

GREET 모델을 활용한 철강 제조 공정 개선이 온실가스 배출에 미치는 영향

김정희¹⁾ · 조성인²⁾ · 정환수³⁾ · 임윤성³⁾ · 박수한^{*2)}

건국대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 건국대학교 기계 · 로봇 · 자동차공학부²⁾ · 국립환경과학원 모빌리티환경연구센터³⁾

Analysis of Impact of Steel Manufacturing Process Improvement on Greenhouse Gas Emission Using the GREET Model

Junghee Kim¹⁾ · Seongin Jo²⁾ · Hwansoo Chong³⁾ · Yunsung Lim³⁾ · Suhan Park^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Konkuk University, Seoul 05029, Korea

²⁾School of Mechanical, Robotics, and Automotive Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

³⁾Mobility Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research,
42 Hwangyeong-ro, Seo-gu, Incheon 22689, Korea

(Received 8 May 2025 / Revised 13 June 2025 / Accepted 1 July 2025)

Abstract : As global concerns about climate change intensify, the decarbonization of the steel industry, accounting for approximately 7 % of global greenhouse gas emissions, has become increasingly essential. In Korea, the world's sixth-largest steel producer, steel production contributes to about 15 % of the nation's total greenhouse gas emissions. This study assessed the carbon emissions profile of Korea's steel production using the life cycle assessment (LCA) methodology and quantitatively assessed potential emission reductions by adopting low-carbon technologies, including electric arc furnace and hydrogen-based direct reduced iron, by applying the GREET model. The results indicate that hydrogen-based direct reduced iron (H-DRI) can reduce emissions by up to 0.89 tCO₂-eq per ton of crude steel compared to the conventional Blast Furnace Basic Oxygen Furnace route. Scenario-based simulations incorporating 2030 projected power mix data suggest that combining hydrogen-based production with electric arc furnace expansion could lead to up to a 41 % reduction in emissions. These findings offer strategic insights for facilitating the Korean steel industry's sustainable transition under international regulatory frameworks, such as the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM).

Key words : Blast furnace-basic oxygen furnace, BF-BOF(고로-전로), Electric arc furnace, EAF(전기로), Natural gas-based direct reduced iron, NGDRI (천연가스환원제철), Hydrogen-based direct reduced iron, HDRI(수소환원제철), Greenhouse gas emissions, GHG emissions(온실가스 배출)

Nomenclature

BF-BOF : blast furnace-basic oxygen furnace
EAF : electric arc furnace
DRI : direct reduced iron
NGDRI : natural gas-based direct reduced iron
HDRI : hydrogen-based direct reduced iron
CO₂ : carbon dioxide
CH₄ : methane
N₂O : nitrous oxide

1. 서론

기후 변화는 국제 사회에서 해결해야 할 가장 시급한 사회 · 환경문제이다. 이를 해결하기 위한 글로벌 협력의 일환으로 2015년 체결된 파리협정에서는 지구 평균 기온 상승을 산업화 이전 대비 1.5 °C 이하로 제한하는 것을 목표로 설정하였다.¹⁾ 이에 따라 각국은 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contributions, NDC)를 제출하고 구체적인 감축 계획을 수립하였다.²⁾ 이러한 배경으로 산업 부문에서의 온실가스 감축은 기후변화

*Corresponding author, E-mail: suhanpark@konkuk.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

대응의 핵심 과제로 자리 잡고 있다.³⁾

그 중 철강은 건설, 자동차, 가전, 기계 등 다양한 분야에서 필수 소재로 사용되고 있으며, 전 세계 온실가스 배출량의 약 7%를 차지하는 대표적인 에너지 집약 소재이다.³⁾ 그 중에서도 내연기관차와 전기차에 들어가는 철강 제품의 온실가스 배출량은 각각 56.4%, 22.1%로 온실가스 배출량이 집중되어 있다는 것을 알 수 있다.⁵⁾ 특히, 탄소 중심의 고로 기반 생산 방식은 온실가스 배출량이 많다. 철강 산업의 탄소 배출량 저감을 위한 기술적, 정책적 대응이 필요하다.

한국은 세계 6위의 철강 생산국으로, 철강 산업은 국내 제조업 중 온실가스 배출 비중이 높은 분야이며, 국가 전체 배출량의 약 15%를 차지하고 있을 뿐만 아니라 자동차 산업에서도 내연기관 차량 기준 약 63.8% 온실가스 배출량을 차지하고 있다.^{4,5)} 고로-전로(Blast furnace-basic oxygen furnace, BF-BOF)방식은 철강 생산의 주요 공정으로 널리 사용되고 있는데, 이 방식은 철광석을 코크스 환원제로 고온에서 선철을 생산하는 고로 공정과 생성된 선철에 산소를 주입해 강철로 전환하는 전로 공정으로 구성된 전통적인 제철 경로이다. 특히, 고로 공정에서 발생하는 온실가스 배출량은 전체 철강 생산 공정 중 약 52.4 ~ 54.5%를 차지하는 것으로 보고되고 있다.⁶⁾ 이는 한국이 2050년 탄소중립 목표를 달성하기 위해 철강 부문의 탈탄소화 전략을 필수 과제로 설정하게 한다.⁶⁾

뿐만 아니라, 유럽연합이 도입한 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)는 한국 철강산업에 직접적인 영향을 미치고 있다. CBAM은 철강, 시멘트, 알루미늄 등 탄소집약산업을 대상으로 수입 제품의 내재 탄소 배출량에 따라 관세를 부과하는 제도이며, 이는 EU의 2050년 탄소중립 달성을 위한 정책 수단 중 하나이다.⁷⁾ 2022년 기준, CBAM 대상 품목 중 한국 철강이 차지하는 비중은 약 89.3%로 매우 높아, 해당 제도의 영향을 직접적으로 받을 가능성이 크다.⁸⁾ 이로 인해, 한국 철강산업의 수출 경쟁력 유지를 위해 탈탄소화는 필수 전략이 된다. 철강은 여전히 자동차 차체 소재 등 주요 부품으로 활용되고 있으며, 철강 생산의 탈탄소화는 자동차의 전과정 배출량에 직접적인 영향을 미친다. CBAM 규제가 도입됨에 따라, 철강의 배출 강도는 자동차 부품 수출의 간접적 경쟁력에도 영향을 미칠 수 있어, 철강 생산 과정의 환경성과 자동차 산업의 지속가능성은 밀접하게 연계되어 있다.

CBAM은 수입 철강의 탄소 배출량을 평가하는 기준으로서 정량적이고 비교가능한 배출 데이터를 요구하는데, 이때 활용되는 대표적 분석 도구가 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)이다. LCA는 원료 채굴부터 제

조, 사용, 폐기까지 전 과정에 걸쳐 온실가스를 포함한 환경영향을 정량적으로 분석할 수 있으며, 정책 대응과 환경 관리의 근거 자료로 활용된다. 특히 LCA의 시스템 경계(System Boundary) 설정은 배출량 평가의 정확도를 결정하는 핵심 개념으로, 철강 생산에서 발생하는 주요 배출 공정을 체계적으로 파악할 수 있게 한다.

이러한 분석 결과는 한국 철강산업의 구조 및 공정 특성을 고려한 감축 전략 수립의 기초가 된다. 대표적인 탈탄소 기술 중 하나로 수소환원제철(Hydrogen-based Direct Reduced Iron, H-DRI)이 있으며, 이는 화석연료 기반 환원제(CO)를 수소(H₂)로 대체하여 환원 부산물로 이산화탄소(CO₂)가 아닌 물(H₂O)만을 부산물로 배출함으로써 공정 내 탄소 배출량을 획기적으로 줄일 수 있다.⁹⁾ 수소 환원공정은 기존 고로 공정의 본질적 문제를 해결할 수 있는 기술로 주목받고 있으며, 주요 철강사들도 이를 핵심 전략으로 채택하고 있다.

포스코는 2022년 기업시민보고서를 통해 2028년까지 수소환원제철의 상용화를 목표로 연구개발을 추진하고 있다고 밝혔다.¹⁰⁾ 이는 한국 철강 산업이 탄소중립 흐름에 대응하고 미래 수출 경쟁력을 확보하기 위한 전략적 행보로 해석된다.

선행연구를 Table 1에 나타내었다. Kim 등,¹¹⁾ Shahabuddin 등,¹²⁾ Kazmi 등¹³⁾과 같이 철강의 고로 및 전기로 기반 제철 공정뿐만 아니라 수소환원제철의 온실가스 배출과 에너지 소비에 대한 LCA 연구는 다수 진행되어 왔으나, 한국 철강산업을 대상으로 주요 공정별 온실가스 배출 특성을 비교하고, 국내 제도 및 통계를 반영한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구는 공정흐름에서 온실가스 차이를 파악하여 철강 산업의 환경 영향을 최소화하고, 국내 제철 공정별 온실가스 배출 특성을 정량적으로 분석하고, 이를 통해 수소환원제철 도입 시 온실가스 배출량의 변화에 대해 정량적으로 제시하고자 한다.

Table 1 Comparative Table on Decarbonization of the Steel Industry

Study	Main focus	Technologies
Kim et al. ¹¹⁾	Tech-policy-society integrated review	Hydrogen, CCUS, EAF, carbon tax, social factors
Shahabuddin et al. ¹²⁾	Techno-economic assessment of hydrogen steelmaking	H-DRI, plasma, biomass, EAF
Kazmi et al. ¹³⁾	Process systems engineering view	Hydrogen, CCUS, electrification, waste heat, integration

2. 연구 방법

본 연구에서는 조강 제품을 대상으로 1 ton 생산 시 발생하는 온실가스 배출량을 전과정평가 기반으로 산정하였다. 배출량 계산은 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O를 대상으로 하였으며 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)는 IPCC 6차 보고서(AR6, 2021)에서 제시한 1, 29.8, 273을 각각 적용하였다.¹⁴⁾

전과정평가는 미국 아르곤 국립연구소(Argonne National Laboratory)의 GREET(Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) ver. 2023 프로그램을 활용하였다.¹⁵⁾ GREET은 LCA 기반 평가 도구로, 공정 기반 데이터베이스인 GaBi 및 Ecoinvent와 달리, 전 과정 에너지 흐름에 따른 모델링을 할 수 있는 장점이 있으며, 다양한 연료 경로 및 기술 변화에 따른 민감도 분석에 유리하다. GREET 모델은 특정 공정에서 발생하는 총 온실가스 배출량을 계산할 때, 해당 공정에 투입되는 원료가 최종 제품으로 전환되기까지의 전 과정에서 발생하는 관련 온실가스 배출을 모두 합산하는 방식을 사용하는데, 총 배출량은 공정에서 소모되는 에너지의 양과 각 에너지원 또는 활동에 해당하는 배출계수를 곱한 후, 이들을 모두 더하여 산출한다.

$$Total\ emission = \sum (Energy\ use \times Emission\ Factor)$$

주요 배출원 구성은 세 가지로 구성되어 있는데, 첫째, 연소 온실가스 배출량(Combustion GHG)은 공정 내에서 연료를 직접 연소하는 과정에서 발생하는 배출을 포함하며 두 번째로, 비연소 온실가스 배출량(Non-combustion

GHG)은 연소 외의 활동, 예를 들어 연료의 누출, 환원 반응 중의 부반응 등에서 발생하는 간접적 배출을 의미한다. 따라서 위의 2가지 온실가스 배출량을 모두 합한 값이 최종 온실가스 배출량이다.

철강의 전체적인 공정효율은 GREET을 따랐으나, GREET은 미국 중심 데이터를 기반으로 설계되어 있어 국내 실정에 맞는 입력 데이터를 추가 및 수정하게 된다. 이를 위해 철강 생산 과정에 대해 Choi 등¹⁶⁾을 통해 국내 연료 공정 효율 등 연료에 대한 정보를 수정하였으며, 한국전력공사 2023년 전력믹스 등 국가 데이터¹⁷⁾를 활용하였다.

2.1 시스템 경계

시스템 경계는 전과정평가에서 분석 대상의 범위를 결정하는 개념으로 Fig. 1은 World Steel 보고서의 시스템 경계 범위를 재구성한 것이다.¹⁸⁾ ‘Cradle to Gate’는 원료 채굴부터 제조 공장에서 제품이 출하될 때까지의 환경 영향을 평가하는 시스템 경계를 의미한다.

본 연구에서 전과정평가의 시스템 경계는 제품 선정 후 원자재 채굴, 수송부터 제품 출고 전까지의 범위(Cradle to gate)를 설정하여 온실가스 배출량을 산출하였다.

2.2 철 원료 비중에 따른 시나리오

수소환원제철과 천연가스환원제철은 철강산업의 탄소 배출을 줄이기 위한 중요한 기술이다. 수소환원제철은 재생 가능한 에너지원에서 생산되는 그린수소로 생성된다면, 이 기술은 온실가스 배출량이 “0”에 도달할

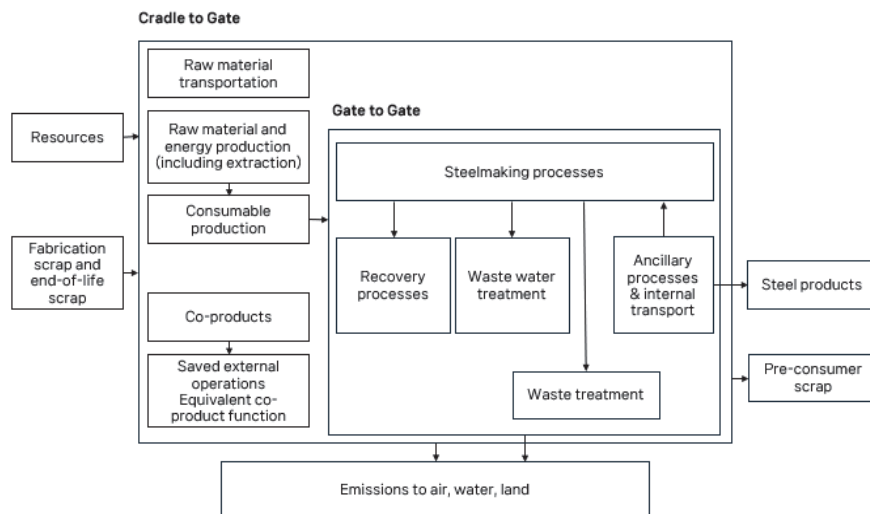


Fig. 1 System boundary in steel¹⁸⁾

수 있어 기후 변화 완화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

반면, 천연가스 환원제철은 천연가스를 환원제로 사용하며, 이산화탄소와 메탄을 부산물로 발생시킨다. 천연가스를 사용하는 공정은 기존 고로 공정보다 적은 탄소를 배출하지만, 여전히 온실가스를 배출하므로 완전한 탈탄소화에는 한계가 있다. 그럼에도 천연가스를 이용한 공정이 수소를 사용하는 공정에 비해 경제적으로 유리하다.

따라서 두 기술이 철강 산업의 전체 온실가스 배출에 미치는 영향에 대해 정량적으로 분석하는 연구가 필요하다. 수소와 천연가스를 각각 사용하는 공정의 탄소 배출 감축 효과를 비교하고, 장기적인 탈탄소화 경로를 제시하는 시나리오 분석이 필요하다.

본 연구는 수소환원제철과 천연가스환원제철에 사용되는 철 원료의 비중을 따라 두 가지 시나리오(A, B)로 설정하여 계산을 수행하였다.

시나리오 A는 직접환원철을 100% 활용하는 방식이다. 이는 고순도 철강을 생산하는 데 적합하지만, 상대적으로 높은 에너지가 필요하고 원료 비용이 증가할 수 있다. 시나리오 B는 직접환원철 75%와 철 스크랩 25%를 혼합하여 사용하는 방식으로, 철강 생산의 탈탄소화를 위한 전력 중 하나인 철 스크랩 활용도를 높이는 방식을 반영하였으나 고로 및 전기로 공정에서 철 스크랩의 혼합 비율은 일반적으로 기술적 제약으로 인해 약 25~30% 수준으로 제한된다고 보고되고 있다.²⁸⁾ 이에 따라 산업 적용성을 고려하여 철 스크랩 비중을 25%로 설정하였다. 이를 통해 다양한 적용 시나리오를 통해 환경적 효과 및 기술 경제성을 복합적으로 평가하고자 하였다.

2.3 2030 전력 및 공정 변화에 따른 시나리오

한국의 전력수급기본계획은 중장기적으로 전력의 수요와 공급을 예측하기 위해 수립되었다. 전력수급기본계획은 국가 차원의 전력 수요 전망, 발전원별 설비 계획, 송배전 인프라 확충, 온실가스 감축 목표 등을 통합적으로 조율한다.¹⁹⁾ 전력수급기본계획은 2002년 제1차 계획이 수립된 이후부터 한국의 전력 정책 방향성과 에너지믹스 구성에 지대한 영향을 미쳐 왔다.¹⁹⁾ 특히, 철강 산업은 제조 공정에서 막대한 전력과 에너지를 소비하는데, 이는 한국전력의 전력 수급에 직접적 영향을 미친다.²⁰⁾ 이러한 맥락에서 전기로 기반 공정은 고로 대비 온실가스 직접배출이 적지만, 대신 막대한 전력을 소모하므로 해당 전력이 친환경적인 발전원에서 생산되었는지가 전체 탄소 배출에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 석탄, 가스 등 화석연료 기반 발전 비중이 줄고, 재생에너지 및 저탄소 에너지원의 비중이 확대될 경우, 전력 부문에서

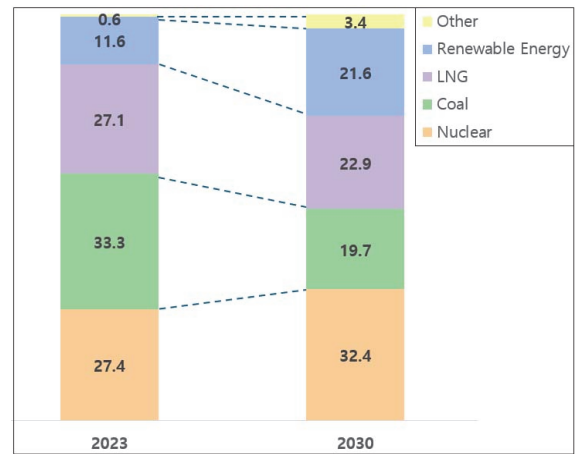


Fig. 2 Power mix for 2023 and 2030 according to Korea's 10th basic electricity supply and demand plan

의 탄소 배출이 크게 감소할 수 있다. IPCC 제5차 평가보고서에 따르면 석탄 발전의 평균 온실가스 배출계수는 약 820 gCO₂e/kWh, 천연가스 발전은 약 490 gCO₂e/kWh로 나타나는 반면, 풍력 발전은 약 11 gCO₂e/kWh, 태양광 발전은 약 41 gCO₂e/kWh, 원자력 발전은 약 12 gCO₂e/kWh로, 저탄소 에너지원의 배출계수는 화석연료 기반 발전 대비 낮기 때문이다.²⁹⁾ 따라서 청정 전원의 구성 비율은 온실가스 배출을 실질적으로 감축의 핵심 변수라 할 수 있다. 그래서 2030년 전력수급기본계획에 따른 온실가스 배출량을 알아보았다.

또한, 환원 제철 기술의 도입 비율을 10%씩 증가시켜 S1부터 S9까지 총 9단계의 시나리오를 설정하여, 천연가스 환원 제철 및 수소 환원 제철과 기존 공정의 혼합 가능성 및 효과를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 철 생산 공정

철 생산 공정은 크게 고로 공정, 전기로 공정, 그리고 최근 주목받고 있는 수소, 천연가스 환원 공정으로 나눌 수 있다. Fig. 3은 GREET의 공정을 도식화한 것이다. Fig. 3(a)-(d)에 각각 고로, 전기로 및 수소 환원 공정 흐름도를 나타내었다.

3.2 철광석 채굴 및 수송

우리나라는 호주, 브라질, 남아프리카공화국 등으로부터 철광석을 주로 수입하고 있다. 이들 국가에서 한국까지의 수송 거리 및 수입 비중은 Table 2에 나타내었다. 수송 거리의 최종값은 수입 비중에 따라 가중 평균하여 나타내었다.

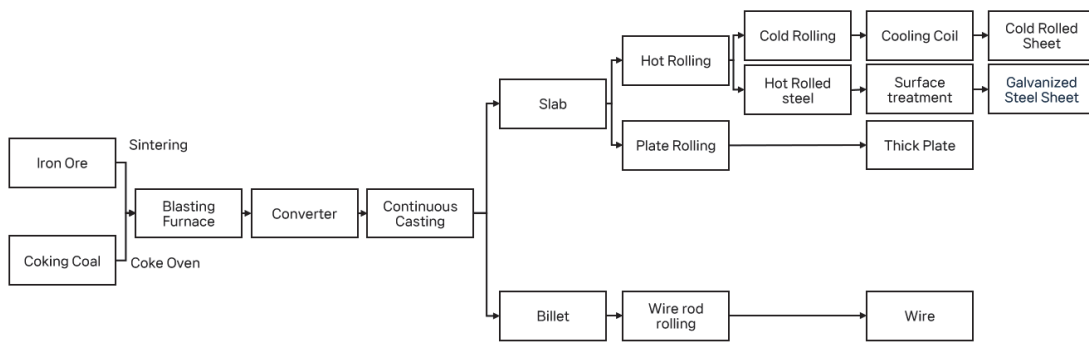
Table 2 Countries exporting iron ore to South Korea

Importing country	Import volume (Mt) ²²⁾	Ratio (%)	Distance (km) ²³⁾
Australia	49,070,803	71.9	8,376.6
Brazil	8,151,611	11.9	21,075.8
Republic of South Africa	4,809,732	7.0	15,045.7
Canada	4,031,221	5.9	8,622.91
Etc.	2,223,475	3.3	13,280.2
Total	68,286,843	100	10,536.5

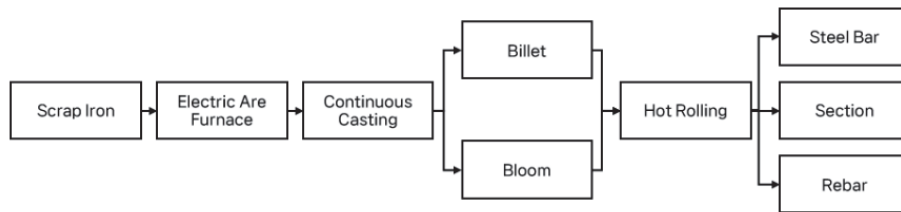
철광석 1 ton 채굴에 따른 온실가스 배출량은 0.012 tCO₂eq으로 호주의 선행 연구 결과를 사용하였다.²¹⁾ 채굴된 철광석은 Ocean tanker로 운송되며, Ocean tanker의 화물 탑재량은 200,000 ton, 엔진출력은 25,000 hp로 가정하였다. 수송은 편도 기준으로 계산되었으며, 철광석 채굴 및 수송과정에서 온실가스 배출량은 철광석 1 ton당 0.031 tCO₂eq으로 산출되었다.

3.2.1 고로 공정

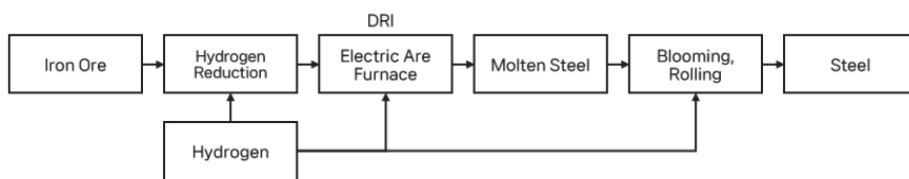
Fig. 4는 GREET을 활용하여 고로-전로 기반 철강 공정에서 열연 및 냉연 제품을 생산할 때 개별 공정별 온실



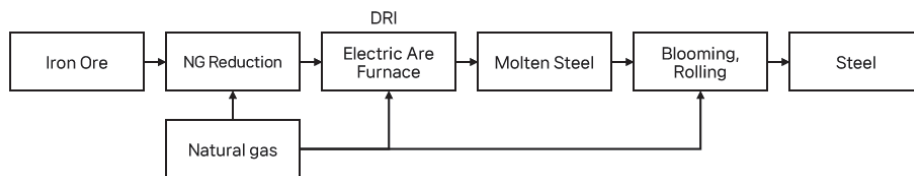
(a) Blast furnace flow chart



(b) Electric arc furnace flow chart



(c) Hydrogen reduction process flow chart



(d) Natural gas reduction process flow chart

Fig. 3 Process flow diagrams of each steelmaking process in (a), (b), (c) and (d)

가스 배출량을 산출한 결과를 나타낸 것이다. 고로 공정은 철광석을 석탄 기반 환원제로 제련하는 방식으로 대량 생산이 가능하고 경제성이 높아 철강 산업에서 오랫동안 사용되어왔다.

포스코 기업시진보고서에 따르면, 조강 1 ton을 생산하기 위해 철광석 1,490.25 kg, 석탄 693.59 kg, 전기 60.06 kWh, LNG 34.9 Nm³가 사용된다.¹⁰⁾

이 값을 토대로 철강의 Fig. 4의 'A'부분인 채굴부터 조강 제품 생산 과정에서 조강 1 ton 당 1.63 tCO₂eq이 배출된다. 이는 소결 및 용광로 공정에서 높은 에너지가 소비되고, 석탄을 환원제로 사용하면서 CO₂ 배출이 발생하기 때문이다.

열연 제품과 냉연 제품의 온실가스 배출량의 차이가 발생하는데, 이는 냉연 제품 생산 공정에서는 냉간 압연 공정이 추가되면서 온실가스 배출량에서 차이가 나타난다.

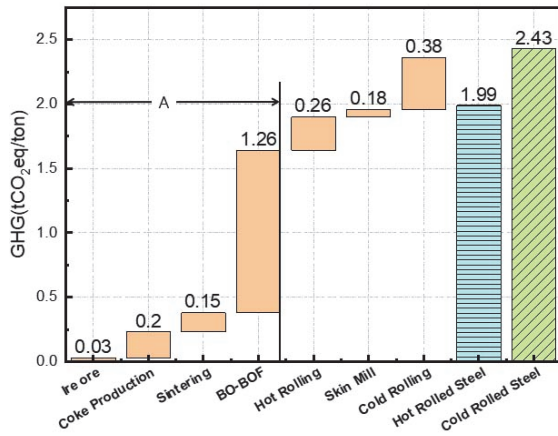


Fig. 4 Greenhouse gas emissions by Korean Hot rolled and cold rolled product processes

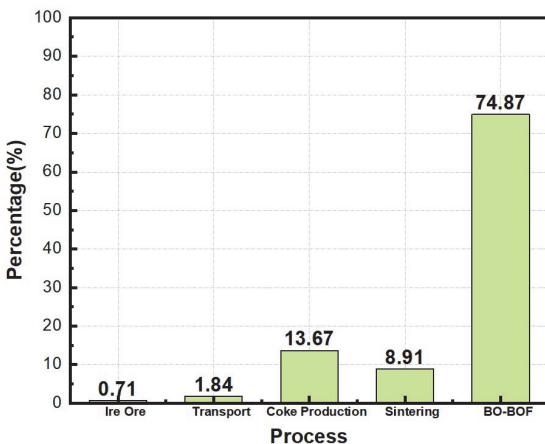


Fig. 5 Proportion of greenhouse gas emissions by process during steel production

다. 그래서 조강에서 열연 및 냉연 공정을 거쳐 최종 제품으로 가공하는 경우, 열연 제품 1 ton 생산 시 온실가스 배출량은 1.99 tCO₂eq, 냉연 제품의 1 ton 생산 시 온실가스 배출량은 2.43 tCO₂eq으로 증가한다.

또한, 이 데이터를 바탕으로 채굴부터 조강 생산까지 각 공정의 배출 비중을 Fig. 5에 정리하였으며, 고로 공정이 전체 온실가스 배출량의 약 74.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 이에 따라, 철강 산업의 온실가스 배출량 감축을 위한 방안으로 고로 공정을 대체하는 전기로 공정의 확대와 수소 기반 환원 기술의 도입이 중요한 전략으로 제시되고 있으며, 다음 절에서는 이 두 기술의 온실가스 배출량에 대해 다루고자 한다.

3.2.2 전기로 공정

전기로 공정은 주로 재활용된 철 스크랩을 사용하며, 기존 고로 공정에 비해 에너지 소비와 탄소 배출이 적은 방식으로 평가받고 있다. 이에 따라 여러 선진국에서 전기로 공정을 도입하여 온실가스 감축 효과를 기대하고 있다.

포스코가 발표한 '2023 지속가능경영보고서'에 따르면 2020년 철 스크랩 사용량은 688만ton으로 보고되었다.²⁴⁾ Table 3은 한국에서 철 스크랩을 수입하는 국가를 나타낸 표로 2023년 기준, 가장 많은 철 스크랩을 수입한 국가는 일본이며, 각 국가에서 포항까지의 거리를 기준으로 수송 거리를 산정하였다. 또한, 기타 국가의 거리는 미국 다음으로 철 스크랩을 많이 수입하는 태국을 기준으로 설정하여 수입 비중과 거리를 가중 평균하여 계산하였다. 수송 선박은 철광석 운송과 같은 제원을 사용하였다. 국내에서의 철 스크랩 수송 거리는 제철소에서 제공받는 것으로 가정하여 제외하였다. 앞의 과정을 통해 철 스크랩 수송 과정에서 발생하는 철 스크랩 1 ton을 수송하는 과정에서 발생하는 온실가스 배출량은 0.008 tCO₂eq으로 계산되었다.

전기로 공정에서 철강 1 ton을 생산하는 데 약 400 ~ 600 kWh의 전기에너지가 사용되며, 본 연구에서는 중간 값인 500 kWh를 적용하였다.²⁵⁾ 전기로는 철스크랩을 주

Table 3 Overseas transportation of steel scrap

Importing country	Import volume (Mt) ²²⁾	Ratio (%)	Distance (km) ²³⁾
Japan	2,950	67.0	1,320.5
Russia	625	14.2	831.6
USA	496	11.3	8,467.3
Etc.	329	7.5	4,926.3
Total	4,400	100	3,748.3

원료로 사용하며 전기를 이용하여 용해하는 동시에 별도의 채굴 및 정련 공정이 없기 때문에 전기로 공정의 주요 배출원은 전력 사용량을 통해 좌우된다. 그래서 최종적으로 전기로 공정을 통해 발생하는 온실가스 배출량은 조강 1 ton당 0.39 tCO₂eq으로 나타났다.

3.2.3 수소환원 및 천연가스 공정

수소환원공정의 철광석 채굴은 고로공정의 채굴 및 운송과정과 일치한다고 가정하였으며, 선행연구를 통해 직접환원철을 펠렛화시킬 경우 1 ton의 조강을 생산하기 위한 철 0.99 ton과 전기 22 kWh를 사용하였다.²⁶⁾ 또한, 직접환원철 생산공정은 1 ton의 직접환원철 생산을 위해 천연가스 2.18 kg, 전기 1,548.7 kWh가 사용되었다.²⁷⁾ 앞의 값을 사용하여 에너지 사용량을 계산하였으며, 수소환원제철과 천연가스환원제철에서 사용되는 공급 원료의 비율은 GREET의 비율을 사용하였다.

본 연구에서는 수소환원제철에서 철 원료의 조합에 따라 두 가지 시나리오(시나리오A 직접환원철 100 %, 시나리오 B 직접환원철 75 %, 철 스크랩 25 %)를 설정하였다. 철 스크랩을 사용하는 경우에는 전기로의 공정을

사용하여 시나리오 비율에 맞춰 온실가스 배출량을 계산하였으며, 각 시나리오별로 온실가스 배출량을 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6은 직접환원철을 사용하여 철강제품을 생산할 때 배출되는 온실가스를 나타내는 그래프로 천연가스환원제철에서는 온실가스 배출량이 직접환원철만 사용하여 생산 시 조강 1 ton당 1.24 tCO₂eq, 직접환원철 75 %, 철 스크랩 25 %를 사용하는 경우 조강 1 ton당 1.02 tCO₂eq이 나왔다. 수소환원제철에서는 직접환원철만 사용하여 생산 시 조강 1 ton당 0.86 tCO₂eq, 직접환원철 75 %, 철 스크랩 25 %를 사용하는 경우 조강 1 ton당 0.74 tCO₂eq이 나왔다.

Table 4와 같이 수소는 연소하거나 철광석을 환원할 때 수증기만을 배출하기 때문에 탄소 배출을 제거할 수 있다. 반면, 천연가스는 CH₄ 형태로 직접 사용되거나 개질하여 CO 및 H₂를 만들어 사용되기 때문에 천연가스 환원 반응 시 이산화탄소가 발생하는데, 이 과정을 통해 수소 환원 제철과 천연가스 환원 제철 공정에서 온실가스 배출량이 차이가 발생한다.

이 결과를 통해 천연가스 및 수소환원제철에서 모두 철 스크랩을 사용한 경우 직접환원철만 사용하는 경우보다 각각 17.7 %, 14 % 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 수소환원제철은 천연가스환원제철보다 온실가스 배출량이 감소한다는 사실을 확인하였다.

Table 4 Differences between hydrogen reduction ironmaking and natural gas iron making

Category	Hydrogen-based reduction	Natural gas-based reduction
Reducing agent	Hydrogen (H ₂)	Natural gas (CH ₄)
Reduction reaction	Fe ₂ O ₃ +3H ₂ →2Fe+3H ₂ O	Fe ₂ O ₃ +3CO→2Fe+3CO ₂ (CH ₄ →CO+H ₂)
Main by-product	H ₂ O	CO ₂

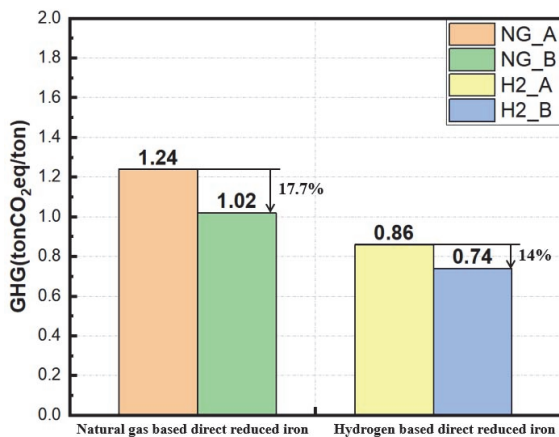


Fig. 6 Greenhouse gas emissions of steel by 2050 carbon neutrality scenarios

3.3 시나리오별 감축 계획

3.3.1 2030년 전력수급 기본계획

Fig. 7은 2030년 전력믹스 변화로 인한 온실가스 감소율을 나타내었다. 온실가스 감소율은 2023년 전력발전믹스에 비해 2030년 전력발전믹스로 변환 시 천연가스 환원제철에서는 약 28.2 ~ 29.6 %, 수소환원제철에서 약 40.9 ~ 41 %의 감소율을 보인다. 또한, Fig. 7의 결과를 통해 한국 철강 산업에서 화력발전 중심의 발전에서 친환경 발전으로의 전환하는 것이 온실가스 배출량 감축에 필수적인 요소임을 알 수 있다.

3.3.2 시나리오에 따른 온실가스 감축

수소환원 제철은 상용화 및 연구 단계에 있어 즉각적인 적용이 어려우므로, 고로 기반 공정을 천연가스환원제철 및 수소환원제철로 전환하는 과정을 Fig. 8과 아래식에 나타낸 바와 같이 10 % 단위(S1 ~ S9)의 점진적 시나리오로 민감도 분석을 같이 진행하였다.

이를 통해 환원제철의 단계적 도입이 온실가스 배출 저감에 미치는 영향을 분석하였다. 모델링 결과, 천연가스환원제철 및 수소환원제철 공정 도입할 경우 철강 1

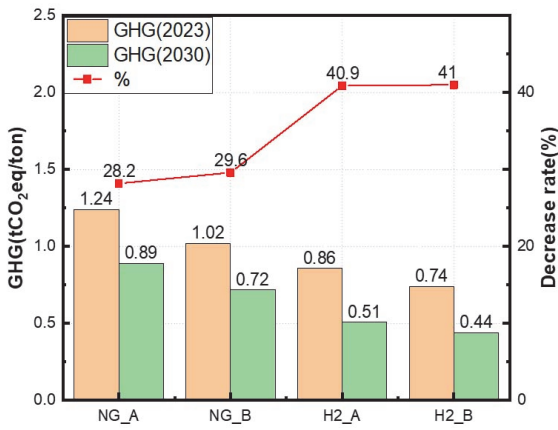


Fig. 7 Greenhouse gas emission reduction rate according to the 2023 power mix and the 2030 basic power supply and demand plan

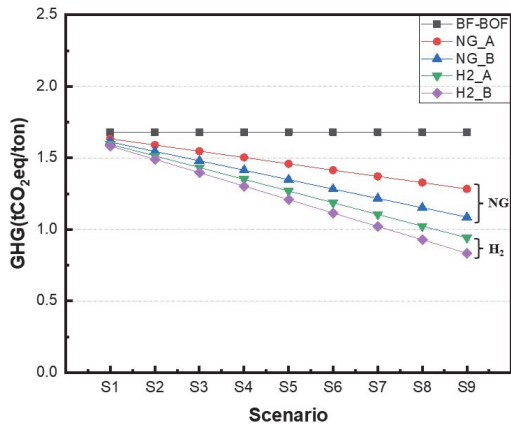


Fig. 8 Greenhouse gas emissions from natural gas reduction ironmaking and hydrogen reduction ironmaking according to scenarios

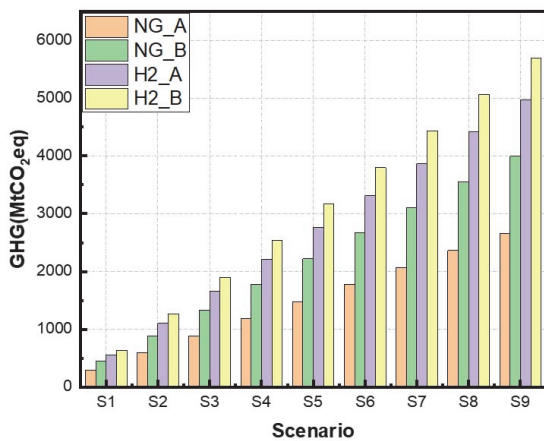


Fig. 9 Annual average greenhouse gas emissions reductions during steel production according to scenario

ton 생산당 온실가스 배출량은 기존 고로 공정 대비 최소 2.4%에서 최대 49.1%까지 감축될 수 있는 잠재력이 있는 것으로 나타났다.

또한, Fig. 9는 5년 연평균 철강 생산량인 67,492천ton을 기준으로 Fig. 8 시나리오에 맞춰 온실가스 배출량을 계산하였다.³⁰⁾ 앞으로도 연평균 철강 생산량을 유지한다면, 천연가스 환원제철 및 수소환원제철 상용시 최대 5,406.1 MtCO₂eq/year의 온실가스 배출량을 감축할 수 있다.

3.3.3 민감도 분석

본 연구에서는 철강 제조 공정별 온실가스 배출량에 대한 입력 변수의 민감도를 정량적으로 평가하기 위해 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 수행하였다. 분석에는 고로, 전기로, 수소 환원제철, 천연가스 환원제철 총 네 가지 공정을 포함하였으며, 각 공정에 대해 GREET 모델을 기반으로, 주요 온실가스인 CO₂, CH₄, N₂O의 전력배출계수를 ±10%가 출력 변수인 온실가스 배출량에 미치는 영향을 민감도 지수(Sensitivity Index, SI)를 통해 산출하였다. 민감도 지수는 다음의 식을 기반으로 계산하였다.

$$SI = \frac{\Delta Y}{2 \cdot Y \cdot \Delta X}$$

SI: 민감도 지수

Y: 기준이 되는 출력 변수의 값

ΔX: 입력 변수(X)의 변화량 (0.1)

ΔY: 출력 변수(Y)의 변화량 (Y_{+10%} - Y_{-10%})

본 식은 민감도 분석 대상 변수의 상대적 변화를 반영

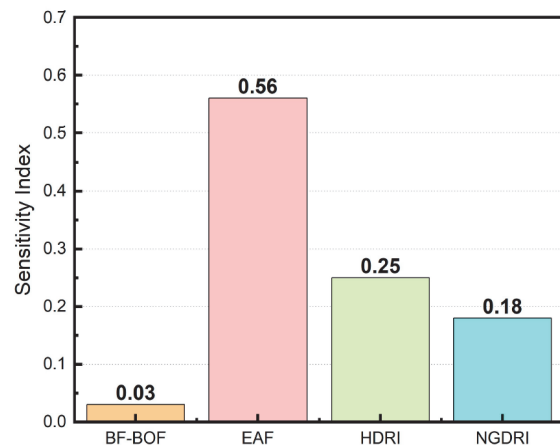


Fig. 10 Sensitivity indices of each process based on sensitivity analysis

하여, 변화율 기반의 영향도를 비교 가능하게 한다.

해당 수식을 기반으로 분석한 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 전기로공정이 0.56으로 가장 높은 민감도를 보였다. 이는 전기로 공정에서 전력 사용을 통한 온실가스 배출량이 크기 때문이며, 고로 공정은 0.03으로 상대적으로 가장 낮은 값을 보여, 고로 공정은 입력 변수의 변화에 따른 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 각 공정별 전력 배출계수의 변화에 얼마나 민감하게 반응하는지를 제시하였다.

4. 결론

본 연구는 철강의 공정에 따른 온실가스 배출량을 계산하였다. 또한 연구 결과를 아래와 같이 설명하였다.

- 1) 고로 공정은 조강 1 ton당 1.63 tCO₂eq, 열연 제품 1 ton당 1.99 tCO₂eq, 냉연 제품의 1 ton당 2.43 tCO₂eq의 온실가스를 배출하며, 특히 소결 및 용광로 공정에서 전체 배출의 약 74.9 %를 차지하는 높은 온실가스를 배출한다.
- 2) 전기로 공정은 철 스크랩을 사용함으로써 고로 대비 약 66 % 수준의 온실가스를 절감할 수 있으며, 총 배출량은 조강 1 ton당 0.39 tCO₂eq에 불과하다.
- 3) 수소환원제철은 조강 1 ton당 0.74 ~ 0.86 tCO₂eq의 배출량을 보이며, 고로 대비 최대 55 %까지 감축 효과가 있는 것으로 분석되었다.
- 4) 수소환원제철을 점진적으로 도입하면, 연간 5,406.1 MtCO₂eq 감축 가능성이 있다. 또한, 2030년 전력수급 계획을 적용할 경우, 천연가스환원제철 도입 시 28.2 ~ 29.6 %, 수소환원제철에서는 40.9 ~ 41 %의 온실가스 감축 효과가 예상된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견후속연구지원사업(RS-2023-00208502), 국립환경과학원 교통환경연구소 연구용역사업(NIER-2024-04-02-032), 환경부 지식기반 환경서비스 특성화대학원 지원사업(지속가능제품 설계분야)의 지원을 받아 수행되었다. 지원 기관에 감사드립니다.

References

- 1) UNFCCC, The Paris Agreement, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>, 2025.
- 2) UNFCCC, Nationally Determined Contributions Under the Paris Agreement. Synthesis Report by the Secretariat, <https://unfccc.int/documents/268571>, 2025.
- 3) IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>, 2025.
- 4) KoSIF, Transition to Green Steel in the Korean Steel Industry, 2024.
- 5) J. H. Kim, S. I. Jo, Y. S. Lim, H. S. Chong and S. H. Park, "Comparative Analysis of Material Composition Differences and Greenhouse Gas Emission Impacts in Internal Combustion Engine Vehicle and Electric Vehicle," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.200-201, 2024.
- 6) Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korea, Land, Infrastructure and Transport Carbon Neutrality Roadmap, 2021.
- 7) European Commission, Proposal for a Regulation of The European Parliament and of The Council Establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism, 2021.
- 8) Korea International Trade Association (KITA), KITA Trade Report, Vol.10, 2023.
- 9) IEA, Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking, 2020.
- 10) POSCO, POSCO Sustainability Report 2022, 2023.
- 11) J. S. Kim, B. K. Sovacool, M. Bazilian, S. Griffiths, J. H. Lee, M. Y. Yang and J. Lee, "Decarbonizing the Iron and Steel Industry: A Systematic Review of Sociotechnical Systems, Technological Innovations, and Policy Options," Energy Research & Social Science, Vol.89, Paper No.102565, 2022.
- 12) M. Shahabuddin, G. Brooks and M. A. Rhamdhani, "Decarbonisation and Hydrogen Integration of Steel Industries: Recent Development, Challenges and Technoeconomic Analysis," Journal of Cleaner Production, Vol.395, Paper No.136391, 2023.
- 13) B. Kazmi, S. A. A. Taqvi and D. Juchelková, "State-of-the-Art Review on the Steel Decarbonization Technologies based on Process System Engineering Perspective," Fuel, Vol.347, Paper No.128459, 2023.
- 14) IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2025.
- 15) Argonne National Laboratory and U.S. Department of Energy, GREET Model Version 2023, <https://www.energy.gov/eere/greet>, 2024.
- 16) W. J. Choi, E. J. Yoo, E. S. Seol, M. S. Kim and H. H. Song, "Greenhouse Gas Emissions of Conventional and Alternative Vehicles: Predictions based on Energy Policy Analysis in South Korea," Applied

- Energy, Vol.265, Paper No.114754, 2020.
- 17) KEPCO, Monthly Electric Power Statistics, https://home.kepco.co.kr/kepco/KO/ntcob/list.do?menuCd=FN05030101&boardCd=BRD_000097, 2025.
 - 18) World Steel Association, Worldsteel LCA Eco-profile Global | Organic Coated Steel, 2023.
 - 19) Ministry of Trade, Industry and Energy, 10th Basic Electricity Supply and Demand Plan, 2023.
 - 20) S. I. Jo, Y. S. Lim, H. S. Chong and S. H. Park, “Impact of Energy Upstream Emission Factors on Automobile Cradle-to-Gate Greenhouse Gas Emissions,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.198–199, 2024.
 - 21) N. Haque, “Chapter 20 - Life Cycle Assessment of Iron Ore Mining and Processing,” Iron Ore (2nd Edn.), pp.691–710, 2022.
 - 22) Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Mineral Resources Statistics Portal, <https://www.kigam.re.kr>, 2024.
 - 23) Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Sea Distance Calculator, <https://www.khoa.go.kr/kcom/cnt/selectContentsPage.do?cntId=31307000>, 2024.
 - 24) POSCO, POSCO Sustainability Report 2023, 2024.
 - 25) SRDL, How Much Power Does an Electric Arc Furnace Require? - Sanrui, <https://www.srfurnace.com/how-much-power-does-an-electric-arc-furnace-require.html>, 2024.
 - 26) W. Lv, Z. Sun and Z. Su, “Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Iron Pelletizing Process in China, a Case Study,” Journal of Cleaner Production, Vol.233, pp.1314–1321, 2019.
 - 27) A. Nurdiawati, I. N. Zaini, W. Wei, R. Gyllenram, W. Yang and P. Samuelsson, “Towards Fossil-free Steel: Life Cycle Assessment of Biosyngas-based Direct Reduced Iron (DRI) Production Process,” Journal of Cleaner Production, Vol.393, Paper No.136262, 2023.
 - 28) A. Gurgel, K. Benavides, J. Morris, B. K. Mignone, B. Chapman, H. Kheshgi, H. Herzog, S. Paltsev, “Role of Advanced Steelmaking Technologies in Global Climate Change Mitigation Scenarios,” Journal of Cleaner Production, Vol.513, Paper No.145726, 2025.
 - 29) IPCC, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Annex III Technology-specific Cost and Performance Parameters, Table A.III.2. (IPCC WG3 AR5 Annex III), https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
 - 30) Korea Iron & Steel Association, Crude Steel Production, https://www.kosa.or.kr/statistics/production_2011.jsp, 2025.