

전환기를 맞은 수소경제, 청록수소를 주목해야 하는 5가지 이유

김영훈 수석연구원, 소재인프라연구센터 (golyong@posri.re.kr)

김희성 책임연구원, 소재인프라연구센터 (hskim78@posri.re.kr)

목차

1. 청록수소란?
2. 청록수소와 수소경제 3.0
3. 청록수소를 주목해야 하는 이유
4. 청록수소 생태계 조성을 위한 제언
5. 종합 및 시사점

Executive Summary

- 그린/블루 중심의 청정수소 정책은 높은 비용과 인프라 제약 등으로 현실적인 한계에 직면해 있으며, 민간 투자도 위축된 상황
- 수소경제가 정착되기 위해서는 기술중립적 체계와 민간 및 활용기업 중심의 시장 구조로 전환되어야 하며, 청록수소는 이러한 패러다임에 부합
 - 청록수소는 재생에너지·CCS에 대한 의존이 낮고 기존 산업 인프라와 연계가 용이하여, 산업에 따른 맞춤형 청정수소 생태계 조성이 가능한 기술로 부상
- 특히, 청록수소는 (1)환경성, (2)활용 경제성, (3)산업공동화 방지, (4)LNG 활용 시너지, (5)고체탄소 활용 측면에서 강점이 있어, 현실적 대안으로 주목
 - 첫째, 청록수소는 CO₂ 대신 고체탄소를 배출하여 생산 단계에서 직접 배출이 없고, 간접 배출은 기술개발 및 친환경 전력 확대 등으로 점진적인 감소가 예상
 - 둘째, 활용 단계에서 그린 및 블루수소만큼 경제적이며, 고체탄소의 자원화를 통한 부가가치 창출로 경제성 우위의 수소 생산이 가능
 - 셋째, 대규모의 재생에너지 부지 없이 산업단지 인근 생산이 가능해, 그린수소의 간헐성에 유연한 대응이 가능하고 제조업 해외 이전 억제 등에 기여
 - 넷째, 산업과 발전업계에서 수소 수요를 확대함에 따라 일부 LNG 물량을 청록수소 생산에 활용하면, 기존 LNG 장기계약 구조와 경제성 확보가 가능
 - 다섯째, 고체탄소는 발전·건설 등 범용 산업뿐 아니라 그래핀, CNT, 탄소섬유 등 미래 고부가 소재 산업 육성에도 기여
- 글로벌 정책 기조가 '특정 기술 선호'보다 '탄소 감축 효과' 중심으로 재편되는 가운데, 청록수소를 이에 부합하는 기술로 보고 국제적 인정과 지원을 확산
 - 미국 IRA 45V와 일본 「수소기본전략」 3조 6항은 메탄 열분해 기반 청록수소를 청정수소로 인정하고, EU 역시 위임법 초안에서 저탄소수소 범주에 포함할 예정
 - 국가별로 CO₂ 배출기준으로 청정수소와 저탄소수소를 정의하여 지원하고 있지만, 인증 여부와 상관없이 신기술(First of a Kind) 이 적용된 탈탄소 사업에 대한 지원 프로그램도 확대 중
- 청록수소는 TRL 4~8 단계로 기술 개선 잠재력이 있기 때문에 기술 주도권이 공백인 지금이야말로 국가전략기술 지정과 조기 투자의 적기라고 판단
 - 현재 기술 수준과 국가 전력망 구조에서는 청정수소 인증이 어려움
 - 하지만, '30년 국가 전력망에 친환경 발전 비중이 확대되고 저에너지 촉매 기술 및 고부가 고체탄소 상용화 기술을 국가전략기술의 목표로 설정하여 추진한다면, 청록수소는 그린수소의 브릿지 기술이 아닌 청정수소 생태계의 핵심 축으로 성장 기대

1. 청록수소란?

- 청록수소는 천연가스의 주성분인 메탄(CH₄)을 열분해(Pyrolysis) 하면서 생산되는 수소이며, 부산물로 고체탄소(C)가 발생되어 CO₂의 직접 배출이 없는 무탄소 수소에 해당
- 청록(Torquoise)은 청색(Blue)과 녹색(Green)을 혼합할 때 만들어지는 색으로, 청록수소는 블루수소와 같이 천연가스를 원료로 사용하지만 그린수소와 같이 무탄소 수소의 성격을 가지고 있음을 함의
- 특히, 부산물로 생산되는 고체탄소는 CO₂보다 산업적 제어가 쉽고 고부가가치 소재로 전환되어 자원화도 가능하므로, 수소생산의 경제성뿐만 아니라 산업적 파급효과도 우수
 - 고체탄소는 순수한 단일원소의 고체 상태이기 때문에 산소와 결합되고, 기체상태인 CO₂보다 부피 제어가 용이
 - 또한, 가탄제 및 카본블랙은 물론 그래핀이나 탄소나노튜브 등과 같은 고부가가치 산업 소재로의 활용성 측면도 우수

【 그림 1 】 청록수소와 그린 및 블루수소 생산 기술 비교

		그린수소	블루수소	청록수소
화학반응 (이론적)		$2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ 	$\text{CH}_4 = 2\text{H}_2 + \text{C}$
기술개발단계		TRL 8-9	TRL 7-9	TRL 4-8
주요 특징 *수소 1KG 생산시	원료	■ 청정수 10kg	■ 용수 4.5kg, 메탄(CH ₄) 2.0kg (SMR: Steam Methane Reforming)	■ 메탄(CH ₄) 4.0kg (물未사용으로 메탄 사용 증가)
	에너지 (실제)	■ E = 57 kWh/kg-H ₂ (수전해 과정에서 고에너지 사용)	■ E = 40 kWh/kg-H ₂ (스팀용수 위한 고온/고압 추가)	■ E = 10~35 kWh/kg-H ₂ (기술별로 필요 에너지 다양)
	부산물	■ CO ₂ 배출 無 ■ 순산소 발생, Oxy Fuel 사용	■ CO ₂ 11kg/H ₂ -kg 배출 ■ 매립 또는 재활용	■ CO ₂ 배출 無, 고체탄소 발생 ■ 산업용 연원료로 재활용

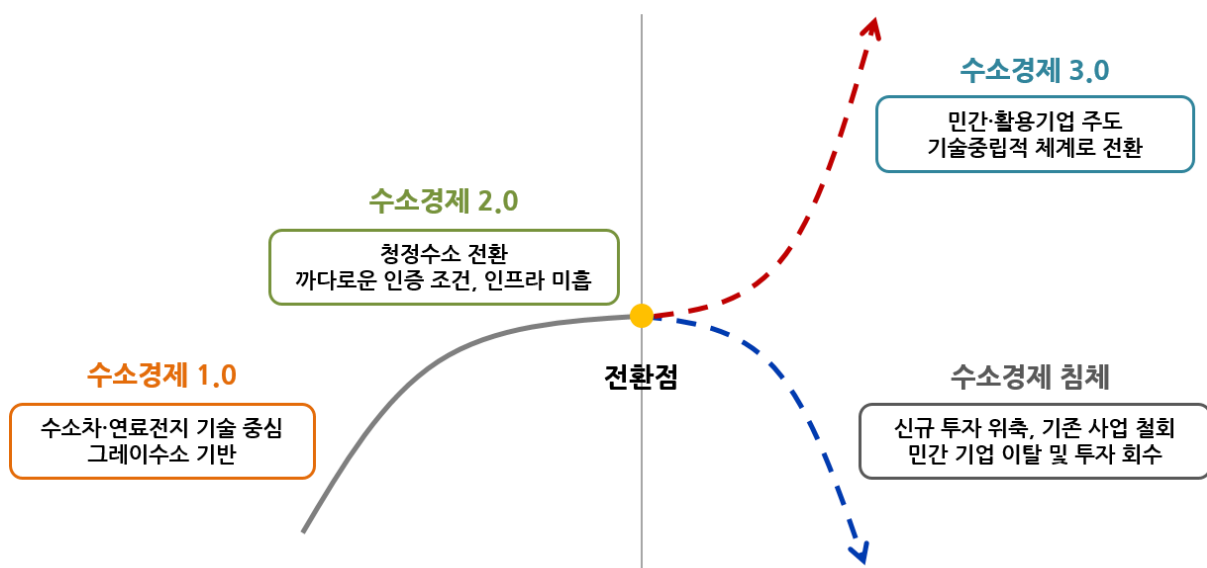
자료: 한국가스공사, IEA 등 자료 POSRI 재구성

- 청록수소는 재생에너지와 CO₂ 매립 환경이 열악한 우리나라 같은 국가에서 에너지 대안으로, 그린과 블루수소의 한계를 보완하면서 현실적인 수소경제 추진이 가능
 - 블루수소는 CO₂의 매립지 확보가 중요한 반면, 청록수소는 고체탄소의 국내 육상 매립이 상대적으로 용이
 - 또한, 그린수소보다는 에너지 효율이 좋고 전력 및 수자원의 소모가 작기 때문에 경제성이 우수하며 현실적인 국내 생산 모델이 가능
 - 청록수소의 에너지 소비(10~35kWh/kg-H₂)는 그린수소의 20~60% 수준이고 물을 원료로 사용하지 않기 때문에 용수 확보 부담도 적음
- 해외 주요국은 청록수소를 중요한 저탄소수소로 분류하여 전략적 지원을 강화하는 추세
 - 미국은 트럼프 시대에도 LNG와 연계된 수소에 대한 지원은 유지하고 있으며, 청록수소를 저원가 생산 잠재력을 보유한 수소로 기대하며 주목
 - IRA 45V 최종안(25.1)은 청록수소 생산 기술인 메탄 열분해(Methane Pyrolysis)를 지원 대상에 포함
 - 에너지부(DOE)는 청록수소가 경제성과 환경성 측면에서 잠재력이 있다고 평가하면서 DOE 전체 자금지원(융자 프로그램) 예산의 0.7%, 그린수소의 50% 수준을 청록수소에 배정
 - 한국처럼 LNG 수입국가인 일본은 「수소기본전략」을 통해 메탄 열분해를 4대 혁신기술로 명시하고 지원
 - 소지츠(Sojitz), 에바라(Ebara), 미쓰비시(Mitsubishi), 스미토모, 미우라공업, 오키나와전력, 도요가스, 철강협회 등 다양한 산업계에서 연구개발을 확대
 - 향후 연구개발을 넘어 실증단계에 진입하면, 경제산업성의 그린이노베이션(GI) 기금 등을 통해 대형 실증사업까지 지원을 넓힐 계획
 - EU 또한 저탄소연료 위임법(Low Carbon Fuel Delegated Act)을 통해 청록수소를 저탄소수소에 포함시키고, 지원 기반을 마련할 예정
 - 탄소배출 기준에만 부합(3.38kg-CO₂/kg-H₂)한다면 그린수소 중심의 지원체계에서 블루/원전/청록수소도 의무사용으로 규제해, 차액보전 지원 대상에 포함

2. 청록수소와 수소경제 3.0

- 우리나라는 '19년 수소경제 활성화 로드맵을 발표하면서 모빌리티 중심으로 수소경제 1.0을 시작하였고, '21년에는 수소법 시행으로 수소경제 2.0을 추진하면서 청정수소 공급기반을 구축하고자 노력
 - 수소경제 1.0 기간 동안에는 수소차 및 연료전지 등 모빌리티 중심의 기술을 보급하고, 수요를 확대하는 데 주력
 - 수소경제 2.0 기간에는 청정수소 인증제도를 중심으로 민관이 글로벌 청정수소 공급망을 구축하고, 청정수소 경제로의 전환을 모색
 - 현대자동차그룹을 넘어 SK, 롯데, 한화, 포스코, 두산 등이 수소경제에 동참
- 하지만, 수소경제 2.0은 현실적인 경제성, 까다로운 인증 요건, 미흡한 인프라 확충 등의 한계로 민간 투자를 견인하지 못하고 정체
 - 청정수소의 까다로운 인증 조건 등으로 생산비용이 예상보다 증가하고, 구체적인 정책 및 재정 지원 부족으로 민간의 투자를 유인하는 데 실패
 - '24년 청정수소 발전시장(CHPS: Clean Hydrogen Production Standard)의 경쟁입찰에서 예상보다 비싼 수소 및 암모니아 가격으로 민간 참여가 저조
 - 우리나라뿐만 아니라 EU, 미국 등 수소경제 선도국에서도 많은 수소 프로젝트가 현실적인 경제성 이슈로 인해 투자가 보류되거나 취소되는 상황

【 그림 2 】 수소경제 3.0 개요



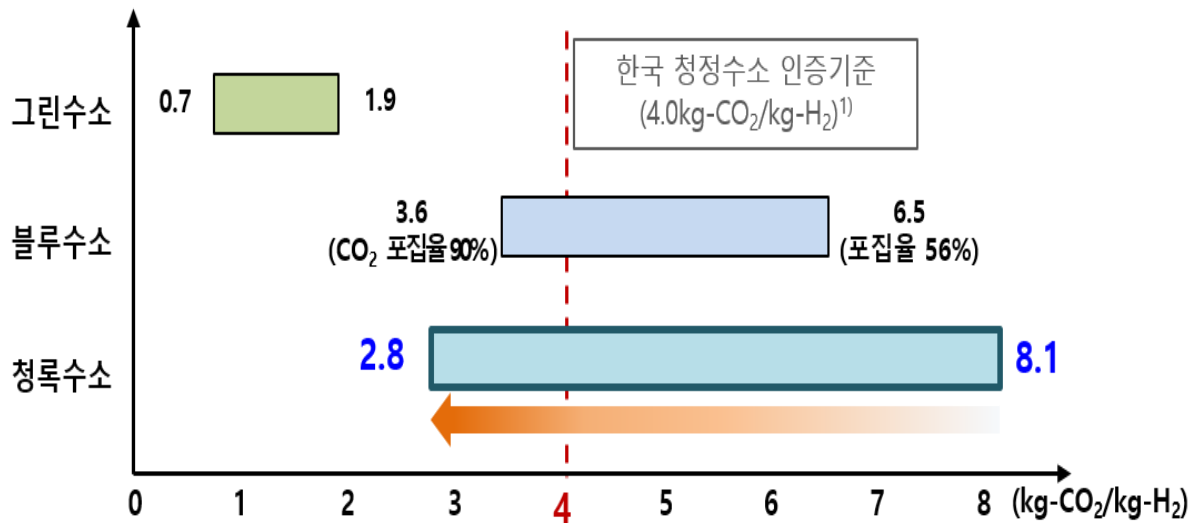
- 청정수소가 탄소중립을 완성하는 핵심 에너지라는 공감대가 형성된 만큼 수소경제 3.0으로 진전하기 위해서는 현실적인 청정수소 생산 및 활용 경로 모색이 필요
 - 우선, 그린수소 중심으로 추진되고 있는 지원체계가 탄소중립 목표에 기여한다면, 다양한 기술을 수용하는 기술 중립적인 지원체계로 전환 필요
 - 수소 생산기업보다 활용기업의 니즈를 반영한 수소 생태계를 구축하는 등 정책 지원 경로 변경을 모색할 필요
- 그렇지 않으면, 수소경제에 동참하고자 했던 많은 기업들이 투자를 보류하면서 수소경제는 장기간 정체될 우려

3. 청록수소를 주목해야 하는 이유

(1) 탄소중립에 기여하는 잠재적 청정수소

- 현재 기술수준으로 청록수소는 생산과정에서 CO₂가 직접 배출되지는 않지만, 천연가스의 추출과 이송, 열분해 과정에서 간접적으로 배출되는 CO₂로 인해 청정수소 인증기준(4kg-CO₂/kg-H₂)을 초과
 - 청정수소 인증제도는 원료 채굴부터 수소 생산까지(WtG: Well-to-Gate) 배출되는 CO₂가 산정 범위에 해당
 - 청록수소는 열분해 과정에서 직접 배출되는 CO₂(Scope 1)는 없지만 열분해에 사용되는 전력에 포함된 CO₂(Scope 2)와 천연가스 추출, 액화 과정에서 발생하는 CO₂(Scope 3)까지 포함하면 청정수소 인증기준을 초과
 - 블루수소는 천연가스(CH₄ 등)를 수증기(H₂O)로 개질하는 과정의 천연가스 외에 수증기에서도 수소를 배출
 - 반면, 청록수소는 천연가스만을 원료로 사용하기 때문에 동일한 양의 수소를 생산하려면 블루수소보다 2배 많은 천연가스가 필요
 - 특히 우리나라는 천연가스를 수입하기 위해 액화하는 과정이 필요한데, 이 과정에서 약 2kg-CO₂/kg-H₂가 발생(Scope 3)

【 그림 3 】 수소 생산 기술별 CO₂ 배출량(Well to Gate 기준)

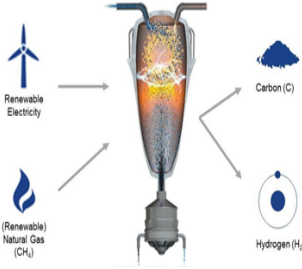
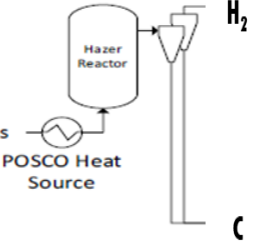
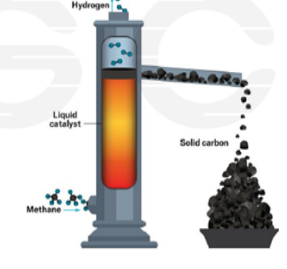


자료: 한국에너지기술연구원, 고등기술연구원 등 자료 기반 POSRI 재구성

□ 하지만, 2030년까지 저에너지 촉매 기술이 개발되고 국가 전력 Mix에 무탄소 전원 확대가 예상되어, 청정수소 인증 확보도 가능

- 첫째, 청록수소는 기술별로 소요 에너지가 상이하기 때문에 저에너지 촉매 및 저탄소 기반의 공정 기술 개발을 통해 탄소 배출량 감축이 가능
 - 상용화에 근접한 고온 플라즈마 방식은 에너지 소요량이 35kwh/kg-H₂에 달하기 때문에, 현재 그리드 전원(무탄소 발전 비중 33.8%)을 사용할 경우 Scope 2 CO₂가 16kg-CO₂/kg-H₂ 배출
 - 저온 플라즈마 또는 용융 금속촉매 등 고효율 공정 및 촉매 기술이 개발된다면, 고체탄소의 순도 이슈가 있지만 에너지를 10 kwh/kg-H₂ 까지 사용하기 때문에 CO₂는 4.7kg까지 배출이 감소
- 둘째, '30년까지 국가 전력망(Grid)의 온실가스 배출계수가 0.2kg-CO₂/kWh까지 떨어지면, 청록수소의 CO₂ 배출량은 청정수소 인증 기준까지 감소
 - 현재 국가 전력망의 무탄소 발전 비중은 33.8%로 전력 배출계수가 0.47kg-CO₂/kWh에 달하기 때문에, 열분해에 에너지를 최소 수준(10kwh/kg-H₂)으로 사용하여도 청록수소는 Scope 2 CO₂가 4.7kg-CO₂/kg-H₂ 배출
 - 제11차 전력 수급기본계획에 따르면 무탄소 발전 비중이 '30년까지 53%까지 확대되는데 이때 배출계수는 약 0.24까지 하락하고, '38년에는 0.2 이하로 하락하기 때문에 Scope 2 CO₂는 2.0kg-CO₂/kg-H₂까지 하락

【 그림 4 】 청록수소 기술 개요 및 필요 에너지

기술	플라즈마 분해 기술	고체촉매 분해기술	용융금속촉매 분해기술
개요			
설명	고온의 플라즈마 가열에 의한 메탄 직접 분해 기술	천연가스가 외부 가열된 반응기 Carbon 이동층을 통과하며 분해	천연가스를 버블형태로 부상, 고온의 액체금속촉매와 반응
필요 에너지	35kWh/kg-H2(M社) 13kWh/kg-H2(저온 플라즈마)	10kWh/kg-H2(H社)	11kWh/kg-H2(C社)

자료: 포스코 기술연구원

- 셋째, 무탄소 전원을 확대하는 국가를 중심으로 LNG 수입 계약을 확대하는 등 청록수소 글로벌 프로젝트를 어떻게 설계하느냐에 따라 업스트림 배출량(현재 약 3.7kg-CO₂/kg-H₂)을 10~70%까지 감축 가능

□ 상기의 모든 조건들을 충족한다면, 청록수소는 CO₂ 배출량이 최대 2.8 kg-CO₂/kg-H₂까지 감소하는 등 블루수소보다 감축효과가 우수

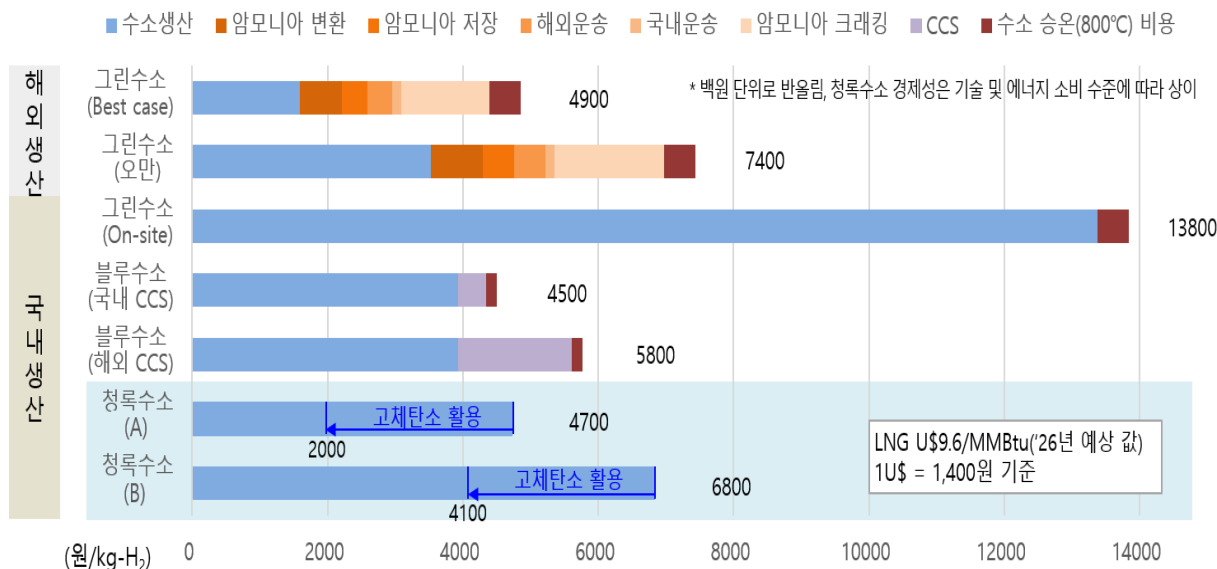
(2) 수소 활용 측면에서 경제성 우수

□ 그린수소는 재생에너지 환경이 우수한 국가에서 경제적으로 생산할 수 있지만 수입에 따른 운송과정에서 높은 비용이 발생되어 활용 시점에 가격은 5~7천 원대로 상승

- 생산 현지에서 암모니아로 변환하여 운송하고 국내에서 크래킹을 하는 과정에서 생산비용 이상의 비용이 발생하기 때문에, 국내에서 수소를 활용하려면 수용하기 힘든 가격대를 감내해야 하는 상황
 - 중동(오만)에서 '28년 프로젝트를 가동하면 수소 1kg을 4천 원 이하에서 생산할 수 있지만, 국내에 수입하는 과정에서 비용이 7천 원대로 상승
 - 수소환원제철 등 산업용으로 수소를 활용하려면 승온하는 과정에서 추가 에너지가 필요해, 기업은 최소 7천 원 중반대의 원가로 수소를 활용

- 가장 낙관적인 미래 시나리오에서도 수소 생산 가격은 2천 원 밑으로 떨어지는 반면 운송비용을 극복하기 어려워, 수소 활용 기업은 5천 원에 달하는 비용을 부담

【 그림 5 】 수소 생산 기술별 생산-운송-활용 가격



자료: Roland Berger, IEA, 미래에셋증권 등 자료 기반 POSRI 재구성

□ 블루수소는 LNG 수입을 위한 인프라가 갖춰져 있기 때문에 운송비용 부담은 덜하지만 LNG 구매 비용과 배출 CO₂의 해외 저장 비용으로 최종 가격이 4~6천 원대로 상승

- LNG를 U\$10/MMBtu로 수입하여 수소를 생산하고 배출탄소를 동해 등 국내 인근 매립지에 저장한다면, 4천 원 중반대에서 활용이 가능
- 하지만, 국내 매립지 부족 및 사회적 수용성 이슈 등으로 해외 매립지 개발이 불가피하기 때문에 현실적으로 최종 가격은 6천 원에 육박

□ 반면, 청록수소는 블루수소와 유사한 4~7천 원대에서 활용이 가능하지만 고체탄소의 활용성에 따라 2~3천 원대의 잠재력을 보유

- 청록수소는 CCS 비용이 불필요하나 블루수소보다 천연가스를 약 2배 더 사용하기 때문에 활용 가격은 4~7천 원대로 상승
- 그러나, 청록수소는 개발단계의 기술(TRL 4~8)로 4천 원대에서 생산이 가능한 기술이 등장하였고, 부산물인 고체탄소를 정제해 고부가가치 산업에 판매한다면 비용을 회수할 수 있어 2~3천 원대의 가격도 가능

- 수소 1kg에 고체탄소 3kg이 생산되는데, 15%는 그래핀, 카본블랙 등 고부가 소재, 85%는 일반 산업용으로 활용 시 2천 원대의 비용 회수가 가능
- 향후 LNG 가격이 상승하여 청록수소의 생산원가도 상승할 우려가 있지만 고체탄소 활용 비율에 따라 경제성 개선이 가능

(3) 그린수소 공급망 보완 및 국내 산업공동화 방지

□ 그린수소 중심으로 국내 산업 생태계가 확대되면, 재생에너지 부지 확보 및 장거리 송전선 건설에 따른 사회적 수용성, 번덕스러운 날씨에 따른 간헐성 이슈 등이 발생되어 수소 공급망이 불안정한 상태로 운영

○ 산업단지 인근에서 1만 톤의 수소를 생산하기 위해서는 여의도 면적에 해당하는 290ha 이상의 태양광 발전 부지가 필요

- 육상풍력은 터빈 블레이드 회전에 따른 후류(wake) 효과로 발전 효율 저하 방지를 위한 터빈 간 적정 간격 확보가 필수적이기 때문에 태양광보다 6배 이상의 부지가 필요

○ 산업단지에서 이격된 지역에 재생에너지 단지를 건설하면 해결되는 문제지만, 장거리 고압 송전망 건설에 따른 주민 수용성 및 추가 건설 비용 이슈 등이 발생

□ 반면 해외에서 그린수소를 생산 시, 운송비용을 극복하기 어렵기 때문에 기업들은 수소 활용 설비를 해외로 이전하는 데 고민

○ 예를 들면 정유업체는 신사업으로 e-Fuel을 생산하고 철강업체는 탈탄소 전략으로 수소환원철(DRI)을 사용해야 하는데, 이때 핵심원료로 그린수소가 필요

- E-Fuel은 수소와 CO₂를 합성하여 만든 연료(육상/해상/항공), 수소 DRI(Direct Reduction Iron)는 철광석을 석탄 또는 천연가스가 아닌 수소로 환원한 철

○ 하지만, 국내의 설비 운영은 수소 운송비용을 감당하기 어렵기 때문에 수소를 사용하는 최소한의 플랜트를 해외로 이전할 가능성이 존재

□ 청록수소는 그린수소를 갑자기 공급하기 어려울 때 기존 LNG 인프라를 활용한 유연한 공급이 가능하기 때문에, 청정수소 공급망의 탄력성을 강화하는 데 기여

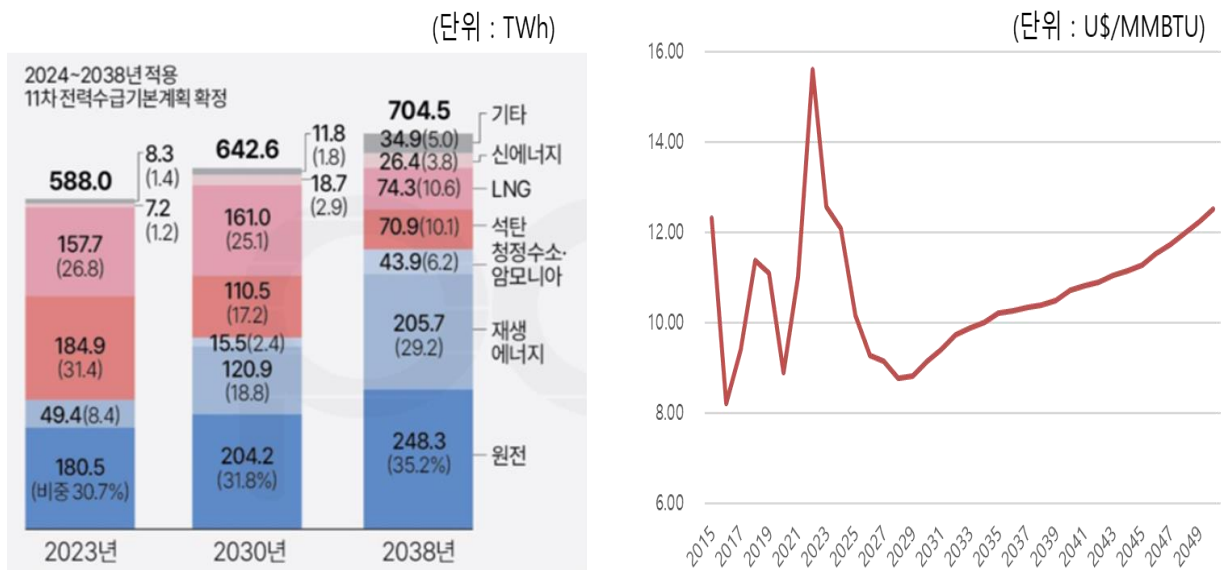
- 청록수소는 국내생산이 용이하고 블루수소와 비교하면 매립지 확보 이슈 없이 고온 공정에 직접 투입이 가능하여, 뿌리산업 단지에 효율적으로 안착하면서 그린수소의 간헐성 리스크의 효과적인 보완이 가능
 - 그린수소와 달리 LNG 선박, 탱크, 터미널, 파이프 등 기존 인프라를 최대한 사용할 수 있어 제조 환경에 큰 변화를 야기하지 않음

(4) LNG와 전략적 활용을 통한 시너지

□ 국내에서 다수의 LNG 장기-대량 계약이 체결되었지만 LNG 수요는 전력수급기본계획에 따라 '30년 이후 감소될 것으로 예상됨. 이에 잉여 물량에 대한 전략적 활용 방안이 필요

- 제11차 전력수급기본계획에 따르면, 발전원에서 LNG 비중은 '30년까지는 25.1%로 유지되다가 '38년에는 10.6%로 감소할 전망
- 반면, '30년 이후 LNG 가격은 꾸준히 상승할 것으로 예상되는데, 수요 감소 시나리오의 영향으로 LNG의 장기-대량 계약을 축소하고 단기 계약 중심으로 체결 시 LNG를 높은 비용으로 수입하는 상황이 발생
 - 아시아 스팟 LNG 가격은 러우전쟁 여파로 '22년에 정점을 찍은 뒤, 미국 및 중동발 공급확대 영향으로 하락하다가 '30년 이후 지속적인 상승이 전망됨

【 그림 6 】 제11차 전력수급기본계획(좌) 및 아시아 Spot LNG 가격 전망(우)



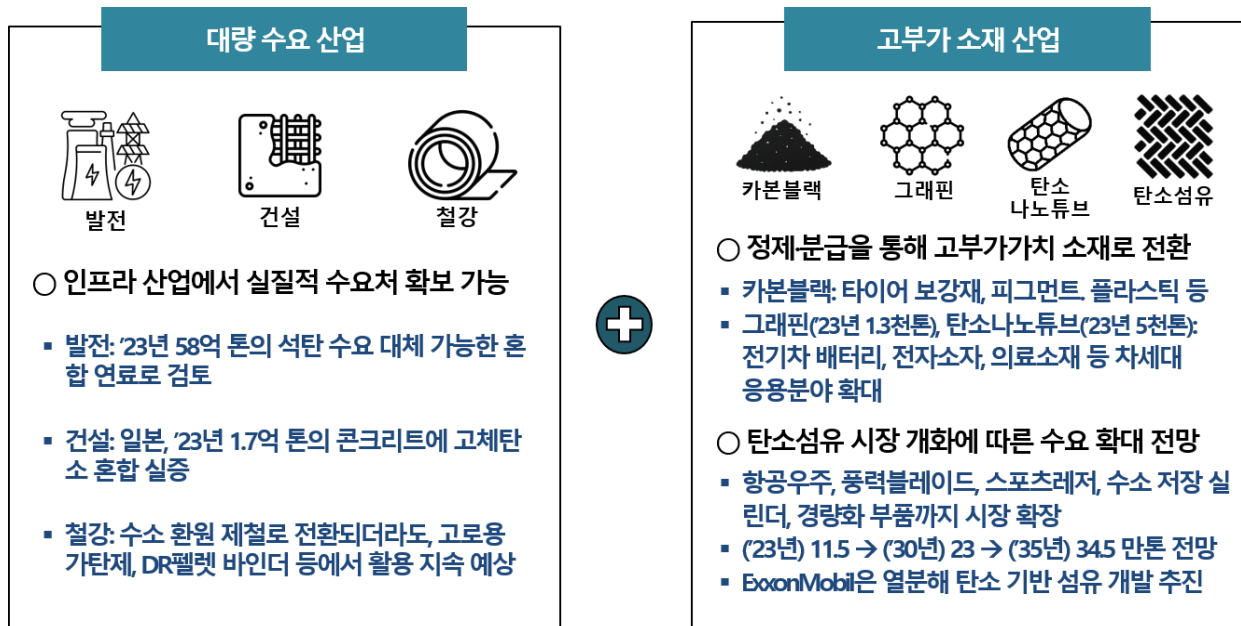
자료 : 연합뉴스, S&P

- 청록수소의 생산은 LNG의 안정적인 수요처가 가능해, 장기계약 기반의 LNG 수급 구조를 유지하고 경제적으로 LNG를 도입하는 전략적 수단으로 작용
 - 향후, 산업 및 발전 부문에서 수소의 수요 확대가 전망되는 가운데, 청록수소는 수소경제 이행과 LNG 장기계약의 연속성을 동시에 뒷받침하는 핵심 연결고리로 작용할 것
 - 철강산업은 저탄소 발전원으로서 LNG와 저탄소 스틸용 환원제에 청록수소가 필요하며, LNG 장기 계약을 통해 경제적으로 LNG와 수소 동시 확보가 가능
 - 발전산업에서도 LNG와 수소 혼소발전을 위해 블루수소와 함께 청록수소라는 전략 옵션을 보유하면, 탄소중립 로드맵을 추진하는 데 전략적 유연성 확보가 가능

(5) 고부가 고체탄소 산업 생태계 육성

- 청록수소와 함께 배출되는 고체탄소는 철강, 발전 등 청록수소를 활용하는 산업뿐만 아니라 건설산업 등에서도 연료 및 보강재로 활용
 - 철강 산업이 수소환원제철로 전환되더라도, 탄소강 생산을 위해서는 탄소가 필요하기 때문에 고체탄소는 수소와 함께 핵심 원료로 활용
 - 대표적으로 고로용 가탄제, 전기로용 전극봉, DR 펠렛용 상온 브리켓 바인더 등에 사용
 - 발전 부문에서도 일본을 중심으로 석탄 사용량을 일부 대체할 수 있는 혼합 연료로의 응용을 검토 중
 - 콘크리트 산업에서는 보강재 또는 구조적 보조재로 활용 가능성이 제기
 - 일본은 연간 1.7억 톤 규모 콘크리트에 고체탄소 혼합의 실증을 검토 중
- 고체탄소는 입자 크기를 정밀하게 조절해 카본블랙, 흑연, 탄소나노튜브(CNT) 등 고기능 소재로도 전환할 수 있는 잠재력을 보유
 - 카본블랙(평균 단가 \$1.1/kg)은 타이어, 피그먼트, 플라스틱 등 전통적 대량소비 산업군에서 광범위하게 사용
 - 고체탄소는 이차전지, 전자소자, 의료기기 등 고부가 수익을 창출하는 차세대 소재로, 흑연(연간 수요 126천 톤), CNT(약 5천 톤) 등에 활용

【 그림 7 】 고체탄소의 주요 활용 산업



자료: Mizuho Bank, KOTRA 등 자료 기반 POSRI 재구성

□ 탄소섬유 시장도 고체탄소의 잠재적 활용처로 계속 성장하여, '35년까지 3배로 증가할 전망

- 탄소섬유는 스포츠·레저 산업을 넘어 항공우주, 풍력블레이드, 수소저장용 실린더, 신모빌리티 경량화 부품 등으로 수요가 확대 중
 - 수직이착륙항공기(eVTOL)의 대표 제조업체인 미국 Joby aviation과 중국 Ehang은 동체를 탄소섬유로 채택
- ExxonMobil이 열분해 공정에서 발생하는 고체탄소를 탄소섬유 생산에 활용할 수 있는 기술로 개발하는 등, 청록수소가 배출하는 탄소섬유의 고부가 활용처는 계속 개발될 것으로 기대

4. 청록수소 생태계 조성을 위한 제언

- 청록수소는 그린수소 상용화 전의 브릿지 기술이 아니라 현실적인 청정수소 생태계의 중요한 축이 될 수 있으므로, 그린 및 블루수소와 함께 전략적 육성과 제도적 기반이 필요
- 청록수소는 그린/블루수소의 한계를 보완하는 '제3의 수소'로, 환경성과 경제성 개선의 잠재력을 보유

- 그린수소 공급망 안정성뿐만 아니라 고체탄소 신산업 육성에도 기여하기 때문에, 브릿지 기술을 넘어 청정수소 생태계를 구성하는 데 유용
 - 수소 활용 기업 입장에서는 그린수소와 청록수소를 혼합하여 사용하는 조달 체계를 구축한다면, 경제적인 수소 공급망 구축이 가능

(1) 국가전략기술 등록을 통한 기술 확보 및 주도권 선점

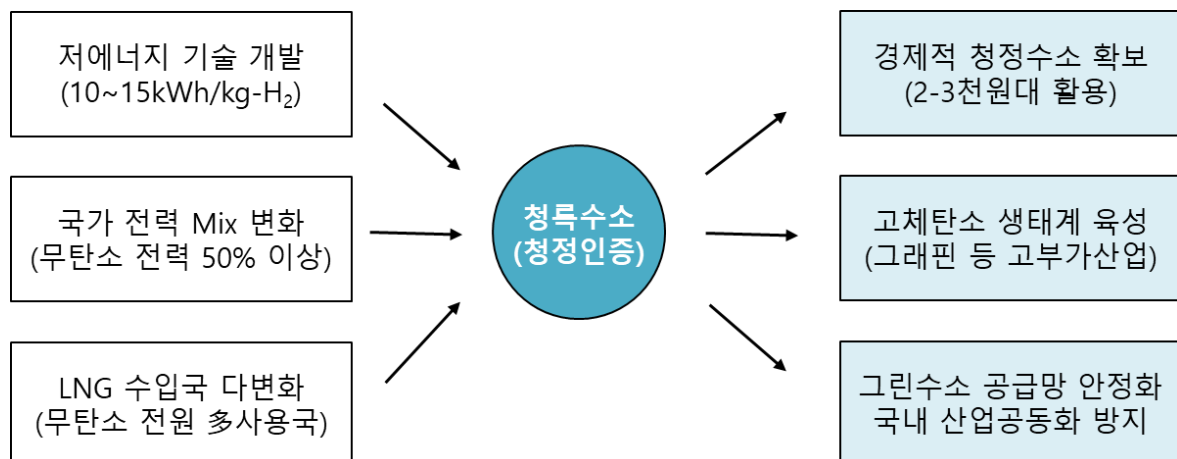
□ 청록수소는 TRL 4~8단계로 아직 기술 주도국이 없는 상황이기 때문에 국가전략기술로 지정 시, 청정수소 생태계에서 리더십 확보가 가능

- 현재 그린과 블루수소만 국가전략기술로 지정되어 있지만, 글로벌 기술 리더십 확보 측면에서 상대적으로 유리한 청록수소의 신규 등록이 필요
 - ‘국가전략기술’ 제도는 기술 자립 및 공급망 리스크 대응 차원의 전략성이 높은 분야에 대해 세제·재정·인허가 등 전방위 지원을 제공

□ 청정수소 인증기준 달성을 목표로 기술개발을 추진하면, 그린수소와 공존하면서 청정수소와 고체탄소 생태계를 리딩하는 핵심 역할이 될 것

- 청정수소 인증 확보 전부터 메탄열분해 및 고체탄소 재활용 기술에 주목한 다양한 정책을 지원해, 청정수소 인증기준 달성을 위해 지원하고 산업 생태계를 조성하려는 현실적인 접근이 필요
 - 특히, 청록수소는 고체탄소의 특성과 용도에 따라 플라즈마, 금속촉매, 용융염 등 다양한 기술의 병렬적인 개발이 필요하기 때문에 고체탄소 활용처와 연계된 다양한 혁신기술에 대한 국가 차원의 전략적 지원이 중요

【 그림 8 】 청록수소의 청정수소 인증을 위한 조건 및 파급효과



- 청정수소 인증 기준에 일시적으로 미달되더라도 그레이수소 대비 탄소저감효과가 입증된다면, 관련된 성과에 대한 인센티브를 한시적으로 부여하는 등의 방안을 고려
 - 미국의 Industrial Demonstration Program 등 탄소저감 실증사업에 수소 공급과 같은 신기술이 적용되면, 청정수소 인증과 무관하게 투자비(CAPEX)를 지원하는 프로그램 등을 검토
- 또는 청정수소 인증 기준을 합리적 기준 하에서 한시적으로 완화하는 방안도 검토
 - 예를 들면 고체탄소가 산업적으로 활용된다면 수소의 단순 부산물을 넘어서 'Co-product'로 간주할 수 있음
 - 이 경우 수소와 발생된 탄소의 질량비(1:3) 또는 수소와 산업적으로 활용된 탄소의 질량비에 따라 CO₂ 배출량을 배분하는 것이 타당하기 때문에 청록수소 생산과정에서 배출되는 CO₂가 감소
 - 기존에는 청록수소 생산 시에 발생하는 고체탄소를 부산물(By Product)로 간주하여 CO₂가 할당되지 않고 WtG 과정에서 배출되는 모든 CO₂를 청록수소에 할당하였기 때문에 청정수소 인증기준 이상의 CO₂가 배출

(2) 기술개발부터 실증사업까지 집중적 지원 체계 구축

- 청록수소는 고순도가 필요하지 않은 산업 및 발전용으로 적합하기 때문에 산업단지와 연계된 실증사업을 통해 사업화 스피드를 강화
 - 실증사업을 통해 청록수소와 고체탄소의 대량 생산기술을 확보하면 활용업체가 수용할 수 있는 수준까지 생산원가 하락이 기대
 - 청록수소 1만 톤에 고체탄소 3만 톤이 생산되기 때문에, 고체탄소의 품질 향상과 활용성을 위해 다양한 업체와 기술개발 및 실증사업을 추진
- 수소 시범도시 등과 연계하여 기술개발을 넘어 실증까지 지원을 확장
 - 기술개발을 넘어 실증-인증-상용화까지 이어지는 전주기 지원을 받는다면, 청록수소에 대한 글로벌 기술의 주도권 선점이 가능할 것으로 기대

5. 종합 및 시사점

- 전환기를 맞은 수소경제 시대를 맞아 수소경제 3.0으로 전진하기 위해서는 자생적 수소 생태계 구축이 중요하며, 수요기업이 선호하는 수소기술에 대한 지원 강화가 중요한 시점
 - 탄소중립 시장이 글로벌 규제에 의해 태동되었지만, 현실화를 위해서는 민간과 수요기업이 선호하는 유망 기술에 대한 지원 체계 마련이 중요
- 탄소중립의 궁극적 기술인 그린수소와 함께 저탄소 연료인 LNG와 연계된 다양한 수소기술의 확보 전략이 중요하며, 블루수소보다 기술 주도권 확보에 유리한 청록수소에 관심이 필요
- 청록수소가 미래 고부가가치 산업의 중요 원료인 고체탄소와 같이 성장하는 기술임을 감안한다면, 그린수소 전의 브릿지 기술을 넘어 청정수소 생태계의 중요 축으로 성장할 것으로 기대

이 자료에 나타난 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고자료]

[보고서/논문]

고등기술연구원(2025.03), 청록수소 생산 동향 및 전망

국토교통부(2023.09), 대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 기획

미래에셋증권(2024.10), 수소경제: 임박한 변곡점, 주인공은 수전해

산업통상자원부(2019.01), 수소경제 활성화 로드맵

산업통상자원부(2021.11), 제1차 수소경제 이행 기본계획

산업통상자원부(2025.03), 제11차 전력수급기본계획(2024~2038)

에너지경제(2025.03), 뱀이 이무기되어야 할 때, 수소경제 3.0으로 전환하자

월간수소경제(2024.03), 청정수소 인증제, 어떻게 운영되나

일본 경제산업성(2023.06), 수소기본전략

KOTRA(2024.12), 중국 탄소섬유, 공급 과잉에 가격하락, 우리 수출기업의 기회요인은?

한국가스공사(2024.12), 가스산업 12월호

한국에너지기술연구원(2022.12), 청록수소 생산을 위한 촉매 후보군 및 고효율/저탄소 공정 개념설계안 도출

IEA(2024.10), Global Hydrogen Review 2024

Roland Berger(2021.10), Hydrogen transportation: The key to unlocking the clean hydrogen economy

The European Parliament and the Council(2024.06), Directive (EU) 2024/1788

The European Parliament and the Council(2024.06), Regulation (EU) 2024/1789

U.S. Department of the Treasury(2025.01), Credit for Production of Clean Hydrogen and Energy Credit

U.S. Department of Energy(2025.01), Guidelines to Determine Well-to-Gate Greenhouse Gas (GHG) Emissions of Hydrogen Production Pathways using 45VH2-GREET Rev. January 2025

[홈페이지]

국제에너지기구 (www.iea.org)

산업통상자원부 (www.motie.go.kr)

에너지경제연구원 (www.keei.re.kr)