020).
83. ARENA. Renewable carbon neutral methane to be produced in south-west Queensland - Australian Renewable Energy Agency. *ARENAWIRE* <https://arena.gov.au/blog/renewable-methane-southwest-queensland/> (2020).
84. ATCO. ATCO investigates renewable natural gas in Albany, Western Australia. <https://www.atco.com/en-au/about-us/stories/atco-renewable-natural-gas-albany.html> (2020).
85. ARENA. Australian first biomethane trial for NSW gas network. *ArenaWire* <https://arena.gov.au/news/australian-first-biomethane-trial-for-nsw-gas-network/> (2020).
86. CSIRO. Methane Fuel Carrier Project. *ARENA R&D Progr. Renew. Hydrog. Export* (2020).
87. Australian Competition and Consumer Commission. *Gas Inquiry 2017–2025 Interim Report*. (2017).
88. Australian Energy Market Operator. *Gas Statement of Opportunities for eastern and south-eastern Australia*. https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Gas/National_Planning_and_Forecasting/GSOO/2019/2019-GSOO-report.pdf (2020).
89. Commonwealth of Australia. *Australian Energy Statistics 2020 Energy Update Report*. (Department of Industry, Science, Energy and Resources, 2020).
90. SGS Inspire Team. *Methanol: Properties and Uses*. (2020).
91. Markets and Markets. Methanol Market Global Forecast to 2025. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/methanol-market-425.html> (2020).
92. Argus Media. No Methanol prices, forecasts and analysis. <https://www.argusmedia.com/en/petrochemicals/argus-methanol-services>.

93. Mordor Intelligence. Methanol Market | Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/methanol-market> (2019).
94. Bell, D. A., Towler, B. F. & Fan, M. Chapter 12 - Methanol and Derivatives. in (eds. Bell, D. A., Towler, B. F. & Fan, M. B. T.-C. G. and I. A.) 353–371 (William Andrew Publishing, 2011). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2049-8.10012-9>.
95. Iaquaniello, G., Centi, G., Salladini, A. & Palo, E. Chapter 22 - Methanol Economy: Environment, Demand, and Marketing With a Focus on the Waste-to-Methanol Process. in (eds. Basile, A. & Dalena, F. B. T.-M.) 595–612 (Elsevier, 2018). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63903-5.00022-4>.
96. Andika, R. *et al.* Co-electrolysis for power-to-methanol applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **95**, 227–241 (2018).
97. IRENA and Methanol Institute. *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. (2021).
98. Methanol Institute. *Methanol: A Future-Proof Fuel*. (2020).
99. Carbon Recycling International. Technology and services. <https://www.carbonrecycling.is/technology-and-services>.
100. Chemicals, C. Methanol Plant in North Laverton, Melbourne. <https://www.coogee.com.au/Our-Businesses/Chemicals-Manufacturing/Manufacturing-Facilities/Methanol-plant-in-North-Laverton,-VIC>.
101. Potter, B. Finkel review ‘too little too late’ to save methanol plant. *Australian Financial Review* <https://www.afr.com/politics/finkel-review-too-little-too-late-to-save-methanol-plant-20170612-gwpbsf> (2017).
102. Chemicals, C. Methanol Plant in North Laverton, Melbourne.
103. Heaney, C. Plans for Australia’s only methanol plant to be built in Darwin Harbour. *ABC News* [https://www.abc.net.au/news/2019-09-04/methanol-plant-in-darwin-could-boost-gas-industry/11477208#:~:text=Coogee%2C a Western Australian chemical,and the Inpex gas plant.](https://www.abc.net.au/news/2019-09-04/methanol-plant-in-darwin-could-boost-gas-industry/11477208#:~:text=Coogee%2C%20a%20Western%20Australian%20chemical,and%20the%20Inpex%20gas%20plant.) (2019).
104. ABEL Energy. Bell Bay Power Fuels Project. <https://www.abelenergy.com.au/our-projects>.
105. Inglis, R. Proposed renewable methanol plant could create up to 30 jobs. *The Examiner* [https://www.examiner.com.au/story/6632805/proposed-renewable-methanol-plant-could-create-up-to-30-jobs/\(2020\)](https://www.examiner.com.au/story/6632805/proposed-renewable-methanol-plant-could-create-up-to-30-jobs/(2020)).
106. National Energy Technology Laboratory. Commercial use of Fischer Tropsch Synthesis. <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifiedia/sasol>.
107. Shell. Pearl GTL - Overview. <https://www.shell.com/about-us/major-projects/pearl-gtl/pearl-gtl-an-overview.html>.
108. El-Nagar, R. A. & Ghaneem, A. . Syngas Production, Properties, and Its Importance. *Intech* (2018) doi:10.5772/intechopen.89379.
109. Mordor Intelligence. Syngas Market: Growth, Trends, Covid-19 Impact and Forecasts (2021-2026). *2020* <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/syngas-market>.
110. Global Energy Monitor Wiki. Coal-to-Liquids in Australia. [https://www.gem.wiki/Coal-to-Liquids_in_Australia#:~:text=While there are no established,gas to a liquid fuel.](https://www.gem.wiki/Coal-to-Liquids_in_Australia#:~:text=While%20there%20are%20no%20established,gas%20to%20a%20liquid%20fuel.)
111. Mazengarb, M. Leigh Creek pushes huge \$2.6 billion brown coal gasification plant for fertiliser. *RenewEconomy* [https://reneweconomy.com.au/leigh-creek-pushes-huge-2-6-billion-brown-coal-gasification-plant-for-fertiliser-86309/\(2020\)](https://reneweconomy.com.au/leigh-creek-pushes-huge-2-6-billion-brown-coal-gasification-plant-for-fertiliser-86309/(2020)).
112. AgBioEn: Australia’s Groundbreaking Biomass Energy Facility. *AZO Cleantech* <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1101> (2020).
113. Hernández, S. *et al.* Syngas production from electrochemical reduction of CO₂: current status and prospective implementation. *Green Chem.* **19**, 2326–2346 (2017).
114. Higman, C. Syngas Database: 2017 Update. in *Gasification & Syngas Technologies Conference* (2017).
115. Lappas, A. & Heracleous, E. 18 - Production of biofuels via Fischer–Tropsch synthesis: Biomass-to-liquids. in (eds. Luque, R., Lin, C. S. K., Wilson, K. & Clark, J. B. T.-H. of B. P. (Second E.) 549–593 (Woodhead Publishing, 2016). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00018-7>.
116. Dieterich, V., Buttler, A., Hanel, A., Spliethoff, H. & Fendt, S. Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer–Tropsch-fuels: a review . *Energy Environ. Sci.* (2020) doi:10.1039/d0ee01187h.
117. Creamer, T. Sasol upscales renewables roll-out ambition to 900 MW, starts plotting big green-hydrogen role. *Mining Weekly* https://www.miningweekly.com/article/sasol-upscales-renewables-roll-out-ambition-to-900-mw-starts-plotting-big-green-hydrogen-role-2021-02-22/rep_id:3650 (2021).
118. Norsk e-fuel is planning Europe’s first Commercial plant for Hydrogen based Renewable Aviation Fuel in Norway. *FuelCellsWork* [https://fuelcellsworks.com/news/norsk-e-fuel-is-planning-europes-first-commercial-plant-for-hydrogen-based-renewable-aviation-fuel-in-norway/\(2020\)](https://fuelcellsworks.com/news/norsk-e-fuel-is-planning-europes-first-commercial-plant-for-hydrogen-based-renewable-aviation-fuel-in-norway/(2020)).
119. IATA. Jet Fuel Price Monitor. <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>.
120. KLM. World first in the Netherlands by KLM, Shell and Dutch ministry for Infrastructure and Water Management: first passenger flight performed with sustainable synthetic kerosene. [https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene/\(2021\)](https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene/(2021)).
121. Lee, M.-Y. *et al.* Current achievements and the future direction of electrochemical CO₂ reduction: A short review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **50**, 769–815 (2020).
122. Na, J. *et al.* General technoeconomic analysis for electrochemical coproduction coupling carbon dioxide reduction with organic oxidation. *Nat. Commun.* **10**, 5193 (2019).
123. Centers for Disease Control and Prevention. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities (2008). *Chemical Disinfectants | Infection Control* <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection/disinfection-methods/chemical.html> (2008).
124. Campos-Martin, J. M., Blanco-Brieva, G. & Fierro, J. L. G. Hydrogen Peroxide Synthesis: An Outlook beyond the Anthraquinone Process. *Angew. Chemie Int. Ed.* **45**, 6962–6984 (2006).
125. Murray, A. T., Voskian, S., Schreier, M., Hatton, T. A. & Surendranath, Y. Electrosynthesis of Hydrogen Peroxide by Phase-Transfer Catalysis. *Joule* **3**, 2942–2954 (2019).
126. Akhlaghi, N. & Najafpour-Darzi, G. A comprehensive review on biological hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* **45**, 22492–22512 (2020).
127. Acar, C. & Dincer, I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *J. Clean. Prod.* **218**, 835–849 (2019).
128. Hepburn, C. *et al.* The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* **575**, 87–97 (2019).
129. Ostovari, H., Sternberg, A. & Bardow, A. Rock ‘n’ use of CO₂: carbon footprint of carbon capture and utilization by mineralization. *Sustain. Energy Fuels* **4**, 4482–4496 (2020).
130. About us - Mineral Carbonation International. <https://www.mineralcarbonation.com/about-us>.
131. Mineral Carbon International – Recycling CO₂ a competitive advantage for Australia? - . *Canberra Business Chamber* <https://www.canberrabusiness.com/mineral-carbon-international-recycling-CO2-a-competitive-advantage-for-australia/>.
132. Sun, J. *et al.* A hybrid plasma electrocatalytic process for sustainable ammonia production. *Energy Environ. Sci.* (2021) doi:10.4135/9781446247501.n1321.
133. Hero(R) is the catalyst for our zero emission future. *Star Scientific* <https://starscientific.com.au/applications/>.
134. Star Scientific. Star Scientific’s cutting-edge hydrogen innovation to help drive Philippines sustainable economic development . *News Post* [https://starscientific.com.au/star-scientifics-cutting-edge-hydrogen-innovation-to-help-drive-philippines-sustainable-economic-development/\(2021\)](https://starscientific.com.au/star-scientifics-cutting-edge-hydrogen-innovation-to-help-drive-philippines-sustainable-economic-development/(2021)).
135. ARENA. Power to gas trial to inject hydrogen into Australia’s gas grid. *ArenaWire* [https://arena.gov.au/news/power-gas-trial-to-inject-hydrogen-australias-gas-grid/\(2017\)](https://arena.gov.au/news/power-gas-trial-to-inject-hydrogen-australias-gas-grid/(2017)).
136. Vorrath, S. Green hydrogen breakthrough uses energy from the sun, water from the air . *RenewEconomy* [https://reneweconomy.com.au/green-hydrogen-breakthrough-uses-energy-from-the-sun-water-from-the-air-85973/\(2020\)](https://reneweconomy.com.au/green-hydrogen-breakthrough-uses-energy-from-the-sun-water-from-the-air-85973/(2020)).

137. University of Wollongong. 2021: UOW developed hydrogen technology commercialised. *Media Release* <https://www.uow.edu.au/media/2021/uow-developed-hydrogen-technology-commercialised.php> (2021).
138. Ardent Underground. Ardent Underground Underground Hydrogen Storage. <https://ardentunderground.com/>.
139. NSW Government. Illawarra-Shoalhaven. <https://www.investregional.nsw.gov.au/regions/illawarra-shoalhaven/#45>.
140. NSW Ports. Port Kembla. <https://www.nswports.com.au/port-kembla>.
141. NSW Government. Illawarra-Shoalhaven.
142. Murphy, K. Energy Australia confirms new gas plant in Illawarra after Morrison government threatened to intervene . *The Guardian* <https://www.theguardian.com/australia-news/2021/may/04/energy-australia-confirms-new-gas-plant-in-illawarra-after-morrison-government-threatened-to-intervene> (2021).
143. Thompson, B. Andrew Forrest to build \$1 billion green power station in Port Kembla. *Australian Financial Review* <https://www.afr.com/policy/energy-and-climate/forrest-willing-to-fund-1b-green-power-station-in-nsw-20210315-p57axg> (2021).
144. BlueScope. *Annual Report 2019/20*. <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/bluescope-corporate-umbraco-media/media/2929/fy2020-annual-report.pdf> (2019).
145. BlueScope. Bluescope underwrites investment in 500,000 panel solar farm. (2019).
146. Counsell, D. *Sustainability Report 2019/20*. <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/bluescope-corporate-umbraco-media/media/2929/fy2020-annual-report.pdf> (2020).
147. Patisson, F. & Mirgaux, O. Hydrogen Ironmaking: How It Works. *Metals* vol. 10 (2020).
148. Martelaro, N. Energy Use in US Steel Manufacturing. [http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/martelaro1/\(2016\)](http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/martelaro1/(2016)).
149. *Hybrit Fossil Free Steel: A Joint venture between SSAB, LKAB and Vattenfall*. https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit_brochure.pdf (2017).
150. Daehn, K. E., Cabrera Serrenho, A. & Allwood, J. M. How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? *Environ. Sci. Technol.* **51**, 6599–6606 (2017).
151. BlueScope Steel. *Steel for Life - Sustainability in a Changing World*. http://www.bluescopesteel.com.au/files/BlueScope_Steel_for_Life.pdf.
152. Counsell, D. *Sustainability Report 2019/20*. (2020).
153. *Hybrit Fossil Free Steel: A Joint venture between SSAB, LKAB and Vattenfall*. (2017).
154. Hunter, R. DRI and Its Effects On the Scrap Steel Market in the US. *Midrex* [https://www.midrex.com/tech-article/dri-and-its-effects-on-the-scrap-steel-market-in-the-us/\(2017\)](https://www.midrex.com/tech-article/dri-and-its-effects-on-the-scrap-steel-market-in-the-us/(2017)).
155. NSW Department of Planning and Environment. *NSW Pumped Hydro Roadmap*. [https://reneweconomy.com.au/another-nail-in-coals-coffin-german-steel-furnace-runs-on-renewable-hydrogen-in-world-first-55906/\(2018\)](https://reneweconomy.com.au/another-nail-in-coals-coffin-german-steel-furnace-runs-on-renewable-hydrogen-in-world-first-55906/(2018)).
156. Origin Energy. Shoalhaven proposed expansion. *2020* <https://www.originenergy.com.au/about/who-we-are/what-we-do/generation/shoalhaven-proposed-expansion.html>.
157. NSW Department of Planning and Environment. *NSW Pumped Hydro Roadmap*. (2018).
158. NSW, W. Water Supply System Schematics. <https://www.watarnsw.com.au/supply/Greater-Sydney/schematic>.
159. NSW, W. Tallowa Dam. <https://www.watarnsw.com.au/supply/visit/tallowa-dam>.
160. Water NSW. Avon Dam. <https://www.watarnsw.com.au/supply/visit/avon-dam>.
161. Malindra Group. Malindra Products. <https://www.manildra.com.au/products/>.
162. NSW Government. Modification 19 Proposed Ethanol Distillery Plant Upgrade. *Major Projects* <https://www.planningportal.nsw.gov.au/major-projects/project/40181>.
163. Malindra Group. CO2 Plant To Create Food and Beverage Products. [https://www.manildra.com.au/CO2-plant-to-create-food-and-beverage-products-the-cultivator-autumn-2019/\(2021\)](https://www.manildra.com.au/CO2-plant-to-create-food-and-beverage-products-the-cultivator-autumn-2019/(2021)).
164. How is Ethanol Made? *Lets talk Science* <https://letstalkscience.ca/educational-resources/backgrounders/how-ethanol-made>.
165. How is Ethanol Made? *Lets talk Science*.
166. Pacheco, R. & Silva, C. Global Warming Potential of Biomass-to-Ethanol: Review and Sensitivity Analysis through a Case Study. *Energies* vol. 12 (2019).
167. Methanol Institute. How is Biodiesel Made. <https://www.methanol.org/biodiesel/>.
168. NSW Government. Hunter. <https://www.investregional.nsw.gov.au/regions/hunter/#45>.
169. Kemp, A. & Chen, T. Economic contribution of the Port of Newcastle. (2020).
170. NSW Department of Planning, Industry and Environment. *Hunter Regional Plan 2036*.
171. Mazengarb, M. NSW tips \$70m into Hunter hydrogen hub as coal closures loom . *RenewEconomy* [https://reneweconomy.com.au/nsw-tips-70m-into-hunter-hydrogen-hub-as-coal-closures-loom/\(2021\)](https://reneweconomy.com.au/nsw-tips-70m-into-hunter-hydrogen-hub-as-coal-closures-loom/(2021)).
172. NSW Government. Hunter.
173. Argus Media. Japan targets 3mn t/yr of ammonia fuel use by 2030. <https://www.argusmedia.com/en/news/2184741-japan-targets-3mn-tyr-of-ammonia-fuel-use-by-2030> (2021).
174. Liu, X., Elgowainy, A. & Wang, M. Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green Chem.* **22**, 5751–5761 (2020).
175. Rapier, R. Estimating The Carbon Footprint Of Hydrogen Production. *Forbes* <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2020/06/06/estimating-the-carbon-footprint-of-hydrogen-production/?sh=5977007024bd> (2020).
176. Australian Embassy Tokyo. Australia-Japan resources and energy relationship. Australia-Japan resources and energy relationship.
177. Moore, P. Anglo American's hydrogen mining truck back on track for H1 2021 first motion . *International Mining* [https://im-mining.com/2020/09/17/anglo-americans-hydrogen-mining-truck-back-track-h1-2021-first-motion/\(2020\)](https://im-mining.com/2020/09/17/anglo-americans-hydrogen-mining-truck-back-track-h1-2021-first-motion/(2020)).
178. NSW Government. Renewable Energy Zones | Energy NSW. (2020).
179. Suntop Solar Farm. <https://suntopsolarfarm.com.au/solar-project/>.
180. No Title. <https://adms.ajenti.com.au/>.
181. Water NSW. Burrendong Dam. <https://www.watarnsw.com.au/supply/visit/burrendong-dam>.
182. Water NSW. Wyangala Dam. <https://www.watarnsw.com.au/supply/visit/wyangala-dam>.
183. ARTC. *The Case for Inland Rail: Summary of the 2015 Business Case*. https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/ehq-production-australia/573b865247760681cf086584fcf8dad522def603/documents/attachments/000/106/353/original/IR_897_The_Case_for_Inland_Rail.pdf?1559016526 (2015).
184. The Australasian Railway Association. Australian Rail Industry Report 2010. (2010).
185. Sharpe, B. Volvo Truck's plan to commercialize DME technology. *International Council on Clean Transportation (ICCT)* <https://theicct.org/blogs/staff/volvo-trucks-plan-commercialize-dme-technology> (2013).
186. Falco, M. De. Dimethyl Ether (DME) production. (2017).
187. US Bureau of Transportation Statistics. Class I Rail Freight Fuel Consumption and Travel (Metric). <https://www.bts.gov/content/class-i-rail-freight-fuel-consumption-and-travel-metric>.
188. ARTC. The solution to Australia ' s freight challenge. (2019).
189. Allied Market Research. Renewable Methanol Market Overview. <https://www.alliedmarketresearch.com/renewable-methanol-market> (2020).

190. Argus Media. Iran's methanol exports to China rise on higher supply. [https://www.argusmedia.com/en/news/2116464-irans-methanol-exports-to-china-rise-on-higher-supply#:~:text=China is the world's largest,two new units this year. \(2020\).](https://www.argusmedia.com/en/news/2116464-irans-methanol-exports-to-china-rise-on-higher-supply#:~:text=China is the world's largest,two new units this year. (2020).)
191. AEMO. National Electricity and Gas Forecast. <http://forecasting.aemo.com.au/>.
192. Tenants - Botany Industrial Park. [https://botanyindustrialpark.com.au/tenants/\(2021\).](https://botanyindustrialpark.com.au/tenants/(2021))
193. Qenos. *Qenos Polyolefins facilities Botany Industrial Park Safety Case Summary 2017*. [http://www.qenos.com/internet/home.nsf/\(LUIImages\)/Qenos Botany Safety Case 2017 final/\\$File/093 QEN Botany BIP Safety Case 2017 P3.pdf \(2017\).](http://www.qenos.com/internet/home.nsf/(LUIImages)/Qenos Botany Safety Case 2017 final/$File/093 QEN Botany BIP Safety Case 2017 P3.pdf (2017).)
194. Qenos. *Qenos Chemistry Resource Kit 2015*. [http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/2A65AA5E65D93763CA257E0A001C35AE/\\$file/Chemistry Resource Kit.pdf \(2015\).](http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/2A65AA5E65D93763CA257E0A001C35AE/$file/Chemistry Resource Kit.pdf (2015).)
195. Qenos. Polyethylene. *Our Plants* <http://www.qenos.com/internet/home.nsf/web/OurPlants>.
196. Office of Environment and Heritage & State of NSW. *Final Compliance Audit Report - Qenos Pty Ltd, Lot 5 and Lot 10 of Botany Industrial Park, 15-20 Beauchamp road, Matraville NSW 2036*. (Office of Environment and Heritage, 2011).
197. Indorama Ventures. Indorama Ventures Oxides Australia . *Worldwide Locations* [https://www.indoramaventures.com/en/worldwide/1514/indorama-ventures-oxides-australia \(2021\).](https://www.indoramaventures.com/en/worldwide/1514/indorama-ventures-oxides-australia (2021))
198. Orica. Botany Industrial Park Pty Ltd. [http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/15265A7D9B151C89CA2577DE007A6BB2/\\$file/BIP Brochure Text 2010 v2.pdfceaudits/120316AuditQenosBotany.pdf](http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/15265A7D9B151C89CA2577DE007A6BB2/$file/BIP Brochure Text 2010 v2.pdfceaudits/120316AuditQenosBotany.pdf).
199. Duffy, L. *IXOM Annual Report 2020*. (Department of Planning, Industry and Environment, 2020).
200. IXOM. Botany. *Environmental Monitoring Data - Botany* [https://www.ixom.com/being-responsible/environmental-monitoring-data/botany \(2021\).](https://www.ixom.com/being-responsible/environmental-monitoring-data/botany (2021))
201. Qenos. *Sustainability Report 2010*. (Qenos Corporate Affairs Department, 2010).
202. Pierce, J. East Coast Wholesale Gas Market and Pipeline Frameworks Review. *Qenos* [https://www.aemc.gov.au/sites/default/files/content/d463acbf-65b8-44f5-8f4a-cac82cde0c1b/MarketReview-Submission-GPR0003-Qenos-Pty-Ltd-150401.pdf \(2015\).](https://www.aemc.gov.au/sites/default/files/content/d463acbf-65b8-44f5-8f4a-cac82cde0c1b/MarketReview-Submission-GPR0003-Qenos-Pty-Ltd-150401.pdf (2015).)
203. NSW Ports. Trade Reports. *News and Resources* <https://www.nswports.com.au/resources-filtered/trade-reports>.
204. NSW Ports. Port Botany . *Locations* <https://www.nswports.com.au/port-botany>.
205. ELGAS. LP Gas Bottle/Cylinders Suppliers. <https://www.elgas.com.au/welcome-to-elgas/gas-suppliers-lp-gas-bottles-cylinders/>.
206. ARUP Australia. *Australian Hydrogen Hubs Study: Technical Study*. (2019).
207. Infinite Blue Energy. Project NEO 1 GW Baseload. <https://infiniteblueenergy.com/project/project-neo-coming-soon/>.
208. Renewables SA & Government of South Australia. Neoen Australia Hydrogen Superhub. <http://www.renewablesa.sa.gov.au/topic/hydrogen/hydrogen-projects-south-australia/neoen-australia-hydrogen-super-hub>.
209. CSIRO. Murchison Renewable Hydrogen Project. *HyResource* <https://research.csiro.au/hyresource/murchison-renewable-hydrogen-project/>.
210. AGIG. Hydrogen Park South Australia - HyP SA. [https://www.agig.com.au/hydrogen-park-south-australia \(2018\).](https://www.agig.com.au/hydrogen-park-south-australia (2018))
211. AGIG. Hydrogen Park Gladstone . [https://www.agig.com.au/hydrogen-park-gladstone \(2021\).](https://www.agig.com.au/hydrogen-park-gladstone (2021))
212. Mazengarb, M. Australia's first three commercial green hydrogen projects to share \$103m ARENA funds. *RenewEconomy* [https://reneweconomy.com.au/australias-first-three-commercial-green-hydrogen-projects-to-share-103m-arena-funds/\(2021\).](https://reneweconomy.com.au/australias-first-three-commercial-green-hydrogen-projects-to-share-103m-arena-funds/(2021))
213. Ludlow, M. & Macdonald-Smith, A. ARENA tips \$100m into three hydrogen projects. *Financial Review* [https://www.afr.com/companies/energy/arena-tips-100m-into-three-hydrogen-projects-20210504-p57otr \(2021\).](https://www.afr.com/companies/energy/arena-tips-100m-into-three-hydrogen-projects-20210504-p57otr (2021))
214. Hiroi, Y. Fukushima powers up one of world's biggest hydrogen plants. *Nikkei Asia* [https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Fukushima-powers-up-one-of-world-s-biggest-hydrogen-plants \(2020\).](https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Fukushima-powers-up-one-of-world-s-biggest-hydrogen-plants (2020))
215. Clark, N. World's largest dynamic hydrogen electrolysis plant inaugurated. *The Chemical Engineer* [https://www.thechemicalengineer.com/news/world-s-largest-dynamic-hydrogen-electrolysis-plant-inaugurated/\(2017\).](https://www.thechemicalengineer.com/news/world-s-largest-dynamic-hydrogen-electrolysis-plant-inaugurated/(2017))
216. Hill, J. S. World's largest 'green' hydrogen pilot commences operation. *RenewEconomy* [https://reneweconomy.com.au/worlds-largest-green-hydrogen-pilot-commences-operation-66722/\(2019\).](https://reneweconomy.com.au/worlds-largest-green-hydrogen-pilot-commences-operation-66722/(2019))
217. Theurer, M. Green light for green hydrogen at Energie Park Mainz. [https://www.energiepark-mainz.de/en/read/article/green-light-for-green-hydrogen-at-energiepark-mainz/\(2015\).](https://www.energiepark-mainz.de/en/read/article/green-light-for-green-hydrogen-at-energiepark-mainz/(2015))
218. Linde. Linde to Build, Own and Operate World's Largest PEM Electrolyzer for Green Hydrogen. *Press Releases* [https://www.linde.com/news-media/press-releases/2021/linde-to-build-own-and-operate-world-s-largest-pem-electrolyzer-for-green-hydrogen \(2021\).](https://www.linde.com/news-media/press-releases/2021/linde-to-build-own-and-operate-world-s-largest-pem-electrolyzer-for-green-hydrogen (2021))
219. Rais, A. Germany's Renewable Hydrogen Project 'Westküste 100' Secures Funding. *Process Worldwide* [https://www.process-worldwide.com/germanys-renewable-hydrogen-project-westkueste-100-secures-funding-a-953626/\(2020\).](https://www.process-worldwide.com/germanys-renewable-hydrogen-project-westkueste-100-secures-funding-a-953626/(2020))
220. Edwardes-Evans, H. Air Liquide completes 20 MW Canadian electrolysis plant. *S&P Global* [https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/012621-air-liquide-completes-20-mw-canadian-electrolysis-plant \(2021\).](https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/012621-air-liquide-completes-20-mw-canadian-electrolysis-plant (2021))
221. Nikola Motors. Nikola orders enough electrolysis equipment from NEL to produce 40,000 kgs of hydrogen per day. *Press Releases* [https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-orders-enough-electrolysis-equipment-from-nel-to-produce-40000-kgs-of-hydrogen-per-day-79%0A \(2020\).](https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-orders-enough-electrolysis-equipment-from-nel-to-produce-40000-kgs-of-hydrogen-per-day-79%0A (2020))
222. Stromsta, K.-E. NextEra Energy to Build Its First Green Hydrogen Plant in Florida. *Green Tech Media* [https://www.greentechmedia.com/articles/read/nextera-energy-to-build-its-first-green-hydrogen-plant-in-florida \(2020\).](https://www.greentechmedia.com/articles/read/nextera-energy-to-build-its-first-green-hydrogen-plant-in-florida (2020))
223. BP. bp Australia announces feasibility study into hydrogen energy production facility. *Press Releases* [https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-australia-announces-feasibility-study-into-hydrogen-energy-production-facility.html \(2020\).](https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-australia-announces-feasibility-study-into-hydrogen-energy-production-facility.html (2020))
224. ARENA. Project GERI Feasibility Study. *Projects* <https://arena.gov.au/projects/project-geri-feasibility-study/>.
225. NS Energy. South Australia unveils plans to build \$173m hydrogen project. [https://www.nsenegybusiness.com/news/south-australia-unveils-plans-to-build-173m-hydrogen-project/\(2020\).](https://www.nsenegybusiness.com/news/south-australia-unveils-plans-to-build-173m-hydrogen-project/(2020))
226. ARENA. Yara Pilbara Renewable Ammonia Feasibility Study. *Projects* <https://arena.gov.au/projects/yara-pilbara-renewable-ammonia-feasibility-study/>.
227. CSIRO. Origin Green Hydrogen and Ammonia Plant. *HyResource* [https://research.csiro.au/hyresource/origin-green-hydrogen-and-ammonia-plant/\(2020\).](https://research.csiro.au/hyresource/origin-green-hydrogen-and-ammonia-plant/(2020))
228. Macdonald-smith, A. & Thompson, B. Origin, Fortescue in rival hydrogen projects in Tasmania. *Australian Financial Review* [https://www.afr.com/companies/energy/origin-fortescue-in-rival-hydrogen-projects-in-tasmania-20201117-p56f76 \(2020\).](https://www.afr.com/companies/energy/origin-fortescue-in-rival-hydrogen-projects-in-tasmania-20201117-p56f76 (2020))
229. Matich, B. Australian port to host massive PV array, hydrogen plant. *PV Magazine Australia* [https://www.pv-magazine.com/2021/03/11/australian-port-to-host-massive-pv-array-hydrogen-plant/\(2021\).](https://www.pv-magazine.com/2021/03/11/australian-port-to-host-massive-pv-array-hydrogen-plant/(2021))
230. Brown Trevor. H2U moves forward with 3 GW green ammonia export plant . *Ammonia Energy* [https://www.ammoniaenergy.org/articles/h2u-moves-forward-with-3-gw-green-ammonia-export-plant/\(2020\).](https://www.ammoniaenergy.org/articles/h2u-moves-forward-with-3-gw-green-ammonia-export-plant/(2020))
231. CSIRO. H2-Hub(TM) Gladstone . *HyResource* [https://research.csiro.au/hyresource/h2-hub-gladstone/\(2020\).](https://research.csiro.au/hyresource/h2-hub-gladstone/(2020))
232. Di Paolo, A. Air Products Plans \$5 Billion Green Fuel Plant in Saudi Arabia. *Bloomberg* [https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-07-07/air-products-to-build-5-billion-ammonia-plant-in-new-saudi-city \(2020\).](https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-07-07/air-products-to-build-5-billion-ammonia-plant-in-new-saudi-city (2020))
233. Noel, A. M. YARA finds partners for biggest ever green ammonia plant. *Bloomberg* [https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-02-18/yara-finds-partners-for-biggest-ever-green-ammonia-plant \(2021\).](https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-02-18/yara-finds-partners-for-biggest-ever-green-ammonia-plant (2021))

234. Brown, T. Yara and Nel collaborate to reduce electrolyzer costs; announce green ammonia pilot in Norway by 2022. *Ammonia Industry* <https://www.ammoniaenergy.org/articles/yara-and-nel-collaborate-to-reduce-electrolyzer-costs-announce-green-ammonia-pilot-in-norway-by-2022> (2019).
235. Iberdrola. Iberdrola will construct the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe. *Flagship Projects* <https://www.iberdrola.com/about-us/lines-business/flagship-projects/puertollano-green-hydrogen-plant>.
236. Alexander H. Tullo. CF plans green ammonia plant in Louisiana. *Chemical and Engineering News* <https://cen.acs.org/energy/hydrogen-power/CF-plans-green-ammonia-plant/98/i43> (2020).
237. ARENA. APA Renewable Methane Demonstration Project. *Projects* <https://arena.gov.au/projects/apa-renewable-methane-demonstration-project/>.
238. Ng, E. China's carbon neutral goal: Hitachi to build world's biggest plant in Shaanxi to mix carbon dioxide, hydrogen into methane. *South China Morning Post* <https://www.scmp.com/business/companies/article/3115473/chinas-carbon-neutral-goal-hitachi-build-worlds-biggest-plant> (2020).
239. Audi e-gas plant qualified to participate in balancing market to stabilize grid. *Green Car Congress* <https://www.greencarcongress.com/2015/07/20150715-egas.html> (2015).
240. EU. Innovative large-scale energy STOragE technologies AND Power-to-Gas concepts after Optimisation. *Cordis Europa* <https://cordis.europa.eu/project/id/691797> (2020).
241. ABEL Energy Bell Bay Powerfuels Project - HyResource.
242. George Olah CO₂ to Renewable Methanol Plant, Reykjanes. *Chemicals Technology* <https://www.chemicals-technology.com/projects/george-olah-renewable-methanol-plant-iceland/>.
243. EU. MefCO₂ Project. *Cordis Europa* <https://cordis.europa.eu/project/id/637016>.
244. EU. FreSME Project. *Cordis Europa* <https://cordis.europa.eu/project/id/727504>.
245. Swiss Liquid Future. Fast track to carbon capture in Norway. *Press Release* https://www.swiss-liquid-future.ch/wp-content/uploads/2020/07/2020-07-01_fast-track-CC-in-Norway_PM-Final_revised21-2.pdf (2020).
246. Liquid Wind secures site and carbon dioxide for Sweden's first e-fuel facility. *Bio Energy International* <https://bioenergyinternational.com/biofuels-oils/liquid-wind-secures-site-and-carbon-dioxide-for-swedens-first-e-fuel-facility>.
247. Aalborg University. Power2Met – Renewable Energy to Green Methanol. <https://vbn.aau.dk/en/projects/power2met-renewable-energy-to-green-methanol>.
248. Burgess, M. Mitsubishi consortium to recycle CO₂ for methanol production. *Gas World* <https://www.gasworld.com/mitsubishi-consortium-to-recycle-CO2-for-methanol-production/2018772.article> (2020).
249. Feng, C. China's carbon neutral efforts to get boost from new ways to produce methanol, hydrogen. *South China Morning Post* <https://www.scmp.com/tech/science-research/article/3105859/chinas-carbon-neutral-efforts-get-boost-new-ways-produce> (2020).
250. Europe's first power-to-liquid demo plant in Norway plans renewable aviation fuel production in 2023. *Green Air* <https://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2711>.
251. Aroonwilas, A. & Veawab, A. Characterization and Comparison of the CO₂ Absorption Performance into Single and Blended Alkanolamines in a Packed Column. *Ind. Eng. Chem. Res.* **43**, 2228–2237 (2004).
252. Kenarsari, S. D. *et al.* Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture. *RSC Adv.* **3**, 22739–22773 (2013).
253. Leung, D. Y. C., Caramanna, G. & Maroto-Valer, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **39**, 426–443 (2014).
254. Song, C., Liu, Q., Deng, S., Li, H. & Kitamura, Y. Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **101**, 265–278 (2019).
255. IEA. *Global Energy & CO₂ Status Report 2019*. (IEA, 2019).
256. Sanz-Pérez, E. S., Murdock, C. R., Didas, S. A. & Jones, C. W. Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chem. Rev.* **116**, 11840–11876 (2016).
257. Chapter 5: Direct Air Capture. in *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda* (The National Academies Press, 2019). doi:10.17226/25259.
258. Ho, H.-J., Iizuka, A. & Shibata, E. Carbon Capture and Utilization Technology without Carbon Dioxide Purification and Pressurization: A Review on Its Necessity and Available Technologies. *Ind. Eng. Chem. Res.* **58**, 8941–8954 (2019).
259. Bakhtiary-Davijany, H. & Myhrvold, T. On Methods for Maturity Assessment of CO₂ Capture Technologies. *Energy Procedia* **37**, 2579–2584 (2013).
260. Bhowan, A. S. Status and Analysis of Next Generation Post-combustion CO₂ Capture Technologies. *Energy Procedia* **63**, 542–549 (2014).
261. Plaza, M. G., Martínez, S. & Rubiera, F. CO₂ Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. *Energies* vol. 13 (2020).
262. Hills, T., Leeson, D., Florin, N. & Fennell, P. Carbon Capture in the Cement Industry: Technologies, Progress, and Retrofitting. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 368–377 (2016).
263. Folger, P. Carbon capture: a technology assessment. in (LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE, 2013).
264. Abanades, J. C. *et al.* Emerging CO₂ capture systems. *Int. J. Greenh. Gas Control* **40**, 126–166 (2015).
265. Osman, O., Sgouridis, S. & Sleptchenko, A. Scaling the production of renewable ammonia: A techno-economic optimization applied in regions with high insolation. *J. Clean. Prod.* **271**, 121627 (2020).
266. Gomez, J. R., Baca, J. & Garzon, F. Techno-economic analysis and life cycle assessment for electrochemical ammonia production using proton conducting membrane. *Int. J. Hydrogen Energy* **45**, 721–737 (2020).
267. Osman, A. I., Hefny, M., Abdel Maksoud, M. I. A., Elgarahy, A. M. & Rooney, D. W. Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. *Environ. Chem. Lett.* **19**, 797–849 (2021).
268. Air Products Africa. Air Separation Unit – How it works. <https://airproductsafrica.co.za/on-site-generation/>.

