

2025 FRE:SC 최종 보고서

산업부문 탄소중립을 위한 공정
및 연료 전환 시나리오 분석
: LEAP 모델 기반 온실가스
배출량 예측

고 려 대 학 교

식 품 자 원 경 제 학 과

하형률(2021140651)

이승훈(2021140663)

최연우(2021140644)

2025 년 08 월 05 일

목차

<제목 차례>

목차-----	2
1. 서론-----	1
1.1 연구의 배경 및 필요성-----	1
1.2 연구 목적-----	1
1.3 연구 범위 및 방법론-----	1
1.4 연구의 기대효과 및 활용 방안-----	1
2. 이론적 배경 및 선행 연구 검토-----	2
2.1 국내 탄소중립 현황-----	2
2.2. LEAP 모형-----	4
2.3. 선행연구 검토-----	5
3. 연구 설계 및 시나리오 구축-----	6
3.1. 분석 대상 산업군 및 감축 기술 정의-----	6
3.1.1. 분석 대상 산업군 현황-----	7
3.1.2. 감축 기술 정의-----	10
3.2. 기준 년도 및 목표 년도 설정-----	11
3.3 시나리오 구성-----	11
3.3.1. BAU(Business As Usual) 기준 시나리오-----	11
3.3.2. 탄소중립 시나리오 -----	11
3.4. 데이터 구축 및 분석 절차-----	12
4. 분석 결과-----	13

4.1 시멘트 산업시멘트 BAU 시나리오-----	13
4.2. 철강 산업-----	15
4.3. 석유화학 산업-----	16
4.4. 제지 산업-----	18
5. 결론 -----	19
5.1. 정책 제언-----	19
5.2. 한계점 -----	22
참고문헌-----	24
부록-----	27

<제 목 차 례>

<그림 1> Modular construction of 2020 Road-map-----	5
<표 1> 에너지 부문 온실가스 배출량-----	8
<그림 2> 석유화학 투입량 추이-----	9
<표 2> 시멘트 BAU 시나리오-----	14
<표 3> 시멘트 2040 시나리오-----	15
<표 4> 철강 BAU 시나리오-----	16
<표 5> 철강 미래 시나리오-----	16
<표 6> 석유화학 BAU 시나리오-----	17
<표 7> 석유화학 2040 년 시나리오-----	18
<표 8> 제지 BAU 시나리오 -----	19
<표 9> 제지 2040 년 시나리오-----	19

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

최근 전 세계적으로 기후 위기에 대한 대응과 탄소중립 실현을 위한 국제적 압력이 강화되면서, 각국 정부는 자국의 온실가스 배출 감축 전략 수립 및 이행을 중요한 정책 과제로 삼고 있다. 한국 역시 2021년 2050 탄소중립을 선언하고, 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 상향 조정하는 등 다각적인 노력을 전개하고 있다. 그러나 국가 전체 온실가스 배출량 중 산업 부문이 차지하는 비중은 약 33.6%에 달하며, 여전히 감축이 가장 어렵고 비용이 많이 드는 부문으로 평가된다. 특히, 국내 산업구조는 철강, 석유화학, 시멘트 등 에너지 다소비형 고배출 제조업 중심으로 구성되어 있어, 획기적인 온실가스 감축을 위해서는 기술적·경제적 타당성을 고려한 전략적 접근이 필요하다.

한정된 정책 자원과 재정적 역량 하에서 국가 차원의 효율적인 감축 전략을 수립하기 위해서는, 어떤 산업이 가장 높은 감축 잠재력을 가지며, 그 산업 내에서도 어떤 공정이나 연료 전환이 효과적인지에 대한 정량적 분석이 선행되어야 한다. 이를 통해 정책적 우선순위를 명확히 하고, 중장기적 투자 방향을 설정하는 것이 탄소중립 이행의 핵심 과제로 대두되고 있다.

1.2 연구 목적

본 연구는 국가 차원의 탄소중립 시나리오를 바탕으로, 국내 산업

부문의 주요 고배출 산업을 대상으로 미래 탄소 배출량을 예측하고, 산업별 감축 잠재력을 비교·분석하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는 시멘트, 철강, 석유화학, 제지 산업을 대표 산업으로 선정하여, 각 산업의 BAU(Business As Usual) 기준 시나리오와 탄소중립 정책 적용 시나리오 간의 온실가스 배출량 차이를 정량적으로 도출하고자 한다. 이를 통해, 각 산업의 연료 전환 및 공정 개선 등 핵심 감축 수단의 효과성을 평가하고, 향후 정책적·재정적 지원이 집중되어야 할 산업 및 감축 수단에 대한 우선순위를 제시하고자 한다.

1.3 연구 범위 및 방법론

본 연구는 산업 부문 중 온실가스 배출량에서 높은 비중을 차지하는 네 개의 대표 산업(시멘트, 철강, 석유화학, 제지)을 분석 대상으로 한다. 각 산업의 에너지 사용 구조와 공정 특성, 기술 변화 가능성을 반영하여 시나리오 기반 배출량 예측을 수행한다.

정량적 분석 도구로는 에너지·환경 통합 모형인 LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning) 모델을 활용하며, 산업별로 BAU 시나리오와 탄소중립 정책 적용 시나리오를 구축한 뒤, 해당 시나리오 간 온실가스 배출량 차이를 통해 감축 잠재력을 산정한다. 또한, 각 산업 내에서 연료 전환(예: 석탄 → LNG, 전기, 수소 등), 공정 전환(예: 원료 대체, 신공정 도입 등) 등의 세부 기술들이 배출량에 미치는 영향을 분석하여, 기술적 감축 수단의 우선순위를 평가한다.

1.4 연구의 기대효과 및 활용 방안

본 연구는 산업 부문 내 탄소중립 달성을 위한 실효성 있는 정책 설계와 투자 전략 수립에 기초 자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다. 산업별 감축 잠재력과 연료 전환 효과를 정량적으로 제시함으로써, 향후 정부가 탄소중립 이행을 위해 정책적·재정적 자원을 효율적으로 배분하는 데 참고할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다. 또한, 각 산업의 특성과 기술 여건을 고려한 정밀 분석 결과는 기업 및 산업계의 중장기적 감축 전략 수립에도 기여할 수 있으며, 실질적인 온실가스 감축 효과를 높이는 데

기여할 수 있을 것이라고 사료한다.

2. 이론적 배경 및 선행 연구 검토

2.1 국내 탄소중립 현황

2.1.1. 전환 부문

원자력 발전의 역할 강화 및 재생에너지 보급 확대를 통해 에너지믹스의 저탄소화가 추진되고 있는 상황이다. 2023년에는 신한울 3·4호기 건설 승인과 같은 원전 재개 움직임이 본격화되었으며, 저수지 수상태양광, 농촌 RE100 모델 도입 등 농업 기반 재생에너지 사업도 활성화되었다. 이를 통해 전환 부문 온실가스 배출량은 전년 대비 약 4.8% 감소한 것으로 추정되어 2년 연속 감축 추세를 유지한 것으로 나타났다. 그러나 고준위 방폐물 특별법 및 해상풍력특별법 등의 입법 지연으로 인해 에너지믹스 전환 속도를 늦추고 있는 상황이다.

2.1.2. 산업 부문

철강·석유화학 등 다배출 업종을 중심으로 민관 협력 기반의 탄소저감 기술 개발(R&D)이 착수되었고, 업종별 협의체 운영을 통해 중소·중견기업 등 민간의 자율적인 감축 노력이 확산되었다. 이에 따라 산업 부문 배출량은 2022년에 이어 2023년에도 소폭 감소한 것으로 추정된다. 그러나, 중소·중견기업 대상 감축설비 지원 예산의 삭감과 탄소차액계약제도(CCfD) 시범사업의 연기로 인해 저탄소 전환에 대한 민간 투자의 부담이 증가하고 있다. 또한 배출권 시장의 가격 불안정이 지속됨에 따라 실질적인 거래 활성화를 위한 구조적 개선이 요구된다.

2.1.3. 건물 부문

건물 부문에서는 공공 부문을 중심으로 재생에너지 설치와 탄소중립 모델 개발이 확대되었으며, 공공환경시설을 대상으로 한 탄소중립 지원 예산도 증가하였다. 민간 부문에서는 에너지절약 융차지원 비율 확대와 히트펌프 보급 지원 확대 등의 제도 개선이 이루어졌다. 다만 민간 건축물의

ZEB 의무화 시행이 2025 년으로 연기되었고, 그린리모델링 이자지원사업의 중단이 예정되어 있어 민간부문 탄소중립 추진력 저하가 우려된다. 또한 건물 부문 배출량은 2020 년 이후 계속 증가하고 있어 2030 년 감축 목표 달 성 에 차 질 이 예 상 된 다 .

2.1.4. 수송 부문

수송 부문에서는 글로벌 경기둔화 속에서도 전기차와 수소차의 누적 보급 대수가 각각 56.5 만 대, 3.4 만 대를 돌파하였고, 충전 인프라도 전년 대비 48.8% 이상 확대되는 등 탈내연기관 기반이 강화되었다. 철도, 항공, 해운 분야에서도 저탄소 연료 전환이 추진되었으며, 친환경 선박 구축 및 철도 운송 확대 등도 병행되었다. 하지만 현재 친환경차 보급이 내연기관차의 실질적 감축으로 이어지지 못하고 있는 것이 문제점으로 지적 되고 있 다 .

2.1.5. 농축수산 부문

농업 분야에서는 화학비료 사용 저감, 저메탄·저단백 사료 도입, 스마트축사 보급 확대 등을 통해 온실가스 감축 기반이 마련되었으며, 규제샌드박스를 통한 바이오차 기술 상용화 기반도 구축되었다. 그러나 농업용 온실가스의 78.9%가 여전히 화석연료에 의존하고 있으며, 재생에너지 보급률은 4%에 불과해 구조적 전환에 대한 요구가 중요 논제로 떠오르고 있다.

2.1.6. 폐기물 부문

폐기물 부문에서는 분리배출 체계 개선, 재활용 수거 기반 확충, 재활용 거점 설치 확대 등으로 폐자원 순환이 활성화되었다. 하지만, 일회용품 보증금제도의 전국 확대 무산 등으로 폐기물 원천감량 정책이 후퇴하고 있어 정책 일관성 유지와 이해관계자와의 적극적인 소통이 요구된다.

2.1.7. 수소 및 CCUS 부문

수소 부문에서는 발전 입찰시장 개설과 청정수소 인증제 도입을 통해 제도적 기반이 마련되었으며, 수소를 국가전략기술로 지정하는 등 수소경제 활성화를 위한 노력이 강화되었다. CCUS 분야에서는 연간 120 만 톤 규모의 이산화탄소 포집 실증이 진행되었고, 관련 법률 제정과 기술로드맵 수립도 병행되었다. 하지만 EU CBAM 및 IMO 규제 대응 차원에서 청정수소 수요가 급증할 것으로 예상되는 반면, 수소 산업 생태계에 대한 구체적인 투자 로드맵이 부족하며, 민간 주도의 기술 상용화를 위한 지원도 제한적이다. CCUS 부문 역시 감축 기여도에 비해 정부 재정 지원 및 기술 실증 규모가 미흡하여, 실질적인 산업화 기반 마련이 요구된다.

흡수원 및 국제감축 부문 산림 및 해양 부문에서는 산림조림, 숲가꾸기, 바다숲 조성 등 탄소흡수원 확충이 추진되었으며, 흡수량 데이터 확보 및 관리 기반도 강화되었다. 국제감축사업에서는 9개국과 협정이 체결되었으며, 국내외 타당성 조사 및 시범사업도 확대되었다. 그러나 기관별로 상이한 탄소흡수량 산정 방식으로 인해 산정·보고·검증(MRV) 체계의 이중 산정 및 누락 가능성이 지적되었고, 국제감축사업은 부처별로 분산 추진되고 있어 시너지 효과가 미흡한 것으로 평가되었다. 이에 따라 관련 거버넌스 재정비 및 협업 기반 강화를 통해 통합적인 이행체계를 마련할 필요가 있다.

2.2. LEAP 모형

2.2.1. LEAP 모형의 구조

LEAP 모형은 상향식(bottom-up) 에너지-배출 시나리오 분석 모델로서, 국가 또는 산업 부문 단위의 에너지 수요·공급, 온실가스 배출, 감축 효과 등을 시나리오 기반으로 분석할 수 있는 시스템이다. 이는 에너지 소비 구조와 감축 기술 적용 여부에 따라 에너지 소비량과 온실가스 배출량 변화를 추적하여 정책 효과를 정량화 하는데 활용된다.

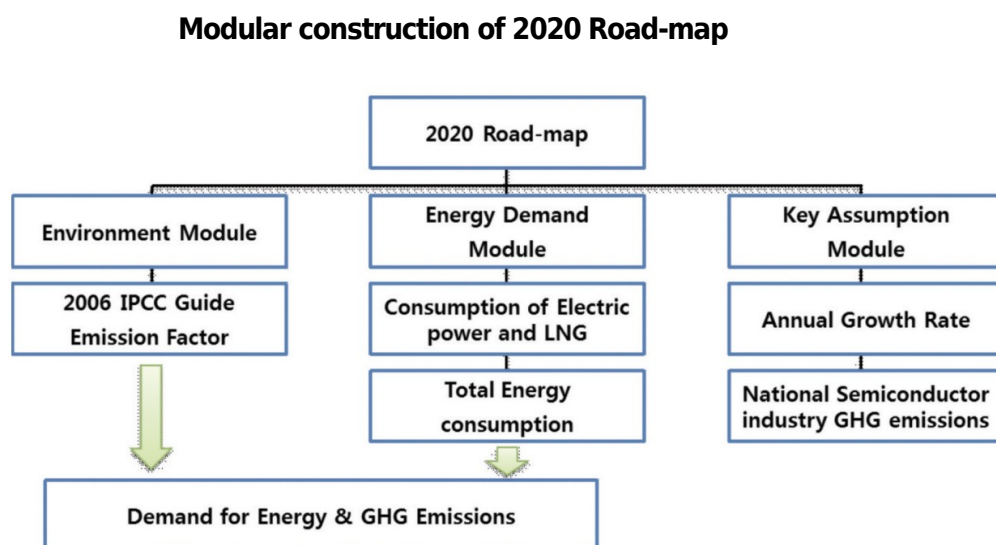


Figure 1. Modular construction of 2020 Road-map(유정화 등, 2012)

LEAP 모형의 구조는 크게 에너지 수요 모듈, 에너지 공급(변환) 모듈, 자원 모듈, 배출계수 라이브러리, 그리고 시나리오 관리 모듈로 구성되어 있다. 먼저, 수요 모듈(Demand Module)에서는 산업, 수송, 건물 등 세부 부문별로 에너지 소비량과 기술 구성을 입력한다. 각 부문에서 사용되는

연료의 종류와 소비량을 기반으로 에너지 사용 행태를 재현한다.

다음으로, 공급 모듈(Transformation Module)은 발전소 등 에너지 생산과 변환 과정에서 발생하는 에너지 손실과 온실가스 배출을 고려한다. 자원 모듈은 원료 에너지의 생산 및 수입량 데이터를 입력하는 역할을 하며, 배출계수 라이브러리를 통해 에너지 소비나 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소, 메탄 등 온실가스 배출량을 자동으로 산출할 수 있다.

마지막으로 LEAP는 시나리오 관리 기능을 통해 BAU(온실가스 감축정책이 없는 기준 시나리오)와 다양한 감축 정책 시나리오를 설정하고, 시나리오별 온실가스 배출 경로와 감축 효과, 에너지 비용 변화를 비교할 수 있도록 지원한다. 이처럼 LEAP 모델은 기술 단위부터 산업 단위, 국가 단위까지 분석할 수 있도록 계층적으로 구성되어 있으며, 시나리오 기반의 정량적 분석이 가능한 것이 특징이다.

2.3. 선행연구 검토

LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning) 모델은 국가 및 지역 수준에서 에너지 소비와 온실가스 배출을 장기적으로 예측하고, 다양한 정책 시나리오의 효과를 정량적으로 분석하는 데 활용되고 있다. 본 장에서는 국내외에서 LEAP 모델을 활용하여 수행된 주요 선행연구를 검토함으로써, 본 연구의 분석 기반을 마련하고자 한다.

먼저, Liang(2019)의 연구는 LEAP 모델을 통해 중국의 전력부문을 대상으로 재생에너지 개발 계획에 따른 에너지 구조 변화와 배출저감 효과, 투자 비용을 분석하였다. 본 연구는 BAU, 재생에너지 계획(REP), 기술발전 포함(REP+) 등 세 가지 시나리오를 구성하여, 2050년까지 재생에너지 설비용량 확대(40.1%), CO₂ 감축, 발전비용 변화 및 한계저감비용(64.53 RMB/tCO₂)을 정량화하였다. 또한, 발전설비 효율 향상과 탄소가격 인상이 재생에너지 확산을 가속화하는 데 효과적임을 제시하였다.

유정화(2012)는 LEAP 모델을 활용하여 세종대학교 캠퍼스의 에너지 수요와 온실가스 배출 현황을 분석하고, LED 조명 교체 및 고효율 기기 도입 등을 통해 감축잠재량을 도출하였다. 통합 시나리오를 통해 예측한 결과 2020년 온실가스 배출량이 14,961 TCO₂eq로 2010년 대비 43.7% 증가한다는 결론이 도출되었고, 세종대학교의 온실가스 배출량은

전력 에너지 사용 저감 활동으로 BAU 대비 약 23.7%의 온실가스 배출량을 줄일 수 있다는 결과를 도출하였다. BAU 대비 통합 시나리오에서는 약 23.7%의 배출 감축이 가능함을 보여주었으며, 대학교와 같은 중규모 시설에서도 LEAP 모델의 활용 가능성을 실증한 사례로 평가된다.

우정호·최경식(2012)의 연구는 부산 소재 A대학교를 대상으로 LEAP 시뮬레이션을 수행하여 BAU, 조명개선, 신재생 확대, 통합 시나리오를 설정하였다. 그 결과, 2020년 기준 통합 시나리오 적용 시 약 5.3%의 온실가스 감축 효과가 도출되었으며, 전력 사용 절감 및 태양광 확대가 단기적인 실현 가능성을 가진 감축 수단임을 입증하였다. 이 연구는 교육시설과 같은 중소규모 건물 단위에서도 LEAP 모델을 활용하여 활동자료 기반의 온실가스 감축 시나리오를 설정하고, 그 효과를 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다. 특히 조명 효율 개선과 태양광 보급이 단기적으로 실현 가능한 기술이라는 점에서, 정책적 도입의 실효성을 뒷받침하는 사례로 평가된다.

마지막으로, 윤영중 (2016)는 서울세관 건물을 대상으로 그린리모델링 시범사업 효과를 분석하였다. BAU, GRE(EHP·단열·LED), BAR(행태개선·태양광), TOT(통합) 시나리오를 구성하고 에너지 수요, 온실가스 감축, 비용 효과를 비교하였다. 분석 결과, TOT 시나리오가 가장 높은 에너지 절감효과(27.3%)와 전력 비용 절감효과(10.5억 원)를 보였으며, 기술 전환이 감축 효과를 보장하지 않음을 보여준 GRE 시나리오는 중요한 반례로 제시되었다.

이들 선행연구는 LEAP 모델이 부문별 정책 시뮬레이션뿐 아니라 실제 프로젝트에 대한 ex-ante 효과 분석 도구로도 유용하며, 기술 간 비용-효과 비교 및 감축 우선순위 설정에 있어 강력한 지원 도구임을 보여준다. 본 연구는 이러한 연구 흐름을 바탕으로, 산업 부문에 대한 MACC 기반 분석과 유상할당 정책 시나리오를 결합함으로써 정책적 실효성과 정합성을 동시에 검토하고자 한다.

3. 연구 설계 및 시나리오 구축

3.1. 분석 대상 산업군 및 감축 기술 정의

본 연구는 탄소중립 시나리오에 기반하여, 국내 고배출 산업을 대표하는 4 개 주요 부문인 시멘트, 철강, 석유화학, 제지 산업을 분석 대상으로 선정하였다. 각 산업 부문은 국내 총 온실가스 배출에서 큰 비중을 차지하며, 탄소중립 목표를 달성하기 위해서 이 부문에 대한 구체적인 감축 전략과 기술 도입이 필수적이다

3.1.1. 분석 대상 산업군 현황

에너지 부문 온실가스 배출량

에너지 부문 온실가스 배출 - 기준 시나리오(REF)

						(단위: 백만 tCO ₂ eq)			
						비중 (%)		증가율 (%)	
						2023	2050	00-23	23-50
주요지표									
총배출	415	569	541	486	412	-	-	1.4	-1.2
에너지당 배출(톤/toe)	2.69	2.29	2.15	2.00	1.86	-	-	-0.7	-0.8
GDP 당 배출(톤/백만원)	0.42	0.25	0.21	0.17	0.13	-	-	-2.1	-2.4
인구당 배출(톤/인)	8.84	11.01	10.55	9.71	8.75	-	-	1.0	-0.8
에너지상품별 온실가스 배출									
석탄	167	273	233	180	128	48	31	2.2	-2.8
석유	207	176	163	146	124	31	30	-0.7	-1.3
천연가스	41	121	145	160	160	21	39	4.8	1.0
부문별 온실가스 직접 배출									
산업	149	188	205	205	194	33	47	1.0	0.1
수송	70	96	84	66	48	17	12	1.4	-2.6
가정	29	28	26	24	21	5	5	-0.2	-1.0
서비스	33	16	16	15	14	3	3	-3.0	-0.5
에너지산업	14	20	20	19	16	3	4	1.4	-0.7
발전/열생산	120	221	189	157	119	39	29	2.7	-2.3

주: 전환부문의 온실가스 간접배출은 자가소비 및 유통손실에 의한 배출량을 의미

2023 년 산업 부문의 온실가스 직접 배출량은 국내 총 배출량 569 백만 tCO₂eq 중 188 백만 tCO₂eq 로 약 31.5%로 나타난다. 산업 부문의 온실가스 직접 배출량은 2000 년부터 2023 년까지 연평균 약 1.0%의

증가율을 보여왔으며, 2023년 이후 전망 기간(2023~2050년)에는 증가세가 둔화되어 연평균 0.04% 수준에 그칠 것으로 예상된다. 이는 전체 에너지 수요가 증가하더라도 전기, 가스, 재생에너지 등 배출계수가 낮은 에너지의 소비 비중이 확대됨에 따라 산업 부문 내 직접 배출이 점차 억제되는 구조로 전환되고 있음을 의미한다.

실제로 산업 부문 직접 배출량은 2023년 207.6 백만 tCO₂eq에서 2030년대 초반 약 226.7 백만 tCO₂eq까지 증가한 뒤, 점차 감소세로 전환되어 2050년에는 210 백만 tCO₂eq 수준에 이를 것으로 전망된다. 이는 2018년 배출량 대비 2030년에는 2.4% 증가, 2050년에는 4.8% 감소한 수준이다. 하지만, 현재의 정책 기반(REF 시나리오)만으로는 정부가 제시한 2030년 및 2050년 온실가스 감축 목표 달성이 어려울 것으로 분석된다. 이에 정부는 철강·석유화학·시멘트분야에 대해 2023년 5월 탄소중립 기술혁신 전략로드맵을 수립하여 구체적인 임무와 목표를 제시하고 있다.

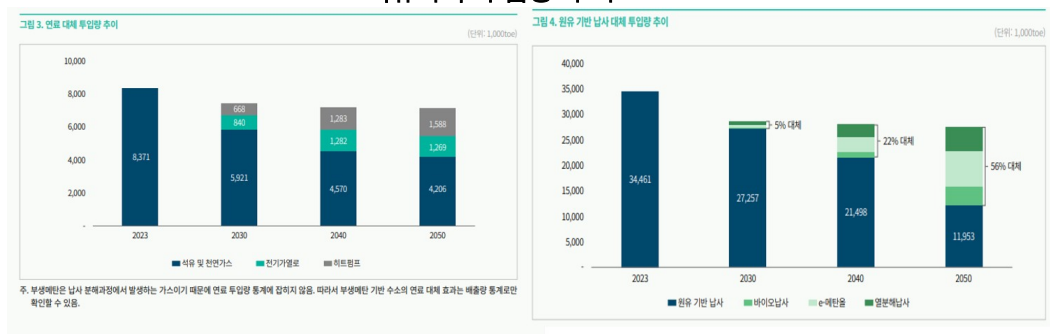
시멘트

시멘트 생산량은 2022년도 기준 5106.2 만톤으로 확인되었다. 총 생산에 쓰인 각 연료별 비율은 석탄 45.2%, 석유류 16.3%, 가스류 4.57%, 전력 13.2%, 열 에너지 0.645%, 기타 20.1%로 확인 되었다.

석유화학

석유화학 산업의 경우, 2022년 기준 총 생산량은 7,369.7 만톤으로 확인되었다. 이 중 기초 유분 및 원료는 3,269.7 만톤, 중간 원료는 1,377.1 만톤, 합성수지·합성원료·기타제품 등은 2,722.9 만톤으로 구성된다. 석유화학 공정에 사용된 에너지원별 소비 비중은 다음과 같다. 석유류가 전체의 74.8%를 차지하며 주된 연료로 사용되고 있고, 이어서 전력 12.4%, 열에너지 5.09%, 가스류 4.18%, 기타 바이오매스 2.47%, 석탄 1.08% 순으로 확인되었다. 이는 석유화학 산업이 에너지 수요 측면에서 석유 기반 연료에 높은 의존도를 보이며, 전력 및 열과 같은 간접 에너지 형태도 다량 활용하고 있음을 보여준다.

석유화학 투입량 추이



석유화학 산업 탄소중립 로드맵에 따르면, 2023년 기준 총 연료 투입량은 약 8,371 천 TOE로, 이 중 대부분이 석유 및 천연가스 연료에 해당한다. 그러나 2030년에는 이 수치가 5,921 천 TOE로 감소하고, 전기가열로 및 산업용 히트펌프 도입으로 전력 840 천 TOE와 히트펌프 668 천 TOE 등이 연료를 본격 대체하기 시작한다. 2040년에는 저탄소 에너지 전환이 더욱 가속화되어, 석유 및 천연가스는 4,570 천 TOE로 줄어들고, 전기 및 히트펌프는 각각 1,282 천 TOE와 1,283 천 TOE로 상승한다. 2050년에는 석유 및 천연가스 사용량이 4,206 천 TOE로 소폭 감소하는 가운데, 전기는 1,269 천 TOE, 히트펌프는 1,588 천 TOE로 상승하여 전체 연료 투입 구조에서 재생가능 에너지 기반 연료의 비중이 크게 확대될 것으로 전망된다.

또한, 석유화학산업에서는 2023년 기준, 원료의 모든 비율을 원유 기반 납사가 차지하고 있다. 석유화학 산업의 원유 기반 납사 사용은 2023년 34,461 천 TOE에서 2050년 11,953 천 TOE로 감소할 것으로 전망되며, 이 기간 동안 바이오납사, e-메탄올, 열분해납사 등 저탄소 원료의 도입이 확대되어 2050년에는 전체 납사 투입의 56%가 대체될 것으로 예상된다. 이러한 변화는 단순한 연료 대체를 넘어, 제품 생산 단계에서부터 저탄소 원료 전환을 추진하는 구조적 전환으로, 석유화학 산업의 탄소중립 달성에 핵심적인 역할을 할 것으로 평가된다.

제지 산업

제지 산업의 경우, 2022년 기준 총 생산량은 1,125 만톤으로 확인되었다. 세부 품목별로는 신문용지 50.5 만톤, 인쇄용지 242 만톤, 포장용지 229.1 만톤, 위생용지 5.47 만톤, 백판지 1,47.2 만톤, 골판지원지 5,64.2 만톤, 기타 429.8 만톤 등으로 구성되어 있다. 2022년 제지 산업의 에너지 소비 총량은 약 1,920.7 천 TOE이며, 에너지원별 사용 비율은 다음과 같다. 가장 높은 비중을 차지한 에너지원은 전력 43.36% 그 다음으로 열에너지 18.57%, 가스류 13.31%, 석유류 13.12%, 기타 연료 11.63% 순으로 확인되었다.

철강 산업

철강 산업(조강)의 경우, 2022년 기준 총 생산량은 약 6,584.6 만톤으로 확인되었다. 이 산업은 대표적인 에너지 다소비 업종으로, 석탄 중심의 에너지 구조를 유지하고 있다. 총 에너지 소비 중 석탄이 84.5%로 압도적인 비중을 차지하고 있으며, 그 외에 전력 8.0%, 가스류 6.62%, 열 0.55%, 석유류 0.33% 순으로 나타났다.

철강 산업 탄소중립 로드맵에 따르면, 2018년 대비 2050년의 온실가스 배출량을 95%까지 감축한다. 이 목표의 주된 수립 방식은 수소 환원 제철 기술 개발 및 철스크랩 전기로 활용을 통해 유연탄 연료 사용을

수소와 전기로 전환하는 것이다. 현재, 전로강 67%, 전기로강 33%의 비율로 산업을 운영 중에 있지만, 중장기적으로 전로강 생산 비중을 수소 환원 제철 공정과 철스크랩 전기로 공정으로 대체하는 경로를 이행 중에 있다.

3.1.2. 감축 기술 정의

각 산업 부문에 대한 탄소중립 전환 경로를 참고하여, 탄소 배출 저감을 위한 주요 기술을 정의하였다.

시멘트

- 고체화석연료(유연탄)를 폐합성수지 60%, 수소열원 40%로 완전 대체
- 석회석 원료 대체율 12% 및 혼합재 비중 20%로 확대
- > 배출량 53% 감축

철강

- 탄소계 공정(고로+전로)을 수소환원제철로 100% 대체
- 철스크랩 전기로 조강 확대
- > 배 출 량 95% 감 축

석유화학

- 기존 공정을 전기가열로, 바이오매스 보일러로 대체하여 기존 연료 57% 전환
- 바이오납사, 수소 열분해 납사를 활용하여 기존 납사 52% 전환
- > 배출량 73% 감축

제지

- 기존 석유 및 가스 연료를 전력으로 대체

-산업용 히트펌프 등 고효율 설비 도입

3.2. 기준 년도 및 목표 년도 설정

-기준 년도: 2022 년

데이터 확보 여건을 고려해 2022 년을 데이터 분석의 기준으로
선 정

-목표 년도 : 2040 년

2050 탄소 중립 시나리오로 나아가기 위한 중간 점검 단계로,
탄소 중립 달성 기한이 임박한 상황에서의 향후 정책 제언을 위해
2040 년으로 선정

3.3 시나리오 구성

본 연구는 국내 산업의 탄소 배출 저감 잠재력 파악을 위해
시나리오를 구성하여 비교 분석을 진행하고자 한다.

시나리오 구성은 다음과 같다.

3.3.1. BAU(Business As Usual) 기준 시나리오

기준 시나리오는 기준년도 이전 10 개년 산업별 생산량 변화 추이
하에서, 기준년도의 에너지 집약도와 배출계수가 변화하지 않고
유지되는 시나리오이다. 산업별 생산량 변화 추이는 선형 회귀 분석을
통해 예측하였다. 또한, 기준년도 이후로 추가적인 에너지 저감 정책을
이행하지 않는 시나리오이다.

3.3.2. 탄소중립 시나리오

탄소중립 시나리오는 기준 년도 이전 10 개년 산업 생산량 변화 추이 하에서, 기준 년도 이후 에너지 집약도가 지속 변화하는 시나리오이다. 산업별 생산량 변화 추이는 선형 회귀 분석을 통해 예측하였다. 또한, 기준 년도 이후로 국가 탄소중립 시나리오에 따른 정책과 감축 기술 투자가 이행되는 시나리오이다.

3.4. 데이터 구축 및 분석 절차

본 연구는 LEAP 모델을 활용하여 산업 부문을 중심으로 2022 년과 2040 년의 에너지 소비 구조 및 에너지원단위를 비교·분석하였다. 산업 부문은 크게 시멘트, 석유화학, 철강, 제지 산업으로 세분화하여 각 산업군의 활동수준(Activity Level), 에너지원별 사용량, 에너지원단위를 정량화 하였다. Activity Level 은 해당 연도의 총 생산량 혹은 수송량 등의 물리적 단위로 정의된다. 에너지원별 소비량은 각 산업에서 사용한 에너지 사용량을 TOE 단위로 산정하는 것이고 에너지원단위 (Energy Intensity)는 활동 수준 1 단위당 소비된 에너지양으로, TOE / 활동량으로 계산하였다.

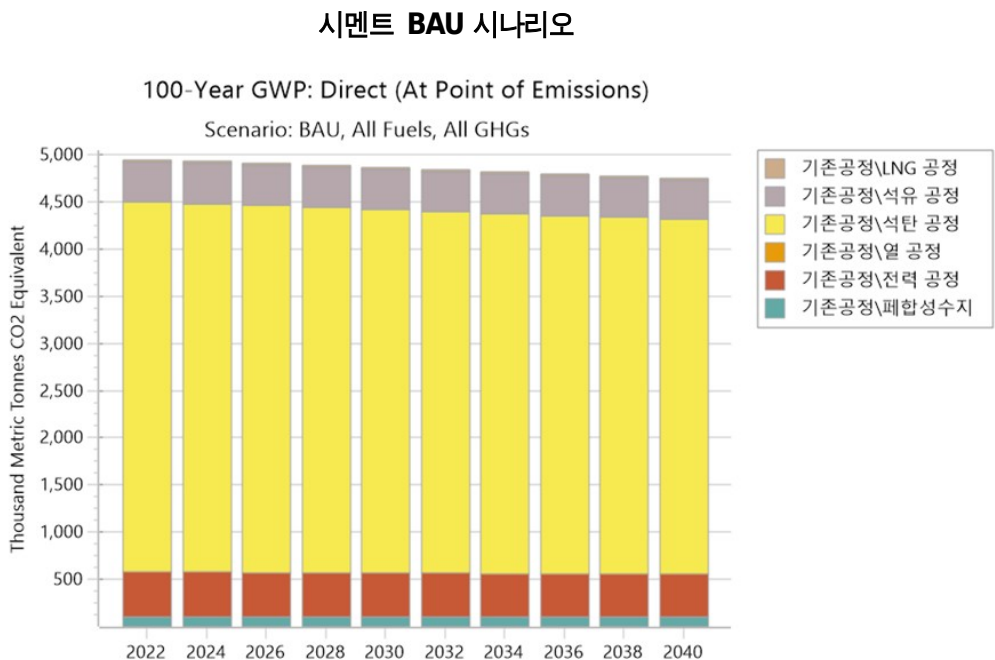
각 부문별 생산량은 한국시멘트협회, 한국제지연합회, 한국화학산업협회, KOSIS 국가통계포털 등 공신력 있는 자료를 통해 찾아냈고, 에너지원별 소비량은 EG-TIPS 에너지온실가스종합플랫폼을 통해 구하여 각각의 비율을 도출하였고, 이 데이터들을 사용하여 에너지원단위를 각 에너지원별로 계산하여 LEAP 모델에 입력하는 절차를 겪었다.

이어서 본 연구에서 사용된 온실가스 배출량 산정을 위한 배출계수는, 한국에너지공단의 온실가스종합정보센터에서 제공하는 공식 배출계수 자료를 바탕으로 구축하였다. 해당 사이트에서 제공되는 부문별·연료별 배출계수를 기준으로 하였으며, 각 에너지원에 대한 기본 배출계수와 산정 방식은 탄소지도의 공개 방법론을 참고하여, 국제 표준과 국내 통계의 정합성을 확보하였다. LEAP 모델 내에서는 이 배출계수를 연료 단위(TOE) 당 이산화탄소 환산량 (tCO₂-eq)으로 변환하여 적용하였으며, 부문별 감축 효과를 정량적으로 평가하는 기반자료로 활용되었다. 이와 같은 공신력 있는 출처 기반의 계수 적용은 모델의 신뢰성과 정책 시뮬레이션의 정확도를 제 고 하 는 데 기 여 한 다 .

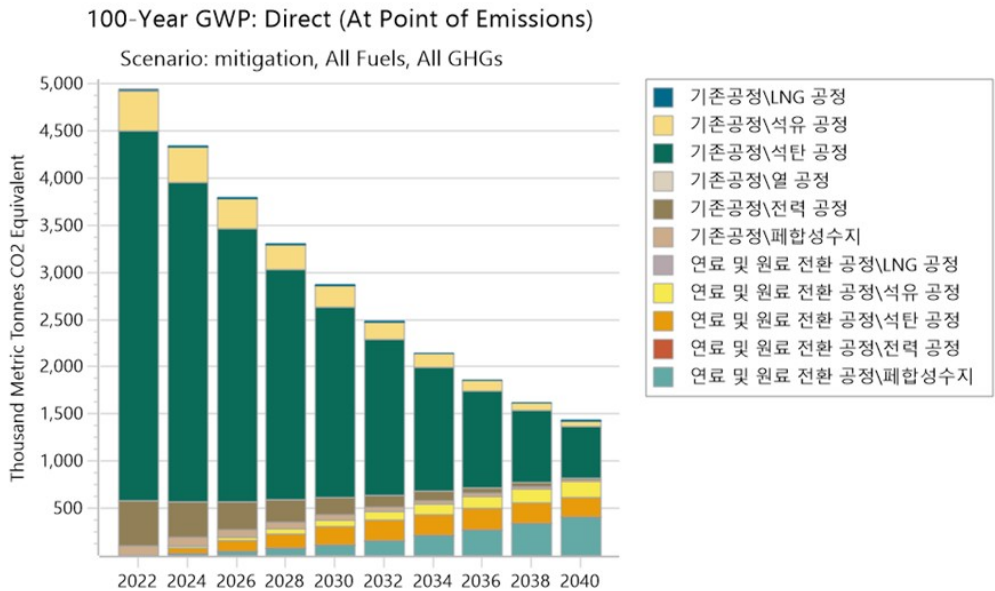
4. 분석 결과

Leap 모델을 통해 예측한 기준년도부터 목표년도까지의 기준 시나리오 및 탄소중립 시나리오 산업별 배출량 추이는 다음과 같다.

4.1 시멘트 산업시멘트 BAU 시나리오



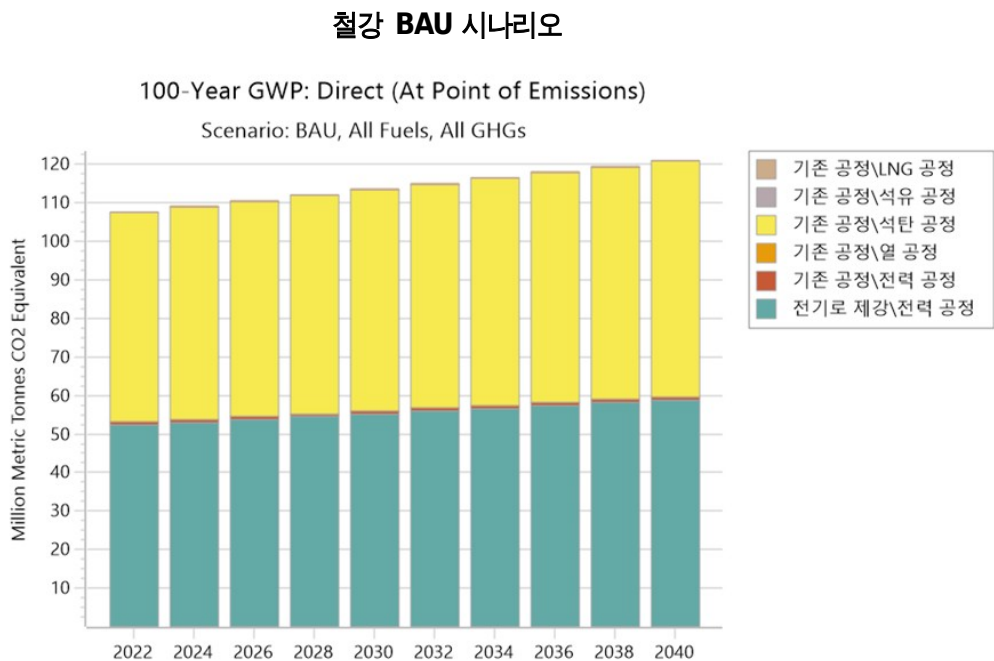
시멘트 2040 시나리오



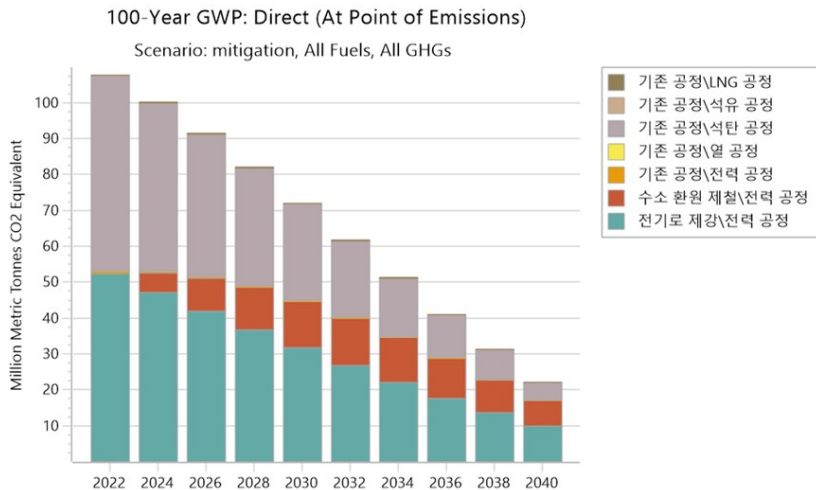
시멘트 산업은 기준 시나리오 하에서 생산량이 2022년 5110만 톤에서 2040년 4900만 톤으로 소폭 감소함에 따라 전체 배출량이 2022년 4,947,800 tCO₂eq에서 2040년 4,748,000 tCO₂eq로 감소하였다.

반면, 탄소중립 시나리오 하에서는 배출량이 2022년 4,947,800 tCO₂eq에서 2040년 1,431,000 tCO₂eq로 감소하여 총 3,516,800 tCO₂eq의 감축 효과가 확인되었다. 목표년도 기준 BAU 시나리오 대비 3,317,000 tCO₂eq 감축하는 것으로 예측되었다. 세부적으로, 기존 석탄 기반 공정이 폐합성수지 및 수소 열원 등 저탄소 공정으로 대체되면서 전체 감축량의 96%에 해당하는 효과를 창출한 것으로 분석된다.

4.2. 철강 산업



철강 미래 시나리오

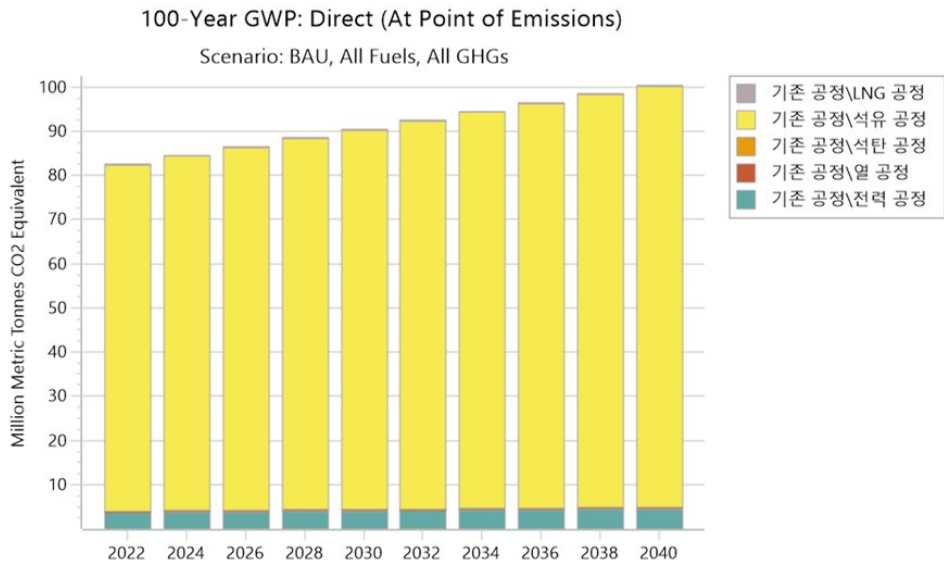


철강 산업은 기준 시나리오 하에서 생산량이 2022년 65,800,000톤에서 2040년 74,000,000톤으로 증가함에 따라 전체 배출량이 2022년 107,700,000 tCO₂eq에서 2040년 121,000,000 tCO₂eq로 증가하였다.

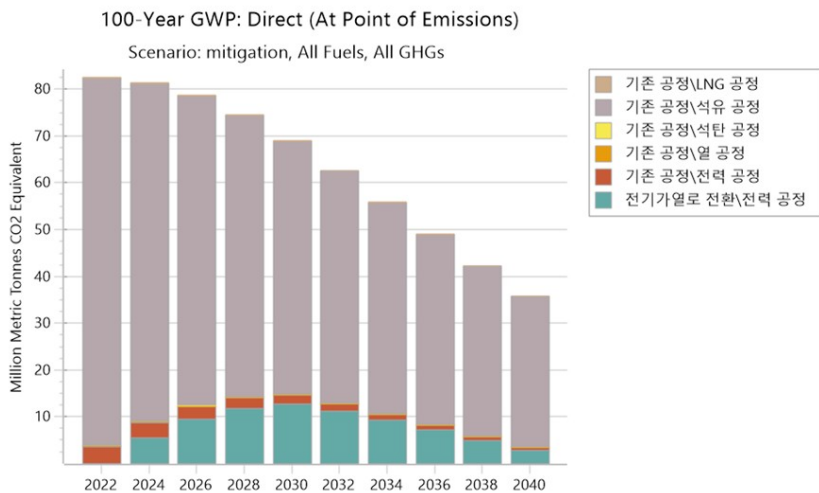
반면, 탄소중립 시나리오에서는 배출량이 2022년 107,700,000 tCO₂eq에서 2040년 22,100,000 tCO₂eq로 감소하며, 총 85,600,000 tCO₂eq의 감축 잠재력이 확인되었다. 목표년도 기준 BAU 시나리오 대비 98,900,000 tCO₂eq 감축하는 것으로 예측되었다. 특히, 고로 및 전로 중심의 석탄 기반 공정을 수소 환원 제철 및 전기로 기반 공정으로 대체한 조치가 전체 감축량의 58%를 차지하였다. 더불어, 전력 공급 부문이 재생에너지 및 원자력 기반으로 전환되면서 전력 사용의 배출계수가 점진적으로 낮아져 간접 배출량이 감소한 것 역시 감축에 크게 기여한 것으로 나타났다.

4.3. 석유화학 산업

석유화학 BAU 시나리오



석유화학 2040 년 시나리오



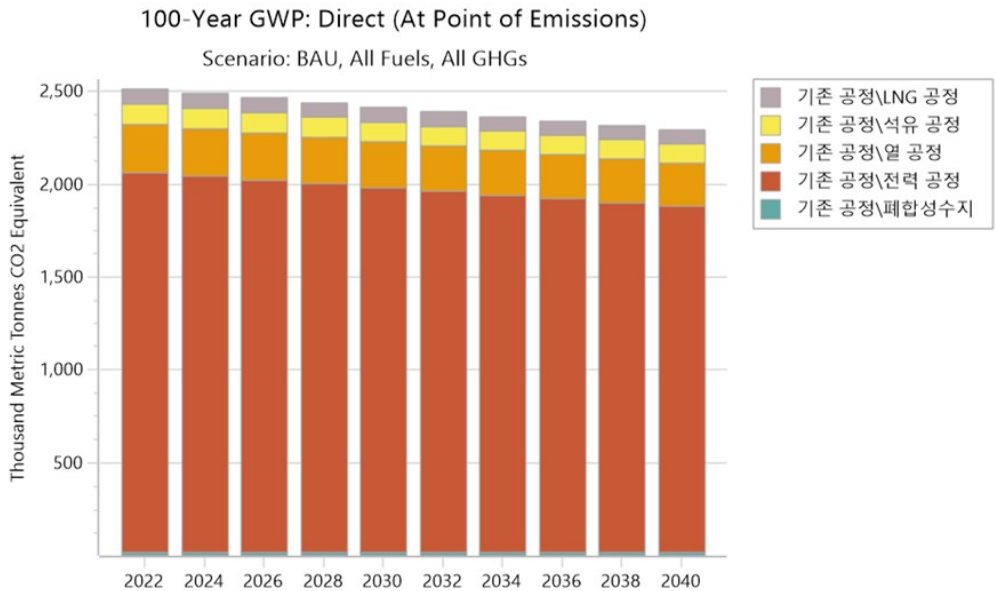
석유화학 산업은 기준 시나리오 하에서 온실가스 배출량은 생산량이 2022 년 73,697,000 톤에서 2040 년 89,700,000 톤으로 증가함에 따라

전체 배출량이 2022 년 82,600,000 tCO₂eq 에서 2040 년 100,500,000 tCO₂eq 로 증가하였다.

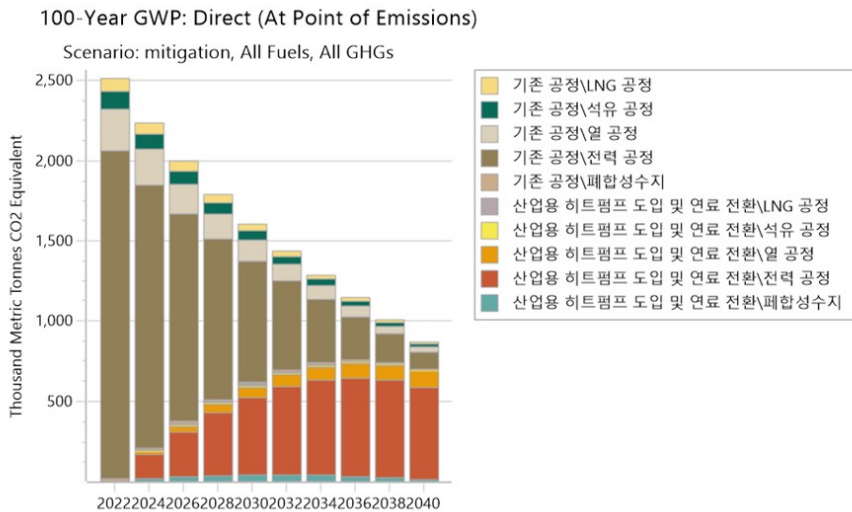
반면, 탄소중립 시나리오에서는 2022 년 82,600,000 tCO₂eq 에서 2040 년 35,700,000 tCO₂eq 로 감소하며, 총 43,330,000 tCO₂eq 의 감축 잠재력이 확인되었다. 목표년도 기준 BAU 시나리오 대비 64,800,000 tCO₂eq 감축하는 것으로 예측되었다. 특히, 석유계 공정을 전기가열 및 바이오매스 보일러 기반 공정으로 전환한 결과 46,300,000 tCO₂eq 의 배출 감축이 발생한 것이 주목할만한데, 이는 석유 납사 원료가 바이오 납사 및 수소 열분해 납사로 대체된 것에 기인하며 산업의 총 탄소 배출량 감축보다 석유계 공정 대체 감축 효과가 크다는 점에서 석유계 연료 및 원료 전환의 영향력이 두드러진다.

4.4. 제지 산업

제지 **BAU** 시나리오



제지 2040 년 시나리오



제지 산업은 기준 시나리오 하에서 생산량이 2022 년 11,200,000 톤에서 2040 년 10,200,000 톤으로 감소함에 따라 전체 배출량이 2022 년 2,489,500 tCO₂eq 에서 2040 년 2,290,000 tCO₂eq 로 감소하였다.

탄소중립 시나리오 에서는 2022 년 2,514,500 tCO₂eq 에서 2040 년 869,100 tCO₂eq 로 감소하며, 총 1,645,400 tCO₂eq 의 감축 잠재력이

확인되었다. 목표년도 기준 BAU 시나리오 대비 1,420,900 tCO₂eq 감축하는 것으로 예측되었다. 이는 석유 및 가스 기반 공정을 전력 기반 공정으로 전환한 것과 함께 전력 공급 부문 탈탄소화에 따른 배출계수 감소에 기인한 것으로 사료된다.

5. 결론

결론적으로, 대한민국 고배출 산업 부문의 탄소중립 시나리오 분석 결과, 철강 산업이 가장 높은 감축 잠재력을 보이며, 탄소중립 경로에서 핵심적 역할을 수행할 수 있을 것으로 평가된다. 이 뒤를 이어 석유화학, 시멘트, 제지 산업 순으로 감축 잠재력이 확인되었다.

나아가 철강 및 석유화학 산업은 공정 기술 전환에 따른 연료 전환이 배출 저감에 미치는 영향이 지대하며, 이에 따라 단순 수요 감소가 아닌 구조적 전환을 통한 접근이 필수적임을 시사한다. 시멘트 및 제지 산업은 상대적으로 감축 규모가 적으나, 공정 전환과 연료 및 원료 전환을 통해 유의미한 감축 효과를 확보할 수 있는 산업으로 볼 수 있다.

따라서, 본 연구는 현재 탄소 집약적 공정 구조와 높은 초기 기술 전환 투자 비용으로 인해 감축 이행에 어려움을 겪고 있음에도 불구하고, 가장 높은 감축 잠재력을 지닌 철강 산업을 중심으로 우선적인 정책 개입이 필요함을 제언한다.

5.1. 정책 제언

5.1.1. 수소환원제철 기술 혁신 투자

철강 산업 내에서 최근 주목받는 기술이 바로 POSCO가 개발 중인 수소환원제철(HyREX) 공정이다. HyREX는 제철 공정에서 석탄 대신 수소를 환원제로 활용함으로써, CO₂ 대신 H₂O(수증기)를 배출하는 친환경 제철 기술이다. 기존의 고로-전로 방식 대비 탄소배출량을 90% 이상 감축할 수 있으며, 전기로 공정과 연계될 경우 완전한 무탄소 철강 생산도 가능하다.

POSCO는 2030년까지 수소환원제철 기술의 상용화를 목표로 하고 있으며, 이를 위해 연간 250만 톤급 데모플랜트 구축을 계획 중이다. 이는

연간 약 360 만 톤의 CO₂ 감축이 가능한 규모로, 1GW 급 태양광 설비가 약 6 만 가구에 공급하는 전기량에 상응하는 수준이다.

수소환원제철 기술은 단순한 기술 개발을 넘어, 국제 무역 질서 변화에 능동적으로 대응하기 위한 산업 전략의 일환으로 이해할 필요가 있다. EU의 탄소국경조정제도(CBAM)가 본격화되면서, 고탄소 철강 제품에 대한 무역 장벽이 현실화되고 있는 상황이다. HyREX와 같은 탄소중립형 공정은 향후 수출 경쟁력 유지에 필수적인 요소이며, 글로벌 저탄소 시장에서의 우위를 선점하기 위한 기반 기술이다.

그러나 수소환원제철 기술의 확산을 가로막는 가장 큰 장애물은 초기 투자 비용과 수소 가격이다. 현재 HyREX는 전로 및 고로 생산 방식 대비 약 1.52 배 이상의 설비투자비가 소요되며, 수소 활용으로 인해 추가적인 생산원가가 추가로 발생한다. 즉, 현재 기준으로 상당한 수준의 투자 비용 소요가 예상되며, 향후 수소 가격의 하락, 재생에너지 기반 전력의 보급 확대, 인프라 구축 등이 병행되어야만 기술 확산이 가능하다는 점을 의미한다.

수소환원제철 기술은 감축 단가만을 기준으로 우선순위를 판단할 수 없는 전략적 기술로, 장기적 관점에서 산업구조 재편과 글로벌 대응력을 동시에 고려한 정부의 선도적 개입이 요구된다. 이를 위해 다음과 같은 세 가지 정책 방향을 제안한다.

첫째, 청정수소 생산 및 공급망 인프라에 대한 선제적 투자.

둘째, 수소 환원 제철 기술 도입 기업에 대한 탄소 배출권 거래제 내 차등 인센티브 및 저탄소 인증제도 설계.

셋째, 민관 공동 R&D 펀드 조성을 통한 기술 실증 및 국산화 지원.

5.1.2. 공공 및 민간 협력 기반 투자 메커니즘 구축

우리나라는 2050 탄소중립 달성을 위한 국가 시나리오(B안)를 통해 산업부문에서 약 80.4%의 감축을 목표로 설정하고 있으며, 그 중 철강

산업은 고로·전로 중심의 기존 공정을 수소환원제철로 100% 전환할 경우, 최대 95%까지 배출 저감이 가능할 것으로 전망되고 있다. 하지만 현재 국내 철강 기업들의 수소 기반 기술 개발은 아직 실증 단계에 머물러 있으며, 관련 인프라와 제도적 유인은 충분하지 않은 실정이다. 특히 고로·전로 기반의 공정 특성상 탄소배출 밀도가 높고, 설비 교체에 막대한 초기 비용이 소요되기 때문에 민간 기업 단독의 대응만으로는 구조적 전환이 어려운 한계를 지닌다. 따라서, 온실가스 감축 핵심 산업으로 평가되는 철강 산업에 대해 정부 주도 하 공공과 민간의 협력 투자 방안이 마련되어야 실증적인 감축 이행과 향후 경쟁력 확보가 가능할 것으로 생각한다.

5.1.3. 청정수소 공급망 조성 및 에너지 인프라 확충

향후 탄소중립 전환 경로 하에서, Posco HyREX 와 같은 수소 환원 제철 기술의 전제는 안정적이고 저렴한 청정 수소의 대규모 공급이다. 현재까지 국내 수소 공급은 화석연료 개질 중심이며, 재생에너지 기반 수전해 비중은 미미하다. 따라서 수소 생산기지 구축, 수소 파이프라인 인프라, 수소 저장 및 운송체계 등 &수소 전주기 인프라&를 국가 기간산업으로 정의하고 지원할 필요가 있다.

5.1.4. 탄소배출권 거래제 강화를 통한 기술혁신 유인

현재 국내 탄소 배출권 거래시장 K-ETS 는 온실가스 감축을 위한 핵심 정책 수단으로 기능하고 있으나, 높은 무상할당 비중으로 인해 배출권 가격이 낮게 형성되는 구조적 문제를 안고 있다. 이러한 낮은 가격은 각 기업의 기술 혁신을 유도하는 것에 있어 충분한 기능을 하지 못한다. 따라서, 유상할당 비중 점진적 향상 등 국내 탄소 배출권 거래제 보완 및 강화를 통해 거래 시장 내에 적절한 가격 신호를 형성하여 기업이 스스로 기술 혁신을 수행할 수 있도록 유도하는 것이 요구된다. 이와 더불어, 현재 탄소 고배출 공정 구조와 높은 초기 투자 비용으로 인해 시장 신호만으로는 감축이 어려운 산업을 대상으로 배출권 거래제 시장 내에서 차등 인센티브를 제공하고 저탄소 인증을 제공하는 등의 지원 정책 마련이 요구된다.

5.2. 한계점

본 연구 LEAP 모델을 활용한 산업 부문별 연료 투입 구조 및 유상 할당 시나리오를 평가함에 있어 다음과 같은 부분에서 한계점이 존재하며, 이는 분석 결과의 정밀도와 해석의 타당성에 영향을 미칠 수 있음을 밝힌다.

산업부문의 activity level 을 각 산업부문의 생산량으로 해석하여 구하였는데, 국내 통계청과 에너지경제연구원의 장기 전망치를 참고하여 현재 시나리오에 존재하는 데이터는 국내에 집계할 수 있었지만 2050년까지의 미래 생산량 예측에는 한계가 존재했다. 미래 생산량은 산업 구조 변화, 수출입 경기, 정책 등 다양한 복합적인 변수를 보일 수 있고, 단일 성장률(Growth Function) 또는 선형 보간(Interp Function)에 의존한 활동 수준 설정은 산업별 이질적 흐름을 충분히 반영하기 어렵다.

현 시점에서 국내 에너지원별로 세분화된 activity level 에 대한 공신력 있는 통계자료가 부재하다. 이에 따라 본 연구는 산업 전체의 총 activity level 을 기준으로 모든 에너지원의 에너지 사용량을 나누는 방식으로 에너지원단위를 산정하였다. 이러한 방식은 현실적으로 불가피한 대안이지만, 에너지 사용량이 많은 특정 에너지원의 에너지집약도가 상대적으로 과대 추정되는 현상을 초래할 수 있다.

특히 복수의 에너지원이 동시에 사용되는 산업에서는, 실제로는 고효율 연료가 주요 활동에 집중되고 저효율 연료는 보조적으로 사용되었음에도 불구하고, 총 활동 수준으로 균등 나누기를 적용함으로써 각 에너지원의 효율성을 정확히 반영하지 못하는 구조적 오류가 발생할 수 있다.

향후에는 에너지원별 활동수준에 대한 보다 세분화된 통계자료 구축이 필요하며, 이는 감축 기술의 우선순위 설정과 정책 지원 타당성 평가의 정밀도를 높이는 데 핵심적 역할을 할 것이다.

또한, 본 연구는 산업 부문에서 연료의 품질, 연소 방식, 공정 기술 변화에 따라 연료별 배출계수가 변화함에도 불구하고, 분석의 용이성을 위해 연료별 배출계수가 변화하지 않는 상황을 가정하고 분석을 수행하였다. 이는 미래 배출량 예측의 타당성을 제한하는 한계점을 제시한다.

따라서, 향후 에너지원별 활동수준에 대한 보다 세분화된 통계자료 구축, 그리고 실증적인 배출계수 변화 적용은 미래 온실가스 배출량 변화 추이의

타당성을 제고할 것이며, 감축 기술의 우선순위 설정과 정책 지원 타당성 평가의 정밀도를 높이는 데 핵심적 역할을 할 것이다.

참고문헌

- 관계부처 합동. (2021, 11 월 26 일). 제 1 차 수소경제 이행 기본계획 (요약). 한국에너지기술연구원. https://www.kier.re.kr/resources/download/tpp/policy_20211126.pdf
- 국토교통부. (2023, 3 월 2 일). 전국 건축물 총 7,354,340 동… 연면적 41억 3 천만㎡. 건축정책과.
- 국토교통부. (n.d.). 탄소공간지도 건물 배출·흡수량 산정방법론. 탄소공간지도. Retrieved August 4, 2025, from <https://carbonmap.kr/about/openMethodologyBldg.do>
- 『대한민국 2050 탄소중립 전략(LEDs 보고서)』, 대한민국 정부
- 박영수, 조영혁, 김태오. (2013). LEAP 모델을 활용한 전자소재·부품업의 온실가스 감축 잠재량 분석. 환경영향평가, 22(6), 667-676.
- 서울특별시 탄소중립지원센터. (2025, 2 월). 서울시 온실가스 인벤토리 보고서 (2022 년 도 분).<https://seoulnetzero.si.re.kr/wp-content/uploads/2025/02/%EC%84%9C%EC%9A%B8%EC%8B%9C-%EC%98%A8%EC%8B%A4%EA%B0%80%EC%8A%A4-%EC%9D%B8%EB%B2%A4%ED%86%A0%EB%A6%AC-%EB%B3%B4%EA%B3%A0%EC%84%9C2022%EB%85%84%EB%8F%84%EB%B6%84.pdf>
- 산업연구원, 『국내 섬유와 제지산업의 탄소중립 추진 전략과 정책과제』, 정책자료 2022-04
- 산업통상자원부, 한국에너지공단. (2022). EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼.
- 유정화. (2012). LEAP 모델을 활용한 세종대학교의 온실가스 감축 가능성

분석. 세종대학교 석사학위논문.

우정호, & 최경식. (2012). LEAP 모델을 활용한 대학 건물부문 온실가스 감축 시나리오 분석. 부산대학교 논문자료.

윤영중, 김민욱, 한준, & 전의찬. (2016). LEAP 모형을 이용한 건축물의 온실가스 감축 시나리오 분석: 서울세관 건물 그린리모델링 시범사업을 중심으로. 기후변화연구, 7(3), 341-349.<https://doi.org/10.15531/KSCCR.2016.7.3.341>

에너지경제연구원. (2023, 12 월 15 일). 2024 장기 에너지전망. 산업통상자원부.

에너지경제연구원. (2024, 10 월 28 일). 2023 년 재생에너지 균등화발전비용 (LCOE) 동향. 재생에너지정책연구실. 세계 에너지시장 인사이트 제 24-21 호.

에너지경제연구원. (2022). 2023 에너지총조사보고서. 산업통상자원부. (발간일: 2025.03.12)

이보람·손원주(2024), 「일본의 &GX 경제 이행채& 추진 현황 및 시사점」, 『세계경제 포커스』, 제 7 권 제 11 호, 대외경제정책연구원(KIEP).

통계청. (2025). 총인구, 인구성장률. e-나라지표.https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1009

탄소중립녹색성장위원회. (2024.4). 2023 년도 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 이행점검 결과.

포스코뉴스룸(2023), 「저탄소 친환경 제철 프로세스 대전환 특집 기획 ① — HyREX: 수소환원제철 기술 심층 소개」, 포스코뉴스룸, 2023.11.29,<https://newsroom.posco.com/kr/저탄소-친환경-제철-프로세스-대전환-특집-기획-①-hyrex>.

포스코(2023), 「저탄소 친환경 제철 프로세스 대전환 특집 — HyREX 기술 설명자료」, 포스코 사보 자료, 2023.11.

한국에너지공단, 국가온실가스종합정보시스템(GIR, 2021)

한국에너지공단 통계분석실. (n.d.). 에너지 발열량 및 온실가스 배출계수. EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼. Retrieved August 4, 2025, from https://tips.energy.or.kr/carbon/Ggas_statistics03.do

한국전력거래소. (n.d.). 전력통계정보시스템(EPSIS): 발전설비용량. Retrieved August 4, 2025, from <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkpoBftChart.do?menuId=020100>

한국시멘트협회. (2022). 2022년 월별 시멘트 수급. http://www.cement.or.kr/stati_2015/total_view.asp?sm=2_2_0

한국제지연합회. (2022). 산업현황 및 통계 — 국내 제지산업 연도별 수급현황. http://www.paper.or.kr/sub_5/5_1_1.php

한국철강협회. (2024). 철강 탄소중립 현황 및 전망. 2035 NDC 컨퍼런스 자료. BOARD_ATTACH_1733883271009.pdf.

한국화학산업협회 (KCIA). (2022). 화학산업통계. <https://kcia.kr/petrochemical-industry/statistics>

해양수산부. (n.d.). 항만물동량통계. 국가항만물류정보포털. <http://nlic.go.kr/nlic/seaHarborGtqy.action>

Black & Veatch. (2010). Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://docs.nrel.gov/docs/fy11osti/48595.pdf>

KOSIS 국가통계포털. 통계청. <https://kosis.kr/index/index.do>

Liang, Y. (2019). Scenario analysis of renewable energy policy in

China's power sector using the LEAP model. [자료 비공개].

부록

1.1. 2022 년 산업 데이터

1.1.1 시멘트

→ activity level = 51,062,000 ton

석탄	석유	가스	전력	열	수소	폐합성 수지
45.2%	16.3%	4.57%	13.2%	0.0645%	12%	8.1%
2,224,900 TOE	803,300 TOE	224,600 TOE	647,600 TOE	31,700 TOE	588,000 TOE	398,200 TOE
0.04357251968 TOE/ton	0.01573185539 TOE/ton	0.004398574282 TOE/ton	0.01268262113 TOE/ton	0.0006208139125 TOE/ton	0.01151541264 TOE/ton	0.007798362775 TOE/ton

1.1.2 석유화학

→ activity level = 73,697,000 ton

석탄	석유	가스	전력	열	바이오매스
1.08%	74.8%	4.18%	12.4%	5.09%	2.47%
464,000 TOE	32,153,700 TOE	1,798,200 TOE	5,307,600 TOE	2,185,200 TOE	1,063,100 TOE
0.006296050043 TOE/ton	0.4362959144 TOE/ton	0.02439990773 TOE/ton	0.07201921381 TOE/ton	0.02965113912 TOE/ton	0.0144252819 TOE/ton

1.1.3 제지

→ activity level = 11,254,334 ton

석유	가스	전력	열	바이오매스	폐합성수지
13.125%	13.31%	43.364%	18.57%	6.3%	5.3%
259,900 TOE	263,600 TOE	858,700 TOE	367,800 TOE	125,020 TOE	105,180 TOE
0.02309 TOE/ton	0.0234221 TOE/ton	0.076299 TOE/ton	0.0326807 TOE/ton	0.011109 TOE/ton	0.0093457 TOE/ton

1.1.4 조강

→ activity level = 65,846,000 tons

석탄	석유	가스	전력	열
84.5%	0.33%	6.62%	8%	0.55%
24,680,800 TOE	96,600 TOE	1840,400 TOE	2,523,000 TOE	159,200 TOE
0.374826 TOE/ton	0.00146706 TOE/ton	0.02795 TOE/ton	0.038317 TOE/ton	0.0024178 TOE/ton

2.1. 2040 년 산업 데이터

2.1.1. 시멘트:

기존 (39%)						
석탄 (17.628%)	석유 (6.357%)	가스 (1.7823%)	전력 (5.148%)	열 (0.025155%)	수소 (4.68%)	폐합성 수지 (3.159%)
867,177.70 TOE / 49,000,000 ton	312,817.57 TOE / 49,000,000 ton	87,693.58 TOE/ 49,000,000 ton	253,356.94 TOE / 49,000,000 ton	1,236.90 TOE / 49,000,000 ton	230,180.16 TOE / 49,000,000 ton	155,396.44 TOE / 49,000,000 ton
0.0177 TOE /ton	0.00639 TOE /ton	0.00179 TOE /ton	0.00517 TOE /ton	0.0000252 TOE /ton	0.0047 TOE /ton	0.00317 TOE /ton

연료전환 (61%)						
석탄 (10.37%)	석유 (9.943%)	가스 (2.806%)	전력 (8.052%)	열 (0.03904%)	수소 (14.335%)	폐합성 수지 (15.25%)
510,017.34 TOE / 49,000,000 ton	489,016.626 TOE/ 49,000,000 ton	13,721.80653 TOE / 49,000,000 ton	396,013.464 TOE / 49,000,000 ton	1920.06528 TOE / 49,000,000 ton	70502.397 TOE / 49,000,000 ton	750,025.5 TOE / 49,000,000 ton
0.010408517 TOE/ton	0.009979932 TOE/ton	0.000280036 TOE/ton	0.008082929 TOE/ton	0.000039185 TOE/ton	0.001438825 TOE/ton	0.015307663 TOE/ton

2.2.2. 석유화학(화공)

기존 (64%)					
석탄	석유	가스	전력	열	바이오매스
(0.6912%)	(47.872%)	(2.6752%)	(7.936%)	(3.2576%)	(1.5808%)
297022.464 TOE / 89,700,000 ton	20,571,555.84 TOE / 89,700,000 ton	1,149,586.944 TOE / 89,700,000 ton	3,410,257.92 TOE / 89,700,000 ton	1,399,855.872 TOE / 89,700,000 ton	679,301.376 TOE / 89,700,000 ton
0.00331 TOE/ton	0.2293 TOE/ton	0.0128 TOE/ton	0.038 TOE/ton	0.0156 TOE/ton	0.00757 TOE/ton

전기 공정 (18%)	
에너지사용량	7,734,960 TOE
에너지원단위	7,734,960 TOE / 89,700,000 ton
	→ 0.08623 TOE/ton

바이오매스 공정 (18%)	
에너지사용량	7,734,960 TOE
에너지원단위	7,734,960 TOE / 89,700,000 ton
	→ 0.08623 TOE/ton

2.2.3. 제지

기존 (39%)					
석유	가스	전력	열	바이오매스	폐합성수지
5.12%	5.2%	16.91%	7.24%	2.46%	2.07%
101,381.12 TOE/10,200,000 ton	102,965.2 TOE/10,200,000 ton	334,834.91 TOE/10,200,000 ton	143,359.24 TOE/10,200,000 ton	48,710.46 TOE/10,200,000 ton	40,988.07 TOE/10,200,000 ton
0.009939 TOE/ton	0.01009 TOE/ton	0.0328 TOE/ton	0.0140548 TOE/ton	0.0047755 TOE/ton	0.004018438 TOE/ton

연료전환 (61%)					
석유 (3.05%)	가스 (3.05%)	전력 (36.6%)	열 (11.346%)	폐합성수지 (3.843%)	바이오매스 (3.111%)
60393.05 TOE/10,200,000 ton	60393.05 TOE/10,200,000 ton	724,716.6 TOE/10,200,000 ton	224662.146 TOE/10,200,000 ton	76,095.243 TOE/10,200,000 ton	61600.911 TOE / 10,200,000 ton
0.005921 TOE/ton	0.005921 TOE/ton	0.07105 TOE/ton	0.0220257 TOE/ton	0.00746 TOE/ton	0.0060393 TOE/ton

2.2.4. 조강

기준 (26%)				
석탄	석유	가스	전력	열
(21.97%)	(0.0858%)	(1.7212%)	(2.08%)	(0.143%)
6,438,550.17 TOE/74,000,000 ton	25,144.6338 TOE/74,000,000 ton	504,416.5932 TOE/74,000,000 ton	609,566.88 TOE / 74,000,000 ton	41,907.723 TOE / 74,000,000 ton
0.087 TOE/ton	0.0003398 TOE/ton	0.006816 TOE/ton	0.008237 TOE/ton	0.00056632 TOE/ton

전기로 제강 공정: 전력 (41%)	
에너지사용량	12,015,501 TOE
에너지원단위	12,015,501 TOE / 74,000,000 ton
	→ 0.1623716 TOE / ton

수소환원제철: 전력 (33%)	
에너지사용량	9,671,013 TOE
에너지원단위	9,671,013 TOE / 74,000,000 ton
	→ 0.130689 TOE / ton