

NSW P2X (Power to X) 산업 사전 타당성 조사

NSW주의 P2X 경제를 위한 로드맵

UNSW 시드니

This work was carried out by the UNSW Sydney with the support from the Office of NSW Chief Scientist & Engineer.

CITATION

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

COPYRIGHT

© UNSW Sydney 2021. To the extent permitted by law, all rights are reserved, and no part of this publication covered by copyright may be reproduced or copied in any form or by any means except with the written permission of UNSW Sydney.

DISCLAIMER

This report is prepared solely for the use of Office of NSW Chief Scientist & Engineer, and for The NSW Government. It has been prepared in accordance with the scope in the Terms of Reference. UNSW Sydney and NSW Government do not take the responsibility arising in any way from reliance placed in this report. Any reliance placed is that party's sole responsibility. We shall not be liable to any losses, claims, expenses, demands, damages, liability, or any other proceedings out of reliance by any third party on this report.

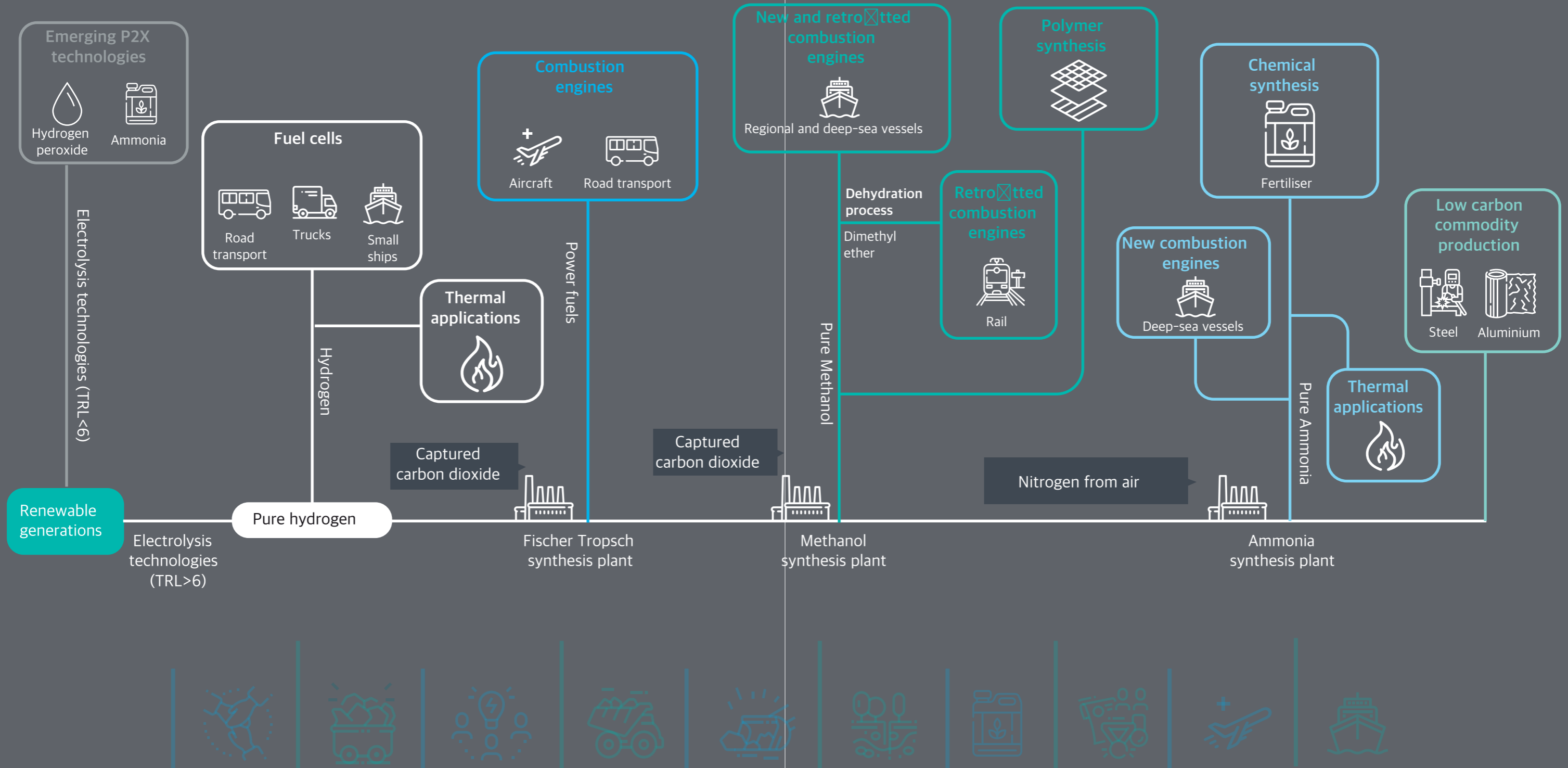
개요

뉴사우스웨일즈 주(NSW)는 태양열과 풍력 분야에서 세계 최고의 재생 에너지와 양수발전 (pumped hydro) 자원을 보유하고 있습니다. 이렇듯 풍부한 천연 자원을 보유하고 있는 동시에 최근 재생에너지 생산 및 저장 비용이 급속히 절감되면서 NSW주는 글로벌 에너지 분야의 초강대국으로 부상하고 있습니다. NSW주는 재생에너지 개발에서 대규모 생산 및 유통 단계, 양쪽모두에서 큰 진전을 이루었습니다. 이로 인해 가격을 낮추고 NSW주의 에너지 부문의 탈탄소화를 순조롭게 추진하고 있습니다. 저비용의 재생가능 에너지를 다른 산업 부문에 공급함으로써 NSW주에 상당한 경제적 기회와 탈탄소화 기회를 창출하게 될 것입니다. 이러한 이유로 NSW주의 재생가능한 자원과 저비용 전기를 최대한 활용하기 위해 다양한 섹터 간의 커풀링 효과를 만들어 낼 통합 솔루션을 개발해야 합니다.

Power-to-X(P2X) 산업은 이러한 잠재력을 보유한 솔루션을 제공합니다. P2X 기술은 저비용 재생 에너지 및 기타 풍부한 자원 또는 폐기물 자원을 사용하여 그린 수소, 암모니아 및 합성 탄화수소 같은 청정 연료 및 화학 물질을 생산할 수 있습니다. P2X는 청정원료를 생산하기 위해 물을 그린 수소로 변환하는 것으로 시작합니다. 변환된 그린수소는 청정원료로 바로 사용되거나 다른 전력 연료, 화학 물질 및 그린 상품을 생산하는 보조공정을 위한 공급 원료로 사용됩니다. P2X패스웨이(그림 A)는 탄소의 순환 고리를 멈추고 산업전반에 걸쳐 화석 연료를 대체하는 지속가능한 청정 대체재를 만들어 낼 수 있습니다. 항공 및 해상 운송처럼 탄소배출량이 높고 탄소배출감소가 어려운 일부 산업의 경우 P2X는 제한적인 대안들 중에 가장 실행가능성이 높은 탈탄소화 솔루션을 제공합니다. P2X 제품들은 호주의 재생 자원들을 상품화하고 해외시장에 안전하고 안정적이며 경제적인 방식으로 수출할 수 있는 뛰어난 에너지 운송체들입니다.

호주 주정부와 지역 정부들은 지역의 역량과 수용력을 개발하기 위해 모두 수소 레이스에 뛰어들었습니다. 미래의 수소산업을 통해 호주는 저 비용 전기와 수소 가치 사슬에서 기술적 우위를 선점하여 중요한 글로벌 생산국이 될 것이 유망합니다. P2X산업은 NSW주에 수소를 넘어 다가올 수소경제를 기반으로 재생가능한 전기, 그린 수소 및 폐기물 자원들을 변환하여 다양한 청정 전력 원료, 화학물 및 제품들을 만들어 낼 수 있는 역량을 제공합니다. P2X산업의 발전은 지식 공유, 재배치가 가능한 기술, 집계된 수요 및 규모의 경제를 통해 수소 경제를 보완하고 더욱 가속화할 수 있습니다.

그림 A. P2X 경로는 섹터 커플링과 뿌리 깊은 탈탄소화를 가능하게 합니다. 전력 연료의 다운스트림 응용 프로그램은 P2X 기술을 사용하여 탄소배출고리를 폐쇄할 수 있습니다.



P2X의 잠재력을 인식한 UNSW 시드니는 NSW 수석 과학자 및 엔지니어 사무실(NSW OCSE)을 대행하여 이 사전 타당성 조사를 이끌었습니다. 이 작업의 목적은 NSW주가 미래의 P2X 경제를 구축할 수 있는 기회에 대해 독립적이고, 증거에 기반한, 산업 중심의 관점을 제공하는 것입니다. 이 연구의 목표는 다른 P2X 산업들의 기술적 경로를 평가하고 사전 기술-경제적인 분석을 통해 NSW 주에서 대규모의 P2X 생산을 위한 유망 로케이션들을 식별하는 것입니다.

NSW주는 주정부가 새로운 경제변영을 위한 모든 성공적인 요건들을 갖추고 있는 P2X에 투자하기 위한 강력한 비즈니스 케이스를 보유하고 있습니다. 여기에는 이미 기존하며 점점 더 증가하고 있는 P2X제품 수요, 재생 에너지 존(REZs)및 대규모 전기 인프라들이 생기면서 낮아진 전기 비용, 특별활성화 구역(SAPs) 및 수소 허브들의 계획 편성과 신속한 배치, P2X기술관련 세계최고의 연구 개발 역량 및 NSW주정부의 탈탄소화 지원을 위한 정책과 재정지원 등이 포함됩니다.

NSW주와 호주에 기술 활용 신산업으로서 P2X를 배치하는 것은 각 기술적 경로에 따라 결정될 것입니다. 이 연구는 이런 P2X 제품들에 대한 로컬 시장 규모 및 글로벌 시장에서의 수요를 비롯해서 NSW주 상황에 맞춰 각기 다른 P2X기술, 개발 상태 및 비용, 화석 연료와의 가격 동등성을 위한 주요요인, 적용 및 최종 사용자에게 대한 체계적인 검토를 수행했습니다. 이 연구를 통해 고려한 이런 P2X경로들은 전력을 수소로 변환하는 방식 (Power to Hydrogen), 암모니아, 메탄, 메탄올, 합성 가스 외 기타 다양한 경로들을 (P2G 방식) 포함하고 있습니다. 전력을 수소로 변환하는 방식(Power to Hydrogen)은 모든 P2X 기술 경로의 기본 단계이며 기술적 경제적 실행가능성을 위한 핵심 요소입니다. NSW주와 호주에서 발명된 혁신적인 P2X기술들 중 일부가 성공적으로 상용화 되었으며 산업적 적용과 대량생산을 위한 초기 단계에 있습니다.

대규모 P2X생산을 위해 유망한 NSW 로케이션 선정을 지원하기 위해 P2X허브 평가 프레임워크를 개발했습니다. 평가 기준은 교통 인프라, 재생에너지 및 공급원료(예, 수자원의) 접근성, 기존의 중공업 및 새로운 산업 구역 계획, 국제 시장을 위한 수출 잠재력 등의 요구사항들을 기반으로 하고 있습니다. 이 프레임워크에 따라 실행된 질적 평가를 통해 일라와라(Illawarra), 헌터(Hunter), 파크스(Parkes), 와가 와가(Wagga Wagga), 더보(Dubbo) 및 배저리스 크릭(Badgerys Creek) 여섯 곳이 일차적인 NSW P2X 허브로 선별되었습니다. **(그림 B)**

* 본 사전 타당성 조사에 포함된 로케이션 분석은 전 지역에 대한 완전하고 철저한 조사가 아니며 NSW주 내에는 P2X경제를 지원할 수 있는 다른 유망 지역들이 있습니다.

† 제안된 위치에 대해 광범위한 비즈니스 사례를 개발할 수 있으므로 추가 이해 관계자 의 참여가 필요하다는 점을 유념할 필요가 있습니다.

NSW P2X 허브를 위한 3단계 산업 개발 기회가 제시되었습니다. 1단계(Tire 1)은 철강 및 화학 생산과 같은 중공업의 친환경 제품 및 원자재를 대상으로 합니다. 2단계(Tier 2)는 운송업, 광업 및 공정 산업을 위한 전력 연료에 중점을 둡니다. 3단계(Tier 3)는 P2X 마이크로 허브들을 분산하여 지역의 수요를 충족하는 것을 목표로 합니다. 1단계 및 2단계 산업들과 선정된 NSW P2X허브들에 대한 세부적인 사전 타당성 평가가 수행되었습니다. 이 타당성 평가는 현지 그린철강 생산을 위한 일라와라의 P2H(P2수소), 일본 수출을 위한 헌터의 P2암모니아, 내륙 철도용 P2연료 및 파크스의 화학 제조를 위한 P2메탄올 등의 4건의 N2X 허브 비즈니스 케이스를 제시합니다. [†] 각 P2X 허브 비즈니스 케이스에 대해 원료 요건, P2X프로젝트 및 인프라 비용, 전기 및 P2X 제품 가격 예상의 모델링 및 정량적 분석을 통해 사업 타당성을 지지했습니다.

본 연구를 제공하기 위해 NSW의 P2X기회에 대한 각기 다른 관점을 이해하기 위해 50인 이상의 개인과 조직의 자문을 받았습니다. 이러한 이해관계자들은 NSW주와 호주연방정부의 P2X 가치사슬에 속하는 주요 플레이어들과 미래 참여자, 로컬 스타트업 및 중소기업, NSW연구 및 기술 발명가, 글로벌 P2X공급망, 다국적기업 및 NGO들을 포함한 지역 산업체들을 대표하고 있습니다. 이해 당사자들은 NSW주가 글로벌 P2X리더로 위치를 선점할 수 있는 경쟁우위를 가지고 있으며 이를 위해 모든 이해당사자들의 협력과 자원을 동원하는 것이 필요하다는데 전반적으로 합의하고 있습니다. 이해 관계자들은 NSW주의 P2X경제를 위한 기술 개발 및 산업 역량 구축을 위한 협력과 파트너십에 강력한 관심을 표명했습니다. 이런 모멘텀을 포착하기 위해 산업계, 연구 및 정부 전반에 걸쳐 40인 이상의 회원들로 구성된NSW P2X 컨소시엄을 설립했으며 컨소시엄의 네트워크는 점점 더 확장되고 있습니다.

이해 관계자들의 인사이트와 사전 타당성 조사결과에 따라 NSW P2X경제를 위한 역량과 수용력을 구축하기 위한 로드맵을 단계별로 제안했습니다.

1. 기술 발전과 산업 개발을 위한 산업, 연구 및 정부의 협업을 위해 핵심 조정자 역할을 하는 P2X 혁신 네트워크를 공식화합니다.
2. 상용화 기반의 R&D프로젝트를 지원하기 위해 기술 발명가 및 최종 사용자에게 연구 인프라, 전문 지식 및 자원을 지원하는 P2X R&D 상업화 허브를 설립합니다.
3. 상업적 규모의 기술 채택의 물꼬를 열어줄 시범 프로젝트 및 타당성 조사 같은 초기 단계의 P2X 프로젝트들을 효율적으로 개시합니다.

4. 투자 신뢰 구축을 위해 P2X제품의 수출기회를 파악하고 장기적 대규모 생산을 위한 오프테이크 계약을 모색합니다.
5. 태양광 PV의 산업적 변형 및 시행의 성공적인 사례들을 재현하는 현지에서 개발된 혁신적인 기술에 대한 투자를 목표로 합니다.
6. 생산에서부터 활용에 이르기까지 수직으로 통합된 P2X 가치 사슬 및 로컬 제조 역량을 구축합니다.
7. NSW P2X 경제의 토대를 마련하기 위해 대규모 생산을 위한 P2X 에코 산업 구역 을 개발하고 중앙집중식으로 배치합니다.

다른 기술 주도적 산업 혁신과 마찬가지로 기술 혁신과 상용화는 NSW주에서 풍요로운 P2X 경제를 구축하기 위한 초석입니다. 따라서 이 연구는 지역 및 산업 단계에 이르기까지 P2X 기술 경로 및 기술적 경제적 타당성에 중점을 두고 있습니다. 이 사전 타당성 조사는 NSW주를 위해 엄청난 경제적 그리고 탈탄소화 혜택을 실현하기 위한 BSW주의 P2X잠재력과 기회를 조사하기 위한 첫 걸음입니다. 이 보고서는 끝이 아니라 NSW P2X의 시작점입니다.



그림 B: 잠재적인 P2X 기회 개발을 위해 선택한 위치의 적합성에 대한 사전 타당성 요약입니다.

위치(Location)	공급원료		기존 산업 분석	Tier 1 & 2 기회 분석	Tier 1 & 2 기회 분석	Tier 3 기회 분석
	기존 중공업/ 경공업 산업	재생 가능한 전력 공급 여부	경수 공급원료 공급 여부	P2X 중/경공업의 탈탄소화 기회	항만 인프라 접근성	마이크로 P2X 경제 개발 기회
일라와라 - 솔헤이븐 Illawarra - Shoalhaven						
헌터 Hunter						
파크스 Parkes		 파크스에는 2개의 주요 저수지 (부렌동과 와이안갈라)가 있지만 이 지역은 가뭄이 잦은 편입니다.	 파크스는 광산업이 발달되어 있으며 '내륙철도'의 인터모달 거점이 될 것입니다.	 내륙철도와 광산운영에 전력연료를 적용할 기회가 있습니다.	 내륙철도를 전력연료수출에 활용할 수 있는 가능성이 있습니다.	
와가와가 Wagga Wagga			 와가와가 지역은 대규모 농업 및 식품 가공 분야가 발달되어 있습니다.	 전력 연료를 가열 및 운송에 적용할 수 있습니다.	 화물 및 물류 경로를 만들 수 있습니다.	
더보 Dubbo			 더보에는 광산분야가 발달되어 있습니다.	 채굴작업은 P2X적용 기회를 제공합니다.	 화물 및 물류 경로를 만들 수 있습니다.	
배저리 크릭 Badgerys Creek			 항공산업 및 에어로트로폴리스	 항공 산업 및 에어로트로폴리스는 전력연료 적용 기회를 제공합니다.	 화물 및 물류 경로를 만들 수 있습니다.	

Key:

- 기준을 충족할 수 있는 확실한 기회를 나타냅니다.
- 기준을 충족할 수 있는 잠재적인 기회가 있지만 이해관계자의 지원이 필요함을 나타냅니다.
- 기준을 충족하기 위한 불확실성이 더 높지만, 이해관계자의 기여도가 더 높아진다면 시행 가능성을 나타냅니다.

목차

- 개요 5
- 1. Power-to-X 소개 16
 - 1.1. 왜 Power-to-X인가? 17
 - 1.2. P2X타당성의 동인 18
- 2. NSW Powe-to-X사례 23
 - 2.1. NSW에 의한 탈탄소화 및 경제적 기회의 우선순위 책정 23
 - 2.2. 청정 동력연료의 시장 성장 23
 - 2.3. 지역 화학 산업의 기존 수요 24
 - 2.4. 전기 인프라 및 재생 에너지 구역 24
 - 2.5. 수소 허브 및 특별 활성화 구역 25
 - 2.6. R&D 및 기술 개발 역량 25
 - 2.7. 탈탄소화를 위한 공공 정책 및 금융 패키지 26
 - 2.8. 비즈니스 인력 및 인프라 26
- 3. P2X 기술 경로 30
 - 3.1 현재 P2X기술에 대한 개요 30
 - 3.2 전력을 수소로 변환 (Power to Hydrogen) 31
 - 3.3 전력을 암모니아로 변환 (Power to Ammonia) 35
 - 3.4 전력을 메탄으로 변환(Power to Methane) 38
 - 3.5 전력을 메탄올로 변환(Power to Methanol) 40
 - 3.6 전력을 합성가스로 변환(합성연료)(Power to Syngas (Synthetic Fuels) 44
 - 3.6. 피셔-트롭슈 공정을 이용한 합성가스 생산 및 변환 44
 - 3.7. 기타 다른 Power to X 기술 47
 - 3.7. 다른 P2X 경로들 47
- 4.0. NSW주와 호주의 혁신적인 P2X기술 49
- 5.0. P2X 허브' 개발에 적합한 로케이션 53
 - 5.1. NSW주 'P2X 허브' 기회를 평가하는 3단계 프레임워크 53
 - 5.2. 'P2X 허브' 실행을 위한 NSW의 주요 로케이션 개요 53
 - 5.3. 일라와라 솔헤이븐 지역 56
 - 5.4. 헌터 지역 61
 - 5.5. 파크스 지역 64
 - 5.6. 기타 기회 70
- 6.0 NSW주의 P2X 에코구역 시행을 위한 로드맵 74
 - 1단계 (2021-2022): 협업 및 지식 공유 75
 - 2단계 (2023-2030): 기술 R&D 및 상용화 76
 - 3단계(2025-2030): 시장 준비 77
 - 4단계 (2031-2050): 산업 배포 78
- 부록 A: 현재 진행 중 및 계획이 발표된 P2X 프로젝트 82
- 부록 B: P2X생산을 위한 공급원료 기술 89
- 부록 C: 도움을 주신 분들 95
- 부록 D: NSW P2X 얼라이언스 회원 97
- References 98

그림 목차

- 그림 A: P2X 경로는 섀터 커플링과 뿌리 깊은 탈탄소화를 가능하게 합니다. 전력 연료의 다운스트림 응용 프로그램은 P2X 기술을 사용하여 탄소배출고리를 폐쇄할 수 있습니다 7
- 그림 B: 잠재적인 P2X 기회 개발을 위해 선택한 위치의 적합성에 대한 사전 타당성 요약입니다 11
- 그림 1: 다른 최종 사용자 그룹에 따라 분류한 P2X 기술 20
- 그림 2: NSW 전역의 다양한 에너지 영역에서 재생 가능 에너지 생성 잠재력 28
- 그림 3: 수소로 확장 가능한 기회 네트워크 30
- 그림 4: 현재 글로벌 수소 가치 사슬 31
- 그림 5: 그린, 블루 및 그레이 수소 생성 예상 비용 ¹⁷ 32
- 그림 6: 제메나에 의해 개발되고 있는 웨스턴 시드니 그린 가스 프로젝트 33
- 그림 7: 호주에서 전기 분해를 통한 수소 생성 비용을 절감할 수 있는 가능성 34
- 그림 8: 오리카의 쿠라강 섬 제조시설. 이미지 제공: 오리카 35
- 그림 9: 하버 보쉬 공정 도식 36
- 그림 10: NSW주의 에너지 벡터로서 그린 암모니아의 잠재적 공급 체인 37
- 그림 11: 자원별 글로벌 에너지 공급 분석 38
- 그림 12: 재래식 메탄 공정의 고차원적 도식 38
- 그림 13: 퀸즐랜드의 APA 재생 가능 메탄화 프로젝트 49
- 그림 14: 재생 가능한 전기 분해 및 탄소 포획을 사용한 전기를 메탄으로 변환(P2M)하는 폐쇄 루프 과정 40
- 그림 15: 메탄올의 전통적 사용 및 새로운 활용 40
- 그림 16: 최종 사용 부문별 메탄올의 글로벌 수요 41
- 그림 17: 메탄올 및 메탄올 기반 연료(DME, 올레핀 및 파라핀 류) 생성을 위한 상용화 된 경로 41
- 그림 18: 전통적인 에너지 매개체와 새롭게 부상하는 에너지 매개체의 변환을 위한 에너지 밀도 비교 41
- 그림 19: 아이슬란드에 있는 CRI의 시설 42
- 그림 20: 빅토리아에 있는 호주 유일의 메탄올 공장 42
- 그림 21: 메탄올 생성을 위한 잠재적인 P2X 경로 43

그림 22: 최종사용처 부문별 글로벌 합성가스 수요 분석 44

그림 23: 합성가스 비율 (H₂/CO)을 기반으로 하는 합성가스 파생상품 45

그림 24: 합성가스의 직접 합성을 위한 선파이어GmbH 의 Sylink SOEC 시스템 45

그림 25: 탄소순환고리를 마무리하기 위한 P2X를 사용사용한 전기화학적 합성가스 생성 46

그림 26: LAVO™ 그린 에너지 저장 시스템 49

그림 27: APA 메탄화 공정의 일러스트 디자인 49

그림 28: 암모니아 생산을 위한 하이브리드 플라즈마 전기분해 시스템의 회로도 49

그림 29: 헤이저 프로세스의 공정 흐름 도표 50

그림 30: Switch2의 파일럿 시스템. 이미지 제공: Switch2 50

그림 31: 아덴트 언더그라운드 의 H2 스토리지 솔루션과 대안의 비용 비교 51

그림 32: 일라와라 솔헤이븐 지역 지도 56

그림 33: 현재 산업계의 철강 제조 과정을 보여주는 회로도 57

그림 34: 프로젝트 HYBRIT의 회로도 57

그림 35: 솔헤이븐의 수력 용량 기회 58

그림 36: 헌터 지역의 기존 수출 인프라 지도 61

그림 37: NSW주 내의 NSW P2X 경제 로드맵 74

그림 38: 제안된 P2X 구역의 회로도 80

그림 39: 아민 기반 공정의 간단한 회로도 ²⁵² 89

그림 40: 수소 생성을 위한 증기 메탄 개척 시설에 설치된 PSA 유닛 90

그림 41: CYNARATM 공정의 회로도, 천연 가스로부터 CO2 분리를 위한 상용 멤브레인 시스템 90

그림 42: 산업적 연도 가스로부터 CO2를 분리하는 초저온 증류 기반 분리 회로도 90

그림 43: 화학적 흡착 기반 DAC 공정의 회로도 91

그림 44: 질소 및 산소를 생성하기 위한 공기 제품에 의해 개발된 상용 공기 분리 장치(ASU) 공정의 회로도 93

표 목록

표 1: NSW에서 'P2X 허브' 기회를 평가하는 프레임워크 53

표 2: 'P2X 허브' 로서의 잠재 전망 요약 54

표 3: 저탄소 철강 생산을 위한 주요 동인 평가 59

표 4: 일라와라 솔헤이븐 지역에서 저탄소 강철 생산을 위한 사전 타당성 평가 60

표 5: 헌터 지역 수소 수출 허브의 주요 동인 평가 62

표 6: 헌터 지역 수소 수출 허브 사전 타당성 평가 63

표 7: 내륙 철도 프로젝트를 위해 디젤과 DME를 블렌딩하기 위한 의 기본 사례 에 사용되는 핵심 데이터 64

표 8: NSW 주정부가 채택할 수 있는 3가지 블렌드 시나리오(수소 5%, 10%, 15%)에 대한 HHV 65

표 9: NSW 주정부를 위한 3가지 수소 블렌드 시나리오별 천연 가스 소비량 및 탄소 배출량의 감소 65

표 10: NSW주에서 주 전역의 가스 블렌딩을 촉진하기 위해 필요한 수소 및 재생에너지 수요 66

표 11: 파크스에서 P2X연료 생산을 위한 핵심 동인들 66

표 12: 파크스의 P2X 연료 생성에 대한 사전 타당성 평가 67

표 13: 파크스 지역의 메탄을 수출경제 생산을 위한 핵심동인 68

표 14: 파크스의 메탄을 수출 경제 의 사전 타당성 평가 69

표 15: 진행 중인 그리고 공표된 그린 수소 프로젝트 목록 82

표 16: 진행 중 및 발표된 녹색 암모니아 프로젝트 목록 84

표 17: 진행 중 및 발표된 그린 메탄 프로젝트 목록 86

표 18: 진행 중 및 발표 그린 메탄을 프로젝트 목록 87

표 19: 진행 중 및 발표 그린 시너지 프로젝트 목록 88

표 20: 다양한 CO₂ 출처 비교 92

표 21: CO₂포획을 위한 잠재적 기술 전망 92

표 22: 다른 포인트 소스에서 탄소 캡처의 비용 전망 92

클린 테크놀로지를 통해 탄소 무배출을 달성하는 것은 NSW경제의 탈탄소화에 매우 중요합니다. 재생에너지 도입 증가, 특히 태양광 및 풍력 발전은 부인할 수 없이 전기 생산비용을 낮춤으로써 NSW주의(그리고 호주의) 국내 및 국제 경쟁력을 촉진하고 동시에 다운스트림 전기 소비자들의 탈탄소화를 촉진하고 있습니다. 현재 NSW주의 전기공급의 21%는 재생자원으로부터 공급되며 FY2020-21년 평균 도매 가격은 ~\$70 MWh¹입니다. (호주의 다른 주와 영토 중 가장 높은 도매가격임) 향후 10년 이내에 12GW용량의 네트워크를 제공하기 위해 제안된 다섯 개의 신재생에너지 존(REZs)이 도입되면서 이 시장 점유율은 더 증가할 것으로 예상됩니다.

그러나 재생 에너지 도입은 하루 중 특정 시간 동안만 가능하다는 간헐성 및 제한된 가용성, 그리드 연결 및 후속 사용과 관련된 이슈들이 한계에 달하며 문제점들을 가지고 있습니다. REZs를 비롯하여 주의 에너지 전환 프레임워크의 다른 요소들이 (배터리 양수발전 같은) 스토리지 문제들을 해결하기 위해 설계되었지만, 이런 솔루션들은 크게 현장, 규모 및 기간별로 한정되어 있습니다. 이런 문제들이 재생가능 에너지의 추가적인 도입을 제한하고 있습니다.

재생 가능한 Power-to-X(P2X)는 신재생 에너지를 산업용 공급원료 및 연료로 쉽게 사용되는 다양한 형태의 화학적 에너지 운반체 ('X'로 통칭함)들로 변환할 수 있는 프로세스와 기술들을 포함함으로써 이러한 문제들에 대한 잠재적인 솔루션을 제공합니다. 나아가 핵심적인 환경적 이점으로써 물과 특히 이산화탄소(CO₂) 및 NO_x 처럼 '풍부하고' 때로 '폐기배출물'인 분자들을 원료로 사용합니다.

이러한 방식으로 P2X는 간헐적인 재생 가능 에너지들을 저장할 수 있는 기회를 제공하며 동시에 현재는 화석 연료 자원에서부터 생산되는 연료와 화학물들을 생성합니다. P2X는 때로 연결 문제와 수요 부족으로 어려움이 겪는 재생 가능한 프로젝트들의 활용을 촉진할 수 있습니다.

P2X의 채택은 재생 에너지의 통합을 용이하게 하기 어려운 산업으로 이어질 것입니다. 재생 가능 에너지는 현재 산업 부문에서 최소한의 역할을 하고 있으며, 글로벌 CO₂ 배출량의 40%에 대한 책임이 산업적 배출이라는 것을 고려할 때 이 사실은 매우 중요합니다.⁵ 따라서 과도한 개조 없이 산업 부문의 재생 가능 에너지 활용을 가능하게 하는 통합 솔루션을 개발할 필요가 시급합니다.

NSW주의 재생 가능 P2X 경제가 재생 가능 전기를 화학 물질 형태로 저장할 수 있는 이런 플랫폼을 제공함으로써 빠른 기간내에 즉각적인 호주의 재생가능성 잠재력을 실현할 진정한 기회를 제공할 것이 분명합니다.

탈탄소화 목표를 달성하는 것 외에도, P2X 는 국가에 상당한 경제적 이익을 제공할 수 있습니다. P2X를 통해 NSW(및 호주)는 산업에 필요한 화학 물질과 연료를 현지에서 제조함으로써 수입에 대한 의존도를 줄일 수 있습니다. 차후의 규모 확장을 통해 이런 전력 원료를 아시아태평양 및 EU의 기존 무역 파트너들에게 수출할 가능성도 생길 수 있습니다.

P2X 경제의 주요 이점은 일반적으로 거리가 멀고 외진 곳에 있는 재생가능 잠재력이 높은 지역들에 투자를 유치하여 지역개발과 일자리 증대로 이어질 것이라는 점입니다. 또한 P2X산업에 필요한 지원 인프라와 기술을 현지에서 개발하고 제조할 수 있다면 당연히 주와 국가를 위해 더 큰 경제적 이익을 가져올 것입니다.

NSW 주정부는 재생 가능 산업에 대한 투자를 통해 다시 경제를 회복하고 지속가능한 일자리를 창출하는 것의 중요성을 잘 인식 하고 있습니다. 재생에너지에 대한 이러한 초기 단계의 투자들은 NSW주가 저 탄소경제로 전환하는 변화의 초석이 될 것입니다.

P2X의 한가지 핵심 기술은 수질 전해해를 통해 수소(H₂)를 생성 하는 것이며 이후 (하버-보수, 메탄화, 메탄올 합성 같은) 이차 변환 기술을 통해 암모니아 및 탄소 기반 제품으로 전환이 가능합니다.

전기 분해로 수소(H₂) 생성하기는 이미 잘 확립되어 있으며(TRL 9), 최근 여러 대규모 전기분해 프로젝트(> 1GW)들이 발표되었습니다.⁶⁻⁹ 이와 유사하게, (i) 수소 H₂ 와 이산화탄소 CO₂, (ii) 수소 H₂ 와 질소(N₂)의 결합을 공기에서 분리하여 메탄(CH₄, 기술 준비 수준 (TRL) 8-9), 메탄올(CH₃OH, TRL 5-7) 및 암모니아(NH₃, TRL 5-7)를 생성하는 프로젝트가 전 세계적으로 검토되고 있습니다.

또한, 전기분해(TRL:3-5)를 이용한 직접적인 암모니아 합성, 과산화수소 및 옥시하이드로카본 생산과 같은 새로운 P2X 경로도 개발되고 있습니다.

1.1. 왜 Power-to-X인가?

현재 거의 모든 산업용 공급원료와 연료는 화석 연료로 공급되고 있습니다. 화석 연료의 사용이 끊임없는 환경 발자국의 증가로 이어지며 기후 안정성을 훼손하고 있기 때문에 이는 심각한 문제를 야기합니다. 이러한 현실은 다음과 같은 사항들을 가능하게 하는 Power-to-X 경제에 이상적인 기회를 제시합니다.

지속 가능한 가치 사슬

P2X는 물, 공기중의 질소(주변 공기의 78%는 N₂)와 CO₂(현재 전 세계적으로 연간~30 Gt의 CO₂ yr⁻¹가 방출되고 있음) 나 직접적인 공기 포집처럼 자연적으로 풍부한 분자들을 가치 있는 상품으로 활용할 수 있게 해 줄 것입니다.

1. Power-to-X 소개

기존 인프라 내에서의 통합

대부분의 P2X 제품은 화석 연료로 생성한 것과 동일한 구성을 가지며, 따라서 쉽게 활용할 수 있습니다. 그러므로 신형 P2X 산업은 스토리지, 운송 및 활용을 위해 이미 성숙된 공급망을 활용할 수 있습니다.

일자리 창출

P2X 경제는 호주의 직간접적인 일자리 창출을 가능하게 할 것입니다. 언스트 앤 영의 최근 분석에 따르면 재생 에너지에 대한 1달러 투자는 화석 연료 프로젝트에 대한 1달러 투자 보다 3배 더 많은 일자리를 창출합니다.¹¹ 또한, P2X 기반 수소를 통해 그린 철강 생성 및 암모니아 생산으로 전환함으로써, 호주 (및 NSW)는 수천 개의 일자리를 창출 할 수 있습니다. 여기에는 기존의 화석연료 기반 인력들이 큰 일자리의 손실 없이 청정 에너지 산업으로 원활하게 전환할 수 있는 기회들도 포함됩니다.¹² 최근 딜로이트 보고서에 따르면 미래의 호주 수소 수출 산업만으로도 2050년까지 최대 16,900개의 새로운 정규직 일자리를 창출할 수 있습니다.¹³

1.2. P2X타당성의 동인

P2X 실현가능성의 핵심 동인은 저가전기와 전기분해장치 자본 비용입니다. 재생 에너지 부문의 성장은 확실히 전기발전 비용을 낮추는 것뿐만 아니라 이 저 비용 에너지를 하루 중 더 긴 시간동안 사용할 수 있도록 가용성을 높임으로써 (다시 말해서 더 높은 수용력 요인)이를 가능하게 만듭니다. 특히 태양광 PV와 풍력기반 전력 생산비용이 2010년이후 각각 82%와 32% 감소했으며, 태양광과 풍력 양쪽 모두에서 수용력 요인이 >30% 증가했습니다.¹⁴

추가적으로 전기분해장치 가격 또한 획기적으로 감소하고 있습니다. 전기분해장치 제조업체는 (2030년까지 단기적으로)40%에서 (2050년까지 장기적으로)80%까지 자본 비용 감소를 예상하고 있습니다.¹⁵ 노르웨이에 본사를 둔 전기분해장치 제조업체인 Nel은 최근 메가자동화 제조 시설로의 전환이 완료되면 전기분해장치 비용을 75% 절감할 것으로 예상한다고 밝혔습니다.¹⁶

동시에 이러한 개발은 비용 경쟁력이 있는 P2X, 특히 H2 가 발전할 수 있는 길을 열고 있습니다. 특히 수소 발전의 경우 호주, 칠레, 사우디아라비아 같은 국가에서 단기적으로 \$2-4 kg¹ 로 가격이 상당히 감소할 것이며, 2030년 정도로 이른 시기에 화석 연료 기반 수소 비용과 동등한 수준이 될 것으로 예상됩니다.¹⁷ 이러한 저비용 H2는 전력 연료 및 기타 화학 물질로 차후 변환하는데도 가격 경쟁력을 보유할 수 있는 방안을 열어줄 것입니다.

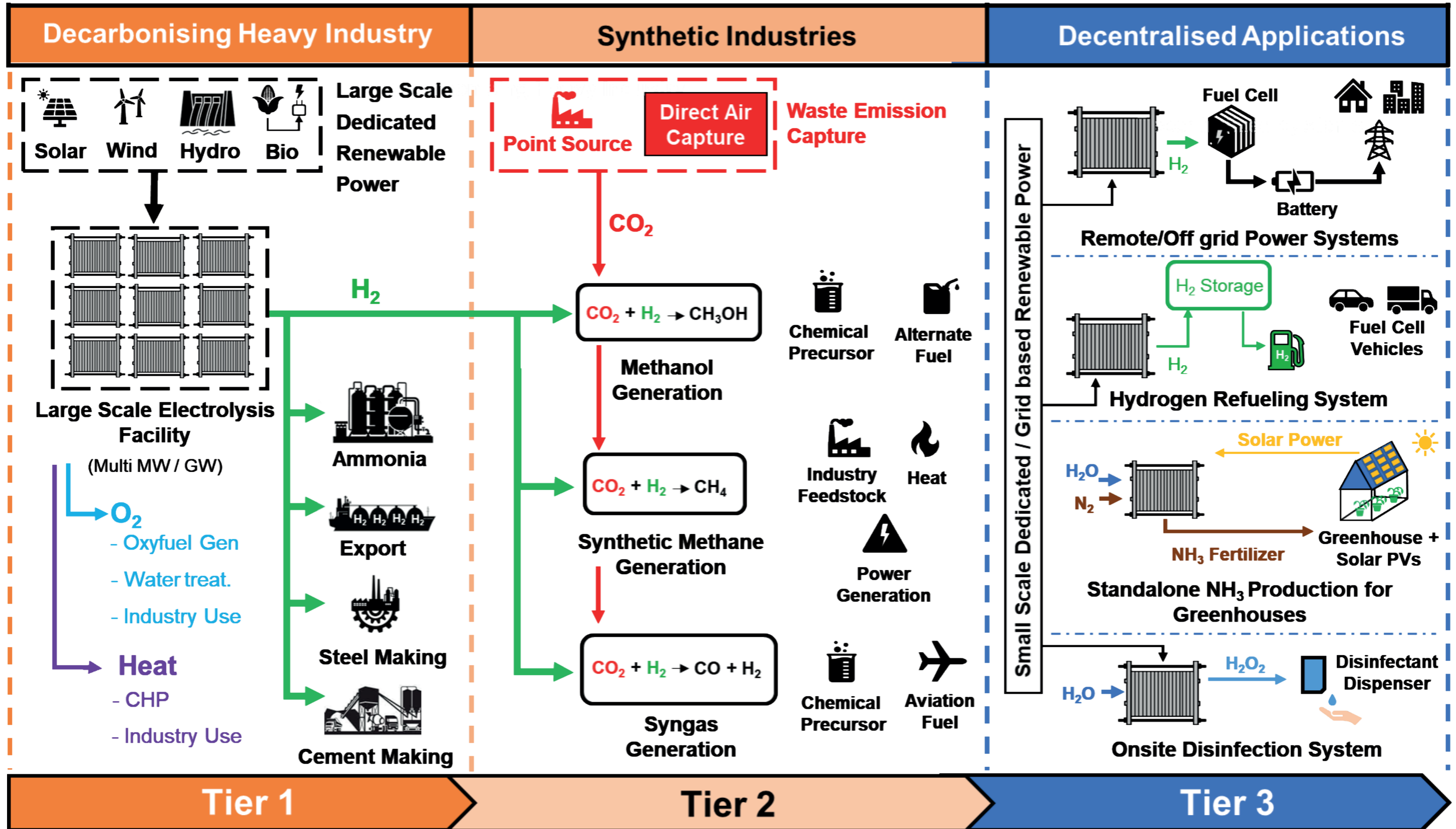
이러한 방식으로 그린 재생 연료와 화학 물질은 경제 전반에 걸쳐 화석연료를 대체할 중요한 기회를 앞두고 있습니다. 이들은 기존 공급망을 크게 수정할 필요 없이 가스 네트워크, 항공, 철강 제조 및 비료 생산처럼 탄소 배출을 절감하기 어려운 산업을 탈탄소화 하기 위한 (낮은 재생 가능 수소 가격에 달린)저비용 전략을 나타냅니다.

P2X 기술에 대한 NSW의 투자는 결과적으로 수출 경제의 발전을 가져올 것입니다. 그런 다음 기술은 다른 단계들로 (그림 1) Tier 1 은 암모니아 생성(Haber-Bosch), 철강 제조, 시멘트 제조 또는 천연 가스 그리드에 주입과 같은 기존 중공업에서 수출 또는 활용되는 수소와 함께 대규모 수소 전해질을 배치하는 것을 포함할 수 있습니다. Tier 2에는 H₂를 로컬용 메탄올, 메탄 또는 syngas와 같은 그린 벡터로 변환할 수 있는 추가 P2X 프로세스 및 인프라 개발이 포함됩니다. Tier 3은Power-to-X의 분산 응용 프로그램을 포함할 수 있습니다.

지금은 2050년까지 세계가 저탄소 경제를 중심축으로 재편됨에 따라 NSW추가 P2X 연료의 대량 적용을 용이하기 하기 위해 필요한 인프라 빌딩 블록을 구축하는데 적절한 시기입니다.



그림 1: 다른 최종 사용자 그룹에 따라 분류한 P2X 기술



2. NSW Power-to-X 사례

미래의 P2X 산업을 구축하려면 해당 기술 공간에서의 즉각적인 목표를 가진 조직화된 투자가 필요합니다. NSW주는 미래 수소 경제를 위한 모든 성공적인 조건들과 P2X 개발을 주도할 기회를 보유하고 있습니다.

2.1. NSW에 의한 탈탄소화 및 경제적 기회의 우선순위 책정

P2X 기술과 이러한 P2X 기술이 활성화하는 산업들은 NSW주의 경제 성장, 새로운 일자리 창출 그리고 보다 지속 가능하고 탄소배출을 억제하는 경제로 산업을 전환하기 위한 우선과제로 선별되었습니다. 특히 주의 기후 변화 대책을 위한 계획 및 NSW주의 경제 전략인 NSW주의 탄소중립 (Net Zero Plan)과 NSW주의 2040 경제 청사진에 의해 수소가 우선순위로 선정되었습니다.

NSW 탈탄소화 혁신 연구 2020은 매 2년마다 탄소중립(Net Zero) 달성을 위한 NSW주의 탈탄소화 여정의 도전과 기회를 검토하는 연구 보고서입니다. 이 연구는 다양한 부분에서 NSW주의 P2X의 탄소배출 감소 및 경제적 기회들을 강조했습니다. 이 연구에서 제안한 65가지 경제적 기회 중 상당수는 P2X 기술 및 산업과 관련이 있습니다. 많은 산업에 적합한 에너지 운반선과 공급원료로서 P2X 제품은 NSW주 경제의 전기, 운송, 건설 환경, 농업 및 중공업 전반에 적용됩니다. 이 연구를 통해 P2X 기술은 NSW주가 경제적 그리고 탈탄소화의 잠재력을 펼치기 위해 적극적으로 개발하고 채택해야 할 중요한 기술이라는 것을 인정받았습니다.

‘NSW: 청정 에너지 초강대국(산업 기회)’라는 제목의 보고서는 NSW 전력 인프라 로드맵의 핵심 구성 요소로 NSW주의 에너지 계획을 요약합니다. 이 보고서는 NSW 정부에 저비용 에너지를 활용할 수 있는 새로운 산업 개발 기회를 추구하기 위한 권고안을 제공했습니다. 보고서에 의해 확인된 다양한 미래 산업 중 대부분은 그린 수소, 강철, 알루미늄, 암모니아, 지속 가능한 화학 물질, 합성 연료 및 저공해 운송을 포함한 P2X와 관련이 있습니다. 이러한 우선 순위 P2X 산업은 새로운 시장을 성장시키고 NSW의 새로운 일자리를 창출하는 데 있어 상당한 규모의 경제 발전을 이루고 있습니다. 예를 들어 NSW의 그린 철강 산업 생산량이 1퍼센트씩 증가할 때마다 연간 최대 2,700만 달러의 수익과 임금을 제공할 것입니다.

2.2. 청정 동력연료의 시장 성장

현재 전 세계 수소 수요는 7천만 톤이며, 대부분 석유화학을 정제하고 비료를 만드는 데 사용되고 있습니다. 수소가 에너지, 운송, 건설 환경, 농업 및 산업 부문을 위한 저탄소 전력 연료로 널리 채택되면 전 세계 수소 수요가 크게 증가할 것으로 예상됩니다. 수많은 국제 에너지 기구, 산업 및 투자자들이 성장 예측 전망을 지지하고 있습니다.^{13,15,17-20} 일부 시나리오의 모델링에서는 2050년까지 수소가 전체 에너지 소비량의 24퍼센트를 차지하며 국제 수소 수요가 6억 9,600만 톤에 달할 것이라고 예상했습니다.²⁰ 전기화 가능성이 낮은 모든 부문이 수소를 에너지원으로 사용하게 되는 경우 이 수요는 13억 7천만까지 높아질 수 있습니다.

호주는 점점 증가하는 글로벌 수요에 부응하는 주요 수소 생산국이 될 잠재력을 가지고 있습니다. 국가 수소전략에 의하면 호주는 최소한 연간 1억 톤의 석유 생산에 해당하는 수소 생산 능력을 가질 것으로 예상됩니다.²¹

지역적으로 NSW주 또한 상당한 수소 수요가 있을 것으로 예상됩니다. NSW 정부는 2030년까지 가스 네트워크의 최대 10%는 수소라는 목표로 삼고 있으며 이는 현지 시장에서 상당한 수요가 발생할 것을 시사합니다. 호주 최초이자 최대 상업 규모의 파일럿 프로젝트인 웨스턴 시드니 그린 가스 프로젝트는 NSW 주거용 지역 가스 유통 네트워크에 수소 주입 및 혼합 시범사업을 진행중입니다.²²

수소 외에도 저탄소 경제로 전환함에 따라 중장기적으로 NSW주와 호주에서 다른 P2X 전력연료에 대한 수요가 크게 증가할 것입니다. 항공 및 해양산업처럼 탄소배출을 획기적으로 줄이는 것이 어려운 운송 산업분야에서는 연간 ~3,000 킬로 톤 (kt) p.a.에 달하는 P2X 연료가 필요합니다.^{23,24} 이러한 수요는 가스 혼합 등의 이니셔티브와 더불어 더욱 증가하여 2030년에는 400ktpa의 수소가 추가로 필요할 것으로 예상됩니다. 주 정부의 강력한 제조 기반과 P2X 제품 해외 수출의 상당한 경제적 이점이 뉴사우스웨일즈의 향후 P2X 수요를 주도합니다. 또한 NSW주의 P2X 경제는 연료 및 화학 제품의 해외 수입 의존도를 줄이고 무역 수지와 에너지 안보를 개선할 것입니다.

2. 왜 NSW의 Power-to-X 인가?

2.3. 지역 화학 산업의 기존 수요

화학 산업은 식품 및 농업, 첨단 제조, 의료 및 제약, 재생 에너지 및 광업처럼 호주가 경쟁력을 보유하고 우선순위로 삼는 여러 산업에 필수적인 인풋을 만듭니다.²⁵ 호주에서 세 번째로 큰 제조 부문인 화학 산업은 국가 경제에서 280억~380억 달러를 차지하며 5,500개 이상의 기업과 211,821명 이상의 정규직 직원(2017~2018년 기준)을 고용하고 있습니다.²⁶ NSW주에서는 화학 제조 산업이 최대 113억 달러의 주익을 창출했으며 NSW주는 호주의 화학 산업 인력(2017~2018)의 3분의 1 이상을 고용하고 있습니다.²⁶ 화학 부문은 호주의 111개 산업 중 109개 산업에 대한 거의 모든 제조 가치 사슬 및 공급망 의 핵심 원동력입니다.²⁷ 호주 및 NSW주의 화학 제조 산업은 화석 연료 공급 원료에 크게 의존하고 있으며 석유 및 원유 공급 원료의 약 75 %를 수입합니다.(2017~2018).²⁸ 이때문에 심한 유가변동의 영향아래 이 분야 산업의 변형과 글로벌 탈탄소화로 나아가는데 큰 도전 과제였습니다.

호주와 NSW주의 화학 산업은 재정적, 환경적 이유로 화석 연료를 대체할 수 있는 방안을 적극적으로 모색하고 있습니다. 이는 NSW주와 호주의 화학 산업에서 P2X의 기존 수요가 존재함을 나타냅니다. 예를 들어 NSW주의 화석기반 암모니아 제조 산업(즉, 오리카쿠라강 섬 시설)은 현재 360,000톤의 생산 능력을 보유하고 있으며 주로 질산암모늄을 생성하는 데 사용되고 있습니다.²⁹ NSW주에서 P2X를 개발함으로써 생산 비용적 측면과 글로벌 무역 시장에서의 embodied carbon(건축물의 생애 주기동안 발생하는 탄소량)측면에서 보다 통제력과 경쟁력을 갖추고 화학산업의 활성화를 위한 기회를 제공합니다. 이는 보다 환경적으로 경제적으로 지속가능한 차세대 청정 화학 산업을 위한 기반을 구축할 수 있습니다. 나아가 주요 화학 물질과 고부가가치 화학 제품 양쪽 모두에서 호주를 비롯해 전 세계적으로 화학 산업에 대한 P2X의 수요는 크게 증가했으며 향후 수십 년 동안 계속해서 지속적으로 증가할 것으로 예상됩니다.³⁰ 이는 다른 지역들 및 국가들이 화학 및 제조 산업을 탈탄소화할 수 있도록 NSW주의 P2X수출 기회를 제공합니다.

2.4. 전기 인프라 및 재생 에너지 구역

P2X 제조는 에너지 집약적이며 전기 가격은 화석 연료와 비교해 P2X 제품의 비용 경쟁력(P2X 경제에 영향을 미치는 다른 매개 변수)을 결정하는 주요 요인입니다. NSW주는 광범위한 태양열 및 풍력 자원(그림2)을 보유하고 있으며 2030년까지 새롭게 12기가와트 용량의 재생에너지 프로젝트의 중요한 파이프라인이 가동될 것입니다. NSW주의 재생 가능 발전 프로젝트는 태양열 및 풍력 프로젝트 뿐만 아니라 심층 에너지 저장 같은 수력 발전 역량을 보유하고 있어 상대적으로 균형을 잘 이루고 있습니다. NSW주는 전국 에너지 시장(NEM)에서 가장 강력한 송전 및 유통 네트워크를 보유하고 있으며, 시스템 역량 부족 신고가 가장 적습니다. NSW주의 전기 네트워크는 전송 확장 및 상호 연결 프로젝트들의 파이프라인을 통해 더욱 강화될 것입니다. NSW주의 발전 계획과 대규모 전기 인프라에 대한 상당한 투자는 이러한 재생 가능 자원을 미래의 P2X 산업의 동력이 될 수 있는 안정적이고 저렴한 전기로 전환할 것입니다.

NSW 정부의 전기 인프라 로드맵은 재생 에너지 자원을 개발, 전기 시스템의 현대화 그리고 산업 및 주거용 소비자 모두에게 장기적으로 안정적인 저비용의 전기를 공급하기 위한 주정부의 계획을 제시합니다. 로드맵의 중요한 구성 요소인 전기 인프라 투자 보호장치는 가변적인 재생 에너지, 장시간 에너지 저장 및 NSW주의 역량을 확고하게 하기 위한 투자인수를 하고 재생가능 프로젝트 투자자들에게 장기적인 오프테이크 계약(offtake agreement, 구매자가 생산자의 미래 생산량의 일부를 구매하는 계약)을 제공할 것입니다. 이는 P2X투자자들에게 강력한 투자 신호를 보내고 NSW주로 투자를 유치하여 저비용 전기 기회를 포착할 것입니다.

재생 에너지 존(REZ) 이니셔티브의 선도자로서 NSW주는 가장 선진적인 REZ 프로젝트를 보유하고 있으며 2022년 말까지 호주 최초의 REZ가 NSW주에 배치될 것입니다. NSW 전기 인프라 로드맵은 REZ 개발에 대한 NSW주의 입장을 재확인했으며 NSW의 중서부 오라나 REZ (CWO REZ), 뉴 잉글랜드 REZ, 남서부 REZ, 헌터 - 센트럴 코스트 및 일라와라 지역인 5 개의 REZ를 우선순위로 선정했습니다. 이런 REZ입지들은 뛰어난 에너지 자원, 기존 그리드 인프라와 근접한 거리, 민간 부문의 기존 투자자 보유 등을 통해 혜택을 누릴 수 있습니다. 중요한 것은, 이러한 REZ들은 이미 새로운 프로젝트를 연결하기위한 충분한 그리드 역량을 보유하고 있을 지도 모르는 NSW의 다른 재생 에너지 프로젝트의 개발을 배제하지 않고 있습니다.

NSW주에서 가장 선진적인 두 개의 REZ, CWO REZ와 뉴 잉글랜드 REZ는 NSW 그리드에 새롭게 11기가와트의 용량을 추가할 것이라고 제안했습니다. 이 두 REZ는 시장진입을 완료하고 산업계로부터 큰 관심을 받았으며 곧 세부 계획 및 설계 단계로 들어갈 것입니다. NSW주정부는 CWO와 뉴 잉글랜드REZ의 개발을 신속하게 진행하기 위해 1억 2천만 달러의 예산을 배정했으며 최근 NSW REZ의 산출을 이끌 NSW 에너지 공사를 설립했습니다.

2.5. 수소 허브 및 특별 활성화 구역

NSW주정부는 대규모의 그린수소 생산을 위한 최초의 수소 허브 유치지역 2곳을 확인했으며 개발을 위해 최소 7천만달러의 자금 투자를 약속했습니다. 두 곳의 수소 허브 모두 P2X 산업 개발을 위한 계획된 REZ, 산업 구역 및 기존 수소 공급망, 심층 항구 및 물류 인프라에 접근할 수 있습니다.

- **포트 뉴캐슬-헌터 수소 허브.** 헌터와 뉴캐슬 지역은 광업 및 제조 산업을 위해 전략적으로 중요한 중공업 기지입니다. 이 지역은 그린 수소 생산의 성장을 위해 이상적인 위치에 자리하고 있으며 에너지 에스테이트, AGL, APA 및 ITM 전력이 참여하는 20 억 달러 규모의 헌터 수소 네트워크 프로젝트를 포함하여 개발 단계의 많은 프로젝트가 진행되고 있습니다. 뉴캐슬 항구는 연간 4,400척 이상의 이동 선박과 1억 6,400만 톤의 화물을 처리하고 있습니다.

- **포트 캠블라-일라와라 수소 허브.** 포트 캠블라 산업 구역은 수소 생산, 운송 및 활용 그리고 100년 이상의 중공업산업에서 입증된 실적을 보유하고 있습니다. 이 구역은 코어가스, 블루스코프 스틸, 울릉공 폐수 플랜트, 에너지 오스트레일리아의 탈라와라 수소/가스 발전소, 스쿼드론 에너지의 수소/가스 스테이션 계획 및 오션엑스(Oceanex) 에너지의 해양 풍력 발전 단지 등을 포함한 다양한 수소 공급망 사업자들과 고객의 본거지입니다. 포트 캠블라는 호주 동부 해안의 주요 산업 항구로 국제 시장에 상품을 수출합니다.

NSW 수소 허브 외에도 여러 특수 활성화 구역(SAP)들이 수소 및 P2X 산업을 위한 유망 지역입니다. SAP는 선거구 계획 및 새로운 산업 개발을 위해 채택한 NSW주의 새로운 접근 방식입니다. 지금까지 NSW주정부는 6개의 SAPs를 발표했으며 지역 일자리 성장 지구로서 4개의 새로운 지역이 확장되었습니다. 이 구역들은 NSW주정부의 조정 계획 및 투자 서비스를 받습니다. 42억 달러 규모의 스노위 하이드로 레거시(Snowy Hydro Legacy) 펀드의 지원을 통해 이 SAPs는 공공 자금 연구, 신속한 계획 승인, 정부가 주도하는 개발 및 공유 인프라 투자를 통한 위험 회피 투자의 혜택을 누릴 수 있습니다. 많은 SAPs들이 자신들이 보유한 강점과 기회를 통해 어떻게 수소 및 P2X 프로젝트를 새로운 산업 구역 개발에 통합할 것인지 조사하고 있습니다.

예를 들어, 와가 와가 SAP는 대규모 태양 에너지에 접근할 수 있는 복합 화물 및 물류 허브로 운영되고 있는 기존의 산업 구역을 보유하고 있습니다. 파크스 SAP는 국립 물류 허브의 본거지로 호주의 중추적인 철도라인인 인랜드 철도와 트랜스 오스트레일리아 철도가 유일하게 교차하는 전략적으로 중요한 위치에 자리하고 있으며 수소 구동 철도 운송을 위한 급유 스테이션이 될 수 있습니다. 모리 SAP는 농업 비즈니스에서 가장 생산적인 곡물 지역을 보유하고 있어 비료로 쓰이는 친환경 암모니아의 수요가 높습니다. 이러한 SAP는 기관 투자자와 업계가 현지 수요를 충족할 수 있는 P2X 공급망을 구축하기에 매력적인 조건을 가지고 있습니다. 또한, 도로/철도 운송망을 통해 호주의 다른 지역 및 심수항들과 잘 연결되어 있습니다.

2.6. R&D 및 기술 개발 역량

NSW주는 P2X 분야에서 우수한 기술 개발 및 상용화 기능을 갖춘 뛰어난 대학, 연구 개발(R&D) 조직 및 기관을 유치합니다. 수소 분야의 글로벌 혁신 리더로 인정받는 NSW주는 수소 가치 사슬 전반에 걸쳐 강력한 R&D 역량을 보유하고 있습니다. NSW 주는 R&D 본거지로 몇몇 대표적인 R&D기관들의 예만 들더라도 세계 수소 경제를 위한 국립 ARC 교육 센터(GlobH2E), 업계 주도의 수소 에너지 연구 센터(HERC) 및 뉴캐슬 에너지 및 자원 연구소(NIER)등이 NSW주에 위치하고 있습니다. NSW주의 산업 R&D는 인프라를 활용하여 학술 및 기술 발명가들과 긴밀히 협력하여 P2X 기술을 적극적으로 시험하고 있으며 일부 선도 기관들은 상업적 규모의 기술 도입을 준비하는 파일럿 프로젝트들을 시행하고 있습니다.

NSW의 우수연구기관들과 대학들은 청정 기술의 상업화와 R&D를 가속화하기 위한 조직적인 협력을 위해 파트너십을 체결했습니다. 예를 들어, NUW 얼라이언스는 NSW 대학, 울릉공 대학 및 뉴캐슬 대학에서 참여한 창립멤버들로 구성되었으며 에너지 기술에 종사하는 가장 규모가 크고 영향력이 강한 호주 연구 집단을 대표합니다. NSW주정부는 CSIRO와 혁신 파트너십을 맺고 기술 발전과 수소를 포함한 NSW주의 신 산업 발전을 최우선 분야 중 하나로 추진하고 있습니다.

NSW주는 기술 혁신과 개발에서 특정한 실적을 보유하고 있습니다. 최근 발표된 *‘실행계획: 아이디어를 일자리로 전환하기 - NSW주의 연구개발 가속화’*는 연구 역량을 새로운 산업, 제품, 서비스 및 일자리로 전환하는 것을 가속화하기 위한 주정부의 실행 계획입니다.³¹ 이 보고서에서 권장한 5가지 우선조치와 16건의 지원 실행은 목표자금조달, 데이터 개통, 구역기반 투자 및 NSW 대학들에 대한 전략적 지원을 통해 P2X산업을 더욱 촉진할 수 있을 것입니다.³¹

2.7. 탈탄소화를 위한 공공 정책 및 금융 패키지

호주 최대규모의 경제이자 국가 총 탄소배출량의 25% 이상을 차지,³² 하고 있는 NSW주는 저탄소 배출의 미래를 향해 전환을 도모함과 동시에 지속적인 경제적 번영방안을 확보할 필요가 있습니다. NSW주정부는 2005년과 비교해서 탄소배출량을 35%로 줄이고 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위해 전념하고 있습니다. NSW탄소중립계획: 1단계 2020-2030(the Net Zero Plan)은 2030년까지 35%라는 탄소배출감소 목표를 달성하고 2050년까지 탄소중립을 추진하기 위한 실행 계획입니다. NSW 탄소중립계획은 검증된 차세대 저탄소 배출 기술에 대한 투자를 통한 기술 주도형 탄소배출감소에 중점을 두고 기후 변화와 탄소배출감축을 해결하기 위한 네 가지의 우선분야를 제시합니다.

탄소중립계획(the Net Zero Plan)에 따른 연간 프로그램들과 정책들의 일환으로 NSW주정부는 청정 기술 및 탈탄소화 개발 가속화를 위한 산업지원책으로 7억5천만 달러 규모의 자금 조달 패키지, 탄소중립 산업 및 혁신 프로그램(the Net Zero Industry and Innovation program)을 발표했습니다. 탄소중립 산업 및 혁신 프로그램은 세가지 중점 영역으로 구성되어 있으며 각 분야별 자금 조달 프로그램을 통해 지원합니다.

- **청정 기술 혁신 프로그램(1억 9,500만 호주달러):** 첨단 청정 기술의 개발과 지속적인 혁신을 지원합니다.
- **신 저탄소 산업 재단프로그램(1억 7,500만 호주달러):** 인프라 구축 및 공급망 역량 강화를 통해 저공해 산업의 토대를 마련합니다.
- **고탄소 배출 산업 프로그램(3억8천만 호주달러):** 기존의 고탄소 배출 산업 시설들과 관련된 탄소배출 절감을 위한 기술과 인프라를 시행합니다.

탄소중립 산업 및 혁신 프로그램 (the Net Zero Industry and Innovation program)하의 이 세 가지 프로그램은 모두 P2X 기술과 산업의 발전을 위한 강력한 권한을 가지고 있습니다. 기술 주도의 탈탄소화 원칙과 긴밀하게 연결된 이러한 금융 패키지는 새로운 P2X 산업 구축을 위한 조직적인 협력을 위해 NSW에 연구, 산업 및 투자를 유치할 수 있습니다. 특히 청정기술 혁신 프로그램은 동력원료에서 한 개 중점 분야와 수소관련 R&D 프로젝트, 연구 인프라, 파일럿, 상업적 규모의 프로젝트 및 표준이라는 다섯 갈래의 조직화된 스트림으로 구성되어 있습니다. 이 다섯가지 상호보완적 스트림으로 NSW주의 P2X 혁신 생태계의 토대를 구축할 수 있을 것입니다. 이 생태계는 NSW주가 P2X 기술을 상용화하고 새로운 저탄소 배출산업 또는 탈탄소화가 어려운 산업들의 탈탄소화를 시행할 준비가 되었는지를 보장할 수 있습니다.

또한 NSW주정부는 저탄소 배출 계획 및 인프라 개발에 전념하고 있으며 많은 지역들이 2036년까지의 지역성장계획과 지속가능성 개발을 통합했습니다.³³ 주 정부의 명확한 신호에 따라 지방 정부와 시의회는 탈탄소화 전략과 실행계획을 수립했습니다. 예를 들어 시드니 시는³⁴ 친환경 조치를 수립했으며 뉴캐슬 시는 탄소배출량을 줄이기 위한 5개년 기후 변화 계획을 세웠습니다. 35 SAPs와 같은 NSW주의 새로운 산업 구역 개발은 지속 가능성, 인프라 및 기술 주도 투자를 중시하는 유엔의 생태 산업 단지 개발 프레임워크를 채택하고 있습니다. 예를 들어, 파크스 SAP는 호주 최초의 탄소 중립 구역이 되는 것을 목표로 하고 있습니다. ³⁶ 이러한 지역 정책과 프로그램은 NSW주에 P2X 생산 및 활용 시설을 구축하기 위한 산업계와 투자자들을 더욱 장려할 수 있습니다.

2.8. 비즈니스 인력 및 인프라

NSW주는 호주의 금융 동력입니다. NSW주의 경제는 역동적이고, 다각적이고, 수준이 높으며 GDP(COVID이전)에서 지속적인 2.3%의 성장율을 보이고 있습니다. NSW주에는 호주에서 가장 큰 500개의 민간기업 중 175개 기업과 600개 이상의 다국적기업 본사가 위치하고 있습니다. 경제적으로 지속가능하고 비즈니스 친화적인 이런 환경이 투자자와 산업계로 하여금 자신 있게 NSW에서 P2X 가치사슬을 시작할 수 있는 확신을 줍니다. 또한 NSW주정부는 최근 무역 및 투자유치를 위해 비즈니스, 산업, 연구 및 정부를 조직화하는 중앙 정부기관역할을 수행할 NSW 투자청(Investment NSW)을 설립했습니다.

NSW주는 시장 근접성을 바탕으로 아시아 태평양 국가들과 강력한 무역 관계를 맺고 있습니다. 현재 NSW주는 일본, 한국, 중국에 약 76억 호주달러규모의 제품을 수출하고 있습니다.³⁷ 이들 국가는 에너지 수입국이며 탈탄소화 경제를 위해 청정전력연료와 화학물질에 대한 높은 수요가 있음을 예고하고 있습니다.

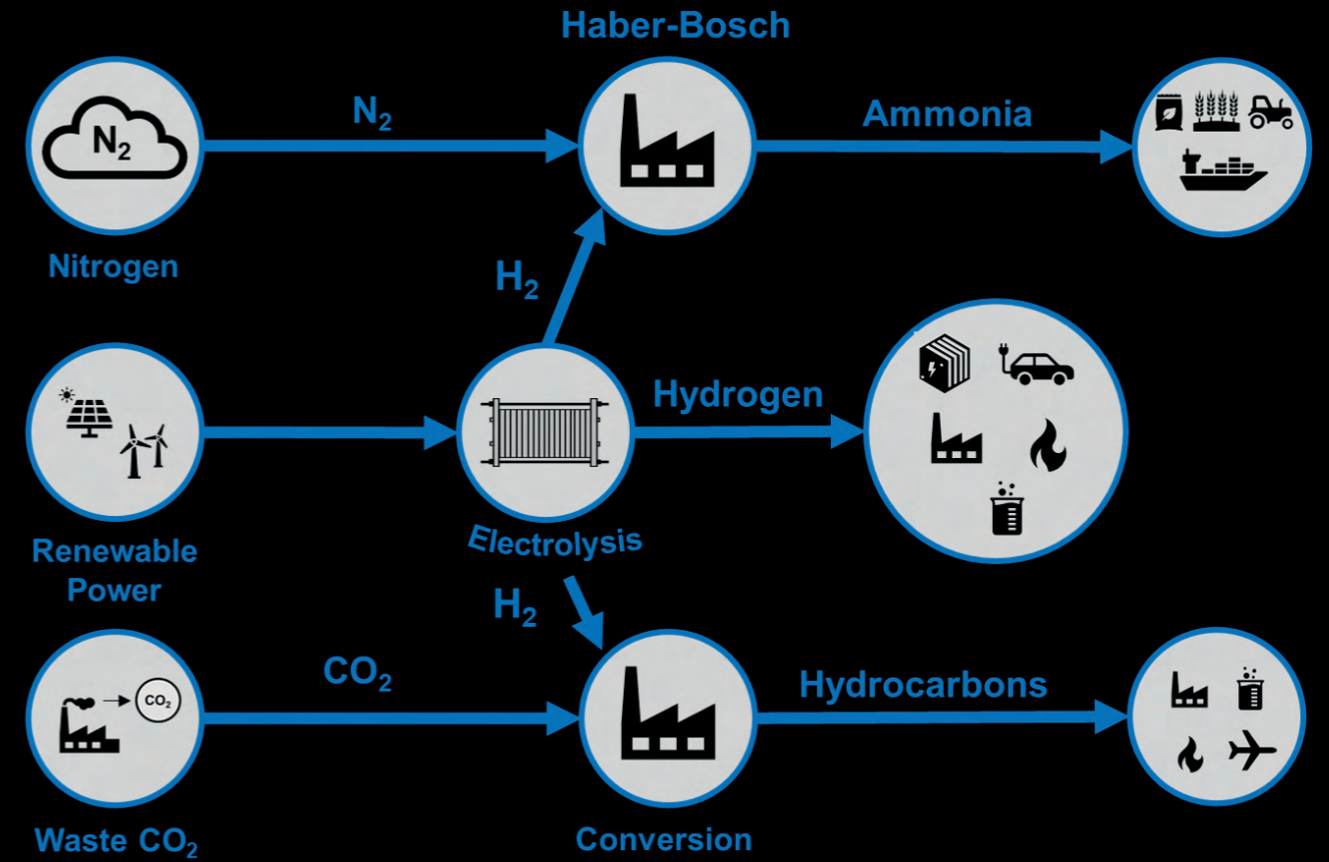
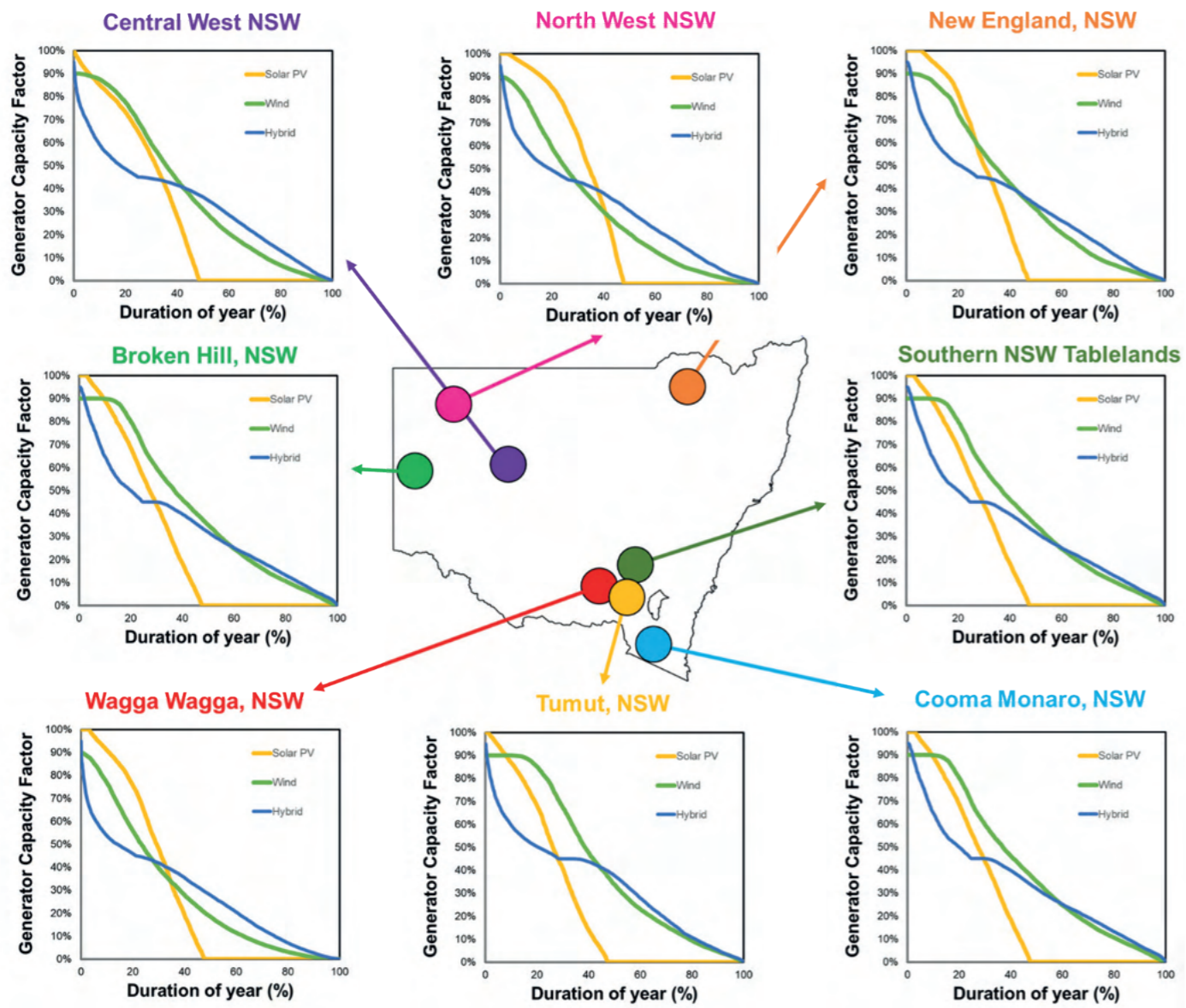
NSW주에서 제조된 P2X제품들을 아시아 시장으로 수출하는데 기존의 자유 무역 협정과 공급망을 활용할 수 있습니다. NSW주는 200개 이상의 상공회의소의 본거지이며, 이 상공회의소들은 여러 다른 나라와 P2X 산업 개발 파트너십을 위한 중개자 역할을 할 수 있습니다.

NSW주의 인구는 790만 명(2017/2018)으로, 거의 호주 전체 인구의 3분의 1이 NSW주에 거주하고 있습니다. NSW주는 전반적인 호주 인구보다 20세에서 34세 사이의 거주자 비율이 높으며, 이는 창의적 및 고등 교육을 받은 노동 연령의 보다 젊은 인구층이 높다는 것을 나타냅니다. 이 숙련된 다양한 인재 풀은 잠재적인 인력 측면에서 NSW주의 새로운 P2X 비즈니스 및 산업의 미래가 유망함을 강력하게 시사합니다.

NSW주의 광범위한 해상, 도로, 철도 및 항공 운송 네트워크와 정교한 물류 서비스는 P2X 제조 및 유통을 위한 완벽한 산업 기반을 제공합니다. NSW주정부가 개발중인 870억 달러 규모의 인프라 파이프라인은 향후 P2X 공급망을 위한 추가적인 물류 및 운송 지원을 제공할 것입니다.



그림 2: NSW 전역의 다양한 에너지 영역에서 재생 가능 에너지 생성 잠재력. 하이브리드 시스템은 태양열 및 풍력 프로파일의 집계를 50% - 50%의 점유율로 나타냅니다.



3. P2X기술의 현재 상황 분석

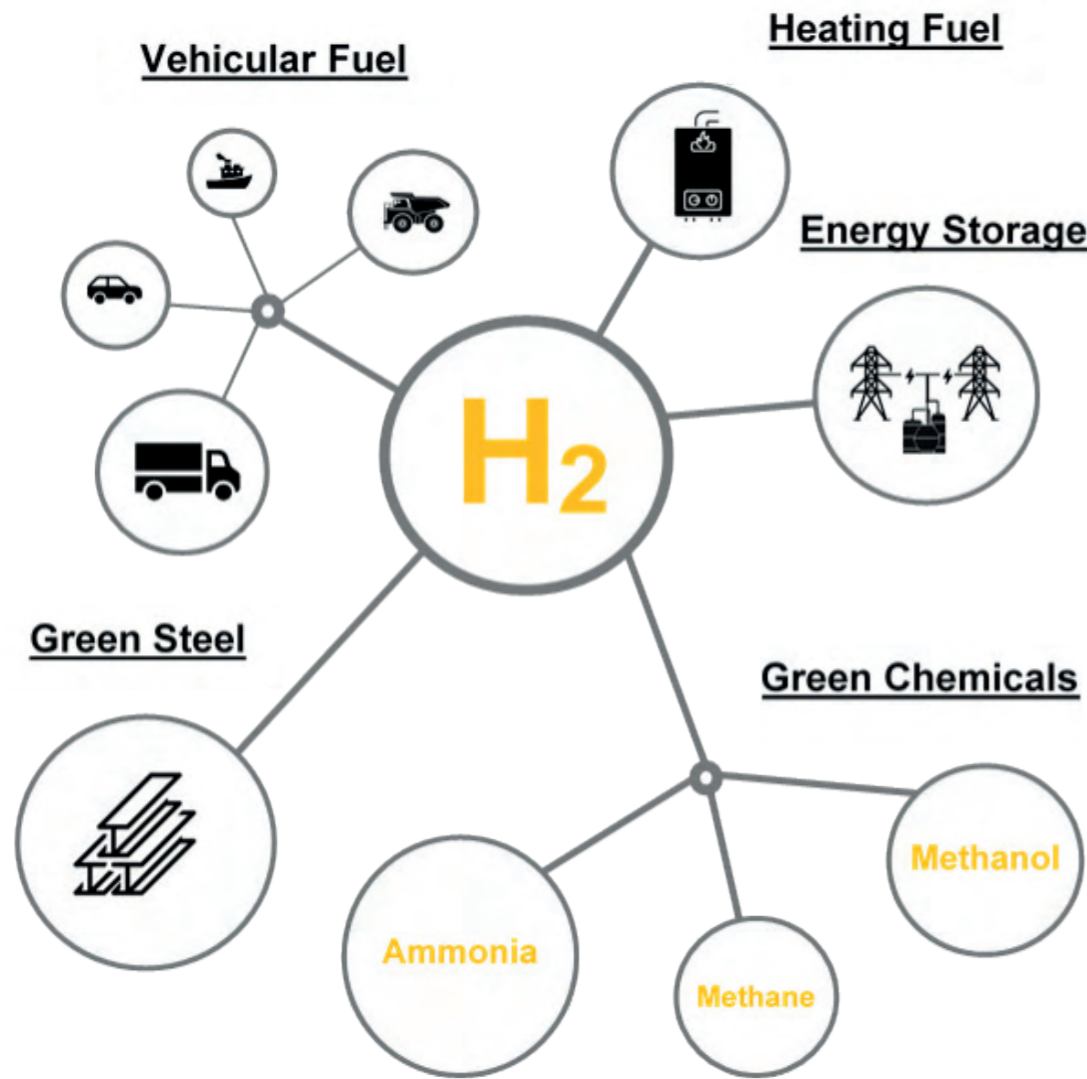
3. P2X 기술 경로

3.1 현재 P2X기술에 대한 개요

그림 3에서 볼 수 있듯이 수소가 에너지 감축이 어려운 산업들의 심화 탈탄소화 및 그린 화학(즉 암모니아, 메탄올, 항공 연료 등)을 위한 조력자의 역할을 수행함으로써 P2X는 산업분야간 커플링이라는 특별한 기회를 제공합니다.

이 섹션에서는 NSW주에 적합한 몇 가지 주요 P2X 기술에 대한 개요를 제시하고, NSW주의 환경과 조건하에서 대한 각 기술들의 현재 상황 및 비용, 타당성 및 적용성에 관한 주요 경제적, 기술적 동인들을 요약합니다. 현재 그리고 미래의 상용 규모 P2X 프로젝트는 부록 A에 자세하게 설명되어 있습니다.

그림 3: 수소로 확장 가능한 기회 네트워크



3.2 전력을 수소로 변환 (Power to Hydrogen)

전 세계적으로 수소는 주로 암모니아 합성(55%), 원유 정제(25%), 메탄올 생산(10%)과 같은 산업 공정에 사용됩니다.³⁸ 더 작은 규모에서 수소는 철광석 환원 및 폴리머 합성에도 사용됩니다.³⁸

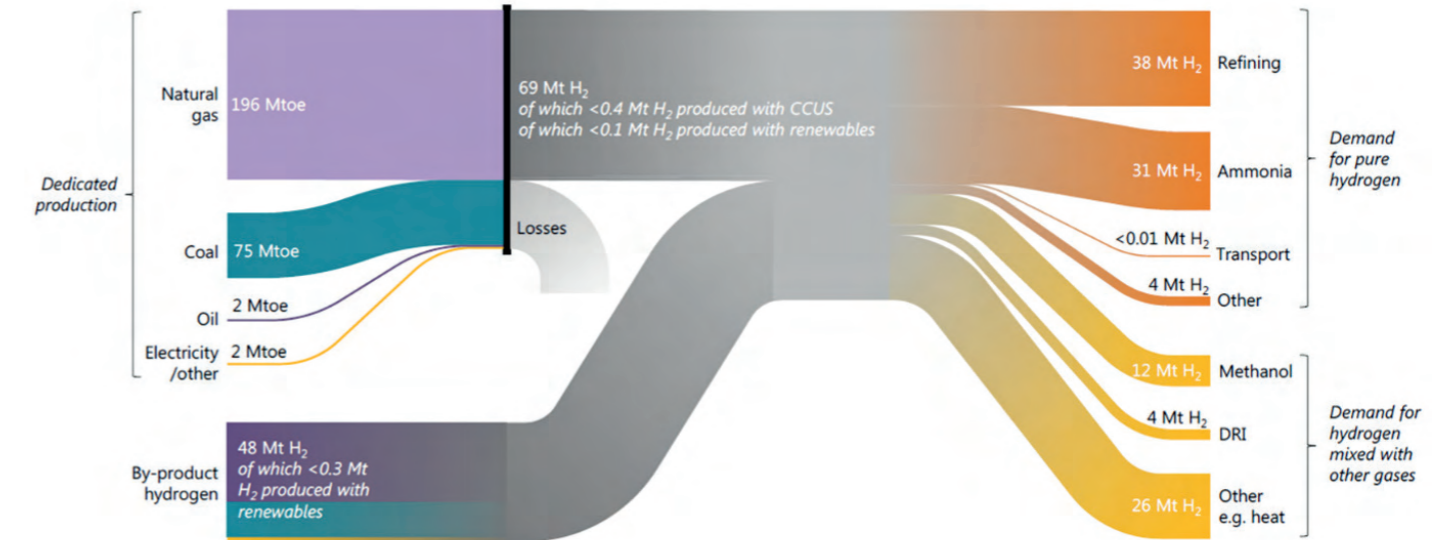
수소 시장 전망

현재 전 세계적으로 매년 약 1억 1,500만 톤의 수소(그림4)가 생성되며 7,500만 톤이 순수 형태로 암모니아 생성 및 석유 정제 작업에 직접적으로 활용되고 있습니다.¹⁸ 나머지 4,500만 톤은 메탄올과 같은 화학 물질 및 연료를 생성하는 데 사용되는 합성 가스(CO +H2)같은 가스혼합물로 사용됩니다. 이런 수소 수요는 1975년부터 꾸준히 증가하고 있으며 연간 성장률(CAGR)은 4%입니다.¹⁸

탈탄소화 촉매

특히 에너지 생성을 위해 수소를 사용하는 것이 가장 중요한 장점은 연소수소가 대부분의 화석-기반 연료와 달리 유해한 배출물을 생성하지 않는다는 것입니다. 따라서 (천연가스의 대체제로서) 열 적용 및 연료 전지를 활용하는 전기 에너지 생성 양쪽 모두를 위한 역할 매개체로서 활용할 수 있는 잠재력을 가지고 있습니다. 두 응용분야의 공통점은 부산물이 열과 물 뿐이라는 것입니다. 따라서 만약 수소가 지속가능성을 만들어 낼 수 있다면 청정 에너지 매개체 및 화석 연료의 대체제로 사용될 수 있습니다.

그림 4: 현재 글로벌 수소 가치 사슬. 수소의 수요와 공급은 연간 백만 톤(Mt)으로 표시되며 생산을 위한 공급연료의 수요는 에너지 면에서, 석유 백만 톤과 동위(More)로 표시됩니다. 참고 : DRO는 수소를 사용한 직접적인 철강환원을 나타냅니다. CUS를 활용하여 생산되는 H2는 활용과 저장을 위한 탄소 포획 화석 연료로 생성된 수소를 나타냅니다. 그림에서 나타낸 값은 2018년 기준 추정 값입니다. 이 이미지는 IEA에서 가져왔으며 모든 권리는 국제에너지기구(IEA)에 있습니다.¹⁸



탈탄소화의 촉매제로 수소의 가능성을 현실화하는 다양한 관할권에 걸쳐 널리 퍼져 있습니다. 수소는 화학 원료 및 지 공급망에서 탈탄소화를 가속화할 수 있는 역량 때문에 점점 더 많이 '21세기의 연료'로 호명되고 있습니다. 국제에너지기구(IEA)는 글로벌 지속가능한 발전 시나리오(기후 안정을 저해하지 않는 에너지 확보)를 달성하기 위해 2070년까지 매년 500Mt의 H2가 필요할 것으로 예측하고 있으며 이는 전 세계 에너지 수요의 13%를 충족시킬 것으로 예상하고 있습니다. 이를 위해서는 2020년부터 전 세계 수소 생산력을 약 5배로 늘려야 합니다.¹⁹

수소 생성 경로 - 블랙, 그레이, 블루 또는 그린 H2?

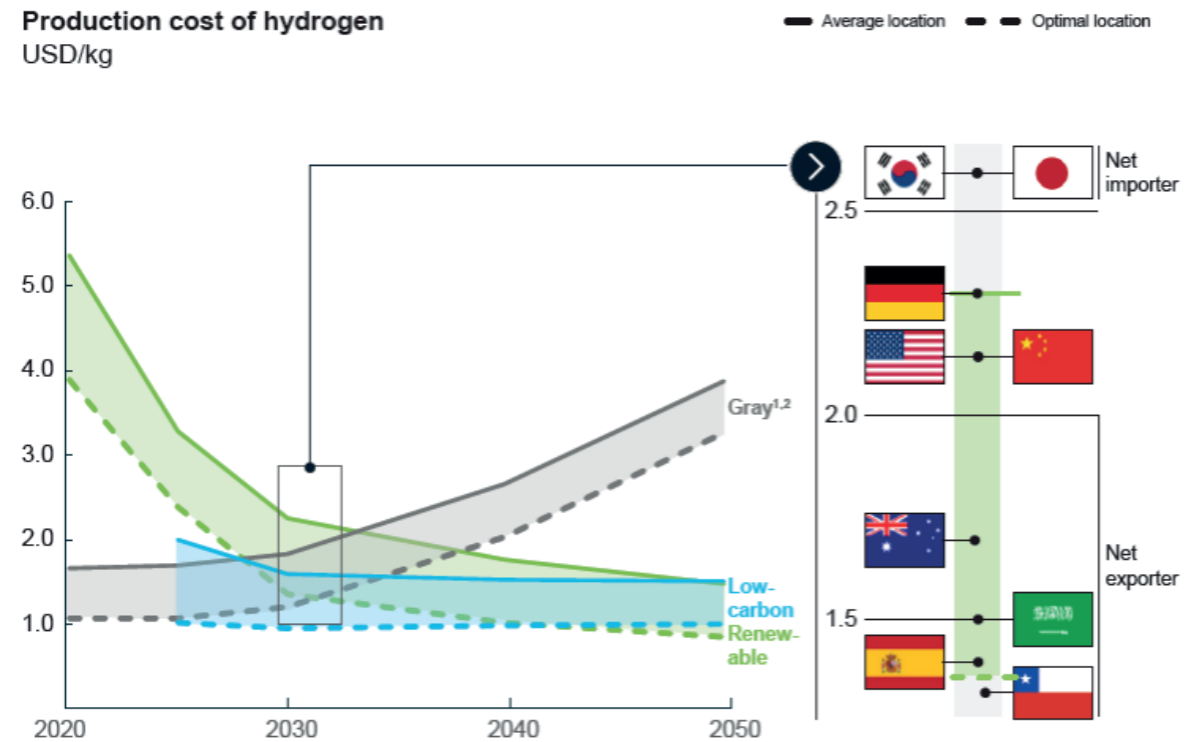
현재 상업적으로 생성된 거의 모든 수소는 화석 연료(~97%)를 사용하여 생성되며, 특히 천연가스(전 세계 천연가스 수요의 6%)와 석탄(전 세계 석탄 소비량의 2%)으로 생성됩니다.¹⁸ 물론, 천연가스를 이용한 증기 메탄 개질(SMR)이 수소 생산의 주요 경로이며, 수소에 대한 전 세계 생산량의 -70%를 차지합니다. 이러한 기술은 높은 생산 수율 (하루 >500 t)과 저비용 (US \$ 1-3 /kg)때문에 인해 널리 채택되었습니다.^{18,21}

그러나 이러한 화석 연료 공정은 2018년 전 세계 탄소배출량의 2%에 해당하는 8억 3천만 톤의 막대한 CO₂ 배출량으로 거대한 환경 발자국을 남긴다는 사실을 고려하는 것이 중요합니다.¹⁸

그래서 이러한 공정은 석탄, 천연 가스 및 기타 화석 연료 공급 원료의 사용으로 수소를 생성하는 "블랙이나 브라운" 그리고 "그레이" 생산방식으로 분류되며 대기에 추가되는 CO₂ 배출로 이어집니다. 이러한 시설은 수소 생산 중에 발생하는 탄소가 포획되어 차후 지하에 저장되거나(CCS) 또는 활용되거나(CCU) 또는 양쪽 모두의 방법이 적용되는(CCUS)로 "블루 수소blue hydrogen" 공장으로 전환함으로써 수소화 관련된 환경발자국을 절감할 것이라 기대하고 있습니다. 그러나 탄소 포집 및 저장 인프라가 추가적으로 필요하기 때문에 필연적으로 생산 비용이 증가할 수밖에 없습니다. IEA의 분석은 화석연료 기반의 H₂ 공장들을 CCS와 통합하기 위한 투자를 장려하기 위해서는 배출되는 CO₂ 1톤당 최소한 US\$50의 프리미엄이 필요하다는 것을 보여줍니다.¹⁸

또한 위치 특이성 및 환경 및 안전 문제가 발생하기 쉽기 때문에 일반적으로 CCS를 채택하기 위한 실질적인 도전과제들이 존재합니다.

그림 5: 그린, 블루 및 그레이 수소 생성 예상 비용.¹⁷



대안적으로 또는 재생 가능 발전으로 생성된 전기를 활용하여 순수한 물을 수소와 산소로 전기화학적 분할하는 전기 분해를 통해 생성되는 "그린수소"가 있습니다. 이 공정은 현재 전 세계 수소 수요의 ~1%에 불과하지만 태양열 및 풍력 에너지를 활용하여 연료 전지 차량의 급유 스테이션과 같은 다양한 소규모 분산 애플리케이션을 위한 확장 가능한 수소 플랜트를 개발하는 데 사용할 수 있으므로 큰 잠재력을 보유하고 있습니다. 또한 화석연료를 대체하기 위한 암모니아 및 기타 합성연료 생성을 위해 그린 수소를 제공하는 대규모의 어플리케이션도 가능합니다. 2070년까지 재생가능한 전기분해로 생성되는 수소가 전체 수소 공급량의 60%를 차지할 것으로 예상됩니다.¹⁹ 그러나 이를 달성하기 위해서는 그린 수소 생산비용을 획기적으로 줄여야만 합니다.

그린 수소의 현재 비용은 USD \$4 - 6/kg, 즉 화석 연료 기반 수소 생성보다 2 ~ 3배 더 비쌉니다. (그림 5)¹⁷ 그러나 이러한 비용은 2030년에는 화석 연료 기반 생성비용(<USD\$2kg⁻¹)과 동등한 수준이 될 것으로 예상됩니다. 특히 호주의 경우 잠재된 재생 가능 에너지를 활용하여 수소 생성을 위해 매우 유리한 가격으로 전기를 제공할 수 있습니다.¹⁷

호주의 신형 수소 경제

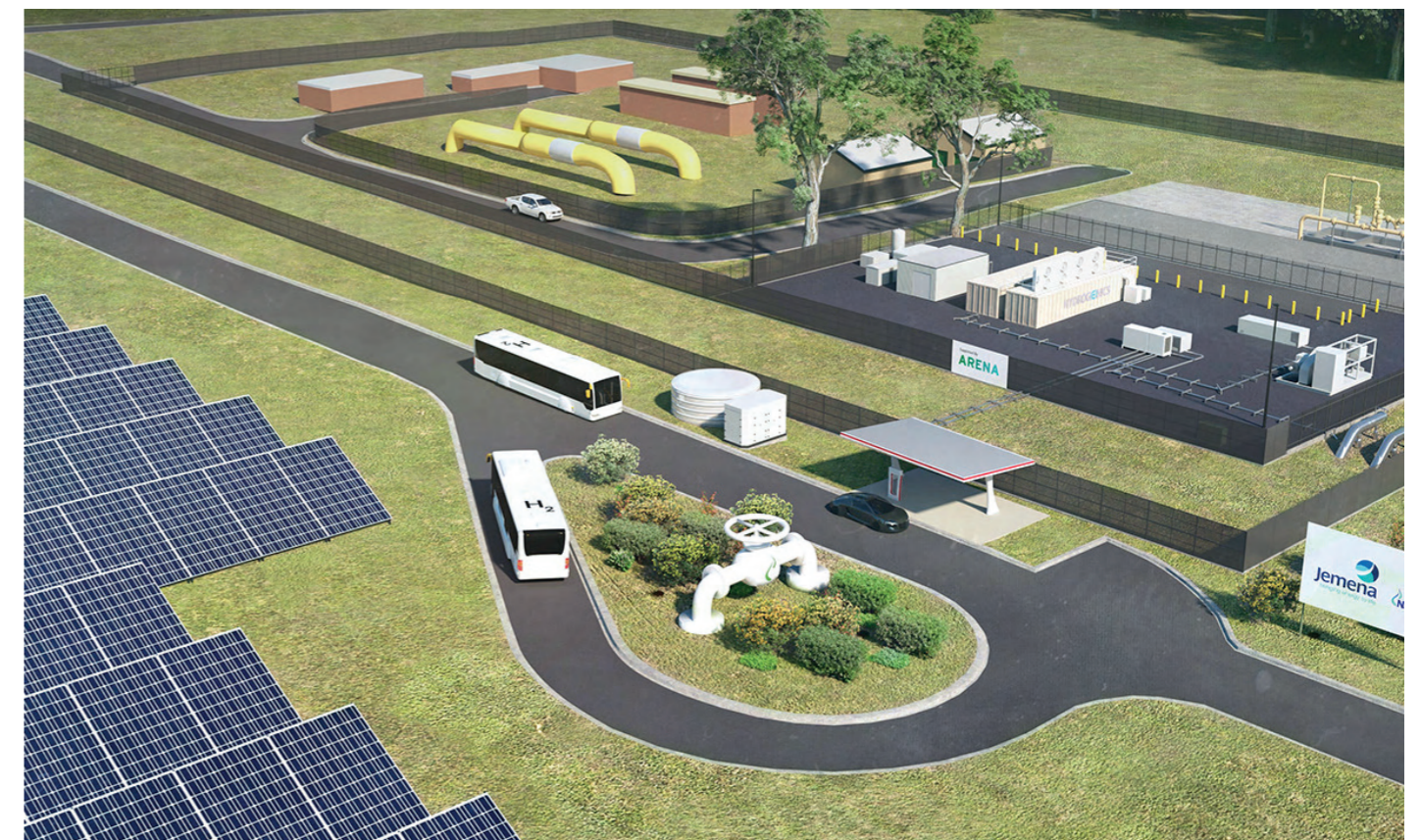
호주의 상황에서 현재 수소 수요는 대부분 암모니아 생성에 의해 주도되며 연간 350,000톤의 H₂를 소비합니다.¹³ 이런 수소 수요는 대부분 천연가스로 생성되지만, 가까운 장래에 재생 가능한 수소가 보충되어 화석 연료로 파생된 수소를 대체할 것으로 예상됩니다. 호주는 이미 자국의 에너지 및 산업 가치 사슬을 탈탄소화할 뿐만 아니라 아태 시장과 그 너머의 시장에서 수소 및 암모니아의 더 큰 수출국으로 자리매김하고자 다량의 수소를 생산할 수 있기 때문에 이미 잠재적인 "거대 수소 수출국"으로 대두되고 있습니다.^{39,40}

이 신형 호주 H2경제는 호주 경제에 최대 16,900개의 직접적인 일자리와 수만 개의 간접적인 일자리를 창출할 것으로 예상되며, 2050년까지 연간 260억 달러의 매출을 창출할 것으로 예상됩니다.¹³ 미래의 H₂ 수출 산업은 특히 아시아 태평양 산업대상 수출만으로 2030년까지 호주 경제에 22억 달러를 기여할 것으로 예상되며(500,000tH2-1), 2040년에는 57억 달러까지 수출규모가 증가할 잠재력을 가지고 있습니다.⁴¹ 호주의 수소 생산 능력은 유럽 연합 국가들, 특히 독일과 두개의 다른 정부가 이 무역거래 사업성을 탐구하기 위해 공동 이해 각서 체결하고 수행한 타당성 연구결과를 통해 인정 받았습니다.^{42,43}

NSW주의 재생 가능한 수소 기회

뉴 사우스 웨일즈는 호주에서 개발 중인 수소 시장의 점유율을 통해 혜택을 누릴 수 있습니다. NSW주는 또한 에너지 캐리어로서 전기 분해를 통해 생성한 재생 가능한 그린 수소의 사용 가능성을 탐구하고 있습니다. (그림 6). NSW는 그린 강철, 알루미늄 (예상매출: 도합 7천만 달러) 및 암모니아(1억 2천만 달러)의 생산을 위한 (에너지 원 및 공급원료로서의)수소 생성에 재생 에너지를 활용한다는 잠재가능성 레버리지를 통해 근본적으로 "청정 에너지 초강대국"이 될 것으로 예상됩니다.⁴⁴ NSW주에는 이런 제조 시설들이 여럿 위치하고 있으며 호주 전역에 걸친 탈탄소화 이니셔티브를 주도할 것으로 예상됩니다.

그림 6: 제메나에 의해 개발되고 있는 웨스턴 시드니 그린 가스 프로젝트. 이 프로젝트는 가스 네트워크에 주입하기 위해 태양 /풍력 구동 전기 분해를 통해 H₂를 생성할 것입니다. (250가구를 위한 에너지- 용적 당~2%) 이 사이트는 또한 그리드 및 미래의 H₂ 급유 시설을 위한 전기를 생성하기 위해 터빈을 통합할 것입니다. 이미지 제공: 제메나



그린 수소 비용 절감을 위한 주요 동인

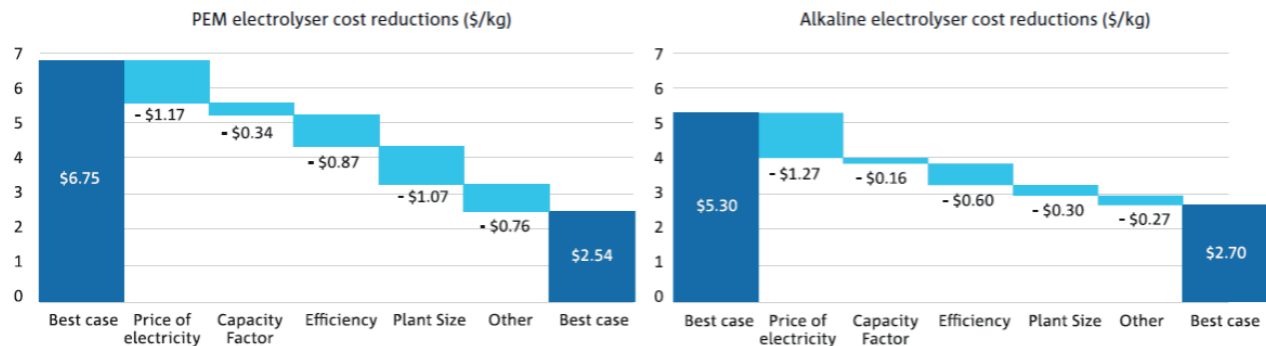
내셔널 수소 로드맵에 따르면 현재 전기 분해를 통한 수소 생성 비용은 A\$5에서 6/kg 사이이며, 이에 비해 블루 수소 생성비용은 A\$2에서 3/kg사이입니다. 현재 그린 수소 생산의 장벽 요소들은 다음과 같습니다.

- 1. 재생 에너지 전기 가격:** 현재 상업적 알칼라인(AE) 및 폴리머 전해질 멤브레인 (PEM) 전기 분해기는 수소 생산을 위해 약 ~ 50에서-60 kWh/kg 사이의 전력이 필요합니다. 따라서 다른 여건에 변함이 없다면 전기 가격이 \$0.01/kWh 감소 시 kg당 수소 비용은 ~6-8% 감소하게 됩니다.²¹ CSIRO의 최근 분석에 따르면 태양광 PV와 풍력 발전 단지는 현재 건설 비용이 가장 저렴하며, 특히 새로운 태양광 PV 농장의 비용은 2030년까지 최대 ~35% 감소할 것으로 예상됩니다.⁴⁵ 따라서 새로 신설되는 태양광 및 풍력 발전 단지가 가동되면 현장의 수소 발생 비용을 크게 줄일 수 있습니다. *
- 2. 설비 이용률:** 전기 비용 외에도 저비용 전기의 가용성 또한 수소 생산 비용에 영향을 미칩니다. 태양열과 풍력 발전 단지는 저비용 전기를 제공하지만 '태양이 비출 때' 또는 '바람이 불 때'만 간헐적으로 전기를 생산합니다. 호주 에너지 시장 오퍼레이터 (AEMO)는 호주의 태양광 및 풍력 발전 단지의 설비이용률이 각각 약 30%와 40%라고 제시했습니다.⁴⁶ 그러나 새로운 태양광 및 풍력 발전 단지가 가동되면 재생 가능 에너지의 가용성이 더욱 높아질 수 있으며, 이로 인해 스토리지 기술을 비롯 에너지 공급업체와의 특별 전력 구매 계약을 통해 더 많은 양의 재생가능 에너지가 제공될 수 있습니다. NSW주에서는 이미 2018년 이후 재생 가능 에너지 발전(태양광 및 풍력 발전)이 40% 증가했습니다.⁴⁷ NSW주는 또한 주 정부는 또한 재생 에너지 용량을 12 GW로 늘리는 계획을 개발하여 주 내에서 P2X 구현을 위한 추가 기회를 제공하고 있습니다. ⁴⁸

- 3. 수소 발전 규모 확대:** 저비용 수소에 대한 관심과 수요가 증가함에 따라 전기분해 장치의 비용을 절감하고 효율성을 높이기 위한 중요한 연구 개발이 추진되고 있습니다. 특히 대규모 수소 프로젝트에 대한 수요가 증가함에 따라 제조업체들이 더 나은 공급망과 최적의 제조 기술에 투자하도록 장려하고 있습니다. 앞서 조명했던 전기분해장치 제조업체 NEL은 생산 시설 확장을 통해 전기분해장치의 자본 비용을 75% 절감할 것으로 기대하고 있습니다.¹⁶ 전문적인 연구 결과들 또한 이런 자본 비용의 절감을 예측하고 있어 재생 가능한 수소의 사업타당성을 촉진하고 있습니다. ^{15,49,50}
- 4. 물 가용성:** 현재 기술로 전기 분해를 통해 1 kg의 수소를 생성하려면 ~ 9에서 10 L의 물이 필요합니다.⁵¹ 이것은 호주에서의 수소 생산을 위한 핵심적인 사안이 될 것입니다. 따라서 담수화 및 재활용 폐수를 회수하는 것과 같은 비 전통적인 수단을 통해 물을 공급해야 합니다. 이러한 수자원, 특히 담수화(~A\$5/kL⁵²)는 더 많은 비용이 들 것으로 예상되지만, 원료로서 물 공급 비용은 수소를 생성하는 최종 비용의 2%에 불과할 것으로 예상됩니다.²¹ NSW는 주 전역을 통해 저 품질, 폐기물 및 염수를 공급받는 혜택을 누릴 수 있으며, NSW지방의 염수 대수층은 P2X에 대한 기회를 제공하고 농산업과의 담수 사용 경쟁에 대한 우려를 완화합니다.

이 모든 점을 종합해 볼 때, 이러한 발전 사항들은 수소 생성 비용이 현저히 감소할 것을 가리키고 있습니다. (그림 7)

그림 7: 호주에서 전기 분해를 통한 수소 생성 비용을 절감할 수 있는 가능성. 모든 비용은 호주 달러를 기준으로 표시되었습니다.²¹



* 원격 재생가능 전력 공급을 사용하는 수소 가격을 추정하기 위해서는 향후 네트워크 전송 비용에 대한 모델링이 필요합니다.

3.3 전력을 암모니아로 변환 (Power to Ammonia)

암모니아는 요소와 질산암모늄 같은 중요한 화학 물질을 생산하는데 사용되는 기본 빌딩 블록입니다 - 전 세계적으로 생산된 암모니아의 90%는 비료를 만드는데 사용됩니다. 소 규모로 소비되는 다른 용도로는 에어컨을 위한 냉각 가스 및 청소 용품을 생산 등이 포함됩니다.

글로벌 암모니아 수요 - 상승 중

세계 암모니아 시장(미화 500억 달러)은 연간 성장률(CAGR)이 5~7% 이상의 꾸준한 성장세를 보이고 있습니다. 남아시아와 중국의 농업 시장이 추동하는 아시아 태평양 중심의 수요 증가 뿐만 아니라 러시아, 브라질, 아프리카 사하라 사막 이남에서의 시장 수요도 증가하고 있습니다. ⁵³ 주요 생산 업체는 러시아, 중국, 미국, 인도에 있습니다.

그림 8: 오리카의 쿠라강 섬 제조시설. 이미지 제공: 오리카



호주 암모니아 시장

호주는 연간 약 2백만 톤(Mtpa)의 암모니아를 생산하며, 전국에 걸쳐 7곳의 생산 시설이 가동하고 있습니다. (대부분 퀸즐랜드와 웨스턴 오스트레일리아에 위치)

NSW주에서는 쿠라강 섬에서 가동하고 있는 오리카(Orica)사 소유의 암모니아 생산 시설이 연간360ktpa의 암모니아를 생산하고 있습니다. 이 시설에는 그림 8에서 보이는 것과 암모니아, 질산 그리고 질산 암모니아를 생산하는 세 종류의 주요 가공 공장이 있습니다.⁵⁴ 최근, 나라브리에 있는 페르다만 인더스트리가 새로운 질산 암모늄 공장 설립을 제안했습니다. 이 공장은 계획된 나라브리 가스 프로젝트(14.5 PJ yr⁻¹)의 천연 가스를 사용하여 연간 300,000 톤의 비료를 생산할 것입니다. ⁵⁵

비용을 넘어선 암모니아 활용 기회

암모니아(NH₃)는 수소를 위한 소중한 에너지 매개체가 될 수 있는 잠재력을 가지고 있습니다. 특히 지리적으로 넓은 지역을 가로질러 운송하기 위해 중요한 에너지 매개체가 될 수 있습니다. 이는 암모니아가 압축 또는 액화 H₂에 비해 액화 연료로 압축 및 운반하기 더 쉽기 때문입니다. 암모니아는 실온에서 10바(bar)의 압력 또는 대기압 하의 -33oC에서 액화 될 수 있습니다. 액화 암모니아는 액화 수소(5.6 MJL⁻¹)에 비해 3배 더 많은 에너지 밀도(15.6MJ L⁻¹)를 가지며, 따라서 L당 더 많은 H₂를 저장합니다. 게다가 암모니아는 100년 이상 전 세계적으로 활발히 수송되고 있으며, 따라서 기존의 암모니아 공급 망을 활용하여 대량의 H₂를 전송하는 경쟁력 있는 수단으로 보입니다.

사용면에서 암모니아는 직접적으로 소비할 수 있습니다. 직접 소비에는 비료, 화학 제조의 공급 원료 또는 발전 및 운송을 위한 연료로서 사용이 포함됩니다. 최근 미쓰비시 중공업은 세계 최초로 완전 암모니아 구동(100%) 가스 터빈을 개발한다고 발표했으며, 2025년까지 40MW 터빈을 상용화할 것으로 예상됩니다.⁵⁶ 또한, 유럽과 일본에서 발전용으로 석탄 및 암모니아 혼합 연료를 함께 태우는 시험을 진행하고 있습니다.⁵⁷

암모니아는 암모니아 연료 전지로 전기를 생성하는데 사용될 수 있으며 부산물로 N₂ 및 물을 생성합니다.⁵⁸ MAN에너지 솔루션은 2025년까지 해양 선박개조를 위한 암모니아 연료 전지와 엔진을 개발하고 있습니다.⁵⁹

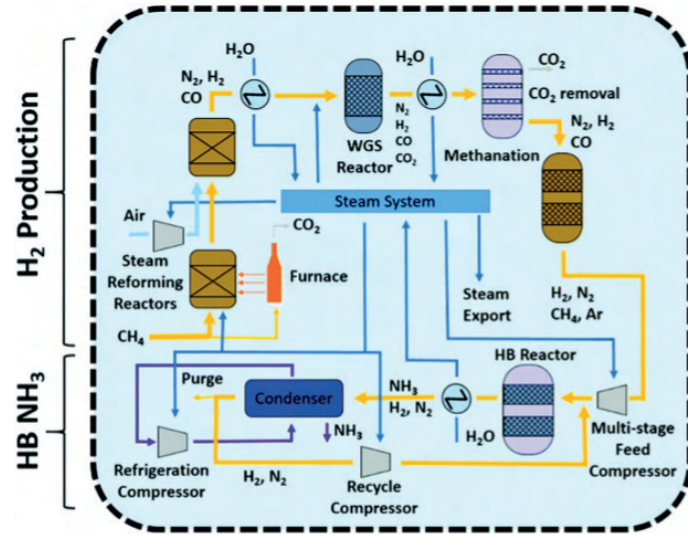
그러나 운송용 엔진, 전력 발전 시스템 및 터빈의 원료로 암모니아를 직접 사용하면 환경문제가 되는 NO_x가 배출되기에 이 문제를 반드시 해결해야만 합니다. 현재 기술로는 NO_x를 불활성 형태로 변환하거나 특수 흡수제 또는 흡착제(부록 B)로 포집 할 수 있습니다. 또한, 이러한 폐기물 NO_x 배출은 전기화학적 질산염/아질산염 환원을 통해 재생 가능한 암모니아로 변환하여, 또 다른 P2X 기술을 효율적으로 사용할 기회를 제공할 수 있습니다. (아래에서 상세 설명)

암모니아는 또한 나중에 사용할 수 있는 H₂ 및 N₂로 다시 분할될 수 있습니다. 열 균열(300 ~700°C 및 1-10 bar) 및 전기 화학 적 분할 (250°C)을 포함하여 암모니아를 H₂로 균열시키는 공정이 개발되고 있습니다.^{58,60} 고온 암모니아 균열 (>700°C)은 이미 7 - 9의 TRL 수준을 달성했지만, 현재 TRL2-4수준에서 저온 크래킹 (<450°C)를 개발하기 위한 노력이 이루어지고 있습니다.⁶¹ 그러나 전기 화학적 분할은 현재 매우 초기의 개발 단계입니다. (TRL 2 - 4).

현재 암모니아 생산 공정

전 세계 거의 모든 상업용 NH₃ 생산은 20세기 초에 설계되어 오늘날까지도 계속되고 있는 하버 보쉬(Haber-Bosch(HB) 공정을 통해 이루어집니다. 이 과정 (그림9)은 공기분리 유닛에서 추출된 질소로 천연 가스의 증기 개질(改質)을 통한 수소 합성을 포함합니다. 암모니아로의 변환은 500°C의 온도, 150 - 200 바의 압력에서 철 기반 촉매를 통해 일어납니다.⁶²

그림 9: 하버 보쉬 공정 도식.⁶³



하버 보쉬의 핵심 이슈

HB의 환경 발자국과 에너지 수요는 미래의 탈 탄소 화 경제에서의 지속 가능성에 의문을 제기합니다.

HB반응을 구동하는 데 필요한 H₂는 현재 앞서 강조된 바와 같이 큰 환경발자국을 남기는 천연 가스 또는 석탄의 증기 개질을 통해서만 독점적으로 공급됩니다. 실제로 1톤의 암모니아를 생산할 때마다~ 2~3톤의 CO₂가 생성됩니다. 이는 전 세계 온실가스 배출량의 1%에 달하는 환경발자국을 남깁니다.^{64,65} 지역적인 시각에서 보면 오리카 쿠라강 시설(350ktpa)에서만 연간 0.7 ~100만 톤의 CO₂를 생성합니다.

또한 HB공정을 통한 암모니아 생성은 에너지 집약적이며 전 세계 에너지 수요의 1%를 차지합니다. 예를 들어 1톤의 NH₃를 생산하기 위해 최대 30~50GJ의 천연가스가 필요합니다.⁶⁶ 전 세계 암모니아 생산량의 72%가 천연가스를 사용하여 이루어지고 있기 때문에 이는 지속 가능한 가스 공급에 상당한 부담이 됩니다.⁶⁷

그린 암모니아로의 전환

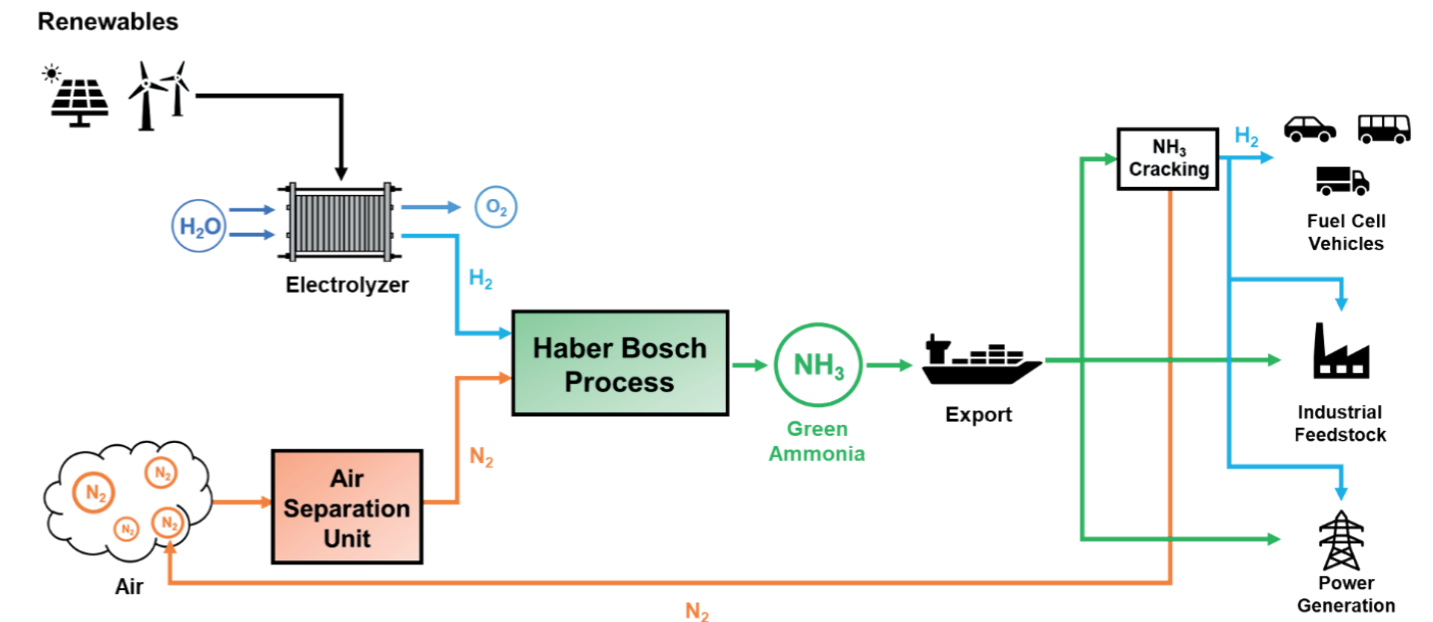
그린 수소의 생산은 즉각 단계적으로 대규모의 그린 암모니아를 생산하는 핵심 원동력이 될 것입니다. 그린 수소는 재생 에너지(그림 10)의해 구동되는 순수 물 전기 분해를 사용하여 생산됩니다. 기존 암모니아 생산에 그린 수소를 주입하면 다양한 그린 상품을 생산할 수 있는 기회가 열릴 것입니다. 폐기 NO_x를 암모니아로 변환, 플라즈마 하이브리드 전기분해 기술, 직접적인 질소 환원 반응 같은 대체 P2X 기술들 또한 그린 암모니아 생성을 위해 확장되고 있습니다.⁶⁸⁻⁷¹ 그린수소에 대한 전 세계 수요는 2030년까지 8억 5 천만 달러로, 연간 성장율은CAGR ~55%로 예상됩니다.⁷²

호주의 그린 암모니아

호주는 재생 에너지 활용을 통해 국내 비료 시장은 물론 수출을 위한 그린 암모니아를 생성할 수 있습니다. 국립 수소 로드맵은 암모니아를 수출을 위해 호주에서 생성된 수소의 저장 및 운송을 가능하게 하는 핵심 벡터로 설명하고 있습니다²¹ 아래에서 자세히 설명한 바와 같이 이러한 기회를 탐구하는 몇 가지 활동들이 진행중에 있습니다.

- 야라 오스트레일리아는 이미 WA 필바라에 있는 암모니아 공장을 그린 암모니아 시설)으로 개조할 가능성을 모색하고 있습니다. (2028년까지 800ktpa)

그림 10: NSW주의 에너지 벡터로서 그린 암모니아의 잠재적 공급 체인.



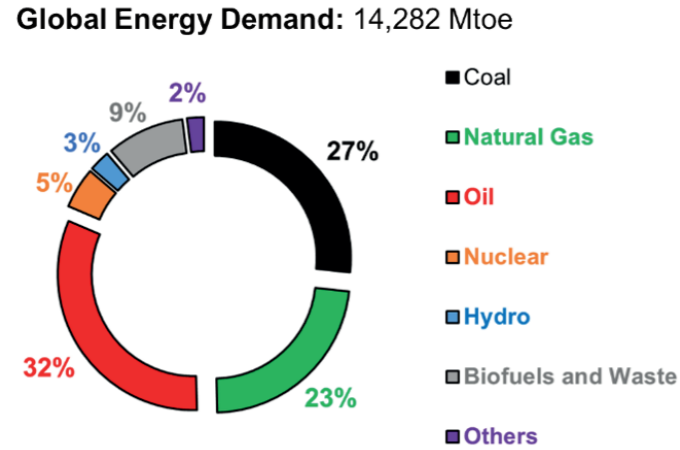
- QNP 질산염 또한 전기분해장치 (>20 ktpa)에서 H₂를 얻기 위해 기존의 암모니아 공장을 변환하기 위해 위와 비슷한 기회를 모색하고 있습니다.
- 아시아 신재생 에너지 허브(WA에 위치), 머치슨 재생 수소 프로젝트(WA), 에어 페닌술라 프로젝트(SA위치) 같은 다른 메가 그린H₂ 프로젝트들은 모두 수출을 위한 그린 암모니아를 생산할 것으로 예상됩니다.

NSW주 또한 그린 암모니아 시장을 향한 이러한 움직임에 참가할 수 있으며 글로벌 수요를 충족하기 위해 NSW가 공급하는 생산량의 매 %마다 호주 달러 1억 2천만 달러의 수익을 창출할 수 있습니다.⁴⁴ 즉각적인 기회로 오리카의 뉴캐슬 시설을 개조하고 일라와라 솔헤이브 구역이나 뉴캐슬/헌터 구역에 있는 모듈형 재생 가능 H₂ 구동 하버-보쉬 공장 설립을 통해 NSW주는 이런 시장 기회를 포착할 수 있습니다. NSW는 또한 즉각적인 탈탄소 화 단계를 위해 석탄 기반 발전소에서 함께 연소할 재생 가능한 암모니아를 개발할 수 있습니다.

3.4. 전력을 메탄으로 변환 (Power to Methane)

천연 가스 형태의 메탄은 핵심적인 에너지 자원(천연 가스의 95%는 메탄/CH₄)이며, 현재 전 세계 에너지 수요의 23%가 천연가스에 의해 제공됩니다. (그림11)

그림 11: 자원별 글로벌 에너지 공급 분석. 데이터는 2018년 IEA의 글로벌 에너지 공급 분석에서 가져왔습니다.⁷³



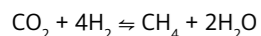
메탄 수요 증가

국제에너지기구(IEA)의 추정에 따르면 2019년 전 세계 천연가스 수요가 ~4,000억 입방 미터에 달할 것으로 예상되며 전 세계 천연가스 수요는 2009년 이래 연간 2.7%의 성장률(CAGR)을 기록했습니다.⁷⁴ 이런 추세로 미루어 천연가스 시장가치는 2022년까지 연간 1,031억 달러(7.7%)에 이를 것으로 예상됩니다. 또한 주요 에너지 수출 상품인 액화 천연가스(LNG) 시장만으로도 2027년까지 5억 3천만 톤규모에 시장 가치는 미화 180억불에 육박할 것이라 예측됩니다. (CAGR~6%)⁷⁶ 비록 전세계적인 팬데믹으로 인해 천연가스 수요의 단기적인 감소가 예상되긴 하지만, 천연가스가 상대적으로 더 청정한 화석연료로서 석탄을 대체할 것으로 기대되고 아시아 의 많은 국가들이 국내 매장량 감소로 인해 수입 LNG에 의존할 것으로 예상됨에 따라 IEA는 천연가스 수요가 강하게 반등할 것이라고 예측하고 있습니다. ^{77,78}

합성 메탄 생산

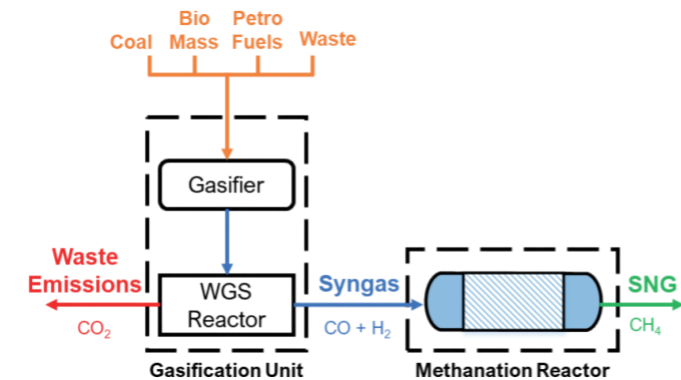
메탄은 현재 거의 독점적으로 천연 가스를 가공을 통해 공급됩니다. 그러나, 메탄 생성을 위한 합성적인 경로는 일찍잡치 1902년 초에 사바티에와 샌더론에 의해 '촉매작용을 통한 메탄 생성'이 제 시되었습니다. ⁷⁹

사바티에 메탄 공정은 이산화탄소와 수소의 촉매 변환에 의해 메탄의 생성을 포함합니다 (150 - 550°C 사이의 온도와 1 - 3 바의 압력)⁷⁹:



이 프로세스는 8 - 9의 높은 기술 준비 수준 (TRL)에 도달해 있습니다.⁸⁰ 현재 린데, 할도르 탑소, 클라리언트 및 포스터 휠러, 린데, 에토가스 및 MAN 에너지 같은 기업들은 상업적 적용을 위한 규격화된 메탄화 원자료를 제공하고 있습니다.⁷⁹ 이러한 적용에는 석탄, 석유 연료, 폐기물 또는 바이오매스에서 생성된 CO₂의 촉매 변환을 포함, 메탄 원자로안에 메탄-합성 천연가스(SNG)를 넣는 과정을 포함합니다. (그림 12)

그림 12: 재래식 메탄 공정의 고차원적 도식



재생 가능한 메탄화 - P2M의 역할

현재 메탄화 기술의 주요 문제로는 CO₂ 공급원료 뿐만 아니라 수소 원료, 고온 고압이라는 요구사항이 있습니다. 현재 거의 모든 상업용 수소는 화석 연료에서 발생하며, 이는 전 세계 CO₂ 배출량의 2%에 해당하는 대규모 환경 발자국을 남기고 있습니다. (섹션 3.1)

재생 전기를 활용한 전기분해를 통해 그린 수소를 공급할 수 있다는 점을 감안할 때 전력을 메탄으로 변환하는 것(P2M)은, 대체 옵션을 제공합니다. 게다가 우리는 이제 산업 공정 과정에서 배출되는 CO₂ 배출을 캡처 할 수 있는 기술(TRL 7 - 9, **부록 B참조**) 또는 대기에서 분리하는 (예를 들어, 직접 공기에서 포집) 기술 보유하고 있습니다. 이러한 기술은 상업용 메탄 공정을 통해 그린 수소와 메탄을 결합하여 폐기물 CO₂ 배출을 변환할 수 있습니다. 그런 다음 메탄을 합성 천연 가스(SNG)로 가스 그리드에 주입하여 연료 또는 산업 공급 원료로 다운 스트림 해서 사용할 수 있습니다. 이후 연소로 인한 탄소배출은 P2M 공정에서 회수 및 재사용할 수 있으며, 본질적으로 순환을 차단할 수 있습니다. (그림 14)

이러한 방식으로 P2M은 환경 솔루션을 제공할 뿐만 아니라 가스 공급망에 재생가능 에너지를 침투하여 향상시키는 방안을 제공합니다.

P2M의 적용

여러 P2M 시설들이 이미 전 세계적으로 운영되거나 개발되고 있으며, 특히 EU에서는 많이 운영 및 개발되고 있습니다. ⁸¹ 이런 최초의 P2M 시설은 독일 아우디가 개발했으며 2015년부터 운영되어 아우디의 가스 구동 차량용으로 1,000톤의 재생 가능한 메탄을 생산하고 있습니다.⁸¹ 최근 중국 산시성 공업지대에서 합성 메탄을 위한 연간 350만 입방 미터 규모의 시설이 개발되고 있습니다.⁸² 이 시설은 사바티에 반응 경로를 사용하여 현지 발전소에서 포착된 CO₂와 (전기분해기반 수소 포함)산업 구역에서 생성된 잉여H₂를 변환할 것입니다. 일단 시설이 가동되면 세계에서 가장 큰 메탄화 시설이 될 것으로 예상됩니다.

호주 최대 천연가스 공급업체 중 하나인 사우스 그린 가스와 APA 그룹은 퀸즐랜드에 있는 데모 시설(남부 그린 가스 프로젝트를)을 개발하여 공기에서 나오는 CO₂와 재생에너지를 사용하여 메탄을 생성할 것입니다. (그림 13)⁸³ 이와 유사하게, ATCO 오스트레일리아는 서호주에서 재생 가능한 메탄 생산시설 개발의 사업타당성을 탐구하고 있으며, 올해 연구 결과는 나올 것으로 예상됩니다.⁸⁴

그림 13: 퀸즐랜드의 APA 재생 가능 메탄화 프로젝트. APA에서 이미지 제공⁸³

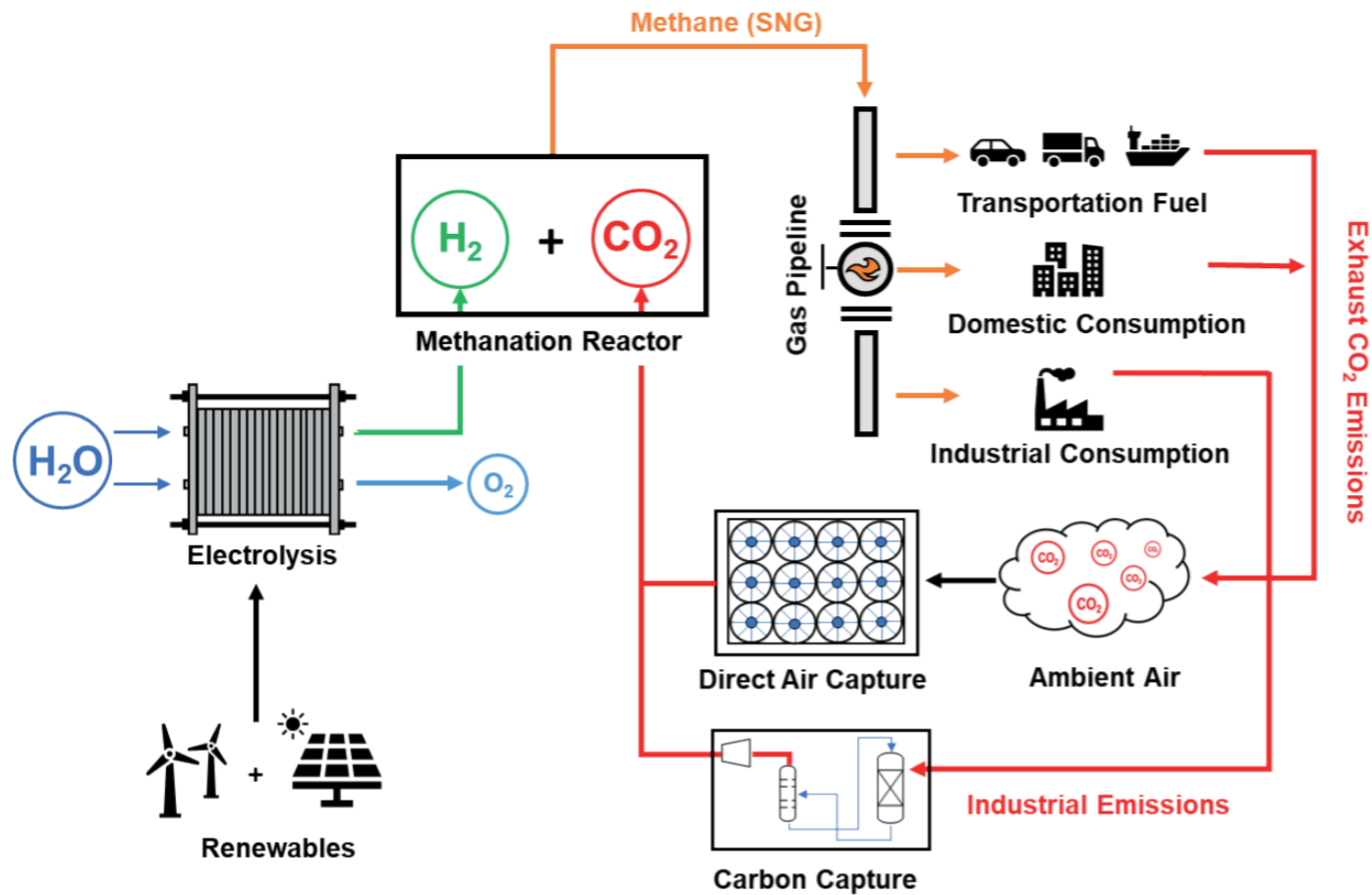


또한, 호주 최초의 바이오 메탄 프로젝트가 시드니에서 개발되고 있습니다. 말라바르 바이오 메탄 프로젝트는 뉴사우스 웨일즈 주 말라바르에 위치한 시드니 워터의 수처리 공장에서 사용할 수 있는 유기물의 혐기성 소화를 통해 바이오 메탄을 생성할 것입니다. 이 프로젝트는 NSW 가스 그리드에 연간 95 TJ yr⁻¹의 바이오 메탄을 제공할 것이며 생산용량은 향후 200TJ yr⁻¹로 증가할 것으로 예상됩니다. ⁸⁵ 2022년까지 호주달러 8 백만불 규모의 시설이 가동될 예정입니다. 뉴캐슬에 본사를 둔 CSIRO 에너지 또한 전용 아민 솔루션 기반 공정(0.29 tCO₂/시간당)을 사용하여 대기에서 공급되는 CO₂와 재생 가능한 수소(2.7MW 전기분해 장치)를 사용하여 재생 가능한 메탄(148m³/시간당)을 생성하는 사업 타당성을 검토하고 있습니다.⁸⁶ 확장된 경우 합성 메탄 비용은 \$5.3/GJ로 100만 tpa(메탄 040만 tpa)의 CO₂ 포집 양으로 달성할 수 있다고 제시되고 있습니다.⁸⁶

NSW주의 합성 천연 가스 기회

NSW주는 기존 매장량으로부터의 생산이 급속히 고갈되고 미개발 자원의 향후 공급이 불확실하기 때문에 가스 부족에 직면할 것으로 예상됩니다.⁸⁷ 호주 에너지 시장 오퍼레이터 (AEMO)는 NSW주가 2024년까지 14PJ의 천연가스 부족에 직면할 수 있으며, 이는 2030년까지 70~128PJ로 증가할 수 있다고 예측했습니다.⁸⁸ 현재 NSW 천연가스 수요가 연간 약 131PJ yr⁻¹(2018-19년)에 이르는 점을 감안할 때 이러한 공급부족은 상당히 심각합니다.⁸⁹ LNG 수입으로 공급이 증가하는 낙관적인 경우에도 70PJ의 부족이 여전히 만연할 것입니다. 따라서 NSW 주의 재생 가능 에너지 잠재력을 활용하여 천연 가스에 혼합하기 위한 합성 천연 가스 또는 그린 수소를 생성하여 천연 가스를 보완하는 합성 메탄을 생성하면 천연 가스(70 PJ = H₂ 5Mt(LHV: 120 MJ kg⁻¹)는 상당한 시장 기회를 제공할 것입니다.

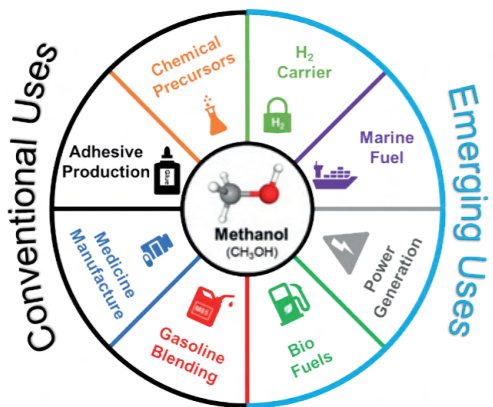
그림 14: 재생 가능한 전기 분해 및 탄소 포획을 사용한 전기를 메탄으로 변환(P2M)하는 폐쇄 루프 과정



3.5. 전력을 메탄올로 변환 (Power to Methanol)

메탄올(CH₃OH)은 매우 다양하게 활용 가능한 화학 물질이며 업계에서 손쉽게 사용되고 있습니다.(그림 15) 메탄올의 주요 특징은 메틸 그룹(CH₃-)의 가용성으로 포름알데히드(화학 전구체), 아세트산(제약 응용 프로그램) 및 에테르류(접착제에 사용됨)와 같은 구조들을 생성하는 전구물질로 활용할 수 있다는 점입니다. 메탄올은 또한 엔진 성능을 향상시키기 위해 가솔린과 혼합되며 전 세계 대부분의 국가에서는 연료에 메탄올의 다른 배합을 사용할 수 있는 규정이 있습니다.⁹⁰

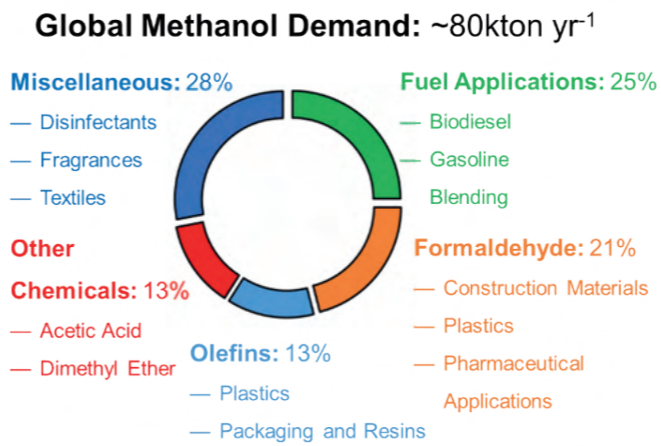
그림 15: 메탄올의 전통적 사용 및 새로운 활용



메탄올에 대한 수요 증가

메탄올은 세계에서 가장 많이 거래되는 5대 화학 물질 중 하나입니다. 글로벌 메탄올 시장은 2027년까지 두 배로 성장할 것으로 예상되며, 2016년 이후 연평균 5%의 꾸준한 성장율을 보이고 있습니다.⁹¹ 연간 글로벌 수요는 7천8백 9십만 메트릭톤(그림16)으로 주로 포름알데히드(21%)와 올레핀(13%)의 생산 덕분이며 연료(~25%)로 활용되는 비중이 가장 큼니다.⁹² 전반적으로 아시아 태평양 지역이 메탄올 시장의 주요 동인이 될 것으로 예상됩니다.⁹³ 또한 메탄올은 수소재생에너지 캐리어로 사용될 것으로 기대되며(아래에서 강조)는 아래에서 강조된 바와 같이 중요한 역할을 할 수 있으므로, 전 세계가 수소 기반 경제로 전환하기 위해 나아가면서 이러한 수요가 크게 증가할 수 있습니다.

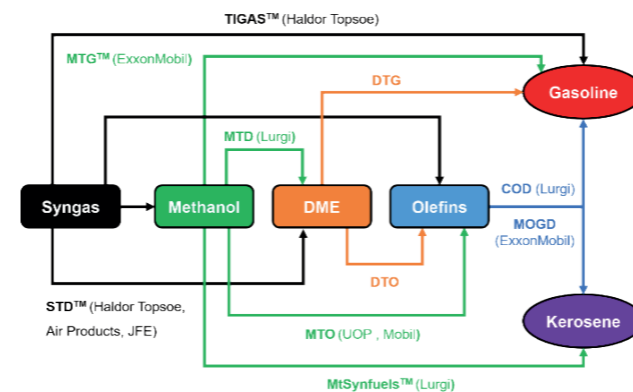
그림 16: 최종 사용 부문별 메탄올의 글로벌 수요.⁹²



메탄올 생성

종래의 메탄올 생성은 합성가스 생산으로 시작해서, 뒤이어 CO₂/CO 수소화라고 하는 열 촉매 변환을 사용하여 메탄올로 변환됩니다. 이 변환 과정은 일반적으로 금속계 촉매 CuO, ZnO 및 Al₂O₃가 있어야 하며 5-10 MPa의 압력, 200-250°C의 온도에서 진행됩니다.⁹⁴ 이 과정은 이미 다양한 기업들에 의해 상용화되었습니다. (그리고 6~7 TRL 수준)(그림17)⁹⁰ 메탄올은 또한 피셔-트롭슈 합성을 통해서 생성되는데 섹션 3.5에서 좀더 자세하게 설명합니다.

그림 17: 메탄올 및 메탄올 기반 연료(DME, 올레핀 및 파라핀 류) 생성을 위한 상용화 된 경로.⁹⁵



재생 가능한 메탄올

메탄올 생성을 위해 전력을 메탄올로 변환(Power to Methanol)하는 경로는 이미 상업적인 촉매 원자로서 산업용 배기가스에서 포집한 CO₂와 재생 가능한 전기 분해를 통해 생성한 H₂를 활용하여 활발하게 시연되고 있습니다.

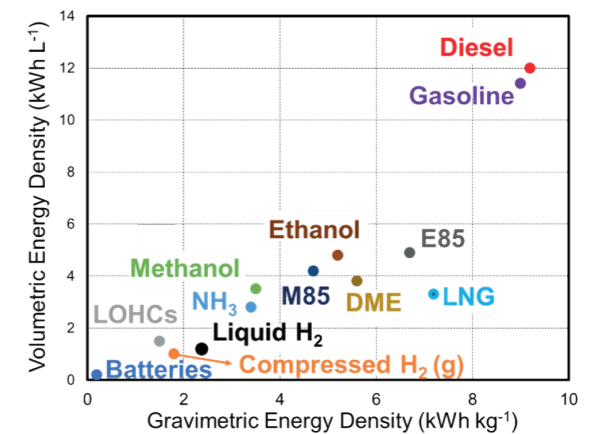
나아가 최근 전기 촉매작용의 발전은 재생 가능한 전기를 사용한(메탄올 변환을 위한)합성가스 및 심지어 메탄올의 직접적인 합성을 가능하게 하는 H₂와 CO₂의 공동 전기 분해를 위한 가능성을 열어주었습니다. (그림 21)⁹⁶이러한 기술은 개발 초기 단계(TRL 2)에 있지만, 국제 재생 에너지 기구(IRENA)는 이런 기술 발전이 완전히 지속 가능한 메탄올 가치 사슬을 개발하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있습니다.⁹⁷

재생 가능한 메탄올의 활용

메탄올은 '수소경제'에서 수소 매개체로서 중요한 역할을 할 것으로 기대됩니다. 에너지 밀도가 높기 때문에 암모니아 같은 다른 수소 매개체들보다 상당한 이점이 있어 (그림18) 단위당 질량면에서나 부피면에서 모두 더 많은 양의 에너지를 저장할 수 있습니다. 또한 차후에 간단한 1단계 변환을 통해 에너지 밀도(에너지 경쟁력)가 더 높은 에탄올 및 디메틸 에테르(DME)로 변환할 수 있습니다.

(연료 및 산업 공급 원료 양쪽 모두에서의) 용도의 다양성, 점점 증가하는 수요, 그리고 지속 가능한 생산 잠재력 등을 감안했을 때 재생 가능한 메탄올은 "미래를 위한 연료"로 대두되고 있습니다.⁹⁸ 이는 전력 발전 및 운송산업 분야, 특히 배터리 사용이 제한적일 것으로 예상되는 중장비 응용 분야, 항공 또는 해양 산업 같은 분야에서 운송 연료로 사용 될 수 있다는 것을 볼 수 있습니다.⁹⁷

그림 18 : 전통적인 에너지 매개체와 새롭게 부상하는 에너지 매개체의 변환을 위한 에너지 밀도 비교. 여기서, M85는 85%의 메탄올과 15%의 가솔린이 혼합되었음을 나타냅니다. 이와 비슷하게 E85는 85%의 에탄올과 가솔린 15%가 혼합되었음을 나타냅니다. DME는 디메틸 에테르를, LOHCs는 액체 유기 수소 운반체를 나타냅니다. (여기에서는 톨렌으로 간주합니다.)



재생 가능한 메탄올 프로젝트 현황

최초의 재생 가능한 메탄올 공장은 아이슬란드의 CRI-카본 리사이클링 인터내셔널 사에 의해 개발되었습니다. (그림 19) 이 시설은 2011년부터 가동 중이며 인근 지열 발전소에서 CO₂와 동시에 전기분해로 필요한 H₂를 생성해내기 위한 전기도 공급받습니다.⁹⁷ CRI는 또한 상용 적인 적용을 위해 연간 50,000에서 100,000t yr⁻¹ 사이의 플랜트 생산력을 갖춘 턴키 솔루션으로써 자사의 기술을 제공하고 있습니다.⁹⁹

그림 19: 아이슬란드에 있는 CRI의 시설은 세계 최초의 Power to Methanol 프로젝트입니다.



IRENA의 분석에 따르면 이미 700,000 t yr⁻¹의 총합 용량의 재생가능 메탄올 공장(P2X)이 이미 설치되고 있습니다.⁹⁷ 이러한 메가 프로젝트에는 스웨덴 (45,000 t yr⁻¹), 호주 ABEL 에너지 사의 벨 베이 프로젝트 (60,000 t yr⁻¹) 및 2024년부터 가동 예정인 노르웨이의 CRI 프로젝트 (100,000 t yr⁻¹) 등이 포함됩니다.

호주의 메탄올 잠재력

연간 70,000t yr⁻¹의 호주 메탄올 수요(그림 20)¹⁰⁰를 충족하는 호주 유일의 메탄올 시설은 1994년 빅토리아에 쿠지 케미칼(Coogee Chemicals)이 설치한 공장입니다. 2016년 이후, 천연가스의 가격 경쟁력이 없어지면서(<A \$ 10 GJ-1), 공장 가동이 중단되었으며 해체 예정입니다.¹⁰¹

그림 20 : 빅토리아에 있는 호주 유일의 메탄올 공장. 이 시설은 가스가격이 높아지면서 2016년에 공장가동을 중단했습니다.¹⁰²



2019년, 쿠지 케미칼은 노던 테리토리에 또다른 메탄올 공장을 개발하기 위한 타당성 분석 실행 계획을 발표했으며, 이곳에서 유리한 비용으로 가스공급을 확보할 수 있을 것이라고 밝혔습니다.¹⁰³ 5억달러 규모의 투자가 필요한 공장이 2024년까지 가동될 수 있을지에 대한 결정은 아직 확정을 기다리고 있습니다.

ABEL 에너지 전력연료 프로젝트

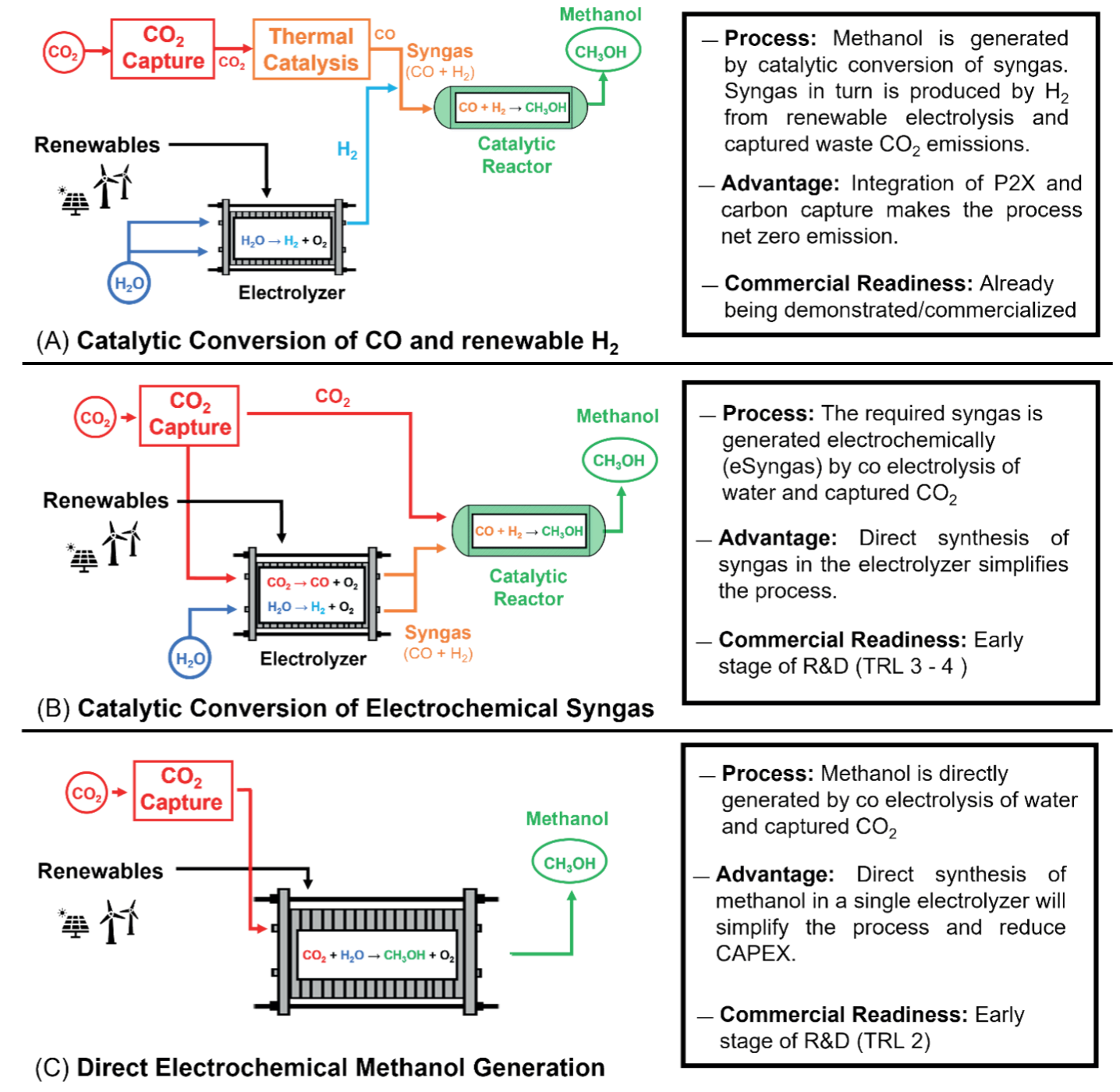
ABEL 에너지는 타즈메니아, 벨 베이에 재생 가능 메탄올 공장 설치를 계획하고 있습니다. 이 공장은 주로 수출을 목적으로 타즈메니아의 재생 에너지 잠재력(특히 수력발전)을 활용하여 100MW의 재생 가능 수소 전기분해장치에 전력을 공급하여 60,000 t yr⁻¹을 생성할 계획입니다.¹⁰⁴ 제안된 향후 개발에는 메탄올의 일부를 DME로 변환하여 현지 수요를 충족하는 공장 설치도 포함되어 있습니다. 제안된 프로젝트 규모는 2억 7천만 달러의 비용 투자로 30개의 일자리를 창출할 것으로 예상됩니다.¹⁰⁵

NSW주의 재생 가능 메탄올 기회

NSW주는 기존의 발전소와 바이오매스 자원에서 얻을 수 있는 폐기 CO₂와 재생가능 수소를 활용하여 재생가능 메탄올을 생성할 수 있습니다. 이것은 공급원료나 연료로서 현지 시장에서 사용되거나 재생가능한 수소에 대한 수출 매개체로서의 역할을 할 수도 있습니다. 메탄올이 압축수소보다 에너지 밀도가 높은 것으로 보고되고 있기 때문입니다.

또한 메탄올은 혼합 연료로 사용할 수 있기 때문에 저탄소 경제로의 점진적 전환을 촉진할 수 있는 특별한 기회를 제공합니다. 메탄올과 석유 혼합은 아태지역에서 무탄소배출 유효성으로 가는 중간 단계의 탈탄소화 경로로 간주되고 있습니다.

그림 20: 메탄올 생성을 위한 잠재적인 P2X 경로. (A) 첫 번째 경로는 열 촉매를 사용하여 포획한 CO₂를 CO로 변환하는 것을 포함하며, 그 후에는 재생 가능한 전기 분해장치를 통해 H₂와 혼합하고, 차후 혼합가스(CO+H₂)를 이차 변환 반응을 통해 메탄올로 변환합니다. (B) 두 번째 경로 (TRL 3-4)는 폐기 CO₂와 CO₂ 전기분해기 내의 물을 사용해 혼합 가스를 생성하고 이를 이차 변환 반응을 통해 다시 메탄올로 변환할 수 있습니다. (C) 메탄올을 생성하기 위해 CO₂ 및 물을 직접 전기 분해하는 장치를 개발하기위한 연구가 진행되고 있습니다.



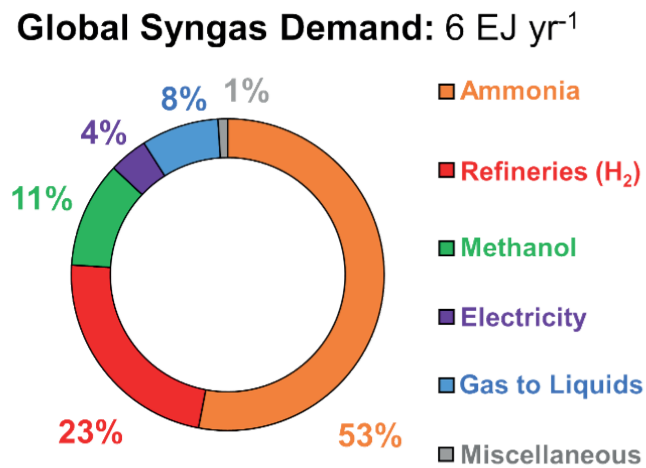
**3.6. 전력을 합성가스로 변환(합성연료)
(Power to Syngas (Synthetic Fuels))**

3.6. 피셔-트롭슈 공정을 이용한 합성가스 생산 및 변환

합성 가스(syngas)는 주로 수소와 일산화탄소로 구성된 각기 다른 배합율의 필수 연료 가스 혼합물입니다. 현재 합성가스는 암모니아 제조(CO가 CO₂로 변환되어 대기로 방출되는 지점), 석유화학 산업 및 메탄을 생성과정에서 산업용 수소를 생성하기 위한 중간 단계로서 활용되고 있습니다. (그림22) 또한 석탄 가스화의 주요 산물로서 전기 발전 특히 석탄 발전에서 간접적으로 사용됩니다. 또다른 새로운 응용법은 피셔-트롭슈 공정을 이용해 혼합 가스를 액체연료(특히 항공연료) 및 화학물질로 변환하는 것입니다.

특히 FT 프로세스는 높은 수준의 상용화에 도달했으며 글로벌 스케일(TRL 5 - 9)로 적극 구현되고 있습니다.⁸⁰ 제너럴 일렉트릭(GE), 루르기 AG, 셸, 지멘스 등 마켓 리더들이 이미 상용화하여 제공하고 있습니다. 대규모 FT 프로젝트로는 남아프리카 공화국의 사솔(Sasol)공장이 하루>300,000 배럴(bpd)의 합성연료를 제공하고 있습니다. 2005년 이 공장은 다양한 다른 제품들과 함께 남아프리카 공화국 전체 디젤 수요의 28%를 공급했습니다.¹⁰⁶ 셸(Shell)은 카타르에 190억 달러 규모의 펄 GTL(Gas to Liquids)시설을 운영하고 있으며, 2011년부터 하루 140,000 배럴(bpd)용량의 제품을 생산하고 있습니다.¹⁰⁷

그림 21: 최종사용처 부문별 글로벌 합성가스 수요 분석.¹⁰⁸



합성가스의 글로벌 수요

합성가스에 대한 글로벌 수요는 ~ 6 EJ yr⁻¹ (즉, 6 * 10¹² MJ)이며, 이는 전 세계 주요 에너지 소비량의 2%에 해당합니다.¹⁰⁸ 합성가스와 그 파생상품을 위한 글로벌 시장은 2022년에 연간 6.6EJ의 가치를 가질 것으로 예상되며 2016년부터 10%CAGR 이상의 연평균 성장률을 보이고 있습니다.¹⁰⁹

호주에서의 수요

호주에서는 합성가스는 대부분 암모니아 생산을 위해 H₂를 제공하는 동안 간접적으로 생성됩니다. 다른 방법으로, 연료로 차후 변환하기 위한 석탄 가스화를 통해 합성가스를 생성하기 위한 여러 프로젝트들이 남호주(SA), 빅토리아, 퀸즐랜드에서 모색되었지만 그 중 아직 상용화된 프로젝트는 없습니다.¹¹⁰ 그러나 남호주(SA)의 리 크릭 에너지 프로젝트가 현재 해당지역의 석탄 매장량을 활용하여 합성가스를 생산하는 가능성을 모색하고 있습니다. 그러나 이는 암모니아 및 요소 생성에 사용하기 위한 것입니다. 이 프로젝트는 현장에(in-situ) 석탄 가스화 시설을 개발하여 지하에 있는 석탄을 추후 회수하여 사용할 수 있는 합성가스로 가스화 할 것입니다. 이 회사는 2030년까지 탄소 중립이 될 수 있는 26억 달러 규모의 시설에 대해 "은행 거래가 가능한(Bankable)"타당성 분석을 수행하는 것을 목표로 하고 있습니다.¹¹¹

AgBioEn은 친환경 디젤을 생산하기 위해 빅토리아에 있는 20억 달러 규모의 '바이오매스 to FT'설비를 개발하고 있습니다. 이 프로젝트는 45 ktpa의 탄소배출을 절감하고 최대 1,500 개의 일자리를 창출할 것으로 예상됩니다.¹¹²

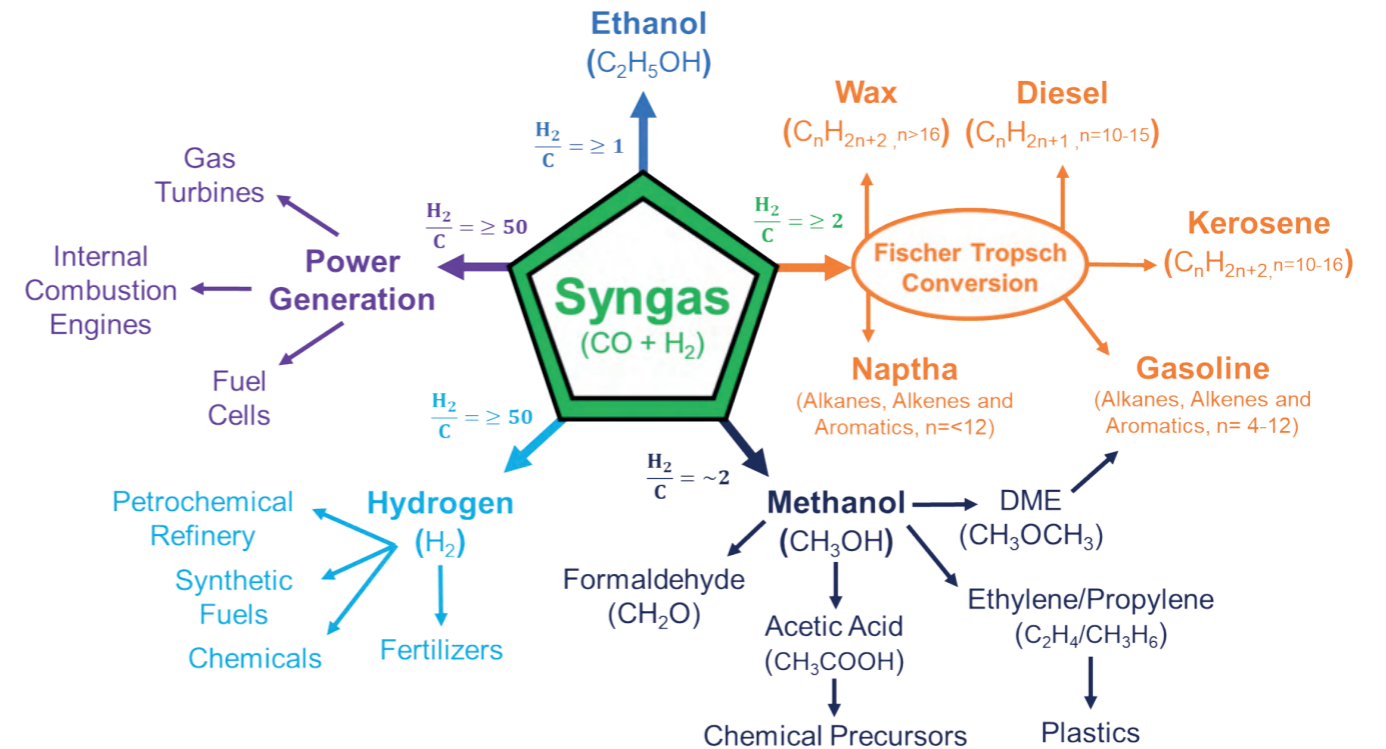
합성가스의 주요 특징

합성가스(Syngas)는 화학적인 레고 블록과 마찬가지로 생각할 수 있습니다.CO와 H₂의 기본 빌딩 블록을 다양한 구성으로 결합하여 셀 수 없을 만큼 많은 제품을 만들 수 있기 때문입니다. 이런 기능은 합성가스의 비율, 합성가스 혼합물안의 H₂:CO의 분자비율에 의해 규정됩니다. 직접적인 사용 또는 FT 공정을 통해 다양한 화학물질과 연료를 생성하기 위한 에너지 원 또는 공급원료로서 합성가스를 매개체로 사용할 수 있는 가능성을 위해 이미 다양한 합성가스 비율이 확립되었습니다.(그림 23)¹¹³

합성가스 생성

현재 대부분의 FT 공정은 천연가스 또는 석유 공급원료를 사용하는 Gas to Liquid(GtL) 공장으로 분류되고 있습니다. 중국과 남아프리카 공화국에서는 Coal to Liquid(CtL) 플랜트가 대량의 합성가스를 손쉽게 생성하는 방법으로 사용되고 있습니다.¹¹⁴ 다른 새로운 경로로는 바이오매스나 고체의 도시 폐기물을 사용해 합성가스를 생성하는 방법 등이 포함됩니다.¹¹⁵ 합성가스 생성을 위한 일반적인 산업 기술들은 촉매 증기 메탄 개질(SMR), 자기열 개질(ATR) 및 부분 산화(POX)등 입니다.

그림 23: 합성가스 비율 (H₂/CO)을 기반으로 하는 합성가스 파생상품¹¹³



합성가스 생산에서 P2X의 역할

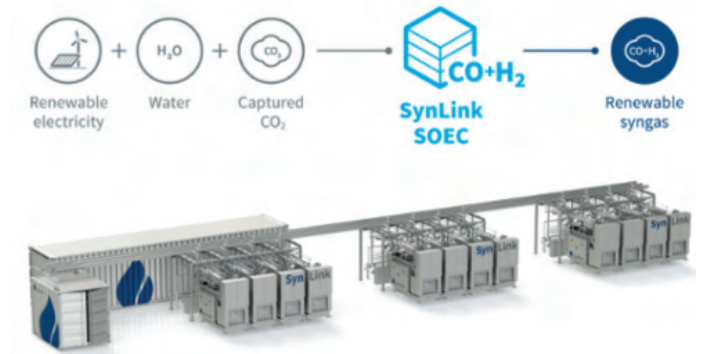
Power-to-X 기술은 재생 에너지를 통해 탈탄소화된 합성가스 생산의 기회를 제공할 수 있습니다.

1. 재생가능한 수소를 폐기용 CO₂에 혼합하여FT 반응장치에 사용하기 위한 합성가스를 생성할 수 있습니다. 종종 Power to Liquid(PtL)이라 불리는 이 접근법은 재생 메탄올 및 다른 FT기반 연료의 생성에서 선두를 달리고 있습니다.¹¹⁶ 남아프리카 공화국 기반의 화학 회사인 사솔(Sasol)사는 앞서 언급되었던 남아프리카의 석탄 기반 FT시설을 재생 수소에 기반한 PtL 공장으로 변화하기 가능성을 조사하고 있습니다.¹¹⁷ 또한 아래의 설명처럼 EU에서 여러 다른 프로젝트들이 개발 중에 있습니다.
2. 전이 금속 기반 촉매들을 활용하여 직접적으로CO2와 수전해장치에서 합성가스를 생성하는 것 또한 가능합니다.¹¹³ 촉매 조율을 통해 합성가스 비율을 쉽게 변경할 수 있으며 이는 차후 FT 변환으로 생성할 수 있는 다른 합성탄화수소 제품들에 대한 다양한 통제력을 제공할 것입니다. (NSW대학들 내에서)합성가스 촉매 개발 및 해외 시스템 확장을 위한 상당한 노력이 이루어지고 있습니다.

독일 기반의 설파이어 GmbH사는 합성가스의 직접적인 합성을 위한 전기분해장치(최대 750Nm³hr⁻¹)를 상용화했습니다(그림 24). 이 전기분해장치는 포집된 CO₂배출물 및 물의 동전기분해로부터 선택적인 비율을 가진 합성가스의 생성을 가능하게 할 것입니다.

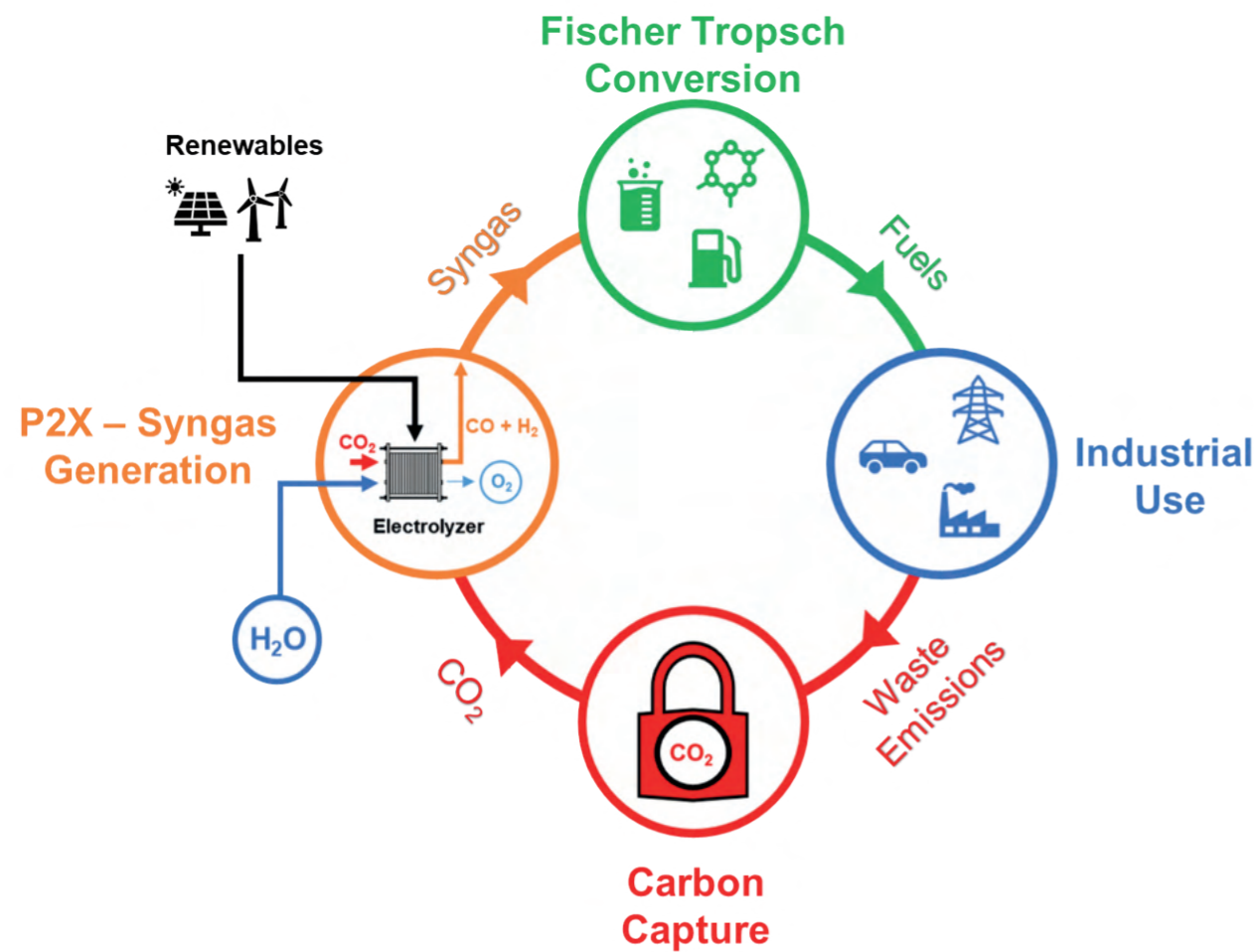
이 회사는 현재 CO₂ 포집회사인 클라이워크스(ClimeWorks)사와 협력하여 노르웨이에서 "노스크 원료(Norsk efuel)"파일릿 프로젝트를 개발하고 있으며, 2026년까지 1억 리터의 합성 연료를 생산하기 위해 보유한 기술을 활용할 예정입니다.¹¹⁸

그림 24 : 합성가스의 직접 합성을 위한 설파이어GmbH의 Sylink SOEC 시스템.



이러한 개발은 포집된 CO₂ 배출로부터 합성 연료들을 생성할 수 있는 폐회로 PtL 시스템 개발을 위한 길들을 열어줍니다. (그림 25) IEA는 이러한 합성 탄화수소, 특히 항공 연료와 같은 합성 등유에 대한 수요가 2070년까지 석유(Mtoe)로 환산했을 때 연간 2억 5천만 톤까지 도달할 것으로 예상하고 있습니다.¹⁹ 이것은 ~ \$ 1,340 억 톤의 석유에 해당하는 항공연료시장 (항공 연료의 현재 가격 : \$ 68 bbl⁻¹)¹⁹으로 옮겨갈 것입니다. 최근 네덜란드를 대표하는 항공사인 KLM은 자신들이 세계 최초로 PtL을 사용하여 생성된 합성 등유를 사용하여 운영하고 있음을 밝혔습니다.¹²⁰ 이 회사는 또한 암스테르담과 로테르담 공항에서 비행 운영을 위한 합성 등유를 생산하기 위한 PtL 공장 설립을 개발하고 있는 프로젝트의 주요 이해관계자이기도 합니다.

그림 25: 탄소순환고리를 마무리하기 위한 P2X를 사용사용한 전기화학적 합성가스 생성



NSW주의 Power to 합성가스 기회

합성가스로부터 메탄올 생산 외에도 (섹션 3.5에서 논의됨), NSW주 내에서 합성가스에서 매우 다양한 전력연료를 생성할 수 있는 시장 기회가 있습니다.

즉각적인 전망 하나는 웨스턴 시드니 에어로트로폴리스(Western Sydney Aerotropolis)의 합성 항공 연료 생산입니다. 또한 올레핀과 폴리머를 생성하기 위한 재생가능한 합성가스의 적용이 지역 제조산업에 경제적인 기회를 제공할 수 있습니다.

3.7. 기타 다른 Power to X 기술

3.7. 다른 P2X 경로들

위에 언급된 경로들 외에도 여러 가지 다른 P2X 기술들을 연구하고 있습니다. 여기에는 여기에는 직접 CO₂ 전해환원으로 포름산, 에탄올/메탄올 및 기타 복잡한 탄화수소 제품을 만드는 경로들이 포함됩니다.¹²¹ 실제로, 유연성 향상을 위해 서로 다른 전기 화학 경로들을 단일 시스템 안에서 함께 결합하는 가능성이 남아있다고 보고되고 있습니다. 최근 Na et al., 의 최근 보고서에 의하면, 전기 화학 경로로 최대 295 가지 조합이 생성 될 수 있다고 제시하며 이는 다양한 가스 및 액체 형태의 제품들이 나올 수 있음을 시사합니다.¹²² 이 중 몇가지 P2X기술에 대해 다음과 같은 논의가 진행되고 있습니다.

재생가능 전력에서 H₂O₂ (Renewable Power to H₂O₂)

과산화수소(H₂O₂)는 상업용 산화제로 사용되는 귀중한 화학 물질이며, 특히 전 세계 H₂O₂ 수요의 60%를 차지하는 펄프 및 제지 산업에서 활용되고 있습니다. 또한 H₂O₂는 수처리 및 살균을 위한 소독제로 사용됩니다. 이 속성은 현재 전 세계적인 팬데믹 상황임을 고려해 볼 때 매우 중요하며, 미국 질병통제센터는 사용에 안전한 강력한 소독제 중 하나로 과산화수소를 포함하고 있습니다.¹²³ 현재 과산화수소는 안트라퀴논의 산화환원반응을 통해 과산화수소를 생성하는 안트라퀴논 공정을 사용하여 생성되고 있습니다, 이 공정의 일반적인 전구체는 증기 메탄 개질로부터 생성된 수소이며 이는 안트라퀴논을 수소화 하는데 사용되며 나중에 과산화수소 생성을 위한 산화 단계에서 제거됩니다.¹²⁴

그러나 최근 전기 촉매의 개발로 단일 전기분해 유닛 내에서 물에서 수소 그리고 공기에서 산소로 과산화수소를 생성하는 길이 열렸습니다.¹²⁵ 이는 공항, 병원, 스포츠 이벤트 등에서 사용하기 위해 단지 공기, 물 그리고 현장의 전기로부터 지속적으로 과산화수소를 생성할 수 있는 간단하고 저렴한 휴대용 장치로 이어질 수 있습니다.

바이오매스에서 H₂

전기 분해에서 재생 가능한 수소를 생성하는 방법에 대한 한가지 대안은 바이오 매스로부터 수소를 생성하는 것입니다. 수소를 생성하기 위해 바이오매스를 석탄 또는 천연가스와 혼합하거나 직접적인 가스화 또는 열분해 공정을 사용하는 것은 이미 확립된 접근법입니다. 연구되고 있는 대체 특별 생물 공정은 특별히 설계된 바이오 촉매체들을 사용하여 생체물질들이 수소로 분해되는 것을 포함하는 전문 생물학적 과정이 조사되고 있습니다.¹²⁶ 바이오매스는 수소 생성을 위한 방대한 재생 가능 자원을 제공하지만, 수소로의 전환은 느린 과정이며, 바이오매스를 육성하고 현재 대규모 확장성을 제한하고 있는 대형 수소발전을 위한 반응체들의 개발이 필요합니다.¹²⁷

CO₂ 무기화(작용)

CO₂ 무기화작용은 폐기되는 CO₂를 시멘트 및 건축 자재처럼 부가가치 재료로 변환하는 유망한 P2X 경로입니다. 세계 경제에서 사용되는 이러한 재료의 양을 감안할 때 CO₂의 무기화는 대량의 CO₂ 활용 및 저장 가능성이 있는 경로로 옹호되고 있습니다. 128 현재 CO₂ 무기화는 높은 에너지 요구 사항과 느린 운동학으로 인해 제한적입니다.¹²⁹ 재생 가능 에너지는 무기화 과정의 규모확장에서 공정을 촉진하는 에너지를 제공하고 직접적인 공기 포획같은 규모확장 과정을 제공하는 역할을 할 수 있습니다.

호주 기반의 미네랄 카보네이션 인터네셔널(MCI)사는 이미 지난 7년 동안 상업용 무기화(mineralization) 기술을 개발하고 있습니다. 뉴캐슬 대학에 파일럿 플랜트를 설계하고 건설하기 위한 자금으로 정부와 산업계로부터 2천만 달러 이상의 시드 펀딩을 조달했습니다.

^{130,131}



4. NSW주와 호주의 혁신적인 P2X기술

4.0. NSW주와 호주의 혁신적인 P2X기술

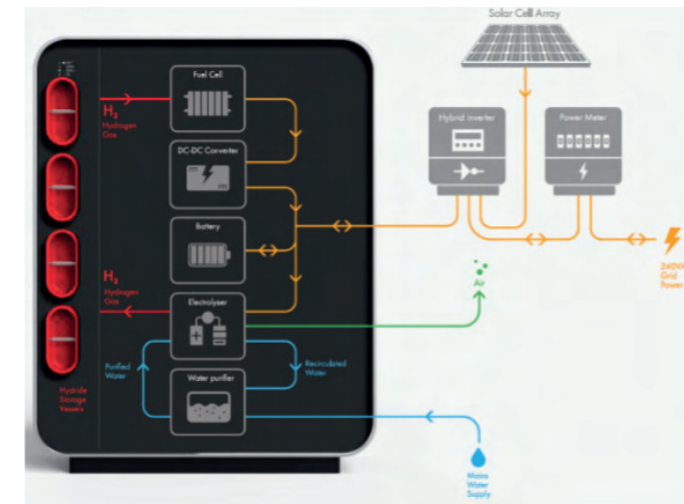
NSW주(및 오스트레일리아)는 P2X 영역에서 탁월한 연구 개발(R&D)역량을 보유하고 있습니다. 이는 엔지니어링과 응용과학 분야에서의 고품질 작업에 의해 주도되었으며 특히 재생 가능 에너지, 에너지 변환, 나노 기술, 촉매, 공정 설계 및 엔지니어링, 제조 및 혼합 에너지 화학 시스템의 생산성과 효율성을 높이는 등 주요 초점 분야에서 주도적입니다.

P2X 영역에서 NSW주와 호주에서 파생된 기술들에 대한 몇 가지 사례를 아래와 같이 소개합니다.

LAVO의 수소 저장 시스템

UNSW에서 파생된 LAVO™는 주거용 주택 및 비즈니스 용의 독자적인 수소 기반 하이브리드 에너지 시스템(40kW 용량)을 개발했습니다. 상기 시스템(그림 26)은 옥상의 태양열 어레이로부터의 전기공급 및 메인라인으로부터의 물공급으로 작동할 수 있는 수소 전기분해장치를 장착하고 있습니다. 생성된 수소는 금속 수소화물 시스템에 저장되고, 저장된 수소는 태양 에너지를 사용할 수 없는 시간에 연료 전지를 사용한 전력 발전용으로 사용될 수 있습니다. 이 회사는 현재 2021년 7월까지 선적 주문을 받고 있습니다(유닛 당 비용: \$29,450).

그림 26 : LAVOTM 그린 에너지 저장 시스템. 이미지 제공: LAVO™

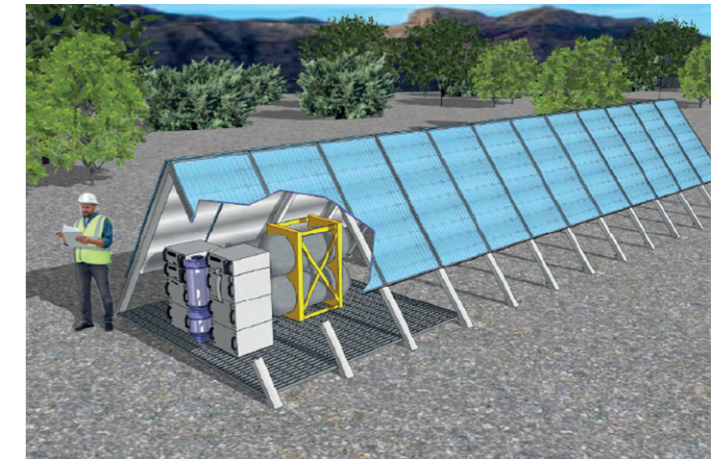


직접 공기 포집과 결합한 메탄생성

(Southern Green Gas서던 그린 가스)

위에서 강조한 바와 같이, APA 그룹과 서던 그린 가스는 ARENB의 펀딩으로 퀸즐랜드에 재생가능한 메탄 생성을 위해 최첨단 설비를 개발하고 있습니다. CO₂ 공급원료는 시드니 대학이 특허를 가지고 있는 직접 공기 포집 기술을 사용하여 공기로부터 포집합니다. 물 공급 원료는 뉴캐슬 대학에서 개발된 하이드로 하베스터 기술을 사용하여 공기에서 포집합니다. 데모플랜트(그림 27)은 매년 74GJ의 합성 메탄을 생산할 것으로 예상됩니다. 이 공장은 기존 가스 네트워크에 메탄을 주입하기 위해 퀸즐랜드의 월룸빌라 가스 허브에 설치될 예정입니다.

그림 27 : APA 메탄화 공정의 일러스트 디자인. 이미지 제공: 아레나.



플라즈마 구동 수소 및 암모니아 생성(플라즈마 리프 - UNSW)

Plasma Leap Technologies 플라즈마 리프 테크놀로지(시드니 대학에서 스핀 오프)는 매우 높은 에너지 효율로 플라즈마를 생성하는 독점적인 시스템을 개발했습니다. 이 시스템은 UNSW기반의 입자 및 촉매 연구 실험실에서 NOx를 생성하는데 사용되고 있으며 이는 차후에 하이브리드 특허의 전기분해 시스템을 사용하여 암모니아로 변환됩니다. (그림 28)

NOx 중간체의 생성은 중요한 기술적 과제였으며 이런 발전은 중급의 생성은 중요한 기술적 과제였으며, 이러한 발전은 Haber-Bosch 공정을 대체하여 규모 확장이 가능한 전기화학적 암모니아 생산을 위한 길을 열어줄 것으로 기대됩니다.

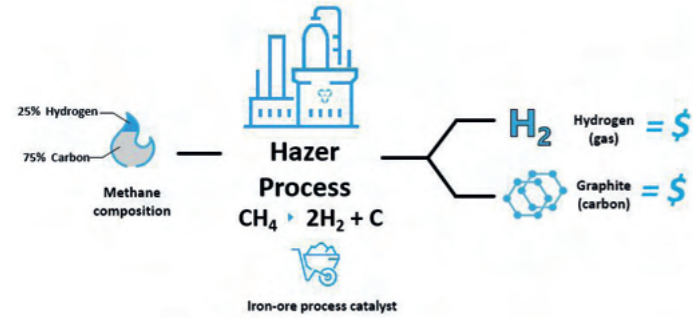
그림 28: 암모니아 생산을 위한 하이브리드 플라즈마 전기분해 시스템의 회로도. 이 공정은 플라즈마를 사용하여 공기(왼쪽의 반응기)에서 물과 질소로부터 NOx 중간체를 생성한 다음, NOx를 전기 분해장치(오른쪽에 도시됨)에서 물과 함께 동-전기 분해하여 암모니아로 변환합니다.¹³²



헤이저 프로세스 (헤이저 그룹)

헤이저 그룹Hazer Group은 시드니 대학과 협력하여 천연 가스로부터 무탄소배출 수소를 생산하는 것을 목표로 하는 Hazer@ 프로세스를 개발했습니다. 이 공정(그림29)은 철광석 기반 촉매를 사용하여 천연 가스를 (판매할 수 있는 고품질 흑연으로 회수되는)탄소로 변환하며 수소 가스를 방출합니다. 이 공정은 환경 친화적이며(탄소배출량 50% 감소) 증기 메탄 개질(SMR)과 비교해 경제적으로 경쟁력이 있습니다.

그림 29: 헤이저 프로세스의 공정 흐름 도표. 이미지 제공: 헤이저 그룹



합성가스 및 수소를 위한 고품 산화 전기분해기 (CSIRO)

CSIRO사는 태양 에너지를 활용하여 배출되는 탄소와 물을 합성가스와 수소로 변환할 수 있는 개념 입증 고품 산화 전기분해기(SOE)를 개발하고 있습니다. SOE를 사용하는 주요 장점은 전기화학 반응 유도를 위한 전기 및 열 양쪽 모두를 위해 태양 에너지를 사용할 수 있어 공정 효율을 개선할 수 있다는 점입니다. 그런 다음 역시나 CSIRO에서 개발 중인 촉매 변환기를 사용하여 합성가스를 액체 연료로 변환할 것입니다. 이 공정은 경제적인 경쟁력을 갖추기 위해 규모확장이 가능할 것으로 기대되며 전기분해과정을 추진하기 위해 필요한 전기를 40% 절감하고 폐기 CO₂ 배출의 최대 8 t⁻¹ 소비를 가능하게 할 것으로 예상됩니다.

수소 생산을 위한 폐수 전기분해(Switch2)

Switch2는 식품 및 음료 산업(예: 양조장, 와이너리 및 증류소 등)에서 유기물이 풍부한 폐수를 부분적으로 산화하여 수소를 생성할 수 있는 촉매 및 전기분해 시스템을 개발했습니다. NSW 주를 위한 Switch2 프로세스의 이점은 수소 생산을 위한 청정수에 대한 의존도를 줄임으로서 국내 사용을 위해 부족한 청정 수 자원을 사용할 수 있습니다. 이 회사는 그림 30에서 보이는 파일럿 시스템을 개발했습니다.

그림 30: Switch2의 파일럿 시스템. 이미지 제공: Switch2.



HERO® 수소 에너지 옵티마이저

영웅® - 수소 에너지 옵티마이저는 뉴캐슬 대학과 협력하여 스타 사이언티픽 리미티드가 개발한 특허받은 촉매 시스템입니다. 촉매는 유해한 부산물 없이 수소와 산소를 사용하여 열 에너지(3분 이내에 700°C에 가까운 온도)를 생성할 수 있게 합니다.¹³³ 이 회사는 또한 전력 생산(석탄 기반 증기 생성 대체)과 같은 에너지 집약적 공정에 발생한 열을 사용할 수 있게 하는 특수 열 교환기(석탄 기반의 증기 생성 대체)를 개발하고, 해수 담수화를 위한 산업용 에너지를 충족할 수 있도록 가정 및 상업용 난방 시스템을 개발하고 있습니다.

이 촉매는 수소의 대량 유통을 위한 기회를 제공함으로써 수소 경제의 핵심 동력으로 선두를 달라고 있습니다. 이 회사는 최근의 수소 경제 발전에 도움을 주기 위해 기술 지원을 하기로 필리핀 정부와 계약을 체결했습니다.¹³⁴

아쿠아 하이드렉스 AquaHydrex Pty Ltd

아쿠아하이드렉스는 울릉공 대학교(UOW)의 연구를 기반으로 한 기술 스타트업입니다. 이 회사는 천연 가스 그리드에 주입할 수 있는 수소를 생성하여 재생 가능한 전기 저장 수단으로써 상업적용도의 독점적인 저비용 및 고효율 전기 분해 장치 시스템을 개발하기 위해 노력하고 있습니다. 이 회사는 이러한 전기분해장치들을 개발하기 위해 2017년 ARENA펀드를 제공받았습니다.¹³⁵ 그 이후로 회사는 미국으로 사업체를 옮겼습니다.

하이드진 리뉴어블스 HydGene Renewables

하이드진 리뉴어블스는 맥쿼리 대학에서 파생된 스피노프로서 특허를 받은 현장 바이오리액터를 사용하여 바이오매스로부터의 수소생성을 상용화하고 있습니다. 이 회사는 전력발전 연료전기에서 생산되는 수소를 사용하여 디젤동력 시스템을 대체하는 오프사이트 에너지 생성 시스템으로 자신들의 시스템을 활용할 것으로 기대하고 있습니다. 이 시스템의 주요 장점은 동일한 현장에서 수소가 생산되고 사용되므로 수소 형성 및 유통의 주 비용 동인인 운송 및 보관 비용을 절감할 수 있다는 점입니다.

하이드로 하베스터 Hydro Harvester

하이드로 하베스터는 태양 에너지/열을 사용해서 공기를 가열하여 주위로부터 더 많은 수분을 흡수하여 공기에서 물을 추출하기 위해 설계된 기술입니다. 가열된 공기는 그다음에 흡수한 물을 응축하기 위해 냉각됩니다. 이 기술은 현재 프로토타입 단계에 있지만 공기로부터 물을 분리하기 위해 비용이 높고 효율이 떨어지는 방법인 냉각된 공기를 사용하는 상용화된 하베스터와는 본질적으로 다릅니다. 하이드로 하베스터는 태양열과 폐열을 사용하여 더 효율적이며 리터 당 5센트 미만의 비용으로 물을 생성할 수 있습니다.

개발자들은 또한 자신들의 시스템이 수소 생성에 사용될 것으로 예측합니다. 이 기술은 물 분해를 위해 사용된 시스템에서 생성된 과잉 태양 열 및 열 에너지로 전기분해장치를 위한 순수한 물을 제공할 수 있습니다. 이 회사는 서던 그린 가스와 파트너십을 맺고 (앞서 언급된)퀸즐랜드에서 합성 메탄을 생성하는 프로젝트를 지원하고 있습니다.

개발자들은 또한 상업적인 데모 유닛을 위해 NSW 물리 과학 기금 (A \$ 330k)을 통해 시드 펀딩을 확보했습니다.¹³

미네랄 카보네이션 인터내셔널

Mineral Carbonation International (MCI)
MCI는 호주에 본사를 둔 회사로 CO₂를 포집하여 건설 자재로 변환하는 기술을 개발하고 있습니다. 이 회사는 지난 7년 동안 활발하게 활동해 왔으며, R&D를 위해 2천만 달러 이상을 자금을 확보했으며 뉴캐슬 대학교에 데모용 공장을 건설했습니다. 이들의 공정을 통해 포집된 CO₂를 시멘트, 콘크리트, 골재 및 석고보드로 변환할 수 있으며, 현재는 난연제 및 의류와 같은 고급 재료로의 변환을 모색하고 있습니다. 이 회사는 이제 잠재적인 산업 현장을 평가하고 CO₂ 변환의 생존 가능성을 탐구할 수 있는 역량을 가지고 있으며, 기술을 상용화할 수 있는 잠재적인 기회를 모색하고 있다고 합니다.^{130,131}

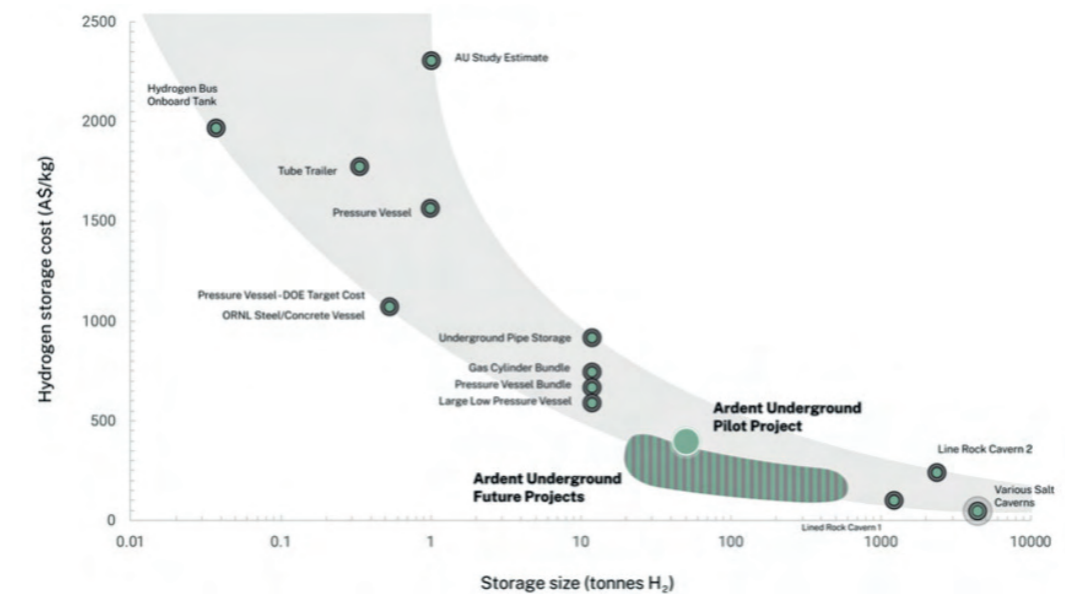
하이사타 Hysata

울릉공 대학교(UoW)의 스피노프인 하이사타는 < 2/kg의 비용으로 수소를 생산하는 것을 목표로 하는 '선진' 전기분해장치 기술을 개발하고 있습니다. 이 회사는 자신들의 전기분해장치 디자인을 상용화하기 위해 최근 클린 에너지 파이낸스 코퍼레이션(CEFC)의 지원으로 IP 그룹을 통해 5백만 달러의 자금을 확보했습니다.¹³⁷

아덴트 언더그라운드 Ardent Underground

수소 공급망의 핵심 측면은 생성과 사용 단계 사이에 중간 저장이 필요하다는 것입니다. 이를 해결하기 위해 아덴트 언더그라운드 사는 ITP 리뉴어블스와 파트너십을 통해 드릴링 샤프트를 통해 현장 지하에 수소 저장을 상용화하고 있습니다. 자연 발생적인 록베드가 수소 누출을 막고 고압을 유지하여 비용이 많이 드는 저장 탱크의 필요성이 없습니다. (그림 31)

그림 31: 아덴트 언더그라운드의 H2 스토리지 솔루션과 대안의 비용 비교. 이미지 제공: 아덴트 언더그라운드.¹³⁸





5.0. P2X 허브' 개발에 적합한 로케이션

이 섹션에서는 NSW의 여러 지역에서 P2X 허브를 개발할 가능성을 탐구해봅니다. 제시된 비즈니스 케이스들은 P2X 실행을 위한 가상의 대표 시나리오로 개발되었으며 각 회사의 의도 또는 계획을 반영하지 않는다는 점을 반드시 유의해주시기 바랍니다.

5.1. 5.1. NSW주 'P2X 허브' 기회를 평가하는 3단계 프레임워크

표 1: NSW에서 'P2X 허브' 기회를 평가하는 프레임워크.

단계	목표 시장	NSW 주의 경제에 대한 혜택
1단계: P2X 공급원료를 중공업(암모니아, 제강, 가스 혼합)에 임베딩	NSW주 안에서의 가스 블렌딩, 중공업 제조 및 광물 가공	'그린 케미컬' 공급원료를 화학공정에 포함시켜 중공업을 되살림으로서 친환경 원자재(green commodity)의 생성 허용. 동아시아 국가(일본, 중국, 한국), 영국, 미국, EU 의 친환경 원자재 의무화가 증가함에 따라 NSW주 친환경 원자재(예: 그린 철강, 암모니아, 메탄올 및 에탄올)의 수출강국이 될 수 있는 기회 제공. 중공업과 광물 가공은 대량의 P2X 제품의 생성 및 생산을 필요로 하여 NSW주의 시골 지역에서 새로운 일자리를 창출.
2단계: NSW주를 '친환경 연료'로 전환 (광업, 운송 및 공정 산업을 위한 전력 연료)	운송, 화학 및 광업 운영 및 열 난방 산업	P2X로 생산되는 수소, 암모니아, 메탄올 및 메탄올과 같은 그린 연료는 NSW주의 교통 인프라를 저탄소/탄소 배출 제로 대안으로 전환할 수 있는 기회를 제시. 이는 탄소배출 제로라는 목표에 더 가까워지게 되므로 NSW에 중요한 단계임. 대안적으로 NSW주의 광산 운영에 직접 그린 연료를 사용하여 연료 전지 전기 자동차로 전환. 열 난방은 NSW주의 식음료 산업에서 P2X 제품을 적용하는 매력적인 기회. 유제품 및 육류/가금류와 같은 산업은 주로 난방 응용 분야에 천연 가스를 사용. 그린 연료의 대규모 생산 후 NSW 주 교통 네트워크 또는 열 난방 네트워크에 배포함으로써 잠재적으로 지역 일자리를 창출.
3단계: 현지 최종 사용자 위한 분산형 P2X 마이크로 허브	NSW 내에 미시 경제를 창조할 특정구역들을 창출	지역 일자리 창출을 촉진하고 NSW 주가 투자하는 자금의 각 달러들이 P2X 기술 채택의 속도를 가속화하는 수많은 소규모 프로젝트로 분산. 즉 NSW 지역의 마이크로 수소(교통) 및 암모니아(비료) 허브 개발. 생산품 구매자들은 해당 마이크로 허브에 근접한 기업들.

5.2. 'P2X 허브' 실행을 위한 NSW의 주요 로케이션 개요

P2X 채택의 가장 큰 기회를 제시하는 NSW 주 내의 지리적 영역을 이해하기 위한 예비 조사가 수행되었습니다. 지리적 위치는 제조 역량 개발(특별 활성화 구역), 재생 에너지 발전 구역(REZs), 인프라 투자(배저리스 크릭의 에어로프로폴리스)와 같은 기존 NSW 주정부 이니셔티브를 기반으로 선정되었습니다. 다음으로는 공급 원료 가용성(정수 등), 산업과의 공동 위치 및 수출 기회를 위한 항만 인프라에 대한 액세스에 대해 각 로케이션에 대한 질적 평가를 수행했습니다. 표 2 이러한 결과에 대한 요약입니다.

타당성 조사의 초점은 재생 에너지 생성, 기존 산업/정부가 신항 산업을 자극하여 P2X 채택을 위한 즉각적인 기회를 제공하는 일라와라 솔헤이븐, 헌터, 파크스가 될 것입니다. 와가 와가, 더보, 보타니, 배저리스 크릭과 같이 탁상연구를 한 기타 다른 지역은 개발초기 단계에 있는 시장이며 P2X 채택에 대한 장기적인 전망을 제시하므로 이 버전의 보고서에서는 자세히 조사되지 않았습니다.

5. 'P2X 허브' 개발에 적합한 로케이션

표 2: 'P2X 허브' 로서의 잠재 전망 요약

Location	Feedstock Assessment		Existing Industry Assessment	Tier 1 & 2 Opportunity Assessment	Tier 1 & 2 Opportunity Assessment	Tier 3 Opportunity Assessment
	Access to Renewable Power Generation	Access to Pure Water Feedstock	Existing Industry in the Region	Opportunity to P2X to Decarbonise Heavy/Light Industries	Access to port infrastructure	Opportunity to Develop a Micro-P2X Economy
Illawarra - Shoalhaven						
Hunter						
Parkes		 Parkes has 2 major water reservoirs (Burrendong and Wyangala) but the region is prone to droughts	 Parkes has a mining sector and will be the intermodal point for the 'Inland Rail'	 The 'Inland Rail' and mining operations present an opportunity for power fuel application	 The 'Inland Rail' can be used for potential power fuel export	
Wagga Wagga			 Wagga Wagga has a large agricultural and food processing sector	 Power fuels can be utilised for thermal and transportation applications	 Freight and logistics pathways can be created	
Dubbo			 Dubbo has a mining sector	 Mining operations present an opportunity for P2X application	 Freight and logistics pathways can be created	
Badgerys Creek			 The aviation industry and Aerotropolis	 The aviation industry and Aerotropolis present an opportunity for power fuels adoption	 Freight and logistics pathways can be created	

5.3. 일라와라 솔헤이븐 지역

일라와라 솔헤이븐 지역은 연 수익155억 달러규모의 NSW주에서 세 번째로 큰 경제 구역입니다.¹³⁹ 이 지역의 경제에 기여하는 핵심 분야들은 다음과 같습니다.

- NSW주의 곡물 수출을 위한 가장 큰 허브이자 석탄 수출 규모로는 두번째로 큰 항구인 포트 캠블라 해운 항입니다. 포트 캠블라는 항구를 통해 NSW주에 5억 4,300만 호주달러의 수익을 제공합니다.¹⁴⁰
- 이 지역에는 철강 제조 및 연료 생산 같은 핵심 산업과 함께 호주 최대의 제조 거점 중 하나가 자리하고 있습니다.¹⁴¹

그림 32 : 일라와라 솔헤이븐 지역 지도.



일라와라-솔헤이븐 지역은 (그림 32) 블루스콥 스틸 및 마닐드라 그룹 같은 거대 중공업 복합기업들이 있는 생태계를 지원합니다. 이 두 기업은 이 지역에 '1단계 P2X허브'를 조성할 수 있는 아주 좋은 기회를 제공합니다. 우리는 이 지역에 P2X허브 설치의 지속가능성을 분석하기 위해 이 지역의 자원 가용성 및 P2X 가격대를 탐색했습니다.

NSW 주정부는 포트 캠블라 지역의 수소 허브를 개발하는 데 상당한 관심을 가지고 있습니다. 최근 정부는 에너지 오스트레일리아에 이 지역에 300MW 규모의 이중 수소/천연가스 화력 발전소를 개발하기 위한 자금을 지원했습니다.¹⁴² 포르테스큐 메탈 그룹은 자회사 인 스퀘드론 에너지(Squadron Energy)를 통해 NSW주의 산업에 전력을 공급할 10억 달러 규모의 발전소 개발에 관심을 표명했습니다.¹⁴³ 이러한 기업은 또한 이 지역에서 '2단계 P2X 허브'를 개발할 수 있는 기회를 제공합니다.

‘그린 철강’ 지원 기회

호주의 블루스콥 철강 BlueScope Steel 사업부는 매년 50억 호주달러 상당의 철강을 생산하며, 대부분 포트 캠블라 제철소에서 생산됩니다.¹⁴⁴ 제철소 시설은 매년 260만 톤의 철강을 생산하며 일라와라에서 10,000개의 일자리를 지원합니다.

블루스콥은 지속가능성 약속의 일환으로 2030년 이전에 제철 사업장의 Scope 1 및 Scope 2 온실가스 배출 강도를 12% 줄이겠다고 발표했습니다. 블루스콥은 재생 가능 태양광 전기 88MW를 공급하기 위한 ESCO 퍼시픽과의 7년간 전력 구매 계약(PPA)을 도입하여 이를 공급하여 이 목표를 달성하는 데 큰 진전을 이루었습니다. 이 PPA는 2019년에 시작되었으며 블루스콥의 에너지 수요의 20%를 제공합니다.¹⁴⁵

블루스콥의 또 다른 탐구 영역은 제강 작업의 탈탄소화입니다. 철강산업의 한 가지 기회는 *“전기 아크 용광로(EAFs)와 함께 직접 저감철(DRI) 플랜트를 사용하여 1차 철강 생산을 늘리는 것”*입니다. - 2020 지속가능성 보고서.¹⁴⁶ 이 제강 공정으로의 전환은 완전한 그린 수소로 전환하기 이전에 처음에는 SMR과 그린 수소로부터 화학 연료 기반 수소 블렌드를 사용하여 이루어질 가능성이 큼니다.

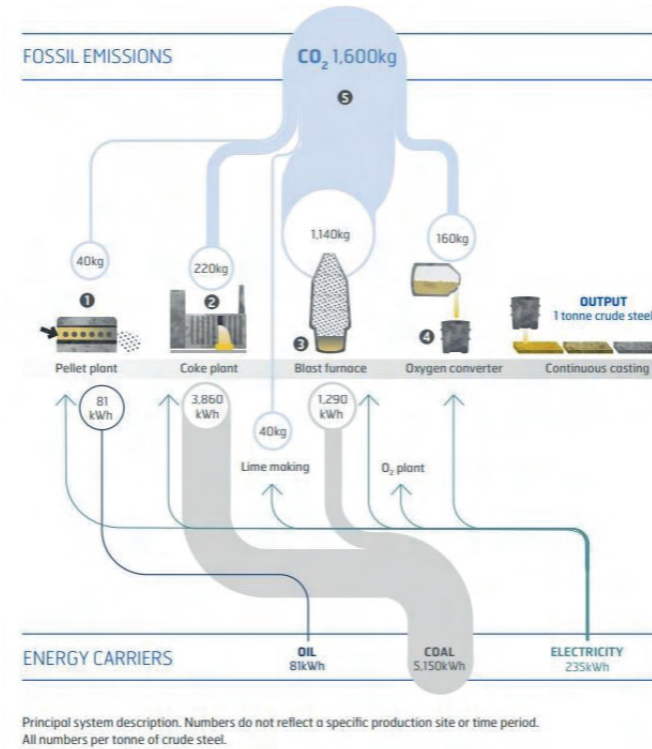
현재의 철강 제조 공정

현재의 철강/철강 가공의 공정 루트(그림 33)은 다음과 같은 단계들을 포함합니다.

1. 덩어리 및 응집미세철광(철질 등 산화철)을 용광로(blast furnace, BF)에서 제련하여 선철pig iron(탄소에 포화된 액상 철)을 만들어냅니다. 이 과정은 금속 코크스 및 기타 다른 보조화학 연료로부터 주로 탄소를 사용하여 직접 및 간접 축소를 포함합니다.¹⁴⁷
2. 기본 산소 용광로 (Basic Oxygen Furnace, BOF)는 탄소 함량이 낮은 철을 선철로 변환하는데 사용됩니다. 선철안에 잔류 탄소(및 기타 불순물)반응을 가속화 하기 위해 가열 중에 산소를 불어넣는 과정으로 인해 일산화탄소를 생성합니다. 1단계 및 2단계는 1 톤의 강철을 생산하기 위해 ~ 24.5 GJ의 에너지 (열 및 전기 모두)를 사용합니다. 따라서 블루스콥의 일라와라 시설의 경우 모든 강철이 1차 작업에서 생산된 것으로 가정할 경우 즉 순수 철광석 단위를 기반으로 할 64PJ의 에너지가 필요합니다.¹⁴⁸

열 가열 및 환원을 위한 화학 연료 사용은 현재 공정과정에서 탄소 배출량의 주요 배출원입니다. 용광로 탐 가스는 이산화탄소 22-23%, 일산화탄소 22-23%, 수소 4-6% 및 나머지는 질소로 구성되어 있습니다.

그림 33 : 현재 산업계의 철강 제조 과정을 보여주는 회로도 ¹⁴⁹



Principal system description. Numbers do not reflect a specific production site or time period. All numbers per tonne of crude steel.

고철을 공급원료로 사용하는 철강 생산

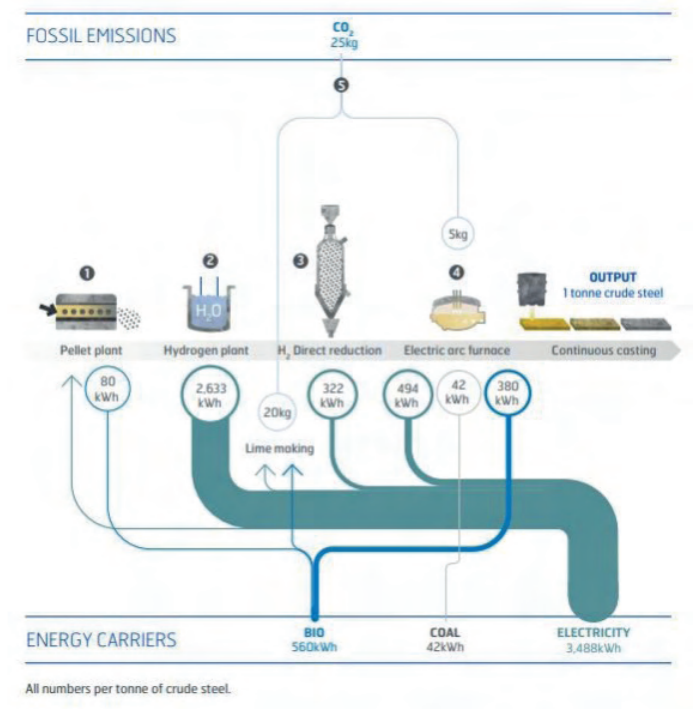
전기 아크 용광로 (EAFs)는 고철강을 강철로 변환하는데 점점 더 많이 채택되고 있습니다. 기본 원칙은 EAF에서 전류에 의해 공급되는 에너지를 사용하여 재활용 고철강 스크랩과 직접 환원 철(direct reduced iron -DRI)의 혼합물을 용해하는 것을 포함합니다. 고철강 스크랩은 평균 0.2 % 구리를 함유하고 있으며, DRI를 추가하여 희석하지 않을 경우 뜨거운 압연 공정 (hot shortness)동안 강철이 표면 균열에 노출됩니다.¹⁵⁰

현재 DRI 생산(2019년 글로벌 생산량의 ~76%)은 가스 기반 용광로 공정을 중심으로 하며, 천연 가스는 SMR을 사용하여 혼합가스(CO & H₂)로 변환되고 혼합가스 성분은 철광석을 환원하는데 사용됩니다.¹⁵⁰ 혼합가스 성분에서 그린 수소로 가스 입력전환은 이차 철강 산업이 저탄소 공정으로 전환하는 데 핵심적인 원동력 중 하나가 될 것입니다.

블루스콥 사에게 이것은 어떤 의미인가?

블루스콥은 현재 연간 철강 생산량의 15-20%를 고철강 스크랩을 사용하여 생산하고 있습니다.¹⁵¹ 블루스콥 사의 2020 지속 가능성 보고서에 설명된 바와 같이 중기적으로는 *“특정시장의 고철 공급이 증가함에 따라 이차 강철 전기 아크 용광로(EAF) 시설이 점점 더 많은 기여를 할 것이며, EAF와 함께 직접 환원 철 (DRI) 플랜트의 1차 철강 생산량이 증가할 것으로 보입니다.”* 블루스콥은 그린철강의 효율적 사용 임증을 목표로 하는 스웨덴의 HYBRIT 프로젝트(그림 34)의 결과를 기다리고 있습니다.¹⁵²

그림 34: 프로젝트 HYBRIT의 회로도. 이 공장은 그린 철강 생산을 위한 그린 수소의 수소의 사용 테스트를 위해 스웨덴에서 개발되고 있습니다.¹⁵³



All numbers per tonne of crude steel.

블루스콥의 일라와라 설비 규모의 저탄소 이차 철강 시설에는 어느 정도의 수소가 필요할까?

전통적으로 이차 철강 생산을 위한 EAF는 75%의 스크랩 강철과 25%의 DRI를 혼합하여 구리 농도를 산업 의무인 <0.15%로 끌어올립니다.⁵⁴ 예를 들어, 블루스콥의 일라와라 설비에서는 이차 강철 제조 공정을 사용하여 약 ~390 kT(블루스콥 연간 생산량의 15%를 차지함)의 철강을 생산합니다. 이를 위해서는 ~97.5 kT의 DRI 가 필요합니다. 현재 추정에 따르면 1톤의 조강을 생산하기 위해 환원 과정에서 54kg의 수소가 필요하다고 합니다. 따라서 블루스콥의 일라와라 시설과 같은 저탄소 이차강철 시설은 운영을 위해 연간 ~ 21 kT 의 그린 수소가 필요합니다.¹⁴⁷

일라와라-솔헤이븐 지역의 '저탄소 강철' 시설을 위한 공급원료 평가

그린 철강 생산을 위한 핵심 P2X 경로는 그린 수소의 생산을 포함할 것입니다. 그러므로 물과 재생 에너지에 대한 접근이 이 기회의 가능성을 결정하는 핵심적인 요소 중의 하나가 될 것입니다.

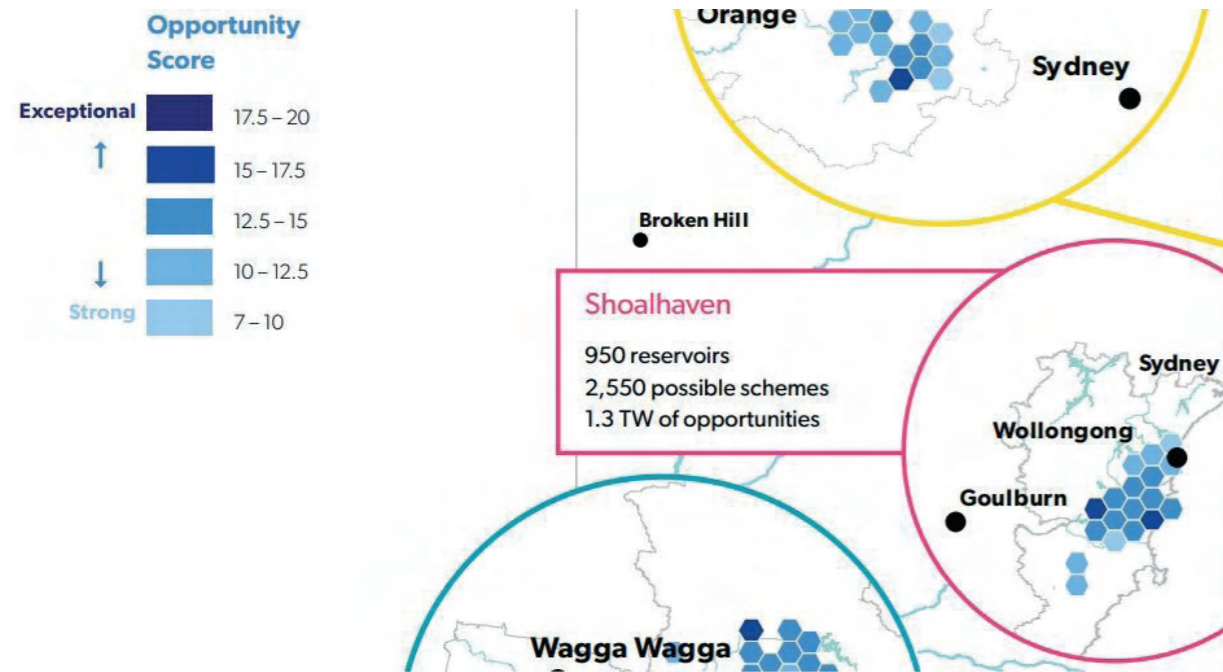
재생 에너지에 대한 접근성: 1977년 일라와라 솔헤이븐 지역에 수력발전 전기를 공급하기 위한 서던 하이랜드의 솔헤이븐 계획이 의뢰되었습니다. 오늘날 이 계획에는 캥거루 밸리와 벤데알라에 있으며 서로 연결되어 있는 두개의 발전소가 포함되어 있습니다. 발전소 소유주인 오리진 에너지 사는 일라와라 솔헤이븐 지역에 240MW의 전기 보급을 지원했습니다.¹⁵⁵

2020년 5월, 오리진 에너지 사는 새롭게 235MW 용량의 전기를 추가로 보급하기 위한 타당성 조사를 완료했습니다. 조사 결과는 *“기술적 타당성, 그러나 현재의 경제 환경에서 상업적으로 실현 가능하지 않다. 오리진 사는 향후 포트폴리오를 위한 이 확장 프로젝트를 계속해서 고려할 것이다”*였습니다.¹⁵⁶

이 단계에서 오리진 에너지 사의 주요 관심사는 COVID-19 에 따른 경제 불확실성으로 인해 비즈니스에 대차대조표 압력이 발생한 것입니다. 이 지역에 1단계 P2X Hub를 설립한다면 Origin이 기존의 네트워크에 추가적인 수력 용량을 더하려는 계획을 NSW 주정부가 다시 활성화할 수 있는 기회를 제공하며, 이는 에너지 수요가 다른 사용처들 중에서도 그린 철강 시설을 위한 수소 생산에 필요한 전기 분해 플랜트에서 비롯될 것이기 때문입니다.

NSW 주정부의 ‘양수발전 로드맵Pumped Hydro Roadmap’은 일라와라 솔헤이븐 지역에서 필요한 경우 1.3 TW의 추가적인 미개발 수력발전 잠재력이 있음을 확인했습니다.(그림 35)¹⁵⁷

그림 35 : 솔헤이븐의 수력 용량 기회.¹⁴⁵



헌터 일라와라-솔헤이븐 지역의 중공업 탈탄소화를 위한 '저탄소 강철' 이상의 기회
 마닐드라 그룹은 세계에서 가장 큰 밀 전분 및 글루텐 생산 공장 중 하나를 소유하고 있습니다. 노우라 시설의 산출물은 주로 빠르게 움직이는 소비자(FMCG) 제품 및 제지 산업의 생산에 사용됩니다.¹⁶¹

이 미개발 수력 용량은 블루스콥 강철이 장기적인 목표달성을 위해 완전한 재생가능 수소로의 전환을 달성하기 까지도 사용될 수 있습니다.

수소 생산을 위한 담수 접근성:

현재 네피안과 헤이븐 시스템은 일라와라-솔헤이븐 지역의 물 수요를 지원하고 있으며 6개의 수처리 시설에서 더 많은 지원을 받고 있습니다.¹⁵⁸ 탈로와 댐은 100% 가동 시(8.5 GL)으로 이 지역의 모든 수소 생산 활동을 가능하게 하도록 전략적인 위치를 차지하고 있습니다.¹⁵⁹

이 지역에 (이차 철강생산을 위한 블루스콥의 현재 규모와 매치되는)대규모 이차 그린철강시설이 설립된다면, 연간 211ML의 물이 필요하며 이는 에이본 댐(147GL, 현재 83%정도 차 있음), 탈로와 댐의 조합을 통해 공급될 수 있습니다. 또한 울롱공 폐수 처리시설 (일일 수용량 15ML)의 재활용 수로 가동 부담을 줄일 수 있습니다.¹⁶⁰ 이 지역의 향후 수요에 부응하기 위한 P2X경제를 지원하기 위해 담수화 된 해수또한 사용할 수 있다는 점을 유념하여 주시기 바랍니다.

밀 공급 원료 활용을 극대화하기 위해 마닐드라 그룹은 바이오에탄올 생산을 위한 바이오 정유 공정을 통합했습니다. 노우라 시설은 연간 110 ML의 바이오에탄올을 생산하는 호주 최대의 바이오에탄올 공급 업체입니다.¹⁶² 현재 에탄올 소비자들은 식음료, 제약 및 운송 연료 부문에 걸쳐 퍼져 있습니다.¹⁶³

바이오에탄올 생산 공정: 핵심 생산 공정에서 나온 잔류 전분은 물을 첨가하여 슬러리로 변환됩니다. 슬러리를 가열하여 더 작은 사슬로 분해합니다. 이 작은 사슬들을 단당인 포도당으로 변환하기 위해 효소를 사용합니다.¹⁶⁴ 이 단당은 효모가 발효 단계에서 생물학적으로 '원유 바이오에탄올'로 변환되는데 사용하는 주요 공급 원료입니다. 출력 용액의 농도는 바이오에탄올 10-15%입니다.¹⁶⁵ 이 바이오에탄올을 마닐드라의 7개 증류기동을 사용한 증류과정을 통하여 탈수해서 100의 순도로 농축합니다.¹⁶⁵

에탄올 생산 공정과정에서의 탄소배출: 바이오에탄올 생산 과정 중 발효 단계가 탄소 배출의 핵심 원천입니다. 현재 바이오에탄올 연구에 따르면 1리터의 바이오에탄올 당 1.5kg의 이산화탄소가 방출되는 것으로 나타났습니다.¹⁶⁶ 따라서 마닐드라의 바이오에탄올 생산 시설은 연간 165ktpa의 이산화탄소를 배출하는 것으로 추정됩니다.

이산화탄소 배출량의 안정을 위해 마닐드라가 개발할 수 있는 핵심 P2X 연료는 메탄올입니다. '저공해 메탄올'을 생산하는 과정은 이산화탄소와 '그린 수소'가 함께 반응하여 메탄올을 생산하는 **3.5항**에 설명되어 있습니다. 마닐드라 현장은 연간 ~120 ktpa의 메탄올을 생산할 수 있으며, 이는 부가가치 화학 제품으로 판매될 수 있습니다.

메탄올 생성을 위해 NSW주에서 재생가능 전기의 범위를 확산:
 NSW주에는 호주 최대의 바이오 디젤 공장 중 하나가 위치하고 있으며 바이오 디젤을 합성하는데 사용되는 주요 화학 물질 중 하나는 메탄올입니다. 바이오 디젤 생산 공정은 합성된 바이오 디젤 100kg당 메탄올 20kg을 소비합니다.¹⁶⁷

에스테르 교환과정에는 메탄올과 식물성 오일을 바이오 디젤 및 글리세린으로 변환하는 과정이 포함되어 있습니다. 이 공정과정에서의 메탄올 회복율은 보통 80%입니다.

예를 들어, NSW주 북부의 바이오 에너지 인더스트리 오스트레일리아 시설은 연간 20ML의 바이오디젤을 생산하며, 연간 ~2.7ktpa의 메탄올이 필요합니다. 이는 Power to 메탄올을 통해 충족할 수 있는 수요입니다. 이는 바이오디젤 공급망에 '저공해 메탄올' 임베딩을 시작할 수 있는 훌륭한 파일럿 이니셔티브가 될 수 있습니다.

참고: 사업성 및 사전 타당성 평가는 NSW 경제를 위한 사회경제적 이익과 운영규모에 따른 저탄소 철강생산 사례연구를 위해 수행되었습니다. 저탄소 이차 철강 시설의 규모는 오리진사의 확장 프로젝트에서 재생 가능 발전 용량(현재 보류 중)을 기반으로 추정되었으며, '미터 뒤'재생 에너지에 대한 접근성은 그린 수소 경제의 핵심 동력이므로 이차 강철의 타당성에 영향을 미칩니다. 일라와라-솔헤이븐 지역에서 ~230kT/yr 규모의 보조 강철 시설을 개발할 수 있으며, 이 시설의 생산역량은 블루스콥의 현재 이차 철강 생산의 60%에 달할 것입니다.

일라와라 솔헤이븐 구역의 저탄소 강철 생산 시설에 대한 사업성 평가

표 3: 저탄소 철강 생산을 위한 주요 동인 평가.

기준	상태	평가
P2X 제품 필요	✓	저탄소 철 생산에 그린 수소가 필요함
P2X 제품 유통을 위한 중공업	✓	그린 수소는 '이차 철강' 생산을 위한 고철강 스크랩과 혼합할 수 있는 DRI를 생산하기 위한 환원제철에 필요함
지역의 재생 가능 자원	✓	솔헤이븐 계획(수력 발전소)은 235MW까지 운영을 추가로 업그레이드 할 수 있는 잠재력 보유
'P2X 허브'를 위한 신재생 에너지 공급업체	!	오리진 에너지 사는 2020년 5월 이후 경제 환경으로 인해 솔헤이븐 계획 확장을 보류. 참고: 일라와라 REZ가 이 P2X 허브에 전력 공급을 제공할 수 있음
공급 원료 가용성 - 물	✓	연간 ~12 ktpa의 수소 생산을 위해 연간 ~124 ML/yr의 물이 필요. 솔헤이븐의 탈로와 댐은 이러한 수요를 용이하게 하는 적절히 위치에 자리잡고 있음. 이 지역은 바다에서 물을 공급할 수도 있음.

일라와라 솔헤이브 지역의 저탄소 철강 생산에 대한 사전 타당성 평가.

표 4: 일라와라 솔헤이브 지역에서 저탄소 강철 생산을 위한 사전 타당성 평가.

연간 ~230kT '이차 강철' 생산을 위한 서비스의 사전 타당성 평가	
공급원료 수요	
상수	값
수소 수요	12 ktpa (현재 재생 가능 발전 용량제한)
에너지 수요	1,298 GWhpa
물 수요	124 MLpa
수력 발전소 용량 계수	37%
수력 발전소 용량	235 MW
전기분해시설 필요 용량	84.5 MW
'그레이 수소' 조달 가격	A\$2 kg ⁻¹
'블루 수소' 조달 가격	국가 수소 로드맵은 블루 수소 (증기 메탄 개척 + CCS)의 비용이 A \$ 2.27에서 2.77 kg ⁻¹ 사이의 범위로 제한하며, 비교를 위해 평균 A \$ 2.5 kg ⁻¹ 의 비용을 가정합니다.
예상 '그린 수소' 조달 가격	A\$4.39 kg⁻¹
P2X 기술 비용 추정 요약	
총 장비 CAPEX	A\$51.7 백만
(10MW 척도에서 A\$750/kW의 전해질 CAPEX 10% 감소 - 용량증가)	
총 OPEX	A\$47.100만 pa
예상 타당성 조사 결과	
'그레이 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$2.39 g⁻¹
'블루 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$1.89 kg⁻¹
프로젝트 타당성에 필요한 전기 요금	
현재 전기 요금	A\$60 MWh ⁻¹
뉴사우스웨일즈의 이차 강철 시설에 대한 '회색 수소'와 경쟁하기 위해 '그린 수소'에 필요한 전기 가격	A\$4 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$11 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$18 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$21 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$25 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)
뉴사우스웨일즈의 '블루 수소'와 경쟁력있는 '그린 수소'에 필요한 전기 가격	A\$12 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$19 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$26 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$29 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$33 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)

5.4. 헌터 지역

헌터 지역은 NSW주에서 가장 큰 지역 경제로 347억 호주 달러의 수익 기여를 하고 있습니다.¹⁶⁸ 헌터 지역의 경제는 광업, 고급 제조, 식품 가공 및 관광과 같은 여러 부문에서 다양하게 분포되어 있습니다.

헌터 지역은 호주에서 세번째로 큰 항구인 뉴캐슬 항구를 보유하고 있으며, 이 항구는 연 수익 12억 호주 달러 및 ~8,000개의 일자리를 지원합니다.¹⁶⁹ 뉴캐슬 항은 아시아 및 태평양 시장에 석탄을 수출하기 위한 주요 터미널입니다.

NSW 주정부는 첨단제조, 재생 에너지 및 인프라에 대한 투자를 통해 지역경제 성장을 촉진하기 위해 향후 20년을 위한 전략적 청사진을 소개했습니다.¹⁷⁰ 이러한 전환의 주요 부분은 수소에 의해 주도 될 수 있으며 NSW주정부는 최근 NSW주의 7천만 달러 규모의 수소 허브 이니셔티브의 일환으로 이 지역에 수소 허브를 설립한다고 발표했습니다.¹⁷¹ 이 계획을 통해 지역 철강 산업의 부흥과 암모니아 생산 성장을 기대해볼 수 있습니다. 그러한 연구소의 보고서에 따르면 수소 기반 암모니아 및 철강 산업은 이 지역에서 수만 개의 일자리를 창출할 수 있습니다.¹²

그림 36 : 헌터 지역의 기존 수출 인프라 지도 ¹⁷²



헌터 지역의 P2X 채택을 위한 주요 기회

헌터 지역은 뉴캐슬 항을 통한 기존 수출 공급망으로 인해 P2X 경제의 동원을 위한 이상적인 발판을 제공합니다. (그림 36)

헌터 지역에 있는 오리카의 쿠라강 섬 시설은 호주 최대의 암모니아 생산 시설 중 하나이며, 연간 암모니아 생산량은 360ktpa입니다. 3.3항에 설명된 바와 같이, 암모니아는 P2X 기술을 글로벌 화학 공급망에 임베드 할 수 있는 특별한 기회를 제공합니다.

오리카 시설은 현재 광산 및 건설 부문의 산업 폭발물로 사용되는 질산 암모늄 생산을 위해 암모니아를 사용합니다. 현재 오리카 사의 지속 가능성 보고서는 질산암모늄 사업을 위한 '그린 암모니아' 생산으로 전환하는 요건을 명시적으로 설명하고 있지 않습니다. 그러나 '그린 암모니아'는 오리카 사에게 글로벌 수출을 위한 친환경 상품 생산을 위한 독특한 가치 제안을 제시합니다.

수출 용 재생 가능한 암모니아를 생산하는 가치 제안은 새로운 프로젝트(이해 관계자와의 협의에 의해 밝혀진 대로)로 확장되며, 특히 아시아 시장을 겨냥하고 있습니다.

암모니아 생산 공정 개요

오리카는 증기 개질 기술을 사용하여 천연 가스에서 수소를 얻습니다.⁵⁴ 이 과정은 황을 제거 하는 것으로 시작하여 수소, 일산화탄소 및 이산화탄소를 생산하는 증기 메탄 개질 과정으로 이어집니다.

그 다음으로 3.6항에 설명된 바와 같이 피셔-트롭슈 방식으로 시프트 컨버터를 사용하여 배출된 일산화탄소 및 잔류수를 수소와 이산화탄소로 변환합니다. 이 공정은 최대한의 수소생산을 보장합니다.

이산화탄소가 하버-보슈 공정에 사용되는 촉매를 공격할 가능성이 있기 때문에 개질 공정을 종료하는 가스는 아민 용액을 사용하여 이산화탄소를 제거해야 합니다.

개질기를 빠져나가는 수소는 압축 및 압축질소와 혼합되어 합성 반응기에서 암모니아를 생성합니다. 질소에 대한 수소의 화학량적 비율은 3:1입니다. ⁶²

NSW 정부가 헌터에 'P2X 수출 경제'를 개발해야 하는 이유는?

헌터 지역은 오리카와 다른 업계 관계자들이 '그린 암모니아' 수출 네트워크 개발을 통해 새로운 가치 창출 사업을 동원할 수 있는 이상적인 중추를 제공합니다. 일본은 '일본 수소 로드맵'에서 예상되는 암모니아 수요로 인해 '그린 암모니아'를 소비하는 이상적인 최초의 고객이 될 것입니다. 일본은 2050년부터 연간 30,000ktpa의 암모니아가 필요합니다.¹⁷³ 이 재생 가능한 암모니아에 대한 일본의 야망은 전력 발전을 위해 재생가능 암모니아와 석탄을 1:1의 비율로 혼합하는 것입니다.

일본의 현재 암모니아 수입의 10%의 '그린 암모니아'로 대체하는 것으로 시작한다면 NSW주와 일본 간의 수출 관계 발전에 이상적인 첫 걸음이 될 것입니다. 현재 일본의 암모니아 수요의 10%를 그린 암모니아로 대체하면 탄소배출량을 ~20kt 줄이는 결과를 가져올 것입니다.^{174,175} 일본 산업은 농업 및 화학 공급망에 저탄소 공급 원료를 포함시키기 때문에 정부가 '그린 암모니아'를 구매하도록 크게 장려 할 것입니다.

일본은 현재 연간213 kt의 암모니아를 수입하고 있으며 주로 인도네시아에서 수입하고 있습니다. 즉각적인 이정표로, 그 수요의 10%가 헌터 지역에서 생산되는 '그린 암모니아'로 대체될 수 있다면 연간~3.8ktpa의 그린 수소가 필요하게 될 것입니다.

기존에 일본 수출을 위한 해운 터미널 역할을 하는 뉴캐슬 항이 이 수출 네트워크의 중심이 될 수 있습니다. 2018년, 일본의 발전용 석탄 수요의 ~70%가 뉴캐슬항을 통해 호주에서 공급되었으며, 뉴캐슬 항은 발전용 석탄 수출을 위한 '크라운 보석' 항구였습니다.

176

NSW 주정부 지원의 잠재적 결과
 이 수출 경제 개발에 NSW 주정부의 지원은 다음과 같은 혜택을 제공할 것입니다:

1. 가치 사슬 전반에 걸친 지역 일자리 창출.
2. 일본과의 장기적인 수출 관계 수립으로 주정부에 대한 반복적인 수익을 창출.

헌터 지역의 공급 원료 분석

저렴한 재생 에너지에 대한 접근성이 이 수출 경제 개발의 핵심 동력이 될 것입니다. 'P2X 허브'는 ~ 3.8 kt의 수소를 생산하기 위해 연간 ~ 233 GWh p.a.의 전력이 필요합니다.

에푸론(60개의 풍력 터빈이 있는 300MW 풍력 발전단지)이 건설중인 보우만즈 크릭 풍력 발전단지를 사용하여 이 구역의 P2X 에너지 수요를 충족할 수 있습니다. 수소를 생산하기 위해서는 89MW의 풍력 용량이 필요하며 암모니아 생성 공정에는 추가로 122MW의 전력이 필요합니다.

헌터 지역의 수출 허브 개발을 위한 사업성 평가

표 5: 헌터 리전 수소 수출 허브의 주요 동인 평가.

기준	상태	평가
P2X 제품 필요	✓	NSW 주정부는 '그린 암모니아' 수출 경제 수립을 위해 오리카 같은 기업들을 지원할 수 있습니다. 즉각적인 이정표로서 일본의 현재 암모니아 수입 수요의 10%가 권장됩니다. 이를 위해서는 연간 ~21 kt의 암모니아가 필요합니다.
P2X 제품을 구매할 중공업	✓	일본은 '국가수소 로드맵'에서 발전소에 발전용 열연료와 혼합할 '그린 암모니아'를 수입하겠다는 의사를 표명했습니다.
지역의 재생 가능 자원 공급	✓	보우만즈 크릭 풍력 발전 단지는 2025년부터 가동될 예정이며 300MW의 에너지 용량을 갖게 될 것입니다. 그 용량의 70 %는 연간 생산량 ~21kt의 '그린 암모니아'생산에 필요한 수소 연간생산량~3.8ktpa를 생산해야 합니다.
'P2X 허브' 신재생 에너지 공급업체	!	이 데이터는 아직 공개되지 않았습니다. 참고: 뉴 잉글랜드 및 오라나 중서부 REZs가 이 허브에 재생 가능한 자원을 제공할 수 있습니다.
공급 원료 가용성 - 물	✓	~3.8kt의 암모니아를 생산하기 위해서 38ML의 물이 필요합니다. 헌터의 토마고 댐은 이러한 수요를 용이하게 충족하기 위한 적절한 위치에 자리잡고 있습니다. 해안에 근접한 이 지역에서는 바닷물에 대한 접근성도 활용할 수 있습니다.

풍력 발전 단지 발전 용량의 총 ~70 %는 필요한 암모니아를 생산하기 위해 구라강쪽으로 돌려져야 합니다.

물 수요

헌터 지역에는 그레이엄스타운, 토마고, 치체스터 등 이 지역의 물 수요를 지원하는 세 개의 주요 댐이 있습니다. 항구 시설과 가장 가까운 댐은 토마고이며 현재 54GL의 수용량을 보유하고 있습니다. ~3.87 ML(메가 리터)의 수소를 생산하려면 연간 ~37ML의 물이 필요합니다. 이는 토마고 댐 수용량의0.6% 입니다. 헌터 워터 플랜트로부터 적절한 폐수 스트림에 접근할 수도 있다는 점을 참고하십시오. 이 지역이 해안에 근접한 점을 감안할 때, 향후 이 지역의 P2X 경제를 지원하기 위해 담수화 해수를 사용할 수도 있습니다.

헌터 지역을 위한 추가적인 기회

헌터 지역은 P2X 연료를 사용하여 탈탄소화의 기회를 제공하는 수많은 고위 광산, 광물, 제강 및 제련 설비들을 보유하고 있습니다.

BHP의 마운트 아서 석탄 광산은 연료 전지 구동 조명 및 증장비로 전환할 수 있으며, 이는 화석 연료 장비와 동일한 운영 유연성을 제공하지만 가동 시 배출되는 배기가스는 없습니다. 세계에서 가장 큰 광산 회사인 앵글로 아메리칸 (Anglo American)은 2021년에 수소 구동 광산 트럭을 배치할 준비를 하고 있습니다.¹⁷⁷

BHP, 안코올, 글렌코어, 센테니얼 코올, 피바디 및 토마고 백주년 석탄, 피바디 및 토마고 등 화석 연료 광산 장비로 운영하는 기업들을 P2X 연료로 구동하는 저탄소 대안연료 변환하기 위한 인센티브 프로그램의 도입은 NSW 주정부가 광산 부문을 저탄소 경제로 서서히 전환할 수 있는 좋은 기회를 제공합니다.

암모니아 일본수송을 위한 헌터 지역의 수출 허브 개발 사전 타당성 평가

표 6: 헌터 지역 수소 수출 허브 사전 타당성 평가.

암모니아 수송을 위한 헌터 지역의 수출 허브 개발 사전 타당성 평가	
공급원료 필요 요건	
상수	값
수소 수요	3.8 ktpa
에너지 수요	233 GWhpa
물 수요	37.8 MLpa
풍력 발전 단지 용량 계수	30%
풍력 발전 단지 용량	235 MW
전해질 용량 필요	26.7
'그레이 수소' 조달 가격	A\$2 kg ⁻¹
'블루 수소' 조달 가격	국가 수소 로드맵은 블루 수소 (증기 메탄 개혁 플러스 CCS)의 비용을 A \$ 2.27에서 2.77 kg ⁻¹ 사이로 제안하며, 비교를 위해 평균 비용은 A \$ 2.5 kg ⁻¹ 입니다.
예상 '그린 수소' 조달 가격	A\$4.98 kg⁻¹
P2X 기술 비용 요약	
총 장비 CAPEX	A\$17.300 만 명
(10MW 척도에서 A\$750/kW의 전해질 CAPEX, 용량 10배 당 비용 10% 감소)	
총 OPEX	A\$143.3 백만 pa
예상 타당성 조사 결과	
'회색 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$2.98 kg⁻¹
'푸른 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$2.48 kg⁻¹
프로젝트 타당성에 필요한 전기 요건	
현재 전기 요건	A\$69 MWh ⁻¹ (@Wind LCOE at 30% 용량 계수)
헌터의 깨끗한 암모니아 수출 시설에 '회색 수소'와 경쟁하기 위해 '그린 수소'에 필요한 전기 가격.	A\$2 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$10 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$17 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$21 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$25 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)
헌터의 깨끗한 암모니아 수출 시설에 대한 '푸른 수소'와 경쟁하기 위해 필요한 전기 가격.	A\$11 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$18 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$25 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$29 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$33 MWh⁻¹ (@전해질 CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)

5.5. 파크스 지역

파크스 지역은 번성하는 광산 및 농업 부문의 본거지이기 때문에 '2단계 P2X 허브' 개발을 위한 다단계적 기회를 제공합니다. 또한, 이 지역의 새로운 '화물 운송 허브'의 출현은 P2X 합성 연료 산업의 개발을 위한 이상적인 발판을 제시합니다.

NSW주의 'P2X 허브'의 개발은 NSW주정부가 '특별 활성화 구역'에 대해 설정한 주요 목표를 다루고 있으며, P2X 경제는 NSW 주 지방의 일자리 창출 기회를 촉진하고 민간 부문 투자를 장려하며 국가 차원의 탈탄소화를 촉진할 것입니다.³⁶

파크스는 '재생 에너지 지대'(REZ)인 중서부 오라나의 중심부에 위치해 있습니다.¹⁷⁸ NSW주정부는 송전 인프라의 석탄-화력 발전소에서 청정에너지 도입으로 전환을 원활하게 하기 위해 NSW 주 내에 5곳의 주요 REZ을 설립했습니다. 이 지역은 향후 5년 - 10년 동안 3GW의 재생 가능 에너지 생산력을 탑재하여 NSW주가 저공해의 미래로 전환하는 과정을 촉진할 것으로 기대됩니다. 이렇게 저렴한 재생 가능 전기 공급은 NSW주 P2X 경제의 토대가 될 것입니다.

파크스 지역의 공급 원료 분석

REZ 인프라의 대부분은 개발 초기 단계에 있기 때문에 완료가 가까운 프로젝트가 파크스 지역에서의 '2단계 2 P2X Hub'개발을 위한 '기본 시나리오' 설계에 사용될 것입니다.

캐네디언 솔라 Canadian Solar 사가 개발중인 개발 중인 썬탑 Suntop 태양광 발전소는 189MW의 태양광 발전소에서 395GWh의 발전 잠재력을 보유하고 있기 때문에 'P2X 허브'에 전력을 공급하는 이상적인 재생 에너지 자원이 될 것입니다.¹⁷⁹ 태양광 발전소는 2021년 3분기부터 가동될 것으로 예상되며, 그 후 몇 달 이내로 전체적인 가동이 가능할 것으로 기대됩니다. 모든 썬탑 태양광 발전소 재생 가능 에너지가 수소 생산에 사용되는 경우, 연간 ~6.4 ktpa의 수소가 파크스에서 생산될 수 있습니다.

연간 6.4 ktpa의 수소 생산에는 연간 ~64ML/yr의 물이 필요합니다. 이는 현재 1.8 GL의 수용 용량을 가지고 있는 레이크 엔디보어 댐에서 공급할 수 있습니다.¹⁸⁰ 댐의 전체 수용력의 4%가 매년 그린 수소 생산을 위해 소비될 것입니다.

그러나 파크스 서 위원회는 10년마다 지역에 심각한 가뭄 문제가 발생함으로 인해 물 소비에 대한 엄격한 의무규정을 적용합니다. 따라서 레이크 엔디보어 댐의 수자원이 임계수준에 도달하는 시나리오 하에 이 지역의 다른 2개 주요 저수지, 버렌동¹⁸¹과 와이안갈라 댐¹⁸²으로부터 물을 조달할 수 있는 비상계획을 수립할 필요가 있습니다. 현재 레이크 엔디보어 댐은 최근 몇 년간 그래왔던 것처럼 수용량의 80% 유지하고 있습니다. 이런 자원들에 추가적으로 물 원료 공급을 위한 지역의 염류 대수층에 접근할 수 있는 기회가 있습니다.

'2단계 P2X 허브' 기회 - 내륙 철도용 연료

NSW주정부는 호주 동부 해안에 이상적인 상호 연계 기회를 제공하는 파크스 지역에서 '국가 물류 허브'를 개발하기 위한 핵심 목표를 세웠습니다. 현재 파크스 지역에서 진행 중인 프로젝트에는 멜버른에서 브리즈번까지 연결하는 '내륙 철도' 노선 개발이 포함됩니다. 내륙 철도 노선은 현재 도로 /고속도로를 통해 운송되고 있는 화물 부하를 전환하기 위해 개발되고 있습니다.¹⁸³ 이 지역 간의 화물 운송량은 2030년까지 3,200만 톤에 이를 것으로 예상되며, ARTC(Australian Rail Transport Corporation 호주 철도 운송 공사)가 만든 비즈니스 케이스는 도로에서 철도로 전환 시 35-43%의 비용이 절감된다는 것을 입증했습니다.¹⁸³

디젤은 호주 철도 산업에서 사용하는 주요 연료로 2012년 소비량이 10억 리터에 달했습니다.¹⁸⁴ 디메틸 에테르(DME)는 디젤과의 혼합 연료로서 점점 더 많이 고려되고 있습니다. 기존 디젤 엔진은 최대 13%의 디젤과 혼합한 DME 블렌드를 적용할 수 있도록 개조가 가능합니다. DME블렌드는 SO_x 및 NO_x 같은 추적가스 배출을 줄이므로 연소 효율적 이점을 제공합니다. 또한 DME 블렌드의 열효율은 연료 효율을 높여줍니다.

DME는 메탄올을 중간 공급원료로 사용하여 생산할 수 있는 핵심 제품입니다. 저공해 메탄올을 제조하는 공정은 이산화탄소와 '그린 수소'가 화학 반응하여 메탄올을 생산하는 **3.5항**에 설명되어 있습니다. 2단계 반응은 DME를 생산하기 위한 메탄올의 화학탈수 작용을 포함합니다. 현재 산업 공정은 이러한 반응들을 촉진하기 위해 2작용 촉매(bifunctional catalyst)를 사용하는 단일 공정을 통해 이루어집니다.¹⁸⁶

내륙 철도 노선은 현재 건설 중이므로 이 철도 노선의 소비량 데이터는 아직 확정되지 않았습니다. 따라서 아래의 표를 사용하여 예상 시나리오를 개발할 것입니다.

표 7 : 내륙 철도 프로젝트를 위해 디젤과 DME를 블렌딩하기 위한 기본 사례에 사용되는 핵심 데이터

항목	분량
평균 열차 연료 효율 (km /L)	0.06 ¹⁸⁷
왕복 내륙 철도 거리 (km)	3400 ¹⁸⁸
디젤과 DME 혼합량 (%)	13
왕복 1회당 필요한 DME (kg)	15.5
왕복1회당 충분한 DME생산을 위해 필요한 메탄올 양 (kg)	25.4

기본 시나리오에서는 새로운 내륙 철도 트랙을 사용하여 매 2일마다 10량의 열차가 왕복 또는 매년 열차당 ~180회의 왕복 운송이 이루어질 것으로 예상합니다. 여기에는 연간 ~28tpa의 DME가 필요하며, 이를 위해 연간 ~45tpa의 메탄올이 필요합니다. (연간~9tpa의 H2 와 ~63tpa의 이산화탄소 필요). 이 기준으로 이 프로젝트를 위해서는 ~530MWh의 재생 가능 에너지가 필요합니다. 이는 NSW 주정부가 화물 철도를 천천히 탈탄소화 할 수 있도록 지원할 수 있는 잠재적 기회입니다.

2단계 P2X 허브 기회 - 뉴사우스웨일즈 주의 메탄올 수출 경제 개발

파크스 지역의 합성 화학 수출 경제의 발전은 P2X 기술을 적용할 수 있는 흥미로운 기회가 될 수 있습니다. 메탄올 생산은 탄소 포집 및 재생에너지를 화학 합성 산업과 커플링 할 수 있는 훌륭한 동인입니다. 파크스에서는 '썬탑 솔라'의 태양광 에너지만을 사용해서 ~34ktpa의 메탄올을 생산할 수 있습니다. 또한 이는 ~46.6ktpa의 이산화탄소를 가치화합니다.

메탄올 경제는 아시아 시장에서 꾸준히 성장하고 있으며 주요 응용분야는 포름알데히드, 아세트 산의 생산으로 좀 더 최근에는 석유와 연료혼합용으로 생산되고 있습니다. 일본은 자국 화학산업의 탈 탄소화를 위한 임베딩 에이전트로서 '그린 메탄올' 소비를 점점 더 늘리고 있습니다.¹⁸⁹ 중국은 2020년 전 세계 메탄올 수입품의 60%를 소비하면서 또다른 '그린 메탄올'의 대안적인 판매처입니다.¹⁹⁰ 중국은 2020년에 12,000 kt의 메탄올을 수입했습니다. 최근의 무역 분쟁을 고려할 때, 중국과 호주의 무역 관계는 P2X 경제에 가장 적합한 런칭 패드는 아니겠지만 다운스트림 옵션이 될 수 있습니다.

P2X 허브 기회 - NSW 가스 네트워크를 위한 수소 가스 혼합

수소 가스 블렌딩은 재생 에너지를 가스 기반 응용 분야에 임베딩하기 위한 섹터 커플링 경로로써 전 세계적으로 점점 더 많이 고려되고 있습니다. 천연가스 기반 발전은 재생에너지 파워 그리드와 관련된 간헐성 문제에 보완책을 제공하기 위한 무상 에너지원으로 활용됩니다. 태양광 및 풍력과 같은 재생 가능 에너지 자산은 연중 15-40%만 가동되므로 전력수요에 대한 대비책으로 가스 기반 발전이 활성화됩니다.

NSW주는 2020년에 1,400PJ의 천연가스를 소비했으며 향후 10년 동안 소비량이 ~3% 증가할 것으로 예상됩니다.¹⁹¹ 천연가스와 수소의 블렌딩은 NSW주정부가 가스 그리드 네트워크를 서서히 탈탄소화 할 수 있는 기회를 제시합니다.

전 세계적으로 수소와의 혼합 상한선 및 최적 혼합 비율 한계점을 식별하고 기존 가스 인프라를 통해 혼합 가스를 사용하기 위해 어떤 개조가 필요한지를 이해하기 위한 연구들이 수행되고 있습니다. 또한 천연가스는 부피별 에너지 밀도가 수소에 비해 ~3x (세 배)이기 때문에 수소와 천연가스의 혼합은 추가적인 과제를 안고 있습니다.

나아가 일관된 열출력을 위해 가스혼합결과 균질화를 위한 블렌드 트레이닝 인프라가 필요합니다.

주 전역에 걸쳐 가스 블렌딩 운영을 촉진하기 위해 필요한 공급원료 필요량을 산출하기 위해 3개안의 천연가스와 수소의 블렌딩 시나리오(수소 5%, 10%, 15%)를 활용할 것입니다.

NSW주는 현재 연간 37GL/yr의 천연가스(NG)를 소비하고 있습니다. 천연가스의 부피 대 에너지 밀도가 더 높기 때문에 H2-NG 블렌드는 너 낮은 HHV(Higher Heating Value- 응축된 상태에서 원래 있던 물과 새로 생성된 물과 함께 연료 연소에서 발생하는 열)를 갖게 됩니다. 따라서 동일한 에너지 출력을 위해 더 큰 부피의 혼합 가스가 필요할 것입니다. **표 8**, 은 H2-NG 블렌드과 비교해 NG용 HHV의 변화를 보여줍니다. **표 9**, 는 수소 혼합으로 NG 소비가 어떻게 감소하는지를 설명합니다.

표 8 : NSW 주정부가 채택할 수 있는 3가지 블렌드 시나리오 (수소 5%, 10%, 15%)에 대한 HHV

가스	HHV (MJ/L)
천연 가스	~0.038
수소 가스	~0.013
95% 천연 가스와 5%수소가스 블렌드	~0.036
90% 천연 가스와 10%수소가스 블렌드	~0.035
85% 천연 가스와 15%수소가스 블렌드	~0.034

표 9 : NSW 주정부를 위한 3가지 수소 블렌드 시나리오별 천연 가스 소비량 및 탄소 배출량의 감소

가스	천연 가스 소비 감소
95% 천연 가스와 H ₂ 가스 5% 블렌드	~1.8%
90% 천연 가스와 H ₂ 가스 10% 블렌드	~3.6%
천연 가스 85%와 H ₂ 15% 가스 블렌드	~5.7%

NSW주정부를 위한 3가지 수소 블렌딩 기본 사례 시나리오상으로는 에너지 용량 수요 기반조건을 볼 때 현재 파크스에서의 시행은 가능하지 않지만, 5개 REZs에 걸친 수소 블렌딩 분산 모델을 통해 가까운 장래에 수소 블렌딩을 고려해 볼 수 있습니다. 그린 수소를 가스 네트워크에 포함시키기 위해 필요한 주요 공급 원료들은 표 10에서 보여주고 있습니다.

표 10 : NSW주에서 주 전역의 가스 블렌딩을 촉진하기 위해 필요한 수소 및 재생에너지 수요

시나리오	수소 수요 (kt/yr)	재생 가능 에너지 용량 (GW)	물 수요 (GL yr ⁻¹)
95% 천연 가스와 5%수소가스 블렌드	~173	~5.1	~1.7
90% 천연 가스와 10%수소가스 블렌드	~359	~10.6	~3.6
85% 천연 가스와 15%수소가스 블렌드	~558	~16.5	~5.6

참고: 그린 수소를 NSW주의 가스 그리드에 혼합하려면 보다 신중한 공급원료 분석이 필요합니다. 특히 물의 경우에 그렇습니다. 식염수 대수층과 폐수를 사용할 수 있는 기회를 자세히 탐구해볼 필요가 있습니다. 또한, REZs에 대한 현재 계획은 필요한 규모의 그린 수소를 생산하기에 충분하지 않을 것입니다. 그러므로 '내륙철도'와 '메탄올 수출 경제 사례 연구'에 대해서만 시행 가능성 및 사전 타당성 분석이 이루어질 것입니다.

파크스 지역 사업 시행 가능성 평가에서 내륙 철도 소비를 위한 P2X 연료의 생산

표 11 : 파크스에서 P2X연료 생산을 위한 핵심 동인들

기준	상태	평가
P2X 제품 수요	✓	철도용으로 디젤 혼합 블렌드를 위해 최대 13%의 용량을 DME로 사용할 수 있습니다. DME는 메탄올의 부산물입니다.
P2X 제품 오프테이크를 위한 중공업 산업	✓	현재 멜버른에서 브리즈번으로 가는 화물 운송을 위해 건설 중인 '내륙 철도'는 P2X 기술로 생산된 혼합 연료를 위한 잠재적인 오프테이크 시나리오입니다. 현재 기본적인 시나리오는 열차10량의 운행을 촉진하기 위해 설계되었습니다. (각 열차가 1년동안 180회의 왕복운행)
해당 지역 내의 재생 가능 자원	✓	파크스 지역에서 건설 중인 '썬 탑(Suntop) 태양광 발전소는 이 프로젝트를 위한 이상적인 태양광 공급업체입니다. 이 프로젝트에는 단지 ~530 MWh 의 태양광 에너지가 필요합니다.
'P2X 허브'를 위한 신재생 에너지 공급업체	!	*에너지 공급업체와 이 프로젝트를 연결하기 위한 파트너가 필요합니다.
공급 원료 가용성 - 물	✓	이 프로젝트에는 연간 ~90 ML/yr의 물이 필요하며 이 물은 1.8GL의 용량을 가지고 있는 엔데버 호수 댐에서 공급받을 수 있습니다.

파크스의 내륙 철도 소비용P2X 연료 생산에 대한 사전 타당성 평가

표 12 : 파크스의 P2X 연료 생성에 대한 사전 타당성 평가.

파크스의 내륙 철도 소비용P2X 연료 생산에 대한 사전 타당성 평가	
공급원료 수요	
상수	값
수소 수요	9 tpa
에너지 수요	530 MWhpa
물 수요	90 ML pa.
태양광 발전소 용량 계수	24%
태양광 발전소 용량	189 MW
필요한 전기분해장치 용량	60 kW
'그레이 수소' 조달 가격	A\$2 kg ⁻¹
'블루 수소' 조달 가격	국가 수소 로드맵은 블루 수소 (증기 메탄 리포밍 + CCS)의 비용을 A\$ 2.27에서 2.77 kg ⁻¹ 범위로 제안하고 있습니다. 우리는 비교를 위해 평균비용을 A\$2.5kg ⁻¹ 로 가정했습니다.
'그린 수소' 조달 가격 추정	A\$4.46 kg ⁻¹
P2X 기술 비용 추정가 요약	
총 장비 CAPEX	~A\$60,000
(10MW규모에서 A\$750/kW의 전기분해장치 CAPEX, 용량이 10배씩 증가할수록 비용 10% 감소)	
총 OPEX	A\$0.014 백만 p.a.
예상 타당성 조사 결과	
'그레이 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$2.26 kg ⁻¹
'블루 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$1.96 kg ⁻¹
프로젝트 타당성에 필요한 전기 요금	
*현재 전기 요금	57 MWh ⁻¹ (@Solar LCOE at 24% 용량 계수)
'그린 수소'에 필요한 전기 가격은 파크스의 P2X 기반 급유 시설에 대한 '그레이 수소'와 비교해 가격경쟁력을 확보할 필요가 있습니다.	달성되지 않음 (@Electrolyzer CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$3 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$12 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$17 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$22 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)
'그린수소'에 필요한 전기 가격은 파크스의 P2X 기반 급유 시설에 대한 '블루 수소'와 비교해 가격경쟁력을 확보할 필요가 있습니다.	달성되지 않음 (@Electrolyzer CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$11 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$21 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$26 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$31 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)

파크스 지역 사업 시행 가능성 평가에서 메탄올 수출 경제의 개발

표 13 : 파크스 지역의 메탄올 수출경제 생산을 위한 핵심동인

기준	상태	평가
P2X 제품 수요	✓	메탄올은 포름알데히드와 아세트산의 화학적 합성을 위한 기본 공급원료로 사용됩니다. 화학산업의 탈탄소화를 위한 기본 공급원료로서 '저공해 메탄올'에 대한 수요가 점점 더 증가하고 있습니다.
P2X 제품 오프테이크를 위한 중공업 산업	✓	메탄올은 화학 합성을 위한 기본 공급원료로서 아시아 시장에서 수요가 증가하고 있습니다. 일본은 '저공해' 메탄올의 핵심 소비자이며 중국은 전 세계적으로 메탄올의 최대 수출국입니다.
해당 지역 내 재생 가능 자원	✓	파크스 지역에서 건설 중인 '선 탑(Suntop) 태양광 발전소는 이 프로젝트를 위한 이상적인 태양광 공급업체입니다. 189MW규모의 태양광 발전소는 연간 ~34ktpa의 메탄올 생산을 가능하게 할 것이며 이는 중국의 연간 메탄올 수입량의 0.28%에 해당합니다.
'P2X 허브'를 위한 신재생 에너지 공급업체	!	*에너지 공급업체와 이 프로젝트를 연결하기 위한 파트너가 필요합니다.
공급 원료 가용성 - 물	✓	이 프로젝트에는 연간 ~64 ML/yr의 물이 필요하며 이 물은 1.8GL의 용량을 가지고 있는 엔데버 호수 댐에서 공급받을 수 있습니다.



파크스 지역 사전 타당성 평가에서 메탄올 수출 경제 개발

표 14 : 파크스의 메탄올 수출 경제의 사전 타당성 평가

파크스 지역의 메탄올 수출 경제 발전을 위한 사전 타당성 평가	
공급원료 수요	
상수	값
수소 수요	6.4 ktpa
에너지 수요	395 GWhpa
Water Demand	64 MLpa
태양광 발전소 용량 계수	24%
태양광 발전소 용량	189 MW
필요한 전기분해장치 용량	45 MW
'그레이 수소' 조달 가격	A\$2 kg ⁻¹
'블루 수소' 조달 가격	국가 수소 로드맵은 블루 수소 (증기 메탄 리포밍+CCS)의 비용을 A\$ 2.27에서 2.77 kg ⁻¹ 범위로 제한하고 있습니다. 우리는 비교를 위해 평균비용을 A\$2.5kg ⁻¹ 로 가정했습니다.
'그린 수소' 조달 가격 추정	A\$4.22 kg ⁻¹
Estimated Summary of Costs for P2X Technology	
총 장비 CAPEX	A\$2,840만
(10MW규모에서 A\$750/kW의 전기분해장치 CAPEX, 용량이 10배씩 증가할수록 비용 10% 감소)	
총 OPEX	A\$2,400만pa
예상 타당성 조사 결과	
'그레이 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$2.22 kg ⁻¹
'블루 수소'와 '그린 수소'의 현재 가격 차이	A\$1.72 kg ⁻¹
프로젝트 타당성에 필요한 전기 요금	
*현재 전기 요금	57 MWh ⁻¹ (@Solar LCOE 24% 용량 계수)
'그린 수소'에 필요한 전기 가격은 파크스의 P2X 기반 급유 시설에 대한 '그레이 수소'와 비교해 가격경쟁력을 확보할 필요가 있습니다.	A\$3 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$11 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$18 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,000 kW ⁻¹) A\$21 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$25 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)
'그린수소'에 필요한 전기 가격은 파크스의 P2X 기반 급유 시설에 대한 '블루 수소'와 비교해 가격경쟁력을 확보할 필요가 있습니다.	A\$3 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$2,600 kW ⁻¹) A\$11 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$2,000 kW ⁻¹) A\$19 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$1,500 kW ⁻¹) A\$29 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$750 kW ⁻¹) A\$32 MWh ⁻¹ (@Electrolyzer CAPEX of A\$500 kW ⁻¹)

5.6. 기타 기회

5.6.1. 뉴사우스웨일즈 지방의 신홍 기술 구역

섹션 4에서 보았듯이 NSW주는 P2X 생태계의 풍부한 혁신문화에서 혜택을 누리고 있습니다. 이러한 기술들의 대부분이 상용화 직전 단계이며 향후 10년동안 국내 시장의 일부로 자리잡기 시작할 것입니다.

NSW주의 지방 경제는 이런 비즈니스들이 만개하기에 이상적인 런치패드를 제공합니다. NSW주 지방의 토지 임대 및 노동력 등 신홍 기술을 위한 핵심 비용 센터가 대도시보다 훨씬 경제적이기 때문입니다.

NSW주정부는이러한 신홍산업들의 NSW 지방 이전을 장려하고 새로운 P2X기술의 채택/지원을 위해 지방 산업계에 인센티브를 지원하는 상호 연결 기회를 조율할 수 있습니다.

리베리나 지역의 청정 에너지에 농업 폐수 활용

스위치2(Switch)사는 2024년까지 상업용 폐수 전기 분해 시스템을 시장에 내놓기 위해 빠르게 규모확장을 하고 있습니다. 이 스타트업은 폐수를 수소로 전환하여 순환 경제 발전을 가능하게 함으로써 수많은 농산업을 위한 핵심 비용센터로 가격을 안정화할 수 있는 독보적인 위치에 자리하고 있습니다.

‘순환 수소’는 ‘재생가능한 전자’의 간헐성이라는 한계들을 극복하기 때문에 농업 부문을 위해 특별한 기회를 제공합니다. 농업 환경에서는 필요이상의 태양열을 수소로 변환할 수 있으며, 이를 연료전지 구동차량(트랙터, 트럭 및 지게차 등), 보일러를 위한 열 연료 또는 에너지 저장을 위한 기본 연료로 사용할 수 있습니다. 이를 채택한 이러한 농장들은 이제 ‘오프 그리드’로 가는 것을 선택할 수 있기에, 이는 농업부문에 가격변동이 심한 그리드 전기 및 가스 가격에 대한 ‘독특한 대비책’을 제공합니다. NSW주의 경우, 이는 그리드 부하 관리 및 폐수 처리를 위한 훌륭한 옵션을 제공합니다.

스위치 2(Switch2)사와 와 하이드진 리뉴어블(HydGene Renewable)사를 런칭할 수 있는 훌륭한 후보지로는 포도원, 사탕수수, 쌀과 채소농장 같은 산업들이 있어 폐수 전기 분해 기술을 위한 이상적인 공급 원료를 생산하는 리베리나 및 와가와가/모리의 특별 활성화 구역입니다. 이 지역은 2018/19년에 220GL의 폐수를 소비했습니다. 75%의 소비/재활용률을 가정하면 연간 ~2,750 ktpa 의 수소 생산에 충분합니다.

역 공급망 지원을 위한 혁신 커플링:

라보(LAVO)사의 금속수소화물(metal hydride) 저장 기술 또는 아덴트(Ardent)사의 지하 저장 기술과 재생 가능한 수소 생성을 결합한다면 대규모의 수소 저장을 가능하게 할 수 있습니다. 이는 NWS주를 위한 ‘역에너지/화학 공급 체인’을 만들기 위한 퍼즐의 핵심 조각이 될 것입니다.

전통적으로 농업은 ‘자원의 순 소비자’로 간주되어 왔기 때문에 이는 농업 부문에 대한 흥미로운 전망을 제시합니다. 그러므로 수소를 생산하기 위한 폐수 안정화는 이런 방정식을 역으로 되돌리게 할 수 있습니다.

라보(LAVO)사의 금속수소화물(metal hydride) 저장 기술 또는 아덴트(Ardent)사의 지하 저장 기술과 재생 가능한 수소 생성을 결합한다면 ‘순환 수소’ 활용을 극대화할 수 있습니다. 라보(LAVO)사와 아덴트(Ardent)사는 모두 전통적인 스토리지 경로에 대한 파격적인 대안을 제시합니다.

- 라보(LAVO)사의 기술은 에너지 저장 발자국을 극대화 할 수 있도록 합니다.
- 아덴트(Ardent)사는 수소의 저장 비용을 최소화합니다.

이러한 비즈니스 모델들은 은 이 연구에서 다루었던 기술들에 국한되지 않는 다는 점을 참조하십시오.

NSW주의 초과 그리드에 대한 ‘대비책’, 수소

새로운 P2X 기술은 <500kW 시스템과 함께 ‘분산 허브’ 개발에 동원될 수 있습니다. 이러한 시스템은 상당히 다양한 기능을 가지고 있으며 이는 운영을 위해 다양한 공급원료 프로파일을 사용할 수 있다는 의미로, 이는 잉여 재생에너지를 ‘순환 수소’ 를 생산하도록 새롭게 방향성을 재설정하는데 중추적인 역할을 할 것입니다. 스마트 계량기와 함께 이러한 시스템들의 무료사용은 에너지 운영자가 언제 시스템을 운영할지 지시하도록 보장해주며 이러한 자산들을 정부가 소유하고 운영하고자 하는 의도입니다. 이런 허브들은 NSW전역에 걸쳐 상당한 양의 잉여 재생가능 에너지를 보유한 지역들에 흩어져 분산될 수 있습니다.

생산되는 수소는 저탄소 모빌리티 차대(예를 들어 버스)나 현지화 가스 블렌딩같은 지방 정부의 에너지 수요에 서비스를 제공할 수 있습니다. 이 프로젝트는 NSW주정부가 장기적으로 (공급 매칭 같은)그리드 관리 문제를 해결하는 동시에 뿌리깊은 탈탄소화 문제를 해결하는 기회를 제공하는데 중추적인 역할을 할 수 있습니다.

메탄 생산을 위한 이산화탄소 안정화

APA 그룹과 서던 그린 가스(Southern Green Gas)는 시멘트, 광업 및 식품 가공처럼 이산화탄소 배출이 큰 스트림을 합성 메탄으로 처리하여 더 높은 가치를 부여하는 솔루션을 개발했습니다. 이 공정은 공기 중의 이산화탄소를 메탄으로 직접 변환할 수 있습니다.

이 기술은 현재 연간 27 ML/yr 의 합성 메탄을 생성하기 위한 규모로 테스트 중입니다. 이 공장은 기존 가스 네트워크에 메탄을 주입하기 위해 퀸즐랜드의 윌룸빌라 가스 허브에 설치될 예정입니다.

이 기술의 성공적인 확장은 탄소 발자국을 줄이는 데 어려움을 겪고 있는 산업들을 위한 ‘분산 저탄소 루프’를 만들 게 해줄 것입니다. 열 연료 산업은 여전히 경제적인 제약으로 자리잡고 있는 천연 가스로부터 벗어날 수 있는 핵심 분야입니다. 그러므로 ‘분산 저탄소 루프’의 활용은 향후 NSW주가 무 탄소 배출 경제로 전환하기 위한 중간 단계로서 장점을 가지고 있습니다. 오라나 중서부의 유제품 및 반려동물 식품 산업과 같은 산업들은 이 새로운 솔루션을 위한 이상적인 단기 시장입니다.

추가적인 기회들

HERO와 같은 기술은 수소의 연소 효율을 높여 화학 연료로부터의 전환을 가속화할 수 있는 특별한 기회를 제시합니다. 이 기술은 NSW주의 열 연료 산업이 장기적으로 탈 탄소화 하는데 점점 더 중요한 역할을 할 것입니다. NSW주의 광산 부문은 장기적으로 이 기술의 확장 및 임베딩을 위한 이상적인 지역입니다.

중기적으로 UNSW의 하이브리드 암모니아 기술은 중앙 집중식 암모니아 생산에서 분산형 암모니아 생산으로의 변환을 가속화할 것입니다. 소규모의 하버-부쉬 공정의 현재 타당성 한계는 암모니아 산업이 넘어야할 큰 장애물입니다. UNSW의 하이브리드 암모니아 기술의 효율성 최적화 및 규모확장은 NSW주의 ‘재생가능한 전자’의 추가적인 도입을 보장하게 될 것입니다.

NSW주 내의 이러한 기술 임베딩 및 확장을 통해 NSW주는 P2X 기술 분야의 시장 선두 주자로 앞서 나갈 수 있게 해주고, 따라서 NSW주가 청정 에너지 혁신을 위한 ‘신호등’이 되어 정부를 위한 지속적인 수익과 지역 시장에서의 일자리 창출을 보장해 줄 수 있게 해줄 것입니다.

5.6.2. NSW 북부 지역에서의 바이오매스로 재생 가능한 수소 생산 기회

NSW주의 북부 강 지역은 클라렌스 강, 리치몬드 강, 트위드 강의 유역과 비옥한 계곡을 포함하고 있으며, (퀸즐랜드 국경에 인접한) 트위드 헤드 북쪽으로부터 클라렌스 강 유역의 남쪽까지 뻗어 있습니다. 300,000명의 거주인구와 320억 달러 규모의 경제 활동이 일어나고 있는 이 지역은 107,411개의 풍부한 일자리를 제공하고 있습니다.

이 지역 내에 위치한 케이프 바이런 매니지먼트(CBM, Cape Byron Management)사는 뉴 사우스 웨일즈의 노던 리버스 지구에 있는 콘동과 브로드워터에 매년 350Gwh의 전기를 생산하며 농업, 어업, 관광업등 지역산업을 지원하고 있는 두개의 30MW 바이오매스 발전소를 운영하고 있습니다.

이 발전소들은 지역의 설탕 공장에 소속되어 있으며 국내 에너지 시장(National Energy Market- NEM)에 연중 무휴로 기본 전력을 제공합니다.

설탕 시즌 동안에는 NEM에 제공하는 전기 뿐만 아니라 설탕 가공을 위해 두개의 설탕 공장에서 사용하는 중 저압 증기를 제공합니다. CBM의 전력 및 증기 공급은 이 지역의 설탕 산업 및 이와 관련된 2,500개의 일자리에 매우 중요합니다.

CBM은 바이오매스로부터 그린 수소를 생산하는 사업 타당성을 모색하고 있으며 목표는 지역내의 모빌리티 및 물류에 대한 급유 옵션으로 이 수소를 활용할 수 있는 역량을 입증하는 것입니다. 이 공장들은 주요 교통 및 산업 경로에 위치하고 있습니다 이를 통해 노던 리버스 구역의 핵심적인 급유 옵션을 제공함으로써 NSW주 전역의 교통에 사용할 수소 네트워크를 확장하는데 도움이 될 것입니다. 뉴질랜드의 히링가(Hiringa) Pty Ltd 같은 기업들은 현재 뉴질랜드 전역에 걸쳐 상업, 산업 및 농업 노선을 지원하기 위해 이와 유사한 프로젝트 타당성을 입증하고 있습니다.

CBM 시범 사이트는 NSW지역 및 사이어에 걸쳐 소규모의 수소생산단위를 위한 모델을 개발할 수 있는 좋은 기회를 제공합니다. 현재 시범사업은 바이오 매스에 중점을 두고 있지만 그린 수소를 위한 동력원으로 폐기물류를 포함하여 폭넓은 다양한 연료를 탐색하게 해줍니다. 이 프로젝트는 다른 지구 협의회들이 개발된 기술과 가정폐기물, 매립 가스 및 그린 폐기물을 포함한 바이오매스 옵션을 활용하여 수소생산에 사용하고 전국적인 운송 네트워크를 지원하고 잠재적으로는 매립폐기물을 줄일 수 있는 기회를 열어 줄 것입니다.

5.6.3. 보타니 항의 기회

보타니 산업 단지는 NSW주 석유화학산업의 요지이며 보타니 항에 인접한 뱅크스매도우에 있는 보타니 베이 북동쪽에서 운영되고 있습니다. 오늘날, 이 산업단지에서 운영되는 주요 산업 기업들은 케노스(Qenos Pty Ltd.), 인도라마 벤처스 옥사이드 오스트레일리아 (Indorama Ventures Oxides Australia Pty Ltd) 및 아이숨(IXOM Ltd)입니다. 다른 마이너 운영사들로는 에어리퀴드 오스트레일리아 (Air Liquide Australia) 및 엘가스(EI-gas Ltd)가 포함됩니다.¹⁹²

기존 운영사업

케노스(Qenos)사는 호주 최대의 플라스틱 제조업체이며 보타니 항에 위치한 케노스 사의 시설에서는 올레핀을, 뭄바에서 시드니까지의 에탄 파이프라인으로 보타니베이에 운송되는 에탄으로 연간 290ktpa가량의 에틸렌을 생산합니다.¹⁹³ 호주 남부, 뭄바에서 산토스사가 천연 가스를 가공하여 1,375km 파이프라인을 통해 운송하기 위해 다른 성분들과 에탄을 분리합니다.¹⁹⁴ 그리고 나서 증기 분해 같은 공정과 추가처리 및 분류과정을 거친 후 보타니 사이트에서 에틸렌을 생산하기 위해 운송됩니다.¹⁹⁴ 이 에틸렌은 이후 알카테인® (Alkathene®) 또는 알카투프®(Alkatuff®)를 생산하는 데 사용되며, 에틸렌 산화물 생산용으로 인도라마 벤처스 옥사이드 오스트레일리아 공장으로 이송되거나 또는 수출을 위해 보타니 항으로 이송됩니다.¹⁹⁴

전체적으로, 고압 오토클레이브 공정을 사용하여 연간 88ktpa의 LDPE(Alkathene®)가 제조됩니다.¹⁹³ 또한 유니폴(Unipol)™ 가스 단계 공정(Gas Phase Process)을 사용하여 연간 100ktpa의 선형 저밀도 폴리에틸렌(LLDPE)과 HDPE가 생산되며 이를 결합하여 알카투프 Alkatuff®를 생산합니다.^{194,195} 케노스 사는 또한 보타니 산업단지를 위한 유틸리티 제공을 책임지고 있습니다. 현장에는 증기 생산을 위한 석탄화력 보일러 두 대와 천연가스 화력 보일러 한 대가 있습니다. 또한 다른 사용자들을 위해 냉각수와 유출물의 처리를 제공합니다.¹⁹⁶ 전기는 외부로부터 수입하고 있습니다.

인도라마 벤처스 옥사이드 공장은 연간 40ktpa규모의 에틸렌옥사이드 공장의 원료로 케노스 공장에서 생산된 에틸렌과 에어 리퀴드에서 공급되는 산소를 사용합니다.^{197,198} 에틸렌옥사이드 제조과정에서 생산된 이산화탄소는 에어 리퀴드와 BOC로 운반되어 사용됩니다. 에틸렌옥사이드는 다시 공급원료로 사용되며 물과 반응하여 연간 16,000tpa의 에틸렌글리콜을 생산합니다.¹⁹⁷ 에틸렌옥사이드는 또한 알코올과 반응하여 연간 5,000tpa의 글리콜에테르를 생산합니다.¹⁹⁷ 추가적으로, 에틸렌옥사이드는 지방 유기물과 반응하여 연간 35,000tpa의 비이온 계면활성제를 생산합니다.¹⁹⁷ 이렇게 다양한 화학 물질들을 첨가하여 다른 특수 화학물질들이 생산되며 이 공장은 300개 이상의 제품들을 제조하고 있습니다.¹⁹⁸

이 사이트의 마지막 주요 운영기업은 아이숨 IXOM입니다. 2015년 아이숨은 오리카Orica사와 분리되어 독립기업이 되었습니다. 아이숨 보타니 클로알칼리 시설은 무수염 멤브레인 기술을 사용하여 해수를 이용한 염수 전해질을 통해 연간 31ktpa의 염소를 생산합니다.^{199,200} 전기분해과정의 부산물로 생산되는 수소는 HCl 버너에서 염소와 결합되어 연간 55,000kLpa의 염산을 생산합니다.¹⁹⁹ 염소는 철과 철염화물과 함께 반응하여 연간 21,200tpa의 염화제이철(ferric chloride), 연간 36,000tpa의 가성차아염소산염(Caustic Hypochlorite) 및 하이포아염소산나트륨(Sodium Hypochlorite)을 생산합니다.¹⁹⁹

보타니 산업 단지의 탈탄소화를 위한 P2X의 역할
기존의 보타니 산업단지 운영은 장기적으로 지속 가능하지 않습니다. 현장의 화학산업은 석유 화학물질에 크게 의존하고 있으며 생산을 위한 기본 공급 원료뿐만 아니라 현장의 유틸리티 제공까지 석유화학물질에 의존하고 있습니다. 화석연료기반 에탄이 현장에서 생산되는 제품들의 핵심적인 공급원료이며 증기 생산의 중요한 열 에너지원은 석탄과 천연가스입니다. 추정에 의하면 현장에서 생산되는 제품 1톤마다 0.3톤의 이산화탄소가 방출되고 있다고 합니다.¹⁹⁸ 이는 공정 효율성이 향상됨에 따라 1996년의 절반에 해당함을 보여줍니다. 그러나 이 산업이 앞으로 나아가기 위해서는 상당한 발전이 이루어져야 합니다.¹⁹⁸

현재 용광로와 보일러에 사용되는 연료가 케노스 사의 전체 에너지 소비량과 현장에서 배출되는 온실가스 배출량의 90% 이상을 차지합니다.²⁰¹

특히 에틸렌 생산에 사용되는 에탄을 제외하고 에너지를 위해 소비되는 천연가스의 양은 2015년 기준, 알토나(Altona, 205ktpa) 및 보타니 베이 사이트(290ktpa)를 합하여 연간 8PJ annum-1로 추정됩니다.^{193,202}

각 사이트에서 사용하는 천연가스가 에틸렌 생산능력에 비례하여 분할된다고 보수적으로 가정하면 보타니 산업 단지의 총 유틸리티에 연간 총 4.69PJ p.a가 필요합니다. 천연 가스의 발열량과 수소의 밀도를 사용하면 천연가스 에너지를 완전히 대체하는 데에는 연간 9,600tpa의 수소가 필요하다고 추정됩니다. 석탄 기반 보일러를 대체하기 위해서는 더 많은 수소가 사용될 수 있으며 탄소배출량을 더 줄이기 위해서는 재생가능한 전기가 필요할 것이라는 점을 유념해야 합니다.²⁰¹

보타니 항의 재생가능 수소 수출 기회

2021년 5월, 보타니 항은 총 9,14120피트 상당 단위(TEU)의 수입 화학물과 2,304TEUs의 수출 화학물을 처리했습니다. 이는 NSW주의 벌크 화학물질의 90%를 차지하는 양입니다.²⁰³ 보타니 항에는 2개의 벌크 액상 정박지가 있으며 현재 정제오일, 가스, 화학물질 및 역청을 처리하는데 사용되고 있습니다.²⁰⁴ 이 구역은 매년 550만 kL의 벌크 액체와 가스를 취급합니다.²⁰⁴ 여기에는 65,000톤의 LPG용량을 보유한 엘가스 카번을 포함한 저장시설들과 인근 산업 구역에 직접 연결된 파이프라인이 포함되어 있습니다.²⁰⁵ 또한 항구를 출입하는 철도도 있습니다.²⁰⁴

따라서 보타니 항은 수소 기반 수출 허브로서의 잠재력을 가지고 있습니다. 그러나 이를 촉진하기 위해서는 기존 항만 인프라와 인접 산업에 상당한 조정이 필요합니다. 예를 들어 액상 수소의 직접 수출을 위해서는 액화 시설 및 극저온 인프라를 건설할 필요가 있습니다. 또한 기존 뭍에서 시드니까지의 파이프라인을 그린 수소 공급원에 연결할 수 있습니다. 되어 있습니다.²⁰⁵ 또한 항구를 출입하는 철도도 있습니다.²⁰⁴

수소를 제공하기 위해 호주 남부 뭍에 블루 수소 설비를 건설해야 합니다.²⁰⁶

또한 암모니아 및 메탄올같은 액체 수소 캐리어의 생산을 위해서 현장에 새로운 산업 공정 과정이 필요할 것입니다. 이런 변화들은 보타니 베이 지역에 새로운 환경 및 안전의 위험을 가져올 것이며 결과적으로 보타니 항 부근의 높은 인구밀도는 허브 후보지로서 이곳을 덜 매력적으로 만들 수도 있습니다.

아니면, 공급원료 및 연료로서 수소를 처리하기 위해 기존의 인프라와 산업을 전환하는 것은 보타니 산업 구역의 탈탄소화에 크게 기여할 수 있을 것입니다. 그러나 기존 제품 레인지를 유지하기 위해 기존 설비를 변경하기 위한 높은 비용과 새롭고 혁신적인 기술이 필요할 것입니다.



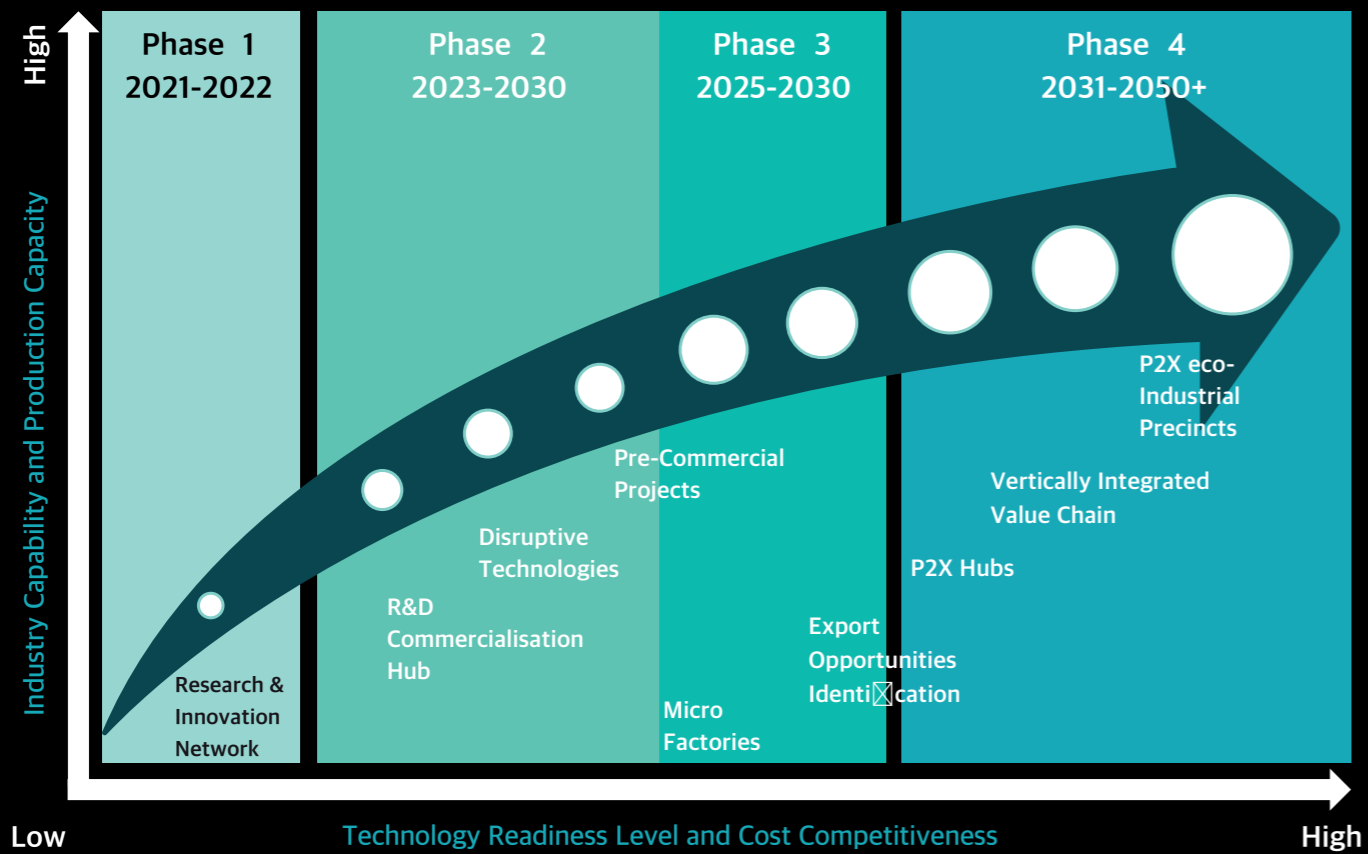
6. NSW주의 P2X 에코구역 시행을 위한 로드맵

6.0 NSW 주의 P2X 에코구역 시행을 위한 로드맵

NSW주는 막대한 경제적, 환경적 편익을 실현하기 위해 P2X경제를 수립하기 위한 강력한 비즈니스 사례를 보유하고 있습니다. NSW주는 성공을 위한 모든 필수 조건들을 보유하고 P2X산업화를 선도하기 위한 좋은 위치에 자리잡고 있습니다. 제 5장의 시나리오 분석은 멀티 P2X허브들을 구축할 수 있는 NSW주의 잠재력을 보여줍니다. 이런 P2X허브들은 국내 수요에 대한 공급을 비롯하여 글로벌 시장에 수출할 수 있는 산업적 규모의 생산력을 갖게 될 것입니다. 이러한 P2X허브들의 구체화는 단기간안에 일어나지 않을 것이며 이들의 발전은 시간이 지남에 따라 필요한 역량 및 용량을 단계적으로 넓아가며 기술적 경로를 따라야 할 것입니다.

사전 타당성 조사를 통해 찾아낸 결과와 이해 관계자의 통찰력을 바탕으로 향후 NSW주의 P2X 경제 개발을 위한 순차적인 4단계 로드맵이 제시되었습니다. 이 로드맵은 R&D의 협업과 집단적 노력으로 시작하여, 기술 상용화 및 수요 집계 단계를 거쳐, 점차적으로 담보가능 자산으로써 산업계에 의해 광범위한 기술 채택과 함께 임계질량에 도달할 것을 제시합니다. 이 로드맵은 그림 37로 설명되며 각 단계 별 과정은 아래에 자세히 설명되어 있습니다.

그림 37 : NSW주 내의 NSW P2X 경제 로드맵



1단계 (2021-2022): 협업 및 지식 공유

1 기술발전에 대한 산업, 연구 및 정부의 협업 노력을 위한 주 코디네이터 역할을 수행할 NSW P2X 연구 및 혁신 네트워크의 공식화

연구 혁신 네트워크는 혁신을 지원하고 조정하는 연구, 개발 및 상업화 전문지식 클러스터 이자 커뮤니티, 물리적 그리고 가상적 공간입니다. 일반적으로 새로운 문제를 해결하고 역량구축 및 협업을 위한 독립적인 포럼을 제공하기 위해서는 새로운 혁신 네트워크가 구축됩니다. 성공적인 혁신 네트워크는 혁신적인 기술과 서비스의 상업화 및 활용을 가속화하고, 공통된 이해관계를 가진 당사자들 간의 새로운 파트너십을 창조하고, 산업계와 정부에 증거기반의 실질적인 조언을 제공하고, 민간 및 공공 투자를 유치하며, 경제적, 사회적 그리고 환경적 이점을 창출하는 등의 가시적인 성과를 산출합니다.

NSW 주정부는 NSW주가 강력한 R&D 역량을 갖추고 있으며 새로운 산업 개발을 위한 전략적 중요성을 가지고 있는 분야에서 연구 혁신 네트워크 모델을 채택했습니다. 예를 들어 NSW 수석 과학자 및 엔지니어 사무국은 첨단 감지, 국방 및 순환 경제 분야의 혁신 네트워크를 구축했으며 NSW 기획 산업 및 환경부는 산불, 에너지 효율 및 기후 변화에 대한 연구 허브를 설립했습니다. 몇몇 이미 발전된 네트워크들은 R&D를 조정하고 NSW주에 상당한 투자를 성공적으로 유치했습니다. 예를 들어 국방 혁신 네트워크는 NSW 정부로부터 지원받은 3백5십만 달러의 지원금을 레버리지 하여NSW 혁신 생태계에 2천2백만 달러 이상의 R&D 투자를 유치했습니다.³¹

NSW P2X 연구 및 혁신 네트워크는 이해 관계자들과 관심 있는 그룹들을 하나로 모으는 조직적인 플랫폼을 제공함으로써 기술 경로를 가속화할 수 있습니다. 이러한 플랫폼을 통해 기술 발명가와 업계 최종 사용자는 서로 협력하여 기술 개발 및 산업 혁신을 위한 개별적이고 체계적인 장벽을 모두 해결할 수 있는 솔루션을 개발할 수 있습니다. 이 네트워크는 산업 및 정부의 다양한 '문제 소유자'가 다른 기업, 기업가, 연구원, 사상 리더, 과학자, 엔지니어, 투자자 및 정책 입안자를 포함한 다양한 '문제 해결사'들과 협력할 수 있는 기회를 제공할 것입니다. 네트워크에서 제공하는 이러한 협업 및 조정 서비스는 미래 산업에 영향을 미치고 실용적이며 혁신적인 P2X 기술을 제공하기 위해 기술 경로를 가속화할 수 있습니다. 네트워크에서 제공하는 공식적이고 비공식적인 채널을 통한 지식 공유 및 정보 통신은 이해 관계자들이 한 R&D에 대한 투자의 이점을 극대화할 수 있습니다.

사전 타당성 조사를 위한 협의에서NSW P2X 이해 관계자는 NSW의 기술 개발 및 역량 구축에 대한 협력과 파트너십에 대한 강한 관심을 촉구했습니다. 모멘텀을 포착하기 위해 40명 이상의 회원(부록 D)으로 구성된 컨소시엄(NSWP2X)을 시작했으며 이 네트워크는 점점 더 성장하고 있습니다. 현재 회원들은 영연방 및 NSW 주 정부 기관, 신생 기업 및 중소기업을 포함한 로컬 산업계, NSW 연구 및 기술 발명가, 글로벌 P2X 공급망, 다국적 및 NGO등입니다. NSWP2X 컨소시엄은 NSW P2X 연구 및 혁신 네트워크의 회원 기반을 구축했습니다. 명확한 목표, 견고한 거버넌스 구조 및 장기적인 효과적인 운영 및 지속 가능한 성장을 위한 측정 가능한 결과물을 가지고 이 네트워크를 공식화할 수 있었습니다.

2단계 (2023-2030): 기술 R&D 및 상용화

2 상용화 중심의 R&D 프로젝트를 위해 기술 발명가 및 최종 사용자에게 연구 인프라, 전문 지식 및 리소스를 제공하는 P2X R&D 상업화 허브 구축

연구 장비, 시설, 인프라는 기술 개발 및 상용화에 매우 중요합니다. 이러한 '하드웨어' 기능은 연구원과 혁신가가 기본 연구를 바탕으로 예비 상업화 프로젝트를 만들어 내는데 필수적입니다. P2X를 위한 새로운 연구 인프라에 대한 투자는 미래의 P2X 산업에 필요한 연구 우수성을 제공하기 위해 필요합니다. 이를 통해 기술 발명가에게 R&D 결과를 시제품, 사전 제조, 평가 및 검증할 수 있는 시설을 갖추게 됩니다. 이러한 파일럿 및 사전 상용화 시험을 통해 생성된 지식과 데이터는 재무 및 기술적 관점을 통해 기술 산업으로 전환하는 과정의 위험을 덜 수 있습니다. 연구 시설에서 엔지니어, 과학자, 기술자, 재무 관리자 및 프로젝트 관리자를 고용하고 교육할 것입니다. 이 고도로 숙련되고 전문화된 인력은 P2X 분야의 산업 프로젝트에서 일할 수 있는 충분한 경험과 전문 지식을 갖추고 NSW 주의 역량을 구축해 나갈 것입니다. 또한, 고품질의 접근 가능한 연구 인프라는 NSW주의 P2X 역량을 강화하여 P2X 가치 사슬 전반에 걸쳐 국제적인 플레이어들과 기관 투자자들을 NSW주에 유치하는 데 필수적입니다. 연구 인프라에 대한 투자는 P2X 산업 개발에 대한 추가 협력을 제공하기 위한 장기적인 산-연-관 파트너십의 토대를 마련할 수 있습니다. R&D 상업화 허브의 설립은 P2X 연구 및 혁신 네트워크를 통해 성숙한 협력과 파트너십의 혜택을 누릴 것입니다.

3 기술적 경로를 가속화하고 글로벌 가치 사슬에 혁신을 가져올 잠재력을 가진 현지에서 발명된 P2X 기술에 투자

딥-테크놀로지를 위한 인큐베이션 기간은 상당히 긴 편이며 청정 기술의 경우 보통 30년 이상이 걸립니다. 국제에너지기구(IEA)는 2050년까지 탄소중립(Net Zero by 2050) 보고서에서 2030년까지 탄소배출 감소를 위한 청정기술의 대부분이 이미 상용화 되어 현재 시장에 출시되었다고 밝혔습니다. 그러나 2050년 또는 그 전까지 무탄소배출 목표를 달성하기 위해서는 탈탄소화의 거의 절반이 P2X처럼 현재 초기 데모나 프로토타입 단계에 있는 신기술을 통해 이루어져야 합니다. 그러므로 P2X의 R&D개발을 가속화하기 위해서 공공 및 민간 투자가 모두 필요합니다. NSW주는 수많은 기술들이 지식의 축적과 근본적인 연구 단계들을 거쳐간 강력한 P2X R&D 역량을 보유하고 있습니다. P2X기술의 개발 및 데모 단계(예, TRL3-TRL6 사이의 기술 준비 수준 (TRL)에서 목표한 투자는 인큐베이션을 가속화하고 초기 산업 도입을 위한 상업화 일정을 앞당길 수 있을 것입니다. 제4장에서 확인된 바와 같이 NSW주 그리고 호주는 글로벌 전력 연료의 지형과 청정 화학 시장의지형을 바꿀 수 있을 획기적인 P2X 혁신 기술을 보유하고 있습니다. 이러한 획기적인 기술들이 상용화되면 가치사슬 전반에 걸쳐 새로운 제품과 서비스 그리고 고객을 창출할 것입니다. 이는 NSW주에 기존 시장 주도 기술과 기업을 대체할 수 있는 지역에서 개발된 혁신적인 P2X 기술에 투자할 수 있는 기회를 제공합니다 R&D 상업화 허브는 연구 인프라, 전문 지식 및 자원을 갖춘 이러한 혁신적인 P2X 기술 개발을 지원할 것입니다.

4 타당성 조사 및 데모 프로젝트 같은 예비 상업화 프로젝트 시행을 통해 산업 규모의 초기 기술 채택 및 시행의 물꼬 트기

섹션 3 및 부록 A에서 강조한 바와 같이, 데모 프로젝트 및 타당성 조사를 포함하여 P2X 도메인에서 여러 프로젝트가 NSW주 (및 전 세계)에서 진행 중입니다. 타당성 조사는 기술 최종 사용자를 위한 P2X 기술 및 경제적 생존 가능성에 대한 초기 평가를 통해 투자 결정에 따르는 위험을 덜어줄 수 있습니다. 데모 프로젝트 시행은 P2X 기술을 제어실험실 환경에서 실제 산업 환경으로 전환할 것입니다. 이러한 사전 상업화 프로젝트는 상용화를 위해 이러한 P2X 기술을 테스트, 검증 및 개선할 수 있습니다. 또 사업 운영을 위한 사회적 라이선스를 준비하는 것은 물론 기술적 금융적 측면에서 완전히 산업적 규모의 프로젝트를 시행하는데 필요한 필수적인 데이터와 지식들을 축적하게 될 것입니다. 이러한 프로젝트들의 시행은 P2X 연구 혁신 네트워크 및 R&D 상업화 허브를 통해 제공되는 기존 파트너십, 인프라 및 초기 투자의 혜택을 누리게 될 것입니다.

3단계(2025-2030): 시장 준비

5 현지 수요 충족용 소규모 P2X 생산을 위한 분산형 마이크로-제조 시설 배치

NSW주에서 상업적 규모의 P2X가 초기에 급증하여 적용되는 것은 소규모의 분산형 프로젝트들일 것으로 예상됩니다. 2 단계의 예비 상업화 프로젝트를 기반으로, 이 프로젝트들은 대부분 현지의 전력 연료 및 청정화학 물질의 수요에 부응하기 위해 생산 규모 면에서 <10MW정도의 전기분해 역량을 가진 상대적으로 작은 프로젝트들이 될 것입니다. 지리적으로 분산된 특성 때문에 이 프로젝트는 지리적으로 외진 곳에 위치하고 있는 광산 및 농업지처럼 운송비가 소요되는 화학연료에 대한 현재수요를 대체할 수 있는 이상적인 위치를 차지하게 합니다. 모듈형 모빌리티 디자인은 수요에 따라 유연하게 생산할 수 있도록 이런 마이크로 생산 시설 운영이 이동할 수 있게 해줄 것입니다. 이런 프로젝트들은 물리적인 요구사항이나, 공급재료의 수요가 더 적으며 작은 규모때문에 환경에 미치는 영향은 최소화됩니다. 이는 이런 프로젝트들의 승인 프로세스는 보다 빠르게 단축될 수 있으며 건설 및 배치 기간도 단축할 수 있고 상대적으로 낮은 자본 투자 및 운영비용으로 운영을 시작할 수 있음을 의미합니다. 새로운 계획과 기존 인프라를 레버리지 하는 마이크로 생산 시설의 그린 투자 및 브라운 필드 개조 운영이 모두 예상됩니다.

6 장기적인 대규모 생산을 위한 오프 테이크 계약 및 투자신뢰 구축을 위한 P2X 제품의 수출 기회 파악

NSW주는 에너지 자원을 위해 아시아 태평양 지역의 주요 경제국과 무역 관계를 맺고 있습니다. 일본, 한국, 인도네시아 같은 많은 국가들은 현지 재생 가능 자원이 제한적이며 경제의 탈탄소화를 위해 높은 P2X수요를 예고하고 있습니다. 싱가포르, 독일, 네덜란드 및 영국에서는 그린 전력 연료 및 화학물질을 위한 새로운 수요가 늘어나고 있습니다. P2X 공급망 그리고 NSW주와 이런 잠재적 P2X구매자들 간의 기술, 규제, 물류적으로 이와 관련된 어려움이나 장애물이 무엇인지 더 잘 이해한다면 대규모 생산 프로젝트에 수반되는 위험을 제거할 수 있습니다. 글로벌 NSW같은 NSW주정부의 무역투자 이니셔티브를 활용하여 이런 '바이어' 정부 및 산업들과 P2X생산을 위한 장기적인 계약을 협상하며 오프테이크 계약을 제공할 수 있습니다. 이는 당연히 대규모 P2X 프로젝트의 위험을 더 제거해 줄 것이며 NSW주 내에서 더 많은 산업들이 P2X사업 운영을 설립할 수 있도록 이끌어 줄 것입니다.

4단계 (2031-2050): 산업 배포

7 대규모 생산을 위한 P2X 허브 배치

P2X 허브는 중앙집중식 대규모 생산을 위해 배치될 것이며 수십 MW에서 GW단위의 전기분해 용량을 보유할 것으로 예상합니다. 5장에서 설명한 바와 같이, 이 P2X 허브는 주요 교통 인프라, 저비용 전기를 이용한 재생 가능 에너지, 풍부한 공급원료(즉, 물)를 공급받을 수 있으며 기존 중공업 및 새로운 산업 구역에 가까이 위치하고 해외 시장에 수출 잠재력을 가지고 있을 것입니다. 허브 및 스포크 모델, 마이크로 설비 및 2단계에 배치된 분산형 소규모 P2X 생산 시설을 채택하면 중앙 집중식 P2X 허브를 지원하기 위한 스포크로 진화할 것입니다. 이러한 허브 및 스포크는 공유 인프라, 고객 기반, 전문 지식 및 리소스를 통해 P2X 제품의 지속적인 이동과 생산성 향상을 제공합니다. P2X 허브는 지역 수요를 충족하고 화석 연료를 상당 부분 대체할 수 있는 충분한 전력 연료와 청정 화학 물질을 생산할 수 있으며, 일부 수출 중심 허브는 해외 시장으로의 운송을 모색할 것입니다.

8 수직통합 P2X 가치 사슬 및 로컬 제조 역량 구축

P2X를 통한 재생 가능 광산은 광업 및 광물 산업의 '채굴 운송' 모델을 따라서는 안 될 것입니다. NSW주는 생산, 운송 및 활용 전반에 걸쳐 P2X 산업을 위한 현지 제조역량을 수립하기 위해 경쟁적 우위를 가진 곳을 엄선할 것입니다. 지역 제조 역량을 가진 사슬의 상위 단계로 끌어올리면 P2X 기술, 서비스 및 기술 분야에서 새로운 시장 및 수출 기회를 열어줄 뿐만 아니라 더 폭넓은 경제적 이익과 일자리 창출을 가져올 것입니다. 예를 들어, P2X 생산에는 전기 분해기, 원자로, 중요한 광물 가공업체, 압축기, 분리기, 정수기 등이 포함된 광범위한 장비와 기계가 필요합니다. 이런 장비와 기계들은 단기적으로는 국제 공급 업체로부터 수입할 수 있지만 NSW주는 이러한 기술과 장비의 현지 제조 능력을 개발할 잠재력을 충분히 가지고 있습니다. 현지에서 자체적으로 발명되고 상용화된 P2X 기술은 공공 부문과 민간 부문 모두에서 상당한 투자와 자원을 끌어들이 것입니다. 고급 제조, 자동화, 감지 및 디지털화 기술분야의 강력한 역량의 지원으로 NSW주는 주에 가장 큰 경제적 이익과 일자리 증대를 가져다 줄 이러한 기술들 또는 요소들을 현지에서 제조하는 기회를 모색할 수 있습니다.

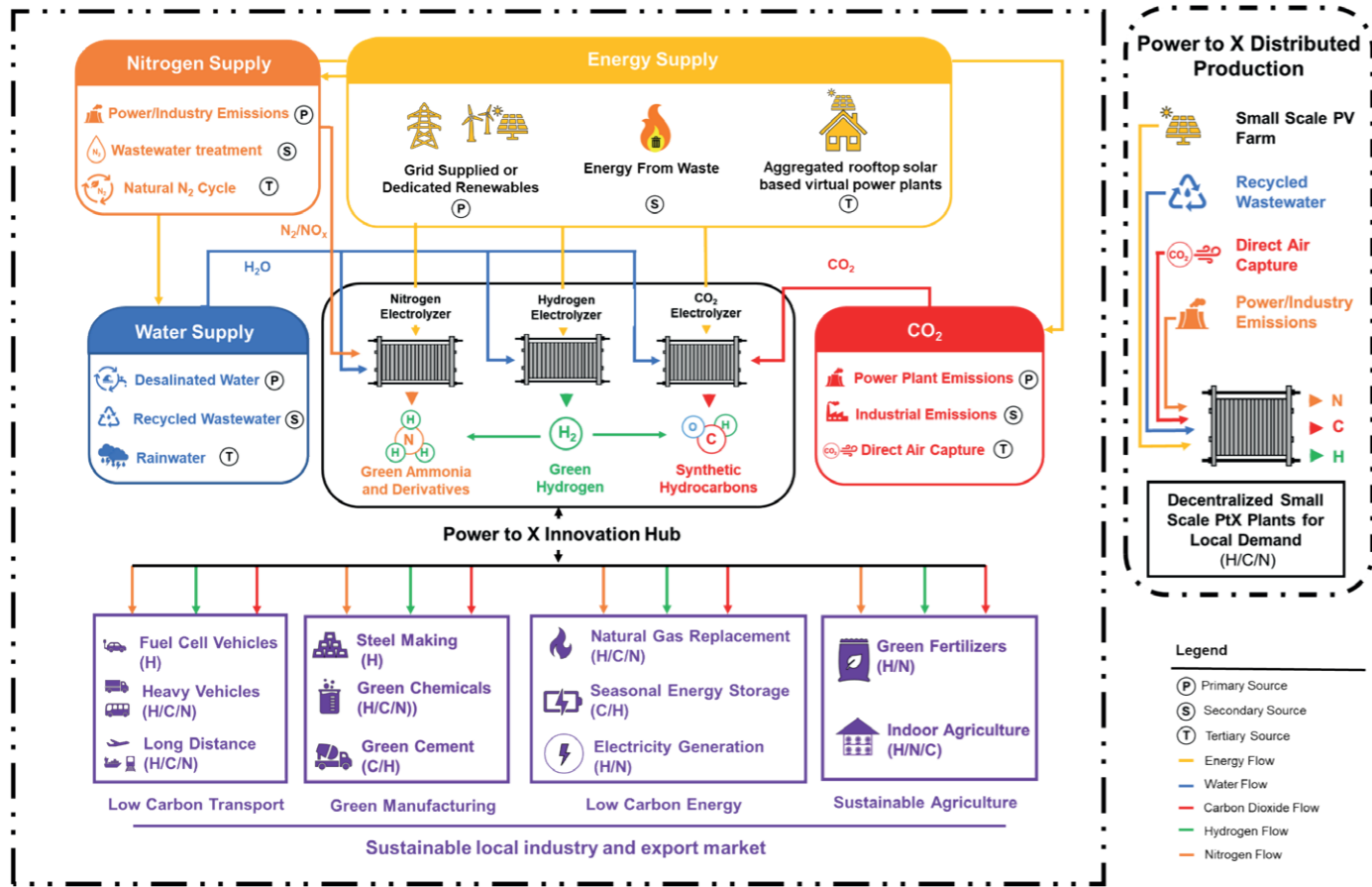
9 P2X 친환경 산업 특구 개발

P2X 허브를 기반으로 하는 P2X 친환경 산업 구역은 P2X 가치 사슬 전반에 걸쳐 산업과 기업들을 유치하고 동일한 위치에 함께 자리를 잡고 산업 발전을 위해 협력하도록 장려할 것입니다. 이 구역은 전력 연료 생산, 그린 철강, 화학 및 비료 제조와 같은 P2X-집약적 산업을 위해 설계되었습니다. 이러한 중공업 기업들이 산업 특구의 중심이 될 것으로 예상됩니다. 생산자, 공급 원료 공급 업체, 장비 제조 및 서비스 제공 업체 (예 : 전해질기) 및 다운스트림 고객들을 포함한 다양한 P2X 산업들이 산업 특구에 매력을 느낄 것입니다. 산업특구 임차기업들은 저 비용의P2X 제품, 공유 인프라 및 숙련된 인력에 액세스할 수 있습니다. 산업특구 구역은 P2X 산업 공생을 통해 생산성을 향상하고 비용을 절감할 수 있습니다. 즉, 임차기업들은 공동체로서의 포용적이고 지속가능한 발전을 위한P2X 제품, 서비스, 공급원료 및 부산물의 물리적 교환을 통해 경쟁 우위를 확보할 수 있음을 의미합니다. 그림 38에서 보여주는 바와 같이, 이러한 특수구역은 P2X 기술을 통해 에너지, 산업, 운송 및 농업 부문 전반에 걸쳐 지속 가능하고 저탄소 배출 또는 무탄소 배출 목표를 달성할 수 있을 뿐만 아니라 상당한 한 경제적 이익과 고용 기회를 제공할 수 있습니다.



그림 38 : 제안된 P2X 구역의 회로도.

Power to X Eco – Industrial Precinct



부록 A: 현재 진행 중 및 계획이 발표된 P2X 프로젝트

A.1. 그린 수소 프로젝트

표 15 : 진행 중인 그리고 공표된 그린 수소 프로젝트 목록

프로젝트 이름	위치	용량	상태	P2X 피드스톡	투자	프로젝트 유형	Ref.
호주							
제메나 웨스턴 시드니 그린 가스 프로젝트	웨스턴, 시드니, 뉴사우스 웨일즈	500 kW PEM 전기분해기	공사 중 (2021년 중반 가동예정)	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$1천5백만 달러	데모 프로젝트 (천연 가스 그리드에 H2 가스 주입).	22
프로젝트 NEO - (인피니트 블루 에너지)	헌터 밸리, 뉴사우스 웨일즈	1,000 MW	사전타당성 분석 (2027 가동예정)	물, 전용 재생 가능 에너지	예상 비용: A\$27억 달러	상업 플랜트 (최저소요 전력 발전소).	207
네오엔 오스트레일리아 수소 슈퍼허브	크리스탈 브룩, 남호주	50 MW	공사 중 (2023년 2분기 가동예정)	물, 전용 재생 가능 에너지	A\$2천4백만 달러	데모 플랜트 (그리드 퍼밍).	208
머치슨 재생 가능 수소 프로젝트	칼바리, 서호주		개발 단계 (파일럿 플랜트)	물, 전용 재생 가능 에너지	A\$100억 달러 (전체 세 단계 완료)	상업용 플랜트 (지멘스 PEM 기술을 사용한 H2를 생성하기 위해 5000MW 태양광 및 풍력 용량)	209
AGIG 수소 파크 남호주	툰슬리 디스트릭트, 남호주	1.25 MW PEM 전기분해기	운영 (2021년 1분기)	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$1천1백40만 달러	상업용 플랜트 (가스 그리드에 주입하기 위한 지멘스의 실라이저 PEM)	210
수소 파크 글래드스톤 (HyP 글래드스톤)	글래드스톤, 퀸즐랜드	175 kW PEM 전기분해기	프로젝트 개발 최종 단계	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$4백20만 달러 (퀸즐랜드 정부로부터 A\$170만 달러의 보조금 지원)	데모 플랜트 (천연 가스 그리드에 수소 가스 주입)	211
수소 파크 머레이 밸리 (HyP 머레이 밸리)	우동가, 빅토리아 주	10 MW 전기분해기	개발 중	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$3천2백10만 달러 (ARENA가 제공하는 자금 - 재생 가능 수소 배포 기금)	(ARENA가 제공하는 자금 - 재생 가능 수소 배포 기금)	212,213
청정 에너지 혁신 파크	와라다르게, 서호주	10 MW 전기분해기	개발 중	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$2천8백만 달러 (ARENA가 제공하는 자금 - 재생 가능 수소 배포 기금)	(ARENA가 제공하는 자금 - 재생 가능 수소 배포 기금)	212,213

아시아							
후쿠시마 수소 에너지 연구 분야	후쿠시마, 일본	10 MW 전기분해기	운영 (2020)	물, 현장 전용 재생 가능 에너지	A\$243 million	상업용 플랜트(연료전지 차량 급유용 H ₂ 소매)	214
유럽							
H&R 외르케 함부르크-노이호프 프로젝트	함부르크, 독일	5 MW PEM 전기분해기	운영 (2017)	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$1천5백만 달러	상업 플랜트(인근 정유공장에서 사용하는 수소)	215
H2FUTURE 프로젝트 (FCHJU)	린츠 (주), 오스트리아	6 MW PEM 전기분해기	운영 (2020)	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	A\$2천9백만	파일럿 플랜트(지멘스 실라이저 300 PEM 철강 제조 용 PEM)	216
에너지파크 마인츠 프로젝트	마인츠, 독일	6 MW PEM 전기분해기	운영 (2017)	물, 잉여 재생 가능 에너지	A\$2천6백만 달러	파일럿 플랜트(지멘스 PEM 전해질을 이용한 수소 저장)	217
린데 루나 화학 단지	루나, 독일	24 MW PEM 전기분해기	공사중 (2022년 3분기 운영)	물, 그리드 제공 재생가능 에너지	공개되지 않음	상업용 플랜트(연료전지 차량용 H ₂ 용 ITM PEM 전해질기)	218
웨스트 코스트 100 프로젝트	웨스트 코스트, 독일	30 MW - 스테이지 1 (700 MW - 최종)	프로젝트 개발의 최종 단계	물, 전용 재생 가능 에너지	초기: A\$4천6백만 달러 (최종: 1억 3천6백만)	상업용 플랜트(H ₂ 가맹점 공장을 위한 티센크룹 전기분해기)	219
미국							
에어 리퀴드 퀘벡 공장	베칸쿠르, 캐나다	20 MW PEM 전기분해기	운영 (2021)	물, 재생 가능 전기	공개되지 않음	상업용 플랜트 (커민스 HyLZER 전해질 H ₂ 소매)	220
니콜라 코퍼레이션 프로젝트	유타, 미국	85 MW	전기분해기 구입	물, 재생 가능 전기	A\$1억 9백만	상업용 플랜트 (H ₂ 급유 작업을 위한 넬 알칼리성 전기분해기)	221
플로리다 파워 & 라이트 프로젝트	오키초비, 미국	20 MW	제안	물, 잉여 재생 가능	A\$8천3백만	파일럿 플랜트 (천연 가스 발전소에 H ₂ 연료 보충제를 공급하는 전기분해기)	222

A.2. 그린 암모니아 프로젝트

표 16 : 진행 중 및 발표된 녹색 암모니아 프로젝트 목록

프로젝트 이름	위치	용량	상태	P2X 피드스톡	투자	프로젝트 유형	Ref.
오스트레일리아							
QNP 타당성 조사	모라드, 퀸즐랜드	20ktpa	연구 완료 (2020년 2분기)	H ₂ (전기 분해), N ₂ (공기)	제안: A\$150 - 2억	파일럿 프로젝트 (기존 하버 보쉬 공장을 개조하기 위해 30 MW 전기분해기에서 H ₂)	223
프로젝트 게리 타당성 조사 (BP - GHD)	제럴드턴 (웨스턴 오스트레일리아 주)	20ktpa - 1 st 단계 1000 ktpa - 결승	타당성 분석 (NA)	H ₂ , 그리드, 물, N ₂ 에서 재생 가능	연구 비용: A\$4.4 mil. (아레나 & BP)	파일럿/상업 플랜트 (수출을 위한 녹색 암모니아 생성 - H ₂ 전해질 + HB 공정)	224
에어 페닌슐라 게이트웨이™ (H2U 그룹)	에어 반도, 남호주	120tpd	공사 중 (2022년까지 파일럿 단계)	H ₂ , 그리드, 물, N ₂ 에서 재생 가능	A\$2억 4천만 달러	파일럿/상업 플랜트 (수출을 위한 녹색 암모니아 생성 - 75MW 전해질 + HB 공정)	225
유리 그린 암모니아 프로젝트 (야라 비료)	필바라, 웨스턴 오스트레일리아	0단계 - 1% 암모니아 공급 (2023) 1단계 - 2 - 6% 암모니아 공급 (2026) 2단계 - 새로운 800ktpa 그린 암모니아 공장 (2028) 3단계 - 80% - 100% 암모니아 공급 (2030)	건설 중인 파일럿 플랜트 (운영: 2023년 2분기)	H ₂ , 그리드, 물, N ₂ 에서 재생 가능	A\$7천만 달러 (1단계 예상 비용) 이 프로젝트는 ARENA로부터 4,250만 달러의 자금을 확보했습니다 - 1단계 재생 가능 수소 배치 기금 (10MW 전해질기)	시범플랜트(10MW 전해질기)는 기존 HB 공정에 H ₂ 를 공급하여 3.5ktpa - 전체 암모니아 생산량의 1%를 만듭니다.	212, 213, 226
오리진 에너지 재생 가능한 암모니아 공장	벨베이 선거구, 태즈메이니아	420 ktpa	피드 스테디 (2022년 1분기)	H ₂ , 수력 발전, 물, N ₂	현재: A\$3백20만 달러	상업 공장 (녹색 암모니아 수출을 위한 500 MW 전전기 및 HB 공장)	227
포르테스큐 메탈 그룹 그린 암모니아 공장	벨베이 선거구, 태즈메이니아	250 ktpa	2030년까지 구상	H ₂ , 수력 발전, 물, N ₂	A\$5억 달러	상업 공장 (녹색 암모니아 수출을 위한 250 MW 전전기 및 HB 공장)	228
에코 에너지 그린 암모니아 프로젝트	글래스톤, 웨스턴 오스트레일리아			H ₂ , 전용 재생 가능, 물, N ₂	A\$5억 달러	상업용 플랜트 (300MW 태양광 발전소 + 200MW 전해질기 및 녹색 H ₂ /암모니아 수출을 위한 100MW 스토리지)	229

아시아 재생 에너지 허브	필바라, 웨스턴 오스트레일리아			H ₂ , 전용 재생 가능, 물, N ₂		상업플랜트 (H ₂ 용 26GW 태양광/풍력 발전 및 암모니아 수출)	7
H2-허브™ 글래스톤	글래스톤, Qld		타당성 단계 (상업용 공장)	H ₂ , 전용 재생 가능, 물, N ₂		상업용 플랜트 (녹색 암모니아 수출용 GW 전해질 3개)	230,231
아시아							
네오엠 그린 암모니아 프로젝트 (공기 제품)	Neom, 사우디 아라비아	1.2 Mtpa	공사중 (운영 2025)	H ₂ , 전용 재생 가능, 물, N ₂	A\$65억 달러	상업용 플랜트 (일본 연료전지 차량 급유로 H ₂ 수출NH ₃ 로 전환)	232
유럽							
포르스그룬 시설 개조 (야라)	포르스그룬, 노르웨이	500ktpa	공사중 (운영 2025)	H ₂ , 그리드 공급 재생 가능, 물, N ₂	A\$ 15억 달러	상업 플랜트 (기존 천연 가스 기반 하버 보쉬 공정을 널리 공급하는 전해질로 변환)	233,234
푸에르토야노 핀란드 프로젝트 (이베르드라)	커디드 레알, 스페인	20ktpa (20MW 전해질)	운영 (2021)	H ₂ , 전용 재생 가능, 물, N ₂	A\$2억 3천만 달러	상업 플랜트 (녹색으로 변환 된 200ktpa 시설의 10%, 100 MW 태양열 + 5 MW 배터리 및 넬 20 MW 전해질)	235
아메리카							
도널드스빌 질소 복합체 (CF 산업)	루이지애나 미국	20ktpa	공사중 (운영 2023)	H ₂ , 전용 재생 가능 전기, 물, N ₂	A\$5억 8천만 달러	상업용 플랜트	236

A.3. 그린 메탄 프로젝트

표 17 : 진행 중 및 발표 된 녹색 메탄 프로젝트 목록

프로젝트 이름	위치	용량	상태	P2X 피드스톡	투자	프로젝트 유형	Ref.
오스트레일리아							
APA 그룹 및 남부 녹색 가스 재생 가능한 메탄 파일럿 플랜트	월롱빌라, 퀸즐랜드	연간 메탄의 35 GJ	공사중	전용 재생 가능에너지, CO ₂ 및 공기중의 물	220만 달러	파일럿 플랜트 (CO ₂ 와 물을 공기, H ₂ 전해질기 및 원자로부터 분리하기 위해 직접 공기 포획을 사용하기 위한 독점 설계)	237
ATCO 재생 메탄 프로젝트	올버니, 웨스턴 오스트레일리아		타당성 분석	재생 가능전기, CO ₂ 및 물	타당성 비용: 서호주 정부에 의해\$20k	시범 공장 (ATCO 소유 파이프라인에 재생 가능 천연 가스 주입)	84
아시아							
히타치 존센의 산시 프로젝트	산시성, 중국	350만 m ³ 년 ⁻¹	운영 (2020)	재생 가능전기, CO ₂ 및 물		시범 공장 (히타치 존센의 기술을 사용하여 폐기물 CO ₂ 배출량을 메탄으로 변환)	238
유럽							
아우디 전자 가스 공장	베르틀, 독일	325 Nm ³ h ⁻¹ , (최대 1,000 t y ⁻¹)	운영 (2013년부터)	바이오매스 (2,800톤), R신설 전기 및 물에서 공급되는 CO ₂		데모 플랜트 (아우디 천연가스 작동 함대용 천연가스 생성)	239
스토어&고 데모 시설 (EU가 지원하는 27개 파트너 단체)	F1: 스위스, 솔로투른 F2: 팔켄하겐, 독일 F3: 트로이아, 이탈리아	스위스 시설: 173 (LNG) 독일 시설: 192kWh (LNG) 이탈리아 시설: 33kWh (LNG)	운영 (2019) 운영 (2019) 운영 (2019)	물, 그리드는 공기에서 재생 가능 에너지, CO ₂ 를 공급	A 4,300만 달러(총)	잉여 재생 가능 에너지 저장을 위한 시범 조종사	240

A.4. 그린 메탄을 프로젝트

표 18: 진행 중 및 발표 그린 메탄을 프로젝트 목록

프로젝트 이름	위치	용량	상태	P2X 피드스톡	투자	프로젝트 유형	Ref.
오스트레일리아							
아벨 에너지 벨 베이 파워 연료 프로젝트	벨베이, 태즈메이니아 여행	60,000 t yr ⁻¹	공사중	바이오매스에서 CO ₂ 및 산업 배출을 캡처, 재생 전기 분해에서 H ₂	타당성 조사 (태즈메이니아 정부의 2천만 달러 교부금)	상업용 플랜트 (수출용 메탄올)	241
유럽							
조지 올라 CO ₂ - 재생 가능한 메탄을 공장 (탄소재활용 국제)	그린다비크, 아이슬란드	연간 500만 리터	운영 (2012년 이후)	지열 공장에서 포착된CO ₂ , 재생 가능한 전해로 H ₂	1,000만 달러	데모 플랜트(공정 R&D 및 메탄올 제조 및 운송의 생존 가능성을 탐구함)	242
메프코2 프로젝트	니데라섬, 독일	1 tpd	운영 (2019년 이후)	전해에서 CO ₂ 및 재생 가능한 H ₂	A 1,200만 달러	데모 플랜트(메탄올 생성을 위한 열 촉매 를 개발하는 공정 R&D)	243
프레스메 프로젝트	스웨덴	1 tpd	운영 (2019년 이후)	강제 공장에서 포착된CO ₂ , 재생 가능한 전기 분해로 H ₂	A 1,700만 달러	데모 플랜트(현재 TRL 6에서 기술 확장)	244
스위스 리퀴드 퓨처	모 이 라나 (모 산업 단지), 노르웨이	연간 100만 리터		바이오매스 플랜트 및 산업에서 포착된CO ₂ , 재생 가능한 전기 분해로부터 H ₂	A\$460 - 5억 4천만 달러	상업용 플랜트 (급유 및 산업용)	245
액체 바람 프로젝트	예테보리, 스웨덴	50k톤 (총 프로젝트 수명 이상)	공사 중 (2024년까지 운영)	바이오매스 공장에서 포착된 CO ₂ , 재생 가능한 전해로 H ₂	A\$2억 2,500만	데모 플랜트	246
Power2Met - 그린 메탄올에 재생 에너지	Aalborg,	연간 300,000리터	운영 (2020)	태양/풍에서 바이오매스/ H ₂ 에서 CO ₂	300만 달러	데모 플랜트	247

아시아							
KIST 프로젝트	일본	100kg 일 ⁻¹	운영 (2004년 이후)	전기 분해로 인한 발전소 CO ₂ 및 H ₂	N/A	데모 플랜트	97
미쓰비시 메탄올 프로젝트	훗카디오, 일본	20 tpd		전해질에서 캡처된 CO ₂ 및 H ₂		상업 시설	248
다렌 화학 물리학 프로젝트	중국			전해질에서 캡처된 CO ₂ 및 H ₂		상업 시설	249

A.5. 그린 시너지 프로젝트

표 19: 진행 중 및 발표 그린 시너지 프로젝트 목록

프로젝트 이름	위치	용량	상태	P2X 피드스톡	투자	프로젝트 유형	Ref.
유럽							
노르스크 e 연료 (클라임웍스와 해드파이어 GmbH)	오슬로, 노르웨이	연간 1,000만 리터 (최대 1억 리터의 스케일)	공사중 (2023년까지 운영)	CO ₂ 부터 DAC, H ₂ 재생 가능한 전기 분해에서 메탄올 생성하기 위한 공동 전기 분해	7억 7,500만 달러 (업스케일링 후 예상 비용 총)	상업용 플랜트 (소매용 액체 연료 생성)	250

부록 B: P2X생산을 위한 공급원료 기술

이 섹션에서는 P2X 공급원료(Feedstock)를 공급하는 데 사용할 수 있는 기술과 비용을 집중적으로 설명합니다. 수소생성(섹션 3.2.)에 관한 이전 섹션에서 설명한 바와 같이 이후 메탄올로 전환하는 데에는 지속적으로 물과 재생 에너지가 필요합니다. (섹션3.4.) 메탄올 (섹션3.5.), 합성가스syngas (섹션3.6.)는 이산화탄소가 필요합니다. 또한, 재생 가능한 암모니아의 생성에는 질소 뿐만 아니라 물(섹션3.3)이 필요합니다. 우리는 또한 Power-to-X 적용을 위해 NSW주의 수자원 가용성에 대해 더 높은 레벨의 조언을 제공합니다.

위의 사례 연구에서 설명한 바와 같이, NSW주는 뛰어난 공급원료 가용성을 보유하고 있으며 이런 공급원료들을 확보하기 위한 비용은 감소세에 있습니다. 또한 이러한 포집 기술의 규모 확장 또한 (규모의 경제를 통해) 비용을 절감해 줍니다. 이러한 요인들은 모두 종합적으로 P2X 기술을 위한 사례와 그로 인한 경제 미래를 더욱 강력하게 뒷받침해줍니다.

B.1. P2X용 탄소 공급원료 기술 개요

일부 주요 P2X 기술경로의 핵심은 필요한 CO₂ 공급 원료를 소싱하는 것입니다. 이와 관련하여 산업 및 발전 부문에서 배출되는 폐기 CO₂들은 P2X를 통해 이를 활용할 수 있는 중요한 기회를 제공하고 탄소 배출 루프를 닫음으로써 탄소가스배출을 할 수 있습니다. IEA는 연료와 산업 공급 원료를 생성하는 탄소 포집 및 활용(CCU)이 장기적인 기후 목표를 달성하는 데 필수적인 역할을 할 것으로 기대하고 있습니다.¹⁹

CO₂ 공급

탄소 포집 기술 확립에서 중요하게 고려할 사항은 배출원입니다. 이는 스트림과 압력을 포함하는 CO₂의 구성을 정의하기 때문입니다. 일반적으로 CO₂ 함량이 낮고 부분적인 압력을 가하는 배기가스 스트림은 포집을 위해 더 큰 규모의 인프라가 필요하며 따라서 다운스트림 애플리케이션에 대한 순수 스트림을 생성하기 위해 더 높은 입력 에너지가 필요합니다. 따라서 CO₂ 함량이 높은 스트림의 경우 사전 처리 없이 P2X에서 직접 활용에 더 적합합니다.

표 20은 잠재적인 CO₂ 소스를 비교하여 CO₂ 함량, 잠재적 불순물 및 폐기물 스트림의 조건 (온도 및 압력)을 보여줍니다. 발전소 및 산업 공정(TRL 5-9)에서 탄소 배출을 포획할 수 있는 여러 CO₂ 포획 기술이 있습니다. 표 21 및 표 22는 각각 다른 포획 기술의 비교 전망과 표시 비용을 제공합니다.

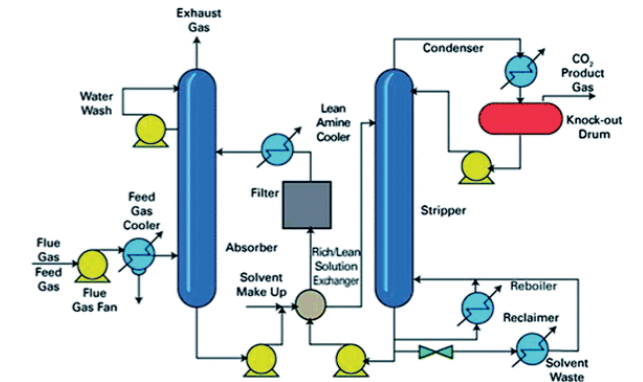
흡수 기술

CO₂ 흡수 기술은 CO₂가 풍부한 리치 스트림(즉 연도가스)과 CO₂에 대한 친화력이 높은 용매(일반적으로 아민)의 상호작용을 포함합니다. (그림 39) 이를 통해 연소가스로부터 CO₂를 흡수할 수 있으며 이 가스는 용매로부터 다시 분리되어 저장하거나 적용할 수 있습니다. 현재 모노에탄올라민(MEA)이 높은 포획 효율을 >90%를 나타내고 있는 것으로 보고되고 있습니다.²⁵¹

이 기술은 매우 성숙한 단계이며 발전소 및 산업 공정에서 연소 후 포획에 적극적으로 활용되고 있습니다. WA의 고르곤 LNG 프로젝트와 같은 가스 처리 시설에서 처리 후 저장을 위해 천연가스에서 분리되는 CO₂ 배출(3~4Mtpa)를 포획하는 데 적극 활용되고 있습니다.

흡수 기술의 주요 단점은 흡수제 재생이 필요하다는 점입니다. 이는 추가적인 에너지 소비를 발생하게 하고 흡수제는 시간이 지남에 따라 기능이 저하되기 때문에 어려움이 있습니다.

그림 39 : 아민 기반 공정의 간단한 회로도.²⁵²



흡착 기술

CO₂ 흡착 기술은 액체 용매대신에 고체 단계 흡착제의 표면에 CO₂가 물리적으로 흡착하게 되는 것을 제외하고는 앞의 흡수 기술과 유사한 원리로 작동합니다. 이러한 흡착제는 일반적으로 넓은 표면적 및 CO₂에 선택성을 갖도록 설계되었습니다. 일반적인 흡착제에는 분자체, 활성화된 탄성 침대 및 제올라이트와 같은 다공성 물질들이 포함됩니다.

상업적으로, 이러한 흡착 베드는 압력 스윙 흡착 (PSA) 또는 열 스윙 흡착 (TSA)로 개조되어 압력과 온도의 사이클링이 포획된 CO₂의 흡착 및 탈착에 도움을 줍니다.

PSA에서, 압력증가는 흡착을, 압력의 감소는 탈착에 이르게 하는 동안. TSA에서는 저온이 흡수를 돕고 온도가 높아지면 배출됩니다. PSA(그림 40)와 TSA는 80~85%, 고순도(>90%)의 CO₂ 회수 효율을 상업적으로 활용합니다.²⁵³

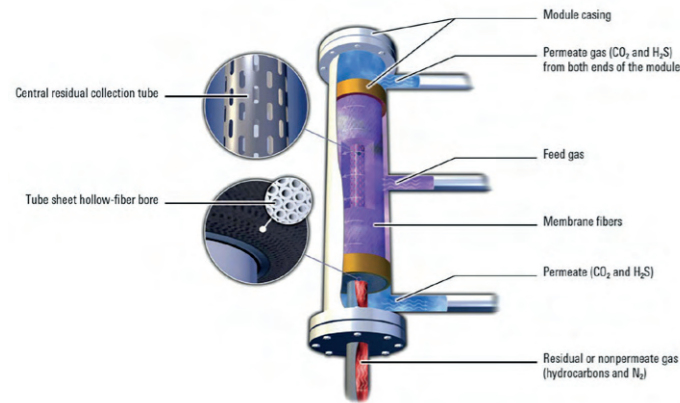
그림 40: 수소 생성을 위한 증기 메탄 개혁 시설에 설치된 PSA 유닛. 13개의 작은 원통형 용기는 흡수성 침대가 장착된 PSA 기동입니다. 이미지 제공: 린데 엔지니어링



멤브레인 분리

멤브레인 분리 기술은 CO₂가 폐기물 스트림의 다른 구성 요소를 제외하면서 통과시킬 수 있는 선택적 멤브레인을 사용합니다. 종종 발전소 및 천연 가스 처리 현장과 같은 고압 응용 분야에서 사용되며, 예를 들어 솔럼버거(그림41)가 개발한 CYNARA 멤브레인 시스템은 멤브레인을 통해 CO₂의 투과를 위한 고압을 지원합니다.

그림 41: CYNARATM 공정의 회로도, 천연 가스로부터 CO₂ 분리를 위한 상용 멤브레인 시스템. 이미지 제공: 솔럼버거

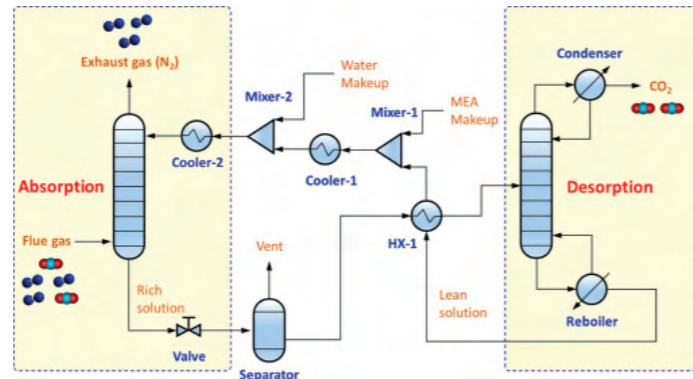


초저온 액화 증류법(Cryogenic Distillation)

기존의 증류 공정과 마찬가지로 초저온 증류는 성분의 비등점에 기초하여 혼합물을 분리합니다. 그러나, 이 공정이 가스 분리에 사용되기 때문에, 가스를 액화 한 다음 비등점에 분리할 수 있도록 매우 낮은 온도와 고압에서 수행해야 합니다. (그렇지 않으면 주변 조건에서 온도가 매우 높음). CO₂를 분리하기 위해 공기는 높은 가압es (100 - 200 atm)에서 -110°C에서 -135°C로 냉각됩니다. 이로 인해 CO₂는 NO X(-152°C) 또는 CO(-192°C)와 같은 연도 가스의 다른 가벼운 성분보다 더 무겁기 때문에 액화/고체화됩니다. 고체/액체 CO₂는 압력을 줄임으로써 분리하여 가스로 다시 변환할 수 있습니다. 초저온 증류는 연도 가스로부터 CO₂ 분리의 90 ~ 95%까지 달성할 수 있습니다.²⁵³ 그러나, 큰 단점은 온도를 감소시키고 압력을 증가시키는데 에너지가 많이 소비된다는 점이며, 회수하는 CO₂ 1톤당 ~600 kWh ~ 660 kWh 가 소요됩니다.²⁵³

상업적으로, 초저온 증류는 공기에서 산소와 질소를 분리하기 위해 적극적으로 사용되고 있습니다. 그러나 동일한 원칙이 산업 폐기물 스트림(그림42)에서 CO₂ 분리로 확장되고 있습니다.

그림 42: 산업적 연도 가스로부터 CO₂를 분리하는 초저온 증류 기반 분리 회로도²⁵⁴



직접적인 공기 포획

새롭게 떠오르는 CO₂포획 기술은 주변 공기에서 직접 포획하는 것입니다. IEA 분석에 따르면 2019년까지글로벌 에너지 관련 배출량이 연간 33GtCO₂ 이상으로 증가함에 따라 공기 중CO₂ 농도가 ~400 ppm을 넘어섰습니다.²⁵⁵ 따라서, 직접 공기 포획 (DAC) 기술은 대기 CO₂를 줄일 수 있는 기회를 제공하여 순환경제의 창출로 이어집니다. IEA는 지속 가능한 개발에서 2070년까지 연간 10Gt의 CO₂ 배출량을 포획해야 할 것으로 예상하고 있습니다.¹⁹ 그 중 약 ~ 2Gt은DAC를 통해 제거 될 것입니다. 전체적으로, 모든 포획된 배출량의 90%는 지하에 저장될 것으로 예상되지만, 10%(1 Gt CO2 yr⁻¹)는 항공용 합성 등유와 같은 전력 연료로 변환됩니다.¹⁹

그림 43 : 화학적 흡착 기반 DAC 공정의 회로도. 첫 번째 단계에서, 수성 알칼리성 흡착제(KOH)는 CO₂를 흡수하여 탄산염(K₂CO₃)을 만듭니다. 탄산염은 탄산칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하여 탄산칼슘(CaCO₃)을 만듭니다. 이는 포획된 CO₂를 방출하기 위해 열분해 될 수 있습니다.²⁵⁷

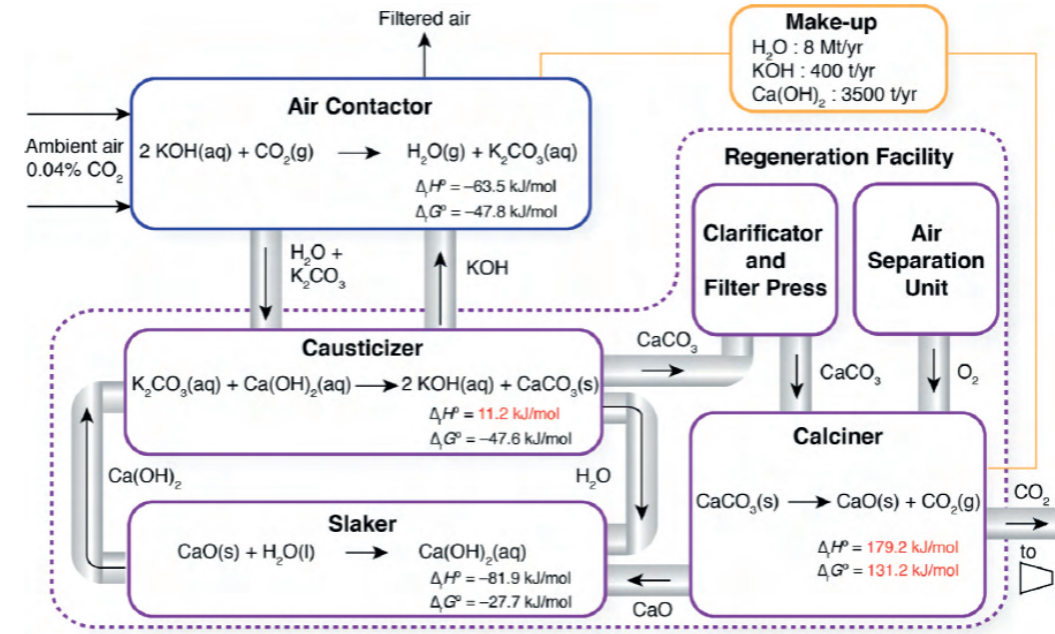


표 20 : 다양한 CO₂ 출처 비교. ²⁵⁸

출처	플루 가스 내의 CO ₂ 구성비율(%)	주요 불순물	사소한 불순물	압력	온도
발전 분야					
가스 화력 발전소	7 - 8%	H ₂ O, O ₂ 및 NO ₂	CO & NO _x	1 Bar	50 - 75 °C
석탄 화력 발전소	12 - 20%	H ₂ O, O ₂ 및 NO ₂	CO, SO ₂ 및 NO _x		
옥시 - 연소 공장	75 - 85%	H ₂ O	NO _x & SO _x		
IGCC 발전소	~40%	O ₂ , CO 및 N ₂	H ₂ , N ₂ 및 CO		
산업					
제강 공장	20%	CO & N ₂	CO & N ₂	33 Bar	37°C
시멘트 가마 공장	14 - 33%	H ₂ O & O ₂	H ₂ O & O ₂	1 Bar	50 - 75 °C
수소 생산 공장 (SMR)	70 - 90%	CO		15 - 40 Bar	40 - 450°C
가스화 공장	~10%	N ₂ & H ₂	CH ₄ & CO		
대기					
주변 공기	~ 400 ppm	N ₂ & O ₂		1 Bar	Ambient

표 21 : CO₂포획을 위한 위한 잠재적 기술 전망. ²⁵⁹⁻²⁶⁴

프로세스	장점	Disadvantages	TRL
아민	• 성숙한	• 부식, 아민 분해 및 높은 에너지 소비	9
활성 탄화	• 빠른 운동, 높은 열 안정성 및 저렴한 비용	• 저압에서 낮은 CO ₂ 용량	3
제올리테스	• 빠른 운동학	• 재생은 에너지 및 시간 집약적입니다	5
금속 유기 프레임워크	• 높은 열 안정성 및 조절 가능한 화학 기능	• CO ₂ 의 낮은 선택성은 다른 요소와 혼합되어 장기적인 성능 데이터가 부족합니다	3
양피지	• 재생이 필요 없고, 자본 비용이 적고, 컴팩트한 디자인이 필요하지 않습니다	• 가스는 분리하기 전에 압축(15~20bar)해야 하며, 고온 분해 멤브레인 및 다단계 분리가 요구되며 효율성을 유지해야 합니다	5 - 7
극저온 증류	• 재생이 필요하지 않으며 포획된 CO ₂ 는 고압으로 전달됩니다	• 높은 에너지 소비	5 - 7
직접 대기중 캡처	• 확장성 • 포인트 소스가 필요하지 않습니다	• 높은 에너지 요구사항 • 높은 사전 투자 비용	6

표 22 : 다른 포인트 소스에서 탄소 캡처의 비용 전망.

탄소 공급원	CO ₂ 캡처 비용 (tCO ₂ 캡처당 USD)
석탄 가스화 발전소	34 - 48
석탄 - 화력 발전소	37 - 60
가스 - 화력 발전소	57 - 110
정유 공장 및 NG 처리	22 - 86
제철소	85 - 89
시멘트 생산	70 - 105
바이오 가스 플랜트	0 - 110
직접 공기 캡처	270 - 325

참고 : 비용은 디테리히 외,의 리뷰에서 발췌했습니다. 116, 실제 비용은 € (2020 기준)으로 인용되었고 1 € = 1.22 USD의 전환 계수를 사용하여 US\$ 기준으로 변환되었습니다.

B.2. 암모니아 생성을 위한 질소 및 NO_x 공급원료

암모니아 생성에 필요한 질소는 현재 공기 분리 장치(ASU)를 사용하여 공기로부터 공급됩니다. ASU 윗은 현재 두 가지 원칙을 기반으로 합니다.

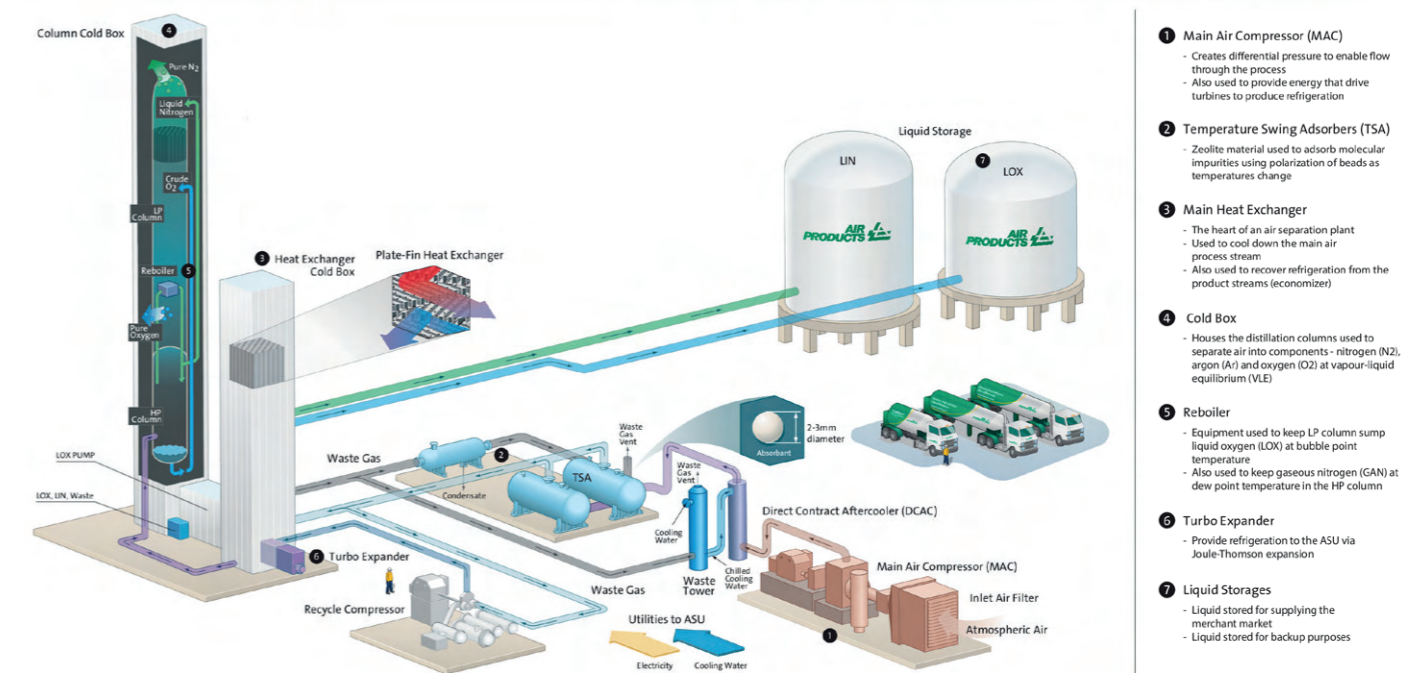
- 초저온 증류 : 초저온 증류는 공기 중의 다른 구성 요소 간의 응축 온도의 차이를 처리합니다. 이 과정에서 주변 공기는 일련의 쿨러와 압축기를 통과하여 구성 요소를 액화하는 데 필요한 온도를 줄입니다. 그런 다음 액체 성분을 증류를 통해 개별 가스로 재변환할 수 있습니다. 상업적으로, 제품의 100에서 1,000 tpd 사이의 용량을 가진 ASU 공장은 전 세계적으로 가동되고 있습니다 (그림 44). 초저온 공장은 고순도의 N₂(>99%)를 제공하지만, 전기에 의해 주로 구동되는 N₂의 압축기를 작동시키기 위해 에너지 ~175 ~280 kWh/톤이 필요합니다. ²⁶⁵
- 흡수 : N₂ 분리를 위한 대체 공정은 일반적으로 PSA 장치 또는 멤브레인을 통해 흡착됩니다. 이 단위는 일반적으로 N₂의 ~30 tpd 로 용량이 제한적입니다. 제한된 용량을 가지고 (이 용량을 넘는 초저온 증류가 보다 더 실행가능성이 높음) 그래서 종종 그들은 N₂ 순도가 상대적으로 더 낮아지는 (~95 %) 경향이 있습니다. ²⁶⁵ 이 과정은 일반적으로 압력 스윙 흡착(PSA)으로 설치된 멤브레인 또는 특별히 설계된 흡착 침대를 통해 수행됩니다.

산업용 ASU 평균 용량 135 tpd는 PSA의 경우 250만 달러, 멤브레인 분리의 경우 480만 달러, 초저온 증류 시 950만 달러 사이의 비용이 소요되는 것으로 보고됩니다. ²⁶⁶

N₂의 또 다른 잠재적 인 소스는 산업 및 발전소에서 배출되는 형태입니다. 이러한 NO_x 배출은 연료가 연소되어 주변 공기가 있는 에너지를 생성할 때 발생하며, 이로 인해 공기 중의 N₂ 구성 요소가 공기와 연료로 전환되어 X 배출이 없습니다. 그런 다음 NO_x 배출을 N₂로 다시 변환 후 다시 암모니아로 변환하여 배출 루프를 닫을 수 있습니다.

또는 NO_x의 직접적인 전기 화학적 감소는 암모니아를 생성할 수 있으며 UNSW 시드니와 시드니 대학교에서 적극적으로 탐구하고 있습니다. NO_x 공급원료는 기존의 탄소 포집 기술을 사용하여 NO_x 배출도 상량화 되기 때문에 산업이나 발전소에서 직접 공급할 수 있습니다. ²⁶⁷ 이러한 방식으로, P2X 기술은 암모니아 에너지 기반 경제에서 중요할 수 있으며, H₂를 생성하거나 발전용으로 연소하면 P2X를 통해 재활용하여 암모니아를 다시 생성할 수 있는 N₂ 및 NO_x의 생성으로 이어질 수 있습니다.

그림 44 : 질소 및 산소를 생성하기 위한 공기 제품에 의해 개발된 상용 공기 분리 장치(ASU) 공정의 회로도. 이미지 제공: 에어 프로덕트 ²⁶⁸



B.3. P2X를 위한 수자원 요구사항

물은 그린 H₂를 생성하거나 이차 변환 프로세스를 위해 고려되는 모든 P2X 경로의 또 다른 핵심 요소입니다. 일반적으로 상업용 전광기는 고품질의 물을 사용하여 최적의 효율을 달성하고 전해질 시스템의 수명을 유지합니다. 이러한 시스템의 대부분은 정수 시스템으로 설치되지만, 공급물은 적어도 식수 (TDS <1,000mg L⁻¹, WHO 표준) 이상이어야 합니다. 이는 전기분해장치로 호주의 식수 및 농업 수요를 충족시키는 요구사항과 경쟁할 것이기 때문에 호주와 같은 물 부족 국가에 잠재적인 문제입니다.

전해질을 사용하여 H₂를 생성하려면 H₂ 1킬로그램 당 ~9 L의 물이 필요합니다. 국가 수소 로드맵에서 강조한 바와 같이 2030년까지 H₂(수소 수출 시장)의 예상 수요 0.5 Mtpa 를 서비스하는데 필요한 물은 4.5 GL⁻¹(기가 리터 - 1 x 10⁹ 리터)라고 산출할 수 있습니다.

21



그러나 호주가 수입하는 3,900만 톤의 액체 연료를 대체하기 위한 합성 연료를 생산하기 위해 업계를 확장해야 한다면 물 수요는 990 억 L⁻¹(170만 명의 물 수요에 해당)으로 크게 증가할 것입니다.⁵² 따라서 전기 분해 경제를 유지하는 것은 폐수를 회수하거나 담수화 용량을 증가시킴으로써 물 소실에 박차를 가해야 할 것입니다. 이러한 소스에서 물을 소싱하는 것은 담수보다 비용이 많이 들지만, 물 비용은 전동 분해 비용의 ~2 %만 차지할 것으로 예상됩니다.²¹ 이 사전타당성 연구에서 고려된 특정 위치에 필요한 물 공급원료는 각 섹션에서 정교하게 검토되어 작성됩니다. NSW주는 P2X 경제 개발에서 고려될 수 있는 지역에 분산된 식수 뿐만 아니라 식염수 대수층의 유망한 매장량을 보유하고 있다는 점을 유념해야 합니다.

부록 C: 도움을 주신 분들

다음 이해 관계자들이 이 첫 번째 버전의 사전타당성 조사를 개발하는 데 지침, 피드백 및 통찰력을 제공해주었습니다.

휴 F. 듀란트-와이트 교수

NSW 수석 과학자 및 엔지니어 사무소

크리스 암스트롱 박사

NSW 수석 과학자 및 엔지니어 사무소

존 오브라이언

딜로이트 오스트레일리아

바트 콜로지에이치크 박사

포르테스쿠 메탈 그룹

베다드 모그타데리 교수

뉴캐슬 대학교

로버트 캐치폴

오리진 에너지

이스멧 칸볼라트 교수

광물 및 에너지 자원 엔지니어링

UNSW 시드니

로버트 리틀

지역학과

뉴사우스웨일즈 정부

폴 페론 박사

연소 후 캡처 (PCC) 연구 프로그램

CSIRO 에너지

교수 폴 줄리

호주 철강 제조를 위한 ARC 연구 허브

울릉공 대학교

팀 스톡

수소 태스크포스

뉴사우스웨일즈 정부

게르하르트 스와이거스 교수

울릉공 대학교

히사타

에이미 필브룩 박사

호주 신재생 에너지 기구 (아레나)

맷 월든

호주 신재생 에너지 기구 (아레나)

윌 레이워드 스미스 박사

딜로이트 오스트레일리아

앤 포스터

퀸브룩 인프라 파트너

알렉스 트라즈코프

H2U™

다니엘 크로쉬

GPA 엔지니어링

세르칸 투명 교수

광물 및 에너지 자원 엔지니어링

UNSW 시드니

데이비드 셰푸리

MAN 에너지 솔루션 오스트레일리아 Pty Ltd.

교수 PJ 컬렌

플라즈마 도약

화학 및 생물 분자 공학 학교,

시드니 대학교

리 케네디

NERA

알릭스 지벨

ATSE

피터 베니온

GHD

티모시 마이어스

MAN 에너지 솔루션 오스트레일리아 Pty Ltd

새뮤얼 프리스비

수소 태스크포스

뉴사우스웨일즈 정부

레이첼 루이

퀸브룩 인프라 파트너

마크 그린웨이

케이프 바이런 파워

사미 카라 교수

기계 공학 학교,

UNSW 시드니

A/교수 이아인 맥길

화학 공학 학교,

UNSW 시드니

브레튼 쿠퍼

써던 그린 가스

니콜라스 구리에프 박사

뉴캐슬 에너지 및 자원 연구소 (NIER)

뉴캐슬 대학교

춘헌 박사

비온드 제로 이미션

샘 멜라

비온드 제로 이미션

마이클 반 발

아벨 에너지

키스 러브그로브 박사

ITP 재생 가능 에너지

아덴트 언더그라운드

크리스티안 피니

아이언사이드 캐피탈

댄 프레이저

아이언사이드 캐피탈

애드리안 비어

METS 이그나이트드 오스트레일리아

Ian Dover

METS 이그나이트드

샘 브리지

오리진 에너지

토머스 우드

UNSW 시드니

클라우스 레게나우어 리브 교수

광물 및 에너지 자원 엔지니어링

UNSW 시드니

코너 커

수소 태스크포스

뉴사우스웨일즈 정부

부록 D: NSW P2X 얼라이언스 회원

얼라이언스 회원	부문/P2X 이해관계
아벨 에너지	산업/개발자
아그비오엔	산업/발명가
ARDENT Underground Hydrogen Storage	산업/스타트업
호주 신재생 에너지 기구 (아레나)	정부/투자자
Beyond Zero Emissions	NGO/커뮤니티 및 정책
BOC	산업/발명가
CNF & Associates	산업/개발자
CSIRO	연구/네트워크
딜로이트	컨설팅/네트워크
에너지 에스테이트	산업/투자자
포르테스쿠 메탈 그룹	산업/투자자 및 최종 사용자
German Energy National Agency (DENA)	정부/투자자
GHD	엔지니어링 컨설턴트
Global Alliance Powerfules	산업/네트워크
GPA 엔지니어링	엔지니어링 컨설턴트
H2U™	산업/개발자 및 투자자
히사타	산업/스타트업
인피젠 에너지	산업/개발자 및 투자자
IP 그룹	산업/투자자
아이언사이드 캐피탈	산업/투자자
ITP 재생 가능 에너지	산업/개발자
MAN Energy	산업/기술
METS Ignited	산업/최종 사용자
미쓰비시 개발 Pty 주식 회사	산업/최종 사용자
NAPEAN Engineering & Innovation	산업/제조업체
Origin Energy	산업/최종 사용자
PlasmaLeap	산업/스타트업
케노스 (주)	산업/최종 사용자
퀸브룩 인프라 파트너	산업/투자자
Santos	산업/최종 사용자
지멘스 에너지	산업/기술
Southern Green Gas	산업/스타트업
Squadron Energy	산업/최종 사용자
스타 사이언픽	산업/스타트업
아크 스틸 리서치 허브	연구/네트워크 발명가
SwticH2	산업/스타트업
도시바	산업/기술
뉴캐슬 대학교	연구/기술
시드니 대학교	연구/기술
유니버시티 오브 테크놀로지 시드니	연구/기술
울릉공 대학교	연구/기술

References

1. IRENA. Renewable Energy Benefits: Measuring the Economics . https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf (2016).
2. Australian Energy Regulator. State of the Energy Market 2021 . <http://www.aer.gov.au/node/18959> (2021).
3. 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).
4. 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).
5. IEA. Statistics report: CO2 Emissions from Fuel Combustion . CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview (IEA, 2020).
6. Hydrogen Renewables Australia. Hydrogen Renewables Australia and Copenhagen Infrastructure Partners announce partnership on the Murchison Renewable Hydrogen Project. Media Release (2020).
7. Match, 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)).
8. 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/>.
9. 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)).
10. IEA. Global Energy Review 2020 . Global Energy Review 2020 (IEA, 2020). doi:10.1787/a60abbf2-en.
11. Morton, A. Renewable energy stimulus can create three times as many Australian jobs as fossil fuels. The Guardian (2020).
12. Wood, T. & Dundas, G. Start with steel: A practical plan to support carbon workers and cut emissions . (2020).
13. Deloitte. Australian and Global Hydrogen Demand Growth Scenario Analysis COAG Energy Council - National Hydrogen Strategy Taskforce. (2019).
14. Renewable Power Generation Costs in 2019.
15. IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal . (2020).
16. 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).
17. McKinsey & Company & Hydrogen Council. Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investments, market development and cost competitiveness. (2021).
18. IEA. The Future of Hydrogen . IEA (2019).
19. IEA. Energy Technology Perspectives 2020 . (IEA, 2020).
20. Bloomberg New Energy Finance. Hydrogen Economy Outlook . (2020).
21. 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).
22. Jemena. Welcome to Jemena's Western Sydney Green Gas Project. <https://jemena.com.au/about/innovation/power-to-gas-trial>.
23. The Coal-To-Liquids Imperative For Australian Fuel Security . The Coal-To-Liquids Imperative%0AFor%0AAustralian Fuel Security.
24. Emissions from ships operating in the Greater Metropolitan Area NSW Environment Protection Authority. 1-114 (2015).
25. Chemistry Australia. The Industry. <https://chemistryaustralia.org.au/the-industry>.
26. ACIL Allen Consulting. Chemical Industry Economic Contribution Analysis, 2017-2018 . http://www.chemistryaustralia.org.au/docs_mgr/ACILAllenChemistry2017-2018_FINAL.pdf (2019).
27. 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>.
28. Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources. Energy trade. energy.gov.au <https://www.energy.gov.au/data/energy-trade> (2020).
29. Orica. Operations - Orica Kooragang Island. <https://www.orica.com/Locations/Asia-Pacific/Australia/Kooragang-Island/Operations#ammonia>.
30. IEA. Chemicals - Tracking Industry 2020. (2020).
31. 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).
32. 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).
33. NSW Government. Regional Growth Plans . <https://www.planning.nsw.gov.au/Plans-for-your-area/Regional-Plans>.
34. City of Sydney. Environmental action. <https://www.cityofsydney.nsw.gov.au/environmental-action>.
35. 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).
36. NSW Government. Parkes Special Activation Precinct. <https://www.nsw.gov.au/snowy-hydro-legacy-fund/special-activation-precincts/parkes-special-activation-precinct>.
37. 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).
38. Hydrogen Europe. Hydrogen Applications. <https://hydrogeneurope.eu/index.php/hydrogen-applications>.
39. World Energy Council & Frontier Economics. International Aspects of A Power-to-X Roadmap . (2018).
40. World Energy Council. New Hydrogen Economy-Hope or Hype. Innov. Insights Br. **6** (2019).
41. ACIL Allen Consulting. Opportunities for Australia from Hydrogen Exports. 1-114 (2018).
42. 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)).
43. 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>.
44. KPMG, NSW Office of Chief Scientist & NSW Department of Planning Industry and Environment. NSW : A Clean Energy Superpower. (2020).
45. Graham, C., Hayward, P., Foster, J. & Havas, J. GenCost 2020-21 Consultation draft. 2020-2041 (2020).
46. Aurecon & AEMO. 2020 Costs and Technical Parameter Review. (2019).

47. Australian Government. Australian Energy Update 2020 | energy.gov.au . 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/\(2019\)](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/\(2021\)](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/\(2016\)](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. A 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/\(2020\)](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-ling-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/\(2020\)](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/\(2020\)](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/gasifipedia/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 techno-economic 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.waternsw.com.au/supply/Greater-Sydney/schematic>.
159. NSW, W. Tallowa Dam. <https://www.waternsw.com.au/supply/visit/tallowa-dam>.
160. Water NSW. Avon Dam. <https://www.waternsw.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.waternsw.com.au/supply/visit/burrendong-dam>.
182. Water NSW. Wyangala Dam. <https://www.waternsw.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/573b865247760681cf086584fc8dad522def603/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](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](http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/2A65AA5E65D93763CA257E0A001C35AE/$file/Chemistry Resource Kit.pdf) (2015).
195. Qenos. Polyethylene. Our Plants <http://www.qenos.com/internet/home.nsf/web/OurPlants>.
196. Office of Environment and Heritage & State of NSW. Final Compliance Audit Report - Qenos Pty Ltd, Lot 5 and Lot 10 of Botany Industrial Park, 15-20 Beauchamp road, Matraville NSW 2036 . (Office of Environment and Heritage, 2011).
197. Indorama Ventures. Indorama Ventures Oxides Australia . Worldwide Locations <https://www.indoramaventures.com/en/worldwide/1514/indorama-ventures-oxides-australia> (2021).
198. Orica. Botany Industrial Park Pty Ltd. [http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/15265A7D9B151C89CA2577DE007A6BB2/\\$file/BIP Brochure Text 2010 v2.pdf](http://www.qenos.com/internet/home.nsf/0/15265A7D9B151C89CA2577DE007A6BB2/$file/BIP Brochure Text 2010 v2.pdf) audits/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).
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).
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.renewables.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).
211. AGIG. Hydrogen Park Gladstone . <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).
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).
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).
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).
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).
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).
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).
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.nsenerybusiness.com/news/south-australia-unveils-plans-to-build-173m-hydrogen-project/\(2020\).](https://www.nsenerybusiness.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).
229. Match, 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).
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).

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/>.

