



STEELWATCH

Bringing climate urgency to steel

저무는 석탄 기반 제철의 시대



2023년 7월



감사의 말

스틸워치(SteelWatch)는 새롭게 떠오르고 있는 환경단체로 철강산업이 탄소중립 경제의 근간이 될 뿐 아니라 환경, 지역사회, 노동자가 번영하는 사회에 이바지하는 것을 꿈꾼다. 스틸워치의 목표는 철강업계의 탄소 감축 목표를 상향하고, 관련 시민사회 운동을 지원하며, 더욱 강력한 공약과 신속한 행동을 국제적으로 촉구함으로써 철강산업의 탄소중립을 가속화하는 것이다. 본고는 향후 스틸워치 활동의 밑거름이 될 첫 번째 보고서이다.

보고서의 주 저자는 캐럴라인 애슐리(Caroline Ashley), 에번 길레스피(Evan Gillespie), 마거릿 한스브러(Margaret Hansbrough)이다. 주 기여자는 조이 애덤스(Zoë Adams), 존 쿠니(John Cooney), 아리아나 크리스테(Ariana Criste), 알래스테어 잭슨(Alastair Jackson), 발렌틴 포글(Valentin Vogl)이다. 그 외에도 의견을 제시하고 기여해 준 지미 앨드리지(Jimmy Aldridge), 크리스 바테일(Chris Bataille), 몰리 도로첸스키(Molly Dorozenski), 리앤 고빈드사미(Leanne Govindsamy), 톰 호스킨스(Tom Hoskyns), 힐러리 루이스(Hilary Lewis), 신시아 로카모라(Cynthia Rocamora), 로저 스미스(Roger Smith), 케이틀린 스왈렉(Caitlin Swalec), 첸 양(Chan Yang), 한유민에게 특별히 감사한다. 아울러 국제에너지공동기금(PIE), 인더스트리얼 랩스(Industrious Labs), 기후솔루션(SFOC), 선라이즈 프로젝트(Sunrise Project) 등 도움을 준 수많은 동료분들에게 감사를 전한다.

디자인·제작: 애비 달리(Abbie Darley)

번역: EcoNetworks, 한국외국어대학교 통번역센터

저작권 고지: 본 출판물은 출처를 명시하는 한 저작권자의 별도 허가 없이 교육이나 비영리 목적으로 부분 또는 전체를 복제할 수 있습니다. 본 출판물은 저작권자의 서면 허가 없이 재판매하거나 여타의 상업적 목적으로 사용할 수 없습니다.

문의는 info@steelwatch.org로 해주시기 바랍니다.

표지사진: 매튜 캐플런(Matthew Kaplan)

인용: 스틸워치(2023) - 저무는 석탄 기반 제철의 시대(Sunsetting Coal in Steel Production)

보고서에 대하여: 본 보고서는 철강산업에서 석탄 사용을 중단할 것을 촉구한다. 구체적으로, 석탄 기반 제철이 어떻게 막대하고 위험한 양의 탄소를 배출하는지 규명하고, 석탄을 벗어나 철강에 투자하고 이를 생산할 수 있는 다양하고 실현가능한 기회요인을 제시한다.



목차

보고서 요약	4
1. 배경 - 지구를 위협하는 철강산업의 탄소 배출	5
2. 근본적인 문제는 석탄에 의존하는 제철 방식이다	8
2.1 석탄에 의존하는 철강	8
2.2 석탄 기반 제철은 엄청난 양의 탄소를 배출하는 데다, 그 양은 과소평가 돼 있다	10
2.3 부분적 효율 개선으로 고로 방식의 탄소발자국을 역전시킬 수 없다	12
2.4 탄소 감축 노력은 예상보다 효과적이지 못하다	13
2.5 부정적 영향은 탄소 배출만이 아니다	15
3. 명확하고 현존하는 위험이 목전에 있다	16
3.1 고로의 신설·개수를 위한 투자가 목전에 있다	16
3.2 BAU가 계속되면 업계도, 지구도 망한다	18
4. 기회 - 석탄 없는 철강의 미래	19
4.1 대안도 많고, 할 일도 많다	19
4.2 핵심 결정, 그리고 레드라인(red-line)	21
참고문헌	24





보고서 요약

철강산업은 전 세계 기후를 위협하고 있다.

철강업계의 탄소 배출은 기후변화를 가속화하고 1.5°C 제한선 이하에서 기후가 안정될 수 있는 가능성을 붕괴시키고 있다. 현재 전 세계 온실가스 배출량에서 철강산업이 차지하는 비중은 최소 7%이다. 즉각적이면서도 근본적인 행동이 이루어지지 않으면 이 수치는 계속 증가할 것이다.

주 원인은 석탄이다.

문제는 철 자체가 아니라 철을 만드는 방식이다. 전 세계 철강의 70%는 철광석과 석탄을 사용하는 고로 기반 제철 방식으로 만들어진다. 이러한 철강 1톤을 만드는 데 0.77톤의 원료탄(철광석으로부터 철을 만들기 위해 고로에 넣는 석탄)이 필요하다.

발전(發電)용 연료탄에 대한 투자의 해악은 잘 알려져 있으나, 제철용 원료탄의 해악에 대한 인식은 아직 충분하지 못하다. 원료탄은 채굴 과정에서도 막대한 메탄이 배출되고, 코코스로 가공하는 과정에서도 대기오염을 일으키며, 마지막으로 고로 제철법에 사용되어 철강의 탄소발자국에도 크게. 환경을 오염시키던 고루한 관행들이 저무는 지금, 우리는 원료탄 기반 제철에 투자하기를 멈추는 데 뜻을 모아야 한다.

철강 1톤을 석탄 기반 고로(철을 생산하기 위해 쇳물을 만드는 용광로를 지칭하는 말로, 이하 '고로'라 칭한다) 방식으로 생산하면 2.3톤의 CO₂가 배출된다. 석탄 채굴 과정에서 발생하는 메탄까지 합하면 이산화탄소 배출량(TCO₂e)은 3톤이 넘는다. 이 사실은 잘 알려져 있지 않지만, 우리가 우려하고 행동하는 주된 이유다.

향후 20년이 철강업계와 기후의 운명을 결정한다.

석탄 기반의 고로 제강법으로 만들어지는 철강 대부분은 전 세계 약 400개 제철소에서 생산된다. 앞으로 20년 간 이들 제철소의 고로 상당수는 보수를 위한 재투자가 필요한데, 이 보수 공사를 '개수(改修, relining)'라 한다. 이렇게 개수가 예정된 고로들에 더해, 고로 신설을 계획중인 약 125건의 신규 프로젝트가 진행되고 있다. 철강사들은 향후 수십 년 더 엄청난 탄소를 뿜어내는 경로에 갇힐 것인지, 석탄 기반 방식을 탈피해 보다 지속가능한 경로로 들어설 것인지 결정해야 한다.

이 결정이 철강업계가 안전한 기후 미래 경로로 들어설지 가름할 것이다. 이 경로에 들어서지 못하면 1.5°C 온난화 유지 시나리오는 불가능하다. 철강업계의 석탄 기반 제철이 계속해서 BAU(Business-As-Usual: 추가 조치 없이 현행 기조로 탄소를 배출하는 시나리오)를 따를 경우, 지금부터 2050년까지 지구가 50%의 확률로 1.5°C 온난화 수준에서 안정되기 위해 필요한 전 세계 탄소예산(모든 국가, 모든 산업부문의 탄소예산 총합)의 약 4분의 1이 의해 소진된다.

아직 희망은 있다.

철스크랩부터 그린수소(green hydrogen)로 석탄을 대체하는 기술에 이르기까지, 제철 방식에 있어 석탄의 친환경적 대안들이 부상하고 있다. 석탄 없는 제철로 전환함으로써 우리는 지속가능한 기후를 지키고 더욱 탄탄한 철강산업을 건설할 수 있다. 이는 철강산업의 혁신을 통해 양질의 고용을 창출하고 해로운 물질의 배출을 근절할 절호의 기회이다.

지금이야말로 제철에서 석탄을 퇴출시킬 때다.

우리는 석탄 기반 제철산업에 다음과 같은 레드라인(red-line: 넘지 말아야 할 선)을 요구한다: 기존 고로의 개수 중단, 신규 고로에 대한 투자 중단, 그리고 기존 고로에서의 단계적 전환. 바로 오늘부터, 경제협력개발기구(OECD) 국가와 이들 국가에 본사를 둔 기업들이 앞장서야 한다. 해당 기업들이 석탄 기반 제철을 뛰어넘는 정의로운 전환 모델을 선도하고, 이를 발판으로 신형경제국이 신기술로 도약할 수 있을 것이다.



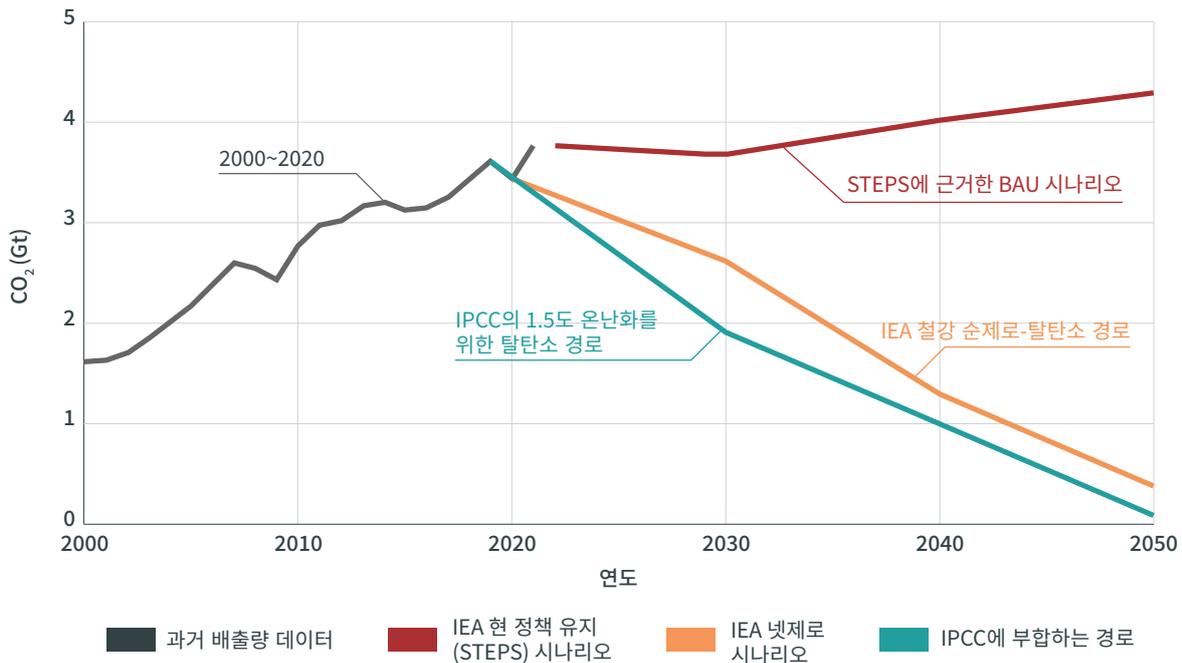
1. 배경 - 지구를 위협하는 철강산업의 탄소 배출

국제사회가 파리협정(Paris Agreement)을 이행할 수 있을지 여부는 철강산업이 석탄 기반 제철을 탈피하느냐에 달렸다. 철강업계가 배출하는 탄소의 양은 너무나 거대하다. 때문에 철강사들의 결연한 행동 없이 지구는 안정될 수 없다. 각종 보고서에 따르면 철강업계가 연간 배출하는 온실가스는 전 세계 배출량의 7%¹를 차지한다. 이는 세계에서 세 번째로 탄소를 많이 배출하는 인도의 연 배출량과 맞먹는 수치다². 하지만 다른 산업부문이 제로배출기술(zero-emission technology)로 전환에 돌입하는 와중에도 철강부문의 온실가스 배출량은 가파르게 상승했다.

철강부문의 CO₂ 직접 배출량은 2000년과 비교해 두 배 증가했다³. 모든 산업부문을 통틀어 가장 빠른 속도다⁴.

철강업계는 지구 온난화 1.5°C 유지에 필요한 탈탄소 전환 속도를 전혀 따라가지 못하고 있다. 도표 1에서 확인할 수 있듯, 진작 혁신적인 저감 경로에 진입했어야 하는 철강산업의 탄소배출량은 지금도 증가 추세를 보이고 있다.

도표 1: 철강업계의 BAU 시나리오는 탄소중립 경로를 완전히 벗어났다



참고: ‘과거 배출량 데이터’⁵와 ‘BAU’⁶ 시나리오는 탄소집약도(emissions intensity: 산업, 공정, 생산물 등의 단위 당 탄소 배출량)⁷, 그리고 다양한 제철 방식이 실제 생산에서 차지하는 비중을 근거로 CO₂ 배출 총량을 산출한 것이다. 국제에너지기구(IEA) 넷제로 경로⁸와 IPCC 경로⁹는 2019년 이후 철강업계가 감축해야 하는 온실가스 배출량을 보여주는 것으로, IEA 철강부문 넷제로 시나리오의 감축률, IPCC 보고서에 근거한 1.5도 경로에 각각 근거했다(출처: World Steel 데이터, IEA 2020, IPCC 2023).

¹ Wang (2021)에 따르면, 철강부문의 온실가스 배출량은 연 4.12Gt CO₂e이다. 이는 기타 간접배출(Scope 3)을 일부 포함하나 석탄 채굴 시의 메탄 방출은 제외된 수치다. 전 세계 온실가스 연간 배출량은 59 +/- 6.6 Gt CO₂e (Dhakal 외, 2022). 이다. 따라서 철강부문이 배출하는 온실가스는 전 세계 배출량의 최소 7%이며, 석탄 채굴 과정에서 발생하는 메탄을 포함하면 이는 더 증가한다.

² Rhodium Group (Rivera 외, 2022, p2)에 따르면, 최근 3년(2017-2020) 간 인도는 전 세계 온실가스의 7%를 배출했다.

³ As per IPCC (Bashmakov 외, 2022):에 따르면, 철강부문의 온실가스 배출량은 2000~2010년에 연 5.62%, 2010~2019년에 연 2.28% 증가했다.

⁴ IPCC (Bashmakov 외, 2022).

⁵ 과거 배출량 데이터: (제철 방식별 탄소집약도 x 해당 방식의 생산량 점유율)을 토대로 각 제철 방식의 탄소 배출량을 합산. 출처: World Steel 데이터 (2022a).

⁶ BAU 경로는 World Steel I의 탄소집약도와 IEA의 STEP(현 정책 유지) 경로(2020)를 곱하여 산출되었다.

⁷ 과거 배출량 경로 및 STEP 경로 추정 시 최근 철강업계의 배출 증가세 둔화를 고려해 World Steel (2022a)에서 참조한 제철 방식별 탄소집약도는 변하지 않는 것으로 간주하였다. 탄 소집약도를 더 높게 추정한 데이터들도 있으며, 그에 따라 철강산업의 예상 배출량도 증가할 수 있으나, 본고의 방법은 시나리오 간 비교에 중점을 둔다.

⁸ 넷제로 경로의 기술기는 IEA Net Zero pathway (2021)를 참조하였다.

⁹ IPCC 1.5°C 경로의 기술기는 IPCC 보고서(2023)에 상술된 2019~2030년 48% 감축, 2019~2050년 99% 감축 시나리오에 근거하였다.



최근 수십년 동안, 탄소배출량 증가세는 둔화되고 있으나, 가용한 데이터들을 보면 여전히 감축은 고사하고 배출량 정점에도 도달하지 못했다. 국제에너지기구(IEA)의 2020년도 ‘현 정책 유지’ 시나리오(STEPS)에 근거하여 BAU 시나리오를 추정하면, 철강업계의 탄소 배출량은 앞으로도 탄소중립 경로와는 거리가 멀 것으로 보인다.

철강산업은 해가 갈수록 탄소중립 경로에서 멀어질 것으로 예상된다. 탈탄소가 지연될수록 기후변화가 1.5°C 온난화에서 안정될 가능성이 줄어들고, 이를 만회하기 위해 철강업계는 더욱 급진적 변화를 필요로 하게 된다.

철강업계가 2030년까지 탄소를 줄여야 할 필요성은 그 시급성에 비해 주목받지 못하고 있다. 철강산업의 탈탄소 경로를 다룬 그간의 보고서들은 2019~2030년에 24~37%, 전력 사용에 따른 간접배출 포함 시 최대 49% 감축을 철강업계에 요구하고 있다.¹⁰ 그러나 철강사 대부분은 2030년 목표의 시급함은 외면한 채 2050년을 목표로 감축 공약을 제시하고 있다.

도표 2는 도표 1을 확대한 상세도로, 2030년에 철강업계가 탈탄소 경로에서 얼마나 이탈하는지 보여준다. BAU 경로(오렌지색 선)와 IEA의 넷제로 경로(녹색 선) 간의 괴리는 2030년이 되면 CO₂ 1Gt이 넘는다. 2030년 철강업계의 BAU 기준 탄소 배출량은 IEA 철강 넷제로 경로를 따르는 경우보다 42% 많고, IPCC의 1.5°C 온난화를 위한 탈탄소 경로를 따르는 경우보다 96% 많다. 철강업계가 즉시, 극적으로 방향을 틀어야 하는 이유다. 철강업계의 배출은 최근 수십 년 간 가파르게 증가한 만큼이나 가파르게 감소해야 한다. CEO, 투자자, 정책입안자들이 시급히 행동해야 한다.

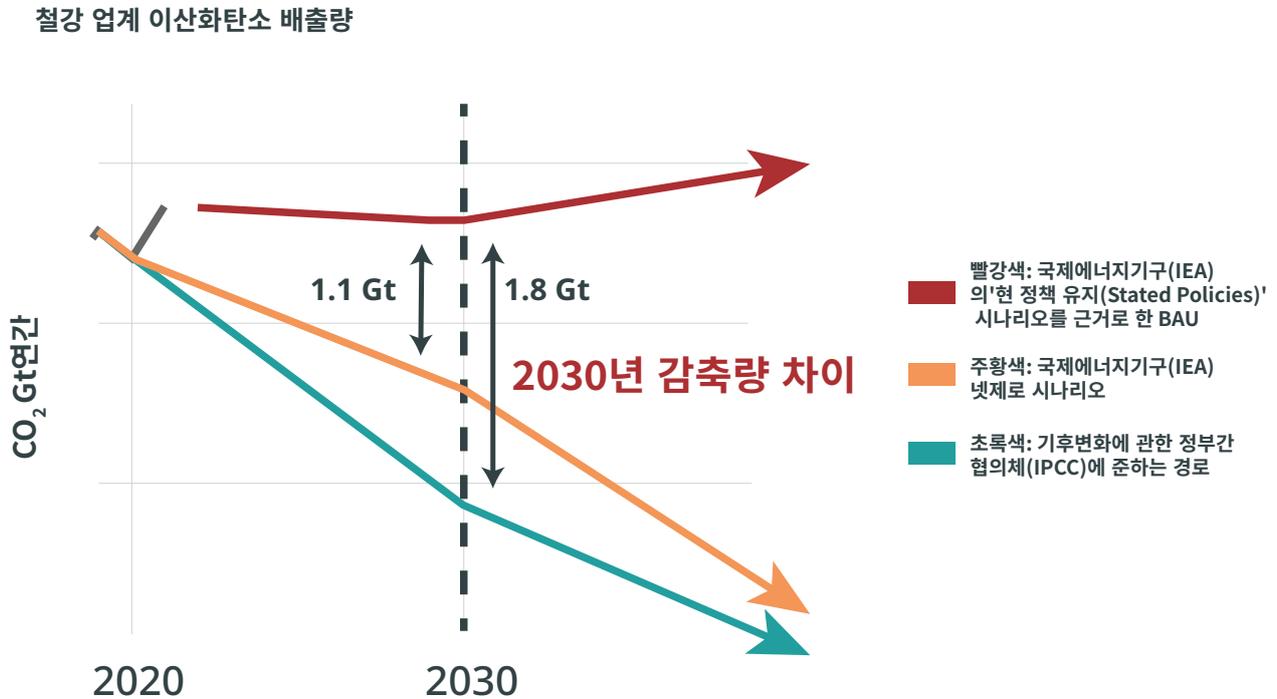


벨기에 겐트의 아르셀로미탈 제철소(Caroline Ashley, 2023. 2)

¹⁰ IEA, 2021; E3G, (Yu 외, 2021); IDDRI, (Bataille 외, 2021); MPP, 2021 (MPP 보고서의 기준연도는 2019년이 아닌 2020년임).



도표 2: 2030년의 탄소 감축량 차이



앞으로 10년 간 철강업계는 중요한 갈림길에 서게 된다. 석탄 기반 제철 방식에 재투자하느냐, 재생에너지 기반 제철로 전환하느냐, 이 갈림길에서 우리는 다음 사항들에 주목해야. **철강업계가 수 조원을 들여 기존 시설을 개수하고 고로를 새로 지어 지구에 남아있는 탄소예산을 먹어치울 것인가, 아니면 그 돈을 화석연료 없는 제철 기술로의 전환에 쓸 것인가?** 철강산업이 과거와 현재에 미친 기후 피해는 어쩔 수 없다. 그러나 미래의 기후 피해는 바꿀 수 있다.

본 보고서는 철강업계의 탄소 배출이 지구에 가하는 위협에 대한 문제의식에서 출발한다. 철강산업을 적절한 감축 경로에 진입시키려면, 우리는 제철 과정의 주된 탄소 배출원을 파악하고 어떠한 조치가 철과 지구 모두의 더 나은 미래를 위한 것인지 판단해야 한다.

본 보고서는 석탄 기반의 고로 방식 제철이 기후 피해의 주된 원인임을 규명하고, 1.5°C 온난화 목표가 여전히 유효하도록 제철 방식을 석탄 기반에서 재생에너지 기반으로 전환하기 위해 향후 5~7년 간 내려야 할 핵심 결정을 심도 있게 다루고자 한다.



2. 근본적인 문제는 석탄에 의존하는 제철 방식이다

2.1 석탄에 의존하는 철강

석탄 없는 철강의 미래를 건설하려면, 우선 현재의 제철 방식을 이해해야 한다. 전 세계 철강 제품의 70%는 고로를 이용해 제조하는 1차 철강(primary steel)으로, 1차 철강은 전 세계 397개 제철소¹¹에서 석탄 기반 고로를 통해 만들어 진다.

1차 철강은 일반적으로 고로-전로 방식으로 생산한다. 고로(철광석을 쇳물로 만드는 용광로)와 전로(Basic Oxygen Furnace: 고로에서 만들어진 쇳물을 넣어 불순물을 제거하고 강철로 만드는 용광로)에 의존하는 방식이다. 1차 철강의 제조 공정은 다섯 단계로 요약할 수 있는데, 채굴(1단계) - 재료 준비(2단계) - 제선(3단계) - 제강(4단계) - 마무리(5단계)이다.

이 과정에서 석탄의 역할이 중요하다. 1단계에서 원료탄(고로에 넣는 석탄)이 채굴된다. 2단계에서 원료탄은 코크스(cokes: 가루 상태의 석탄을 고로에서 타기 좋도록 불순물을 제거하고 덩어리 형태로 만든 것)가 된다. 3단계에서는 철을 만들기 위해 고로에서 엄청난 양의 코크스가 연소된다. 고온의 고로에서 코크스는 철광석과 화학반응을 일으켜 철광석에서 산소를 떼어내고 순도 높은 액체 상태의 철(iron)로 만드는데, 이를 선철이라 한다. 선철은 4단계에서 전로에 들어가 강(steel)으로 변하고, 5단계에서 성형과 마무리 작업을 거쳐 출하된다.

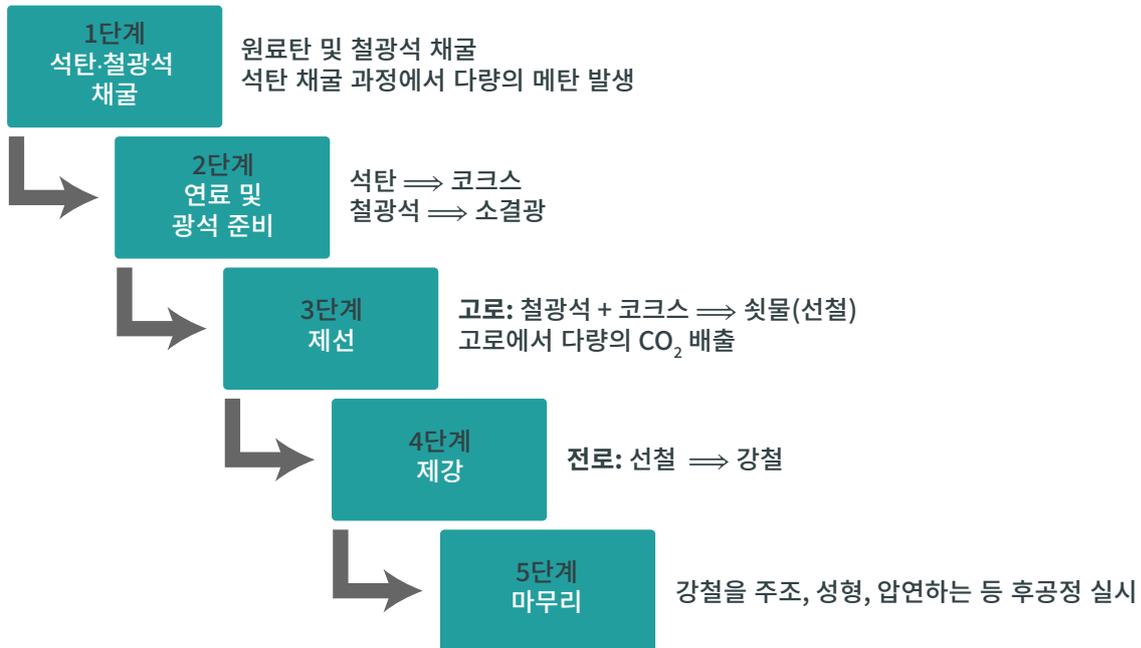
원료탄(metallurgical coal)은 발전(發電)용 연료탄(thermal coal)보다 고품질의 석탄으로, ‘점결탄’, ‘철강용 유연탄’이라 부르기도 한다. 전 세계 연간 석탄 생산량의 약 23%가 원료탄으로 사용된다.¹² 원료탄 대부분은 철강업계가 소비한다. 원료탄은 고로 안에서 철광석을 녹이는 열원이자 산화철 형태인 철광석에서 산소를 떼어내는 환원제 역할을 한다. 고로에 들어간 원료들이 무너져내려 고로 하부를 막아버리지 못하게 지지하는 역할도.

¹¹ 현재 가동 중인 제철소 중 고로를 보유한 시설에 관한 GEM 최신 데이터(2023년 업데이트)

¹² IEA (2022b, p66)



도표 3: 전통적 석탄 기반의 5단계 고로 제철 공정



1차 철강을 제외한 나머지 30%는 ‘2차 철강’으로, 전기로(EAF: electric arc furnace)를 통해 철스크랩(고철)을 재활용하는 것이다.¹³ 이 밖에도 다양한 기술적 변형이 있으며, 위의 일반적인 두 방식 간 겹치는 부분도 존재한다.

철강산업의 탈탄소 경로에 관한 연구들이 흔히 강조하는 두 가지는 2차 철강의 비중 확대와 철강 총수요 감소이다. 둘 다 효과적인 방법이지만, 이것만으로는 충분하지 않다. 느리지만 점진적인 기술 발달로 시장에서 2차 철강이 1차 철강을 대체하고 있다. 특히, 전통적으로 고품질의 1차 철강을 사용하던 자동차 업계에서 이런 현상이 두드러진다. 그러나 2차 철강은 모두 1차 철강을 재활용한 것이므로 원료가 되는 철스크랩의 양이 한정적이다. 일반적으로 전 세계 철의 재활용율은 대략 85~90%로 추정한다. 게다가 제철에서 배출되는 탄소 대부분은 1차 철강 생산 과정에서 나온다.

2차 철강의 비중을 늘리면서 철을 효율적으로 사용해 총수요를 줄이는 것만으론 주어진 시간 안에 충분한 양의 탄소를 감축할 수 없다. 더욱이 이 두 가지 방안이 1차 철강 제조법의 변화를 기피하는 핑계가 되어서는 안 된다.

아울러, 전기화를 통해 경제가 보다 친환경적으로 변하면서 전기차, 풍력시설, 송전시설 등 전기화 경제의 핵심 품목이 늘어날 텐데, 이들에 필요한 철을 만드느라 석탄 기반 철강의 생산이 늘어나서는 안 된다. 결론적으로, 1차 철강과 2차 철강의 비율, 향후 수십 년 간 철강 수요를 얼마나 억제할 수 있을지 등은 논쟁의 여지가 있겠으나, 세계는 여전히 많은 양의 1차 철강을 필요로 할 것이며, 따라서 1차 철강의 근본적인 탈탄소화가 불가피하다.

¹³ MPP (2021, p11). 이와 반대로 미국에서는 철강의 70%가 전기로 방식으로 생산된다.



2.2 석탄 기반 제철은 막대한 양의 탄소를 배출하고 있지만, 그 양은 과소평가 되어있다.

세계철강협회(World Steel) 는 2021년 고로-전로 방식 제철에 의한 CO₂ 배출량을 3.2Gt으로 집계했다. 이는 철강업계 연간 온실가스 배출량의 86%에 해당한다.¹⁴

고로 방식이 이렇게 많은 탄소발자국을 남기는 이유는 원료탄(석탄)에 전적으로 의존하기 때문이다. 고로-전로 방식으로 1톤의 철을 만들려면 0.77톤의 석탄이 든다.¹⁵ 이 석탄이 고로 방식의 탄소집약도를 끌어올리는 주 원인이다. **세계철강협회 보고서** 는 철강 1톤을 만드는 데 평균 2.32톤의 CO₂가 발생하는 것으로 추정한다. 이미 엄청난 양이지만, 계산법을 들여다보면 이는 최소한의 수치다.

철강산업의 온실가스 배출은 석탄광산에서 시작된다. 원료탄으로 쓸 석탄을 채굴하는 과정에서 흔히 메탄이 대기 중으로 방출되기 때문이다. 국제에너지기구(IEA) 2022년 보고서에 의하면 원료탄 채굴 시 방출되는 메탄은 연간 1 Gt CO₂e¹⁶ 로 추산된다. 이렇게 채굴된 원료탄 대부분은 철강사들에 공급된다.¹⁷ 그러나 세계철강협회 보고서 등 보수적인 자료들이 집계한 석탄 기반 제철의 탄소 배출량에는 이러한 메탄 배출량이 빠져 있다. 이 1 Gt CO₂e의 메탄을 더하면, 고로-전로 방식의 탄소배출량 또한 엄청나게 증가한다.

이렇게 메탄 배출량을 제대로 더하면, 우리는 **고로-전로 방식에 의한 철강 생산으로 연간 4.2 Gt CO₂e가 배출된다고 추정할 수 있으며, 이는 철강산업 전체 온실가스 배출량의 90%에 해당한다.** 또한 이는 **도표 4에서 보듯, 고로 방식 제철의 탄소집약도가 철강 1톤 당 무려 3 CO₂ 톤이 넘는다는 것을 의미한다.**¹⁸

¹⁴ From World Steel [2022a](#) and [2022b](#)

¹⁵ BHP (2023, 4, 24에 참조함)

¹⁶ GEM (Swalec, 2022, p19) and EMBER (Campbell, 2023). 보고서(p10)에 의하면, "IEA는 코크스 석탄(1차 철강의 원료탄) 채굴로 인해 2021년에 1,198만 톤의 메탄이 배출된 것으로 추산하며, 이는 IPCC의 20년 지구온난화지수(GWP)를 적용해 CO₂의 82.5배로 환산하면 연간 9억 8,800만 톤의 CO₂e에 해당"한다. 따라서 철강업계의 온실가스 배출량은 보고된 수치보다 1 Gt CO₂e 더 많을 수 있다.

¹⁷ Global Energy Monitor (Swalec, 2022)에 따르면, 2021년 고로-전로 방식 철강 생산량과 석탄 생산량을 고려했을 때, 철강산업은 원료탄 및 원료탄/연료탄 혼합 채굴량의 약 84%를 소모하는 것으로 집계된다.

¹⁸ 이 수치는 스틸워치가 GEM (Swalec, 2022) and World Steel (2022a). 등 2차 자료를 기반으로 추정된 것이다. 스틸워치는 철강산업 배출 총량 산정을 위해 세계철강협회가 제시한 고로-전로 방식 제철의 평균 배출량(2.32t CO₂/1t 철강)을 대리변수로 사용하고, 여기에 전 세계 고로-전로 방식 철강 생산을 위해 1Gt CO₂e의 메탄이 방출된다는 IEA, GEM의 분석에 근거하여 업스트림 메탄 배출량을 더하였다. 연간(2021) 고로-전로 방식 철강 생산량이 13억 톤이므로, 고로-전로 방식으로 생산된 철강 1톤당 약 0.7톤 CO₂e의 메탄이 방출됨을 알 수 있으며, 이를 토대로 고로-전로 방식 철강 1톤당 온실가스 배출 총량을 3.04톤 CO₂e로 추산하였다.



도표 4: 석탄 기반 고로 방식의 공정 단계별 온실가스 배출량(메탄 포함)

공정 단계	연간 CO ₂ e Mt	t CO ₂ e/t 조강	단계별 배출량 비중
1: 원료탄(석탄) 채굴	1,000	0.72	원료탄 채굴 시 다량의 메탄 방출 24%
2: 재료 준비(코크스, 소결광, 펠릿 생산)	643	0.45	15%
3: 고로에서 철강 생산	2,217	1.6	고로에서 다량의 CO ₂ 배출 53%
4. 강철 생산	354	0.26	8%
합계	4,214	3.04	

참고 및 출처: ‘연간 CO₂e Mt’은 1년 동안 배출되는 이산화탄소 환산량(단위: 백만 톤)을 뜻한다. ‘t CO₂e/t 조강’은 조강(crude steel: 철강 제품을 만들기 위해 적당할 정도로 불순물을 제거한 강철. 일반적으로 국가·기업의 철강 생산량은 이 조강 생산량을 의미한다) 1톤을 생산하는 데 배출되는 이산화탄소 환산량(단위: 톤)을 뜻한다. 도표의 추정치는 석탄 채굴 과정의 메탄 배출량을 포함한 것이다.¹⁹

위 도표에서 확인할 수 있듯 통상의 일관제철 공정에서 탄소 배출을 주도하는 것은 코크스(석탄)의 사용이다. 따라서 코크스에 의존하는 현재의 고로 방식을 코크스에 의존하지 않는 친환경 제철기술로 대체해야 원료탄과 코크스가 사라질 수 있다. 즉, 고로야말로 석탄에 의존해 철을 생산함으로써 가치사슬 전반에서 온실가스를 발생시키는 주범이다. 고로의 단계적 퇴출만이 철강업계가 2030년까지 1.5°C 온난화 경로에 성공적으로 진입할 수 있는 유일한 방법이다.

**즉, 고로야말로 석탄에 의존해 철을 생산함으로써
가치사슬 전반에서 온실가스를 발생시키는 주범이다**

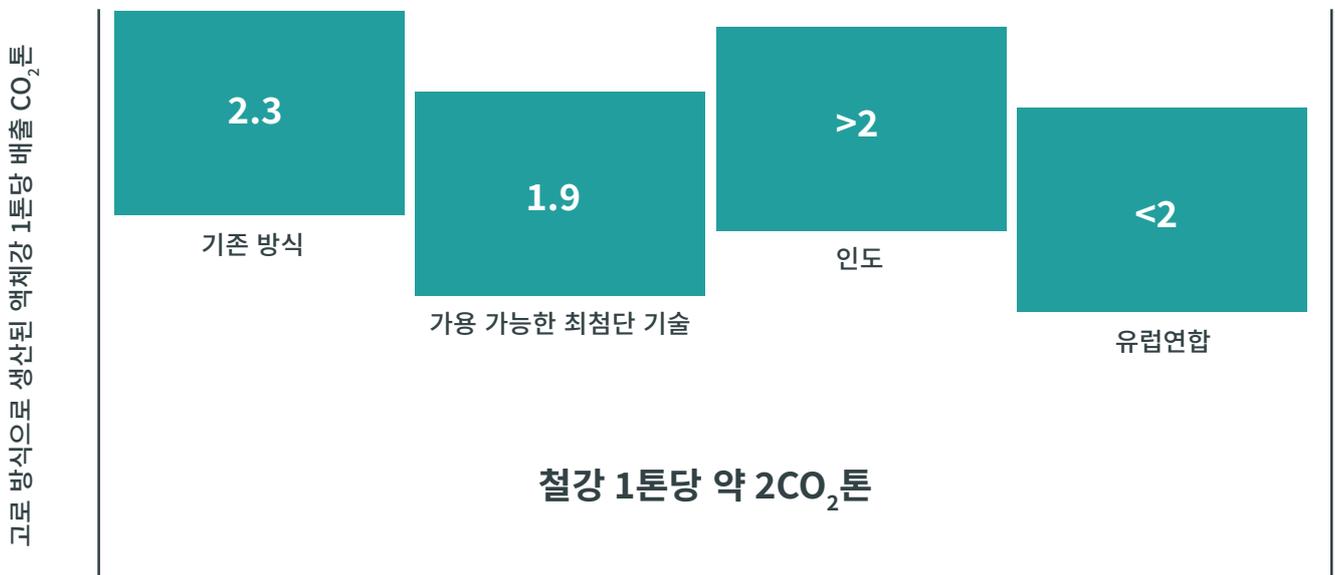
¹⁹ 이 도표는 고로-전로 방식 제철의 공정 단계별 CO₂ 배출량을 나타낸 것이다. 도표는 석탄 채굴로 인한 메탄 배출량을 포함하나, 철광석 채굴 등 그 밖의 기타 간접배출(Scope 3) 항목은 포함되지 않았다. 참고문헌: GEM (2023), Swalec (2022), World Steel 데이터 (2022a), IEA (2020) and Sohn 외 (2019). 자료분석: 스틸워치.



2.3 부분적 효율 개선으로 고로 방식의 탄소발자국을 개선시킬 수 없다

석탄 기반 고로 방식의 기후 악영향은 고로 효율성 개선으로 풀 수 있는 문제가 아니다. 고로 기반 제철은 수십 년 간 공학적 개선을 거듭하며 중공업 공정 가운데 최고 수준의 효율을 자랑하게 되었다. 대부분의 고로는 이론상 최대 효율에 가깝게 가동되고 있다. 즉, 제철소들의 에너지 효율은 이미 대단히 높은 수준으로, 보통은 매년 미미한 개선만이 이루어진다. 동일한 기술에 입각한 기존의 효율 개선 방식으로는 온실가스 감축 목표가 요구하는 감축량에 도달할 수 없다. 물론, 고로 간에도 다소간의 탄소집약도 차이는 존재한다. 그러나 도표 5에서 나타나듯 통상 고로 방식은 철강 1톤을 만드는 데 1.8~2.3톤의 CO₂를 배출한다. 따라서 인도를 제외하면 공정 효율 개선으로 얻을 수 있는 탄소 감축 효과는 적으며, 철강산업이 기후에 미치는 악영향에 대한 개선 효과도 미미할 것이다.

도표 5: 석탄 기반 고로 방식들 간의 탄소집약도는 ‘높음’에서 ‘매우 높음’으로, 차이가 크지 않다.



출처: ETC (2021) and GEI (Hasanbeigi, 2022) 자료에 근거함.



2.4 철강사들의 탄소 감축 노력은 그들의 주장만큼 효과적이지 못하다

철강업계는 고로 공정에서 배출되는 탄소의 포집·활용·저장(CCUS)이 탈탄소 접근법에 포함되어야 한다고 오랫동안 주장했다. 그러나 넷제로 혹은 1.5°C 경로에 부합하려면 철강 생산 과정에서 배출되는 탄소의 90~95%를 CCUS 기술로 포집·저장할 수 있어야 한다.²⁰ 저장의 경우, 기존 및 미래의 고로를 탈탄소화 할 수 있는 규모와 포집률을 갖추었지만 현재 상업화된 연소 후 포집·저장(post-combustion CCS) 기술은 존재하지 않는다.²¹ 따라서 중단기적으로 CCUS는 석탄 기반 제철을 위한 신뢰할 만한 해결책이라 보기 어렵다.

CCUS 기술의 연구·개발이 여전히 값진 교훈을 주는 것은 사실이나, 중단기적으로 다른 솔루션(그린수소 직접환원철, 재료효율 향상)의 실현 가능성이 훨씬 높다는 것은 자명하며, 이들은 철강산업에 있어 CCUS보다 경쟁력 있는 솔루션이 될 수 있다. 국제에너지기구(IEA)와 유관 기관들이 실시한 기술 성숙도 평가(readiness assessment) 결과도 CCUS 기술의 중단기 실현가능성에 대해 낙관적이지 않다. IEA는 현 시점에서 고로용 CCUS 기술 중 가장 효과적일 것으로 예상되는 기술²²의 성숙도(TRL)를 1~10단계(최종 10단계) 중 5단계로 평가한다. 그러나 이 기술의 성숙도 평가 대상 프로젝트들 중에는 실현가능성 및 확장가능성(scalability)의 변화 속도를 가늠하는 데 필요한 투명성 및 성과목표가 결여된 사례들이 있었다.

CCUS 분야에서 최고 수준으로 꼽히는 일본의 연소 후 CCUS 연구·개발 성과조차 합리적 비용의 실현 가능한 솔루션까지는 갈 길이 멀다. 최근 일본 재생에너지연구소(REI)가 이 솔루션의 개발 상황을 평가한 결과, 현재 탄소 포집률 목표는 20% 미만이며, 이렇게 낮은 포집률마저 아직 달성하지 못한 것으로 확인됐다. 동 REI 보고서는 일본 철강 산업에서 CCUS가 실용화되기 어려운 장애요인을 제시하였으며, 고로용 CCUS가 더 실현가능성이 높은 다른 글로벌 감축 방안들에 비해 경쟁력이 크게 떨어진다고 판단했다. 이는 블룸버그 뉴 에너지 파이낸스(Bloomberg New Energy Finance)가 2021년에 예측한 바와 같다.²³

문제는 CCS 기술이 필요한 시기에 요구되는 규모로 사용하기 어렵다는 것이며 이에 더하여 고로 기반 제철소는 물리적 특성상 여러 곳에서 탄소가 배출되기에 효과적인 포집이 매우 어려운 데다, 석탄광산의 메탄 배출이라는 또 다른 문제가 있다. 철강사들이 기존 시설에 CCS를 적용해 개수하더라도 여전히 탄광에서 막대한 양의 탄소가 배출된다. 노동자들의 일자리를 유지하는 동시에 석탄 의존형 생산방식을 탈피하려면 진정한 의미의 기술적 전환이 필요하다. 최근 몇 년 간 탄소 포집·저장이 포함된 철강산업 탈탄소화 경로를 제안하는 보고서들이 나왔다. 이 중에는 IEA 보고서도 있다. 하지만 이 경로들은 넷제로에 도달하기 위해 ‘향후 필요한 조건이 갖추어질 경우’를 전제로 한 것이다.²⁴ 앞으로 CCS가 ‘실현될 수도 있다’는 희망이 고로에 대한 투자의 근거가 되어서는 안 된다. 효과가 입증된 CCS가 투자의 전제조건이어야 한다. 배출 탄소의 90~95%를 영구적으로 저장할 수 없다면 고로에 CCS 기술을 적용하는 것은 적절한 솔루션이 될 수 없는 것이다.

²⁰ IDDR (Bataille, 외, 2021, p2)

²¹ 본문에는 CCS와 CCUS가 혼용되고 있다. CCS와 CCUS는 다른 개념이며 포집된 CO₂의 처리 결과 역시 다름을 주지하고 있다. 우리가 우려하는 것은 애초에 제철 공정에서 CO₂를 포집할 수 있는지 여부다. CO₂ 포집이 우선 과제이고, 사용이나 저장은 추후 문제라 생각한다. 본문에 사용된 CCS, CCUS 등의 용어는 단순히 서술의 일관성을 위한 것이다. 즉, CCUS라는 용어가 사용된 연구(예: IEA 보고서)에 대해 논할 때는 본문에도 CCUS라는 용어를 사용했다.

²² IEA (2022a)

²³ REI (2022, p25-28)

²⁴ 2021년에 발간된 철강 넷제로 경로 보고서에 따르면, 현재 상업화 되었으며 탄소 90% 감축이 가능한 1차 철강 제조 기술은 CCS가 적용된 메탄 기반 직접환원철-전기(DRI-EAF) 방식이 유일하다(Bataille, 외, 2021, p2). 이는 CCS가 적용된 고로와는 근본적으로 다르다. 기존의 고로-전로 방식은 탄소 배출원이 일관제철소 곳곳에 흩어진 경우가 많아 CCS를 이용한 성능개선(retrofit)이 어려우며, CCS를 적용한다 해도 기존 시설의 포집률은 최대 50%에 불과하다(Bataille, 외, 2021, p4, 출처: Fan and Friedmann, 2021).



석탄 기반 기술에 의존하는 고로에 대한 신규 투자는 없어야 한다. 더군다나 현재 가용하고 신뢰할 수 있는 고로 기반 CCUS 감축 기술은 존재하지 않는다. 본 보고서의 관점에서 ‘신뢰할 수 있는’ 기술이란 다른 친환경 기술과 비용면에서 경쟁할 수 있고, 2030년 초까지 90% 포집률이 보장되며, 탄광의 메탄 방출을 비롯해 연료탄이 미치는 기후영향 전반을 해결할 수 있어야 한다. 또한, ‘신뢰할 수 있는’ 솔루션은 기후 외에도 대기·수질 오염의 영향을 해결할 수 있어야 한다. 이는 석탄 기반 제철소가 위치한 지역사회의 삶의 질과 밀접하게 연결되기 때문이다.

“넷제로에 도달하려면 2025년 후에는 90% CCS가 적용되지 않은 고로-전로는 건설해서는 안 되며, 무탄소에 가까운(near zero) 대안을 지금부터 계획해야 한다는 점을 철강사들에 분명히 알려야 한다.”

넷제로 스틸(Net Zero Steel, Bataille 외, 2021)



호주 뉴사우스웨일스주 브로크 부근 불가(Bulga) 석탄광산(Mikulas Jaros, 2019. 4. 16, iStock.com)



2.5 부정적 영향은 탄소 배출만이 아니다

원료탄의 채굴과 연소는 기후변화만 앞당기는 것에 그치지 않는다. 대기·수질 오염을 유발하고 토지권(土地權), 인권, 노동권과 충돌한다. 원료탄 광산과 코크스 공장 등 고로 기반 공정으로 직접적인 타격을 받는 지역 주민들은 그 피해를 더 많이 받고 있으며, 이제는 이에 저항하고 있다.

이들 오염원이 건강과 경제에 미치는 영향을 분석하기 위해 에너지·청정대기연구센터와 기후솔루션(Centre for Research on Energy and Clean Air and Solutions for Our Climate)은 한국의 제철소 세 곳에 대한 대기오염 분석을 실시했다(포스코 포항제철소, 포스코 광양제철소, 현대제철 당진제철소).²⁵ 세 곳의 제철소를 동시에 가동한다고 가정할 때, 지표면 근처의 연간 이산화질소, 이산화황, 입자상 오염물질의 농도가 각각 $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.22\mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 수 있다. 이들 제철소에서 유발된 대기오염으로 2021년에 약 506명이 조기에 사망했고, 한국의 ‘현 정책 유지 시나리오’(오염물질 배출에 대한 추가 제재가 없는 경우)에 따르면 그로 인한 2022~2050년 누적 조기사망자는 19,400명에 달할 것으로 예상된다.

남아프리카공화국의 경우, 아파르트헤이트의 잔재와 철강산업의 환경 오염이 서로 얽혀있다. 아르셀로미탈 사우스아프리카(ArcelorMittal S.A.)는 밴더바일파크 공장 일대에서 대기·수질·토양 오염을 유발해 지속적인 비판과 저항을 받아왔다.²⁶ 밴더바일파크 공장은 대주주가 정부에서 아르셀로미탈그룹으로 바뀌었다. 이 회사는 독성 대기오염 물질을 배출하여 ‘모든 사람이 건강이나 행복을 해치지 않는 환경을 누릴’ 헌법상의 권리를 침해했다는 혐의로 형사 고발을 당했다.²⁷ 인접한 흑인 지역사회와의 사전 합의를 지속적으로 무시하는 행태도 비판을 받고 있다.²⁸

발전(發電)부문에서는 연료용 석탄이 지난 수십 년 간 지역사회 운동의 초점이었다. 피해를 입은 지역사회는 공기, 물, 토지, 그리고 목숨을 지키기 위해 석탄발전소에 문제를 제기하고 많은 경우 이를 폐쇄시키기 위해 연대했다. 이러한 움직임은 제철용 원료탄에 대해서도 시작되었다. 철강산업의 특성상, 제철소 인근 지역사회 일부는 일관제철소의 석탄 사용으로 인한 독성 오염물질의 피해자인 동시에 보수가 높고 안정적인 대규모 일자리의 수혜자라는 딜레마를 안고 있다. 그러나 어떤 지역사회도 생명과 생계 중 하나를 선택해야 하는 상황에 처하지 말아야 한다. 한편, 제철소의 친환경 전환을 목표로 연대하는 지역사회도 출현하고 있다.

일례로 미국폐협회(American Lung Association)에 따르면, 오하이오 리버 밸리(Ohio River Valley)에는 인근 제철소에서 발생하는 검댕(soot) 피해를 입은 지역사회들이 있다.²⁹ 지역 활동가들은 제철소에 친환경 전환을 요구하면서, 일자리를 유지·확충하고 사람과 지구를 보호하기 위해 왜 석탄이 반드시 퇴출되어야 하는지에 대해 설득력 있는 주장을 펴고 있다.³⁰ 오하이오 리버 밸리 연구소(Ohio River Valley Institute)의 보고서에 따르면, 인근 제철소가 기존 제철 방식을 고수하면 2031년까지 지역 일자리가 30% 감소하지만, 화석연료 없는 제철로 전환하면 같은 기간 제철과 연계된 일자리가 27~43% 증가하여 일자리 손실을 막을 수 있다.³¹

석탄 기반 제철이 유발하는 공기, 물, 건강, 사회의 권익 침해는 온실가스 배출량처럼 정량화되는 경우가 드물지만, 이는 변화를 추동하는 강력한 동기이며, CCS 등 이른바 ‘기술적 해결책’이 채굴이나 연소 단계에서 발생하는 주요 오염을 모두 제거할 수 없다는 것을 일깨워준다.

²⁵ 에너지·맑은공기·우리기후솔루션 연구소(Centre for Research on Energy and Clean Air and Solutions for Our Climate) (2021)

²⁶ 환경권익센터(Center for Environmental Rights) (2019)

²⁷ 기업과 인권 리소스 센터(Business and Human Rights Resource Center) (2019)

²⁸ 환경권익센터(Center for Environmental Rights) (2022)

²⁹ 가디언(The Guardian, Lakhani, N., 2023)

³⁰ 커넬리 미디어(Canary Media, Myers, K., 2023)

³¹ 오하이오 리버 밸리 연구소(Ohio River Valley Institute, Ebner 외, 2023)



3. 명확하고 실존하는 위험이 다가오고 있다

3.1 고로의 신설·개수를 위한 투자가 가까이에 있다

전 세계적으로 397개³²의 고로 기반 제철소에서 1,000기가 넘는 고로가 가동 중³³이다. 지금 이 순간에도 이들은 대기 중으로 온실가스를 내뿜고 있다. 하지만 여기서 끝이 아니다. 두 가지 중대한 위험이 다가오고 있다.

X 첫째, 2030년까지 전 세계 고로의 71%가 개수 여부를 결정한다. 만일, 고로 1기당 수억 달러를 들여 이들을 개수할 경우, 고로 기반 공정이라는 고배출 기술에 향후 20년 더 종속될 위험이 있다.³⁴

X 둘째, 철강업계에서 발표되었거나 이미 진행 중인 프로젝트 중 1기 이상의 고로 신설 계획이 포함된 신규 프로젝트가 125건이 넘는다.³⁵ 이러한 신규 설비의 수명은 40~50년으로, 2050년 탄소중립을 쉽게 물거품으로 만들 것이다.

고로 개수(改修, relining)

고로 내부를 감싸는 내화벽돌은 시간이 지나면 마모되므로 주기적으로 교체해야 한다. 이른바 ‘1대기’라 불리는 개수작업의 주기는 과거 15~25년이었으나, 오늘날 내화물의 발달로 교체 주기가 길어질 수 있다. 고로 개수는 하공정 설비(downstream unit)의 업그레이드/보수와 고로 용량 확대를 동반하는 경우가 많다. 개수 프로젝트에는 보통 수억 달러가 드는데, 이는 통상적인 고로 신설 비용의 25~50% 수준이다.

³² GEM (2023) 보고서는 397개 고로 기반 제철소 목록을 담고 있다

³³ GEM's 세계 제철소 정보(GSPT) 데이터(2022년 3월 발표)는 2022년 3월 기준 약 1,060기의 고로가 가동 중인 것으로 추산했다. 이는 전 세계 고로 용량의 약 89%를 나타내는 GEM 데이터와 고로 수를 알 수 없는 공장의 경우 1기를 보유한다고 가정한 데이터에 근거한 수치다. 따라서 이는 과소 추정일 수 있다. GEM은 2023년 업데이트(예정)에서 고로 관련 정보를 추가 제공할 예정이다. 스틸워치도 전 세계에서 가동 중인 고로는 1,000기가 조금 넘을 것으로 추정하고 있다.

³⁴ Agora Industry (2021)

³⁵ 고로 신설이 포함된 제철소 건설 프로젝트(발표됨+진행중)에 관한 GEM의 최신 데이터(2023년 업데이트).



글로벌 철강사들은 고로 개수 계획을 발표하거나, 검토하고 있다. 이는 수십 년 더 석탄과 탄소에 종속되는 것을 의미한다. 일례로, 2020년 미국 중서부에 있는 아르셀로미탈, AK스틸의 기존 공장들을 인수한 1차 철강 생산업체 클리블랜드 클리프스(Cleveland Cliffs)는 최근 석탄 기반 제철에 역량을 집중하겠다고 발표했으며, 2025년에는 인디애나주 레이크미시건에 있는 자사 제철소 중 한 곳의 고로를 개수할 예정이다.³⁶ 개수한 고로가 좌초자산(stranded asset)이 되거나 1.5°C 온난화 유지에 필요한 탄소예산을 소진할 수 있다는 증거가 늘어남에도 이와 같이 석탄 기반 공정에 대한 업계의 투자는 계속되고 있다.

고로 신설 프로젝트의 경우, 진행 중인 것보다 아직 확정되지 않은 것이 많다. 그만큼 재검토, 재설계의 가능성은 열려 있다. 사용되는 제철 기술을 공개하지 않는 신규 투자 프로젝트들도 있다. 예컨대, 인도에 있는 아르셀로미탈-신일본제철의 합작회사는 구자라트주 하지라에 고로 2기를 신설하고 있으며, 오디샤주에도 일관제철소 두 곳을 새로 지을 계획이다. 하지라와 오디샤주에서 사용되는 제철 기술은 공개되지 않았다. 신설되는 제철소는 석탄에서 친환경 경제로 도약하는 기회의 발판이 되어야 한다.³⁷

현재 가동 중인 고로 중에는 최근에 신설 또는 개수된 것들이 있다. 이를 소유한 철강사들은 추가 투자가 필요하기 전까지 고로가 20년 이상 가동될 것으로 기대한다. 이렇게 최근에 신설 또는 개수된 고로들과 그것이 내뿜는 탄소야말로 탈탄소 전환이 가장 어렵다. 따라서 2030, 2040, 2050 넷제로-탈탄소 목표를 달성하려면 지금부터 고로 신설이나 기존 고로 개수를 반드시 중단해야 한다.

고로를 가동 중인 397개 제철소의 투자 결정에 따라 철강 산업과 지구가 1.5도 상승 제한선을 지킬 수 있을지 여부가 결정될 것이다.



광양만 산업시설(Igor Groshev, Adobe Stock)

³⁶ Northwest Indiana Times (Pete, 2023)

³⁷ IEEFA (Nicholas and Basirat, 2023)

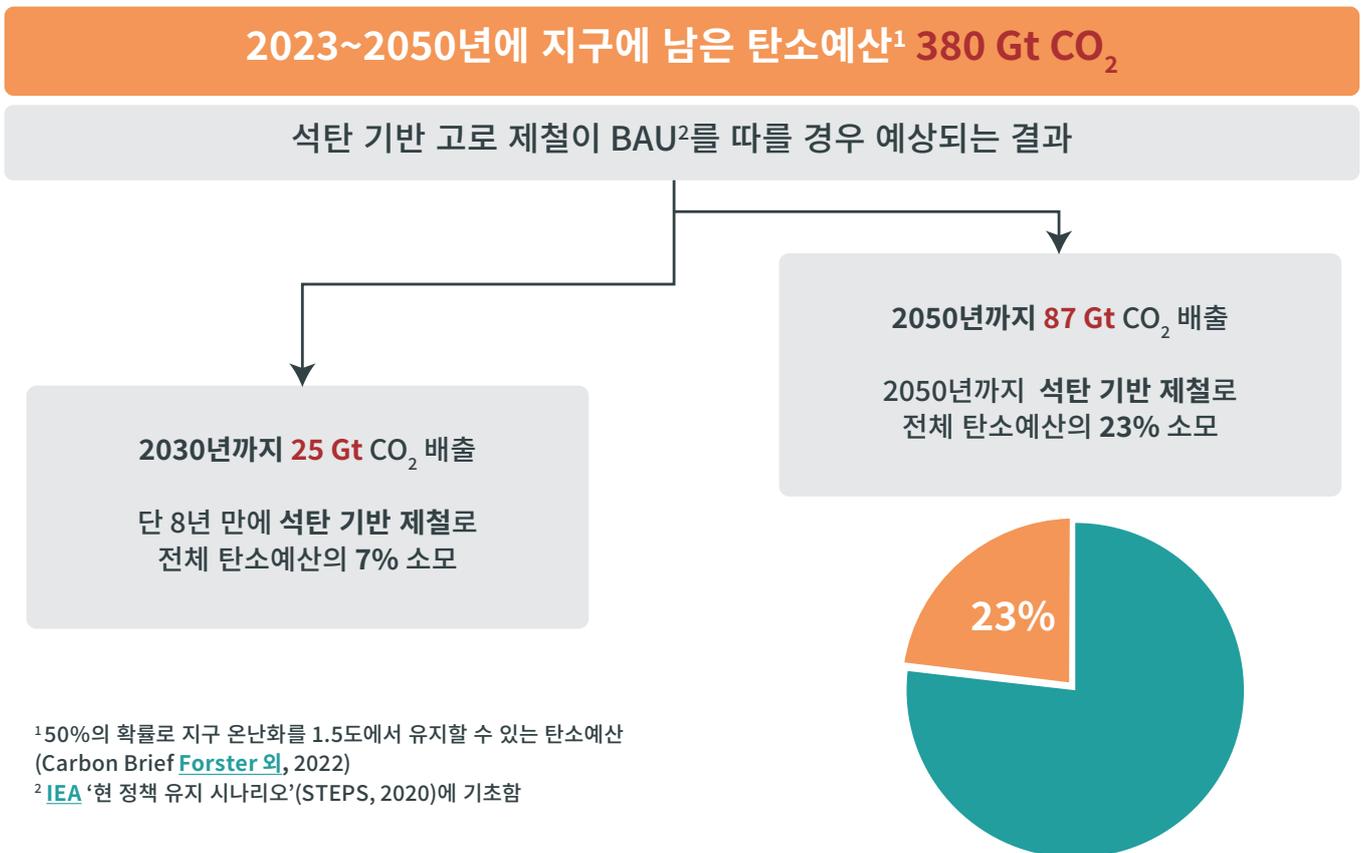


3.2 BAU가 지속되면 업계도, 지구도 망한다

IPCC는 지구 온난화가 1.5°C 기준선에서 안정될 확률을 50%로 유지하기 위해 2019~2050년까지 가용할 수 있는 탄소예산을 약 500Gt으로 추정했다. 카본 브리프(Carbon Brief)는 2023년 1월 기준으로 2050년까지 380Gt이 남은 것으로 추정한다.³⁸ 스틸워치는 국제에너지기구(IEA)가 2020년에 내놓은 철강의 ‘현 정책 유지 시나리오(stated policies scenario)’를 토대로 고로에 BAU(Business-As-Usual: 추가 조치 없이 온실가스 배출을 현행대로 유지하는 것) 시나리오를 적용하여 향후 CO₂ 배출량을 추정했다.³⁹ ‘현 정책 유지 시나리오’는 이름에서 알 수 있듯 원대하지만 불분명한 목표가 아니라 전 세계에서 실제 발표된 정책들에 근거한 시나리오이다. 이것이 발표된 2020년 이후 약간의 바람직한 진전은 있었으며, 이를 근거로 우리는 예방적 전환이 아닌 BAU 시나리오를 따를 경우 예상되는 결과가 무엇인지 알 수 있다. 2030년까지 석탄 기반 철강 생산으로 인한 예상 CO₂ 배출량은 2030년까지 총 25Gt, 2050년까지 총 87Gt이다.

이는 석탄 기반 고로 제강법에 의해 생산된 1차 철강이 BAU 경로를 따를 경우, 1.5°C 를 지키기 위한 지구에 남은 탄소예산(모든 사람·산업·국가의 탄소예산)의 거의 4분의 1을 소모한다는 뜻이다.

도표 6 - 석탄 기반 철강의 BAU 시나리오는 지구에 남은 전체 탄소예산의 23%를 소모한다.



³⁸ Carbon Brief (Forster 외, 2022)

³⁹ 우리의 추정치는 연간 철강 생산량이 비교적 일정할 것이라는 IEA의 가정에 기초한다. 탄소예산은 CO₂e가 아닌 CO₂로 표시되므로, 우리는 World Steel (2022a)의 고로-전로 방식 탄소 집약도 계수(t CO₂/t 조강)를 사용하여 CO₂만 계산하였다.



4. 기회 - 석탄 없는 철강의 미래

4.1 대안도 많고, 해야 하는 일도 많다

철강 수요가 감소하거나 철스크랩으로 만든 철강의 사용이 늘더라도 고로제강법에 의해 생산된 1차 철강은 향후 수십 년 간 여전히 필요할 것이다. 해당 철강 생산을 위해 수소 직접환원제철(direct reduction iron)을 도입하면 제철산업이 기후에 미치는 악영향을 없앨 수 있다.

철광석을 직접 환원시키는 기술(직접환원제철, DRI)은 1970년대부터 사용되었다. 이 기술은 녹는점 아래에서 철광석에서 산소를 제거한다. 산소가 제거된 순수한 금속성 철은 철스크랩과 함께 일반적으로 전기로(EAF)에 넣어 강철로 만든다. 하지만 직접환원공정에서 철광석을 환원시키거나 전기로에 전력을 공급하기 위해 화석가스(천연가스), 때로는 석탄이 사용된다. 따라서 이러한 직접환원제철-전기로(DRI-EAF) 방식도 고로-전로 방식보다는 덜하지만 여전히 많은 탄소발자국을 남긴다.

철광석 환원에 화석가스 대신 그린수소(green hydrogen)를 사용하면 제철 공정에서 화석연료를 없애는 방법이 가능해진다. DRI를 통해 생산된 철은 전기로에 장입(용광로 등의 내부에 적재함)하거나 추가 제련 설비를 거쳐 전로에 장입할 수 있다. 다른 대안은 그린수소를 이용해 철광석을 환원철단광(HBI: 직접환원 공정을 거친 직접환원철을 보관 및 운반이 용이하도록 조개탄 모양으로 성형한 것)⁴⁰으로 바꾸어 제철소로 운반하는 것이다. 그린수소를 만드는 전해조에 재생에너지 전력을 공급할 수 있다면, 제철은 화석연료와 탄소 배출에서 해방된다. 여기에, 전기로에 사용되는 전력을 100% 재생에너지로 공급하게 되면 제철 공정의 탄소발자국 대부분을 지울 수 있다. 이 두 가지, 즉 철(iron)을 만드는 과정에서 화석연료를 그린수소로 대체하는 것과 철을 강(steel)으로 만드는 과정에서 전기로에 재생에너지 전력을 공급하는 것으로 화석연료 없는 철강이 가능하다.

또한, 아직 상업화 전이나 용융산화물전기분해(MOE)와 같은 신기술은 연료의 필요성을 완전히 없애고 제철의 직접 전기화(direct electrification)를 향한 토대를 마련할 수 있다.

요컨대, 대규모의 재생에너지가 철강의 탄소발자국을 획기적으로 줄이고 제철 공정에서 석탄과 화석가스의 역할을 대체할 수 있다. 우리가 행동한다면, 화석연료 없는 철강은 실현 가능한 범위에 있다.

⁴⁰ International Iron Metallurgy Association (2023. 5. 25.에 참조함)



이미 전환을 시작한 곳들이 있다. 캐나다의 아르셀로미탈 도파스코 제철소는 고로-전로 설비를 단계적으로 축소하고 2028년 가동을 목표로 직접환원제철-전기로(DRI-EAF) 공정을 신규 도입하여 석탄을 완전히 퇴출 시킬 예정이다.⁴¹ 상황에 따라, DRI 방식으로 생산된 철이 중간 제련설비를 거쳐 기존 전로에 장입되거나, 수소 전환이 가능한(hydrogen-ready: 향후 수소를 이용하는 방식으로 전환이 가능함) DRI 시설이 들어설 수 있다. 단, 후자의 경우 그린수소 인프라가 구축된 후에 가동하기로 한다.

가장 주목할 사례는 스웨덴의 공공-민간 합작회사인 하이브리트(HYBRIT)가 철강 가치사슬을 구성하는 여러 시범시설(prototype facilities)을 한 데 묶어 통합 네트워크를 구축한 것이다. 이 네트워크를 통해 이미 볼보(Volvo)의 트럭 시제품에 들어갈 그린스틸(green steel, 친환경 철강재)이 생산되었으며, 이 그린스틸은 2026년에 상업화를 앞두고 있다. 탄소중립 전환은 여러 단계를 거쳐야 하고 지역에 따라 이를 구현하는 방식도 다를 수 있으나, 핵심은 석탄 기반 공정이 아닌 것에 투자하는 것이다.

우리는 이 전환을 기회로 삼아야 한다. 주요 철강 생산국들은 자국 내 철강산업 지역의 역사적 정치적 문제 해결을 위해 심혈을 기울여야 한다. 중공업과 그로부터 파생된 소비재 제조업은 여러 국가에서 중산층 형성에 기여했다. 주요국들에 철강 생산 능력은 안보와 직결되는 문제이기도 하다. 기후 안정을 위해 친환경 철강산업에 투자해야 한다는 주장은 분명 설득력이 높지만, 경제의 체질 개선을 위한 사회적·정치적 모멘텀이 마련되지 않으면 안 된다. 그 길이 무엇인지 찾기 위해 지역사회들과 적극적으로 대화하고 참여를 장려해야 하며, 공정하고 ‘미래에 어울리는’ 투자가 이루어져야 한다



포스코 광양제철소(Matthew McDermid, 2023. 5)

⁴¹ Canadian Broadcasting Company (Hristova, B., 2022)



4.2 핵심 결정, 그리고 레드라인(red-line)

오늘, 우리는 철강산업의 탄소 배출 경로를 바로잡고, 이를 통해 지구 온난화를 늦출 절호의 기회를 맞이했다. 기업과 투자자는 막대한 탄소를 배출하는 고로를 개수하고 석탄 기반 제철을 연장하는 대신 철강산업의 방향을 근본적으로 틀 수 있고, 틀어야만 한다. 발전(發電)부문에서는 이미 청정·재생가능 전력으로의 근본적 변화가 한창이다. 이제 철강업계가 방향을 바꿀 때다.

향후 7년 동안의 철강업계의 행보가 철강산업이 1.5°C 경로에 동참할지, 아니면 그것을 붕괴시킬지 결정할 것이다. 행동을 요하는 여러 복잡한 문제(아래 상자 참조)가 있지만, 핵심은 명확하다. 신뢰할 만한 연구들이 공통적으로 시사하는 것은 석탄에 대한 투자가 지속될수록 우리는 살 만한 지구에서 멀어진다는 것이다.

철강산업이 1.5°C 경로에 진입할 수 있다는 희망을 유지하려면 다음을 마지노선으로 삼아야 한다.



금일부로 OECD 국가와 OECD 국가에 본사를 둔 철강사들은 새로운 고로를 도입하거나, 기존 고로를 개수하지 말 것.



신흥경제국은 2028년 이후 가동을 목표로 새로운 고로를 도입하거나, 기존 고로를 개수하지 말 것.⁴²

⁴² Agora Industry (2023) 보고서는 1.5°C 경로 진입을 위한 석탄 기반 제철의 소멸/퇴출 목표 시점을 2043~2045년으로 제시한다.



석탄 기반 제철로부터의 전환을 위한 핵심 요소

석탄 기반 제철로부터 효과적이고 정의로운 전환을 이루려면 다음 핵심 요소에 대한 지속적인 관심과 연구, 행동이 필요하다. 의사결정권자는 지금, 올해부터 이 항목들에 집중해야 한다.

- **친환경 발전 확대:** 고로 1기가 대체되기 시작하면, 새로운 1차 철강 생산 방식인 그린수소-직접환원제철 공법으로의 전환에 속도가 붙을 것이다. 정부와 철강업계는 전력회사를 비롯한 이해당사자들과 조율하여 친환경 수소 생산을 위한 전력 수요 증가에 대비할 수 있도록 친환경 전력 공급 능력을 충분히 확보해야 한다. 다른 업계의 친환경·탈탄소 전력을 탈취해서는 안 된다.
- **화석연료 종속 방지:** 철강사들은 화석연료의 완전한 퇴출을 늦추기 위해 당분간 천연가스를 사용하지만 ‘수소 전환이 가능한’ 직접환원제철 방식의 개발을 검토할 수 있다. 그러나 천연가스에 대한 신규 투자는 신설 인프라(예: 생산 설비로 연결되는 파이프라인)에 대한 종속과 좌초자산을 유발할 수 있다. 명확한 기준을 마련하여 처음부터 그린수소를 사용하도록 설계되지 않은 제철소가 ‘수소 전환 가능’이라는 명칭을 오용하지 않도록 하고, 구속력 있는 천연가스 탈피 일정을 분명히 규정해야 한다.
- **노동자 보호:** 노동조합과 노동자가 소외된 친환경 철강으로의 전환은 실패한 전환이다. 정부와 기업은 노조, 직업 교육 프로그램, 여타 이해당사자와 연계하여 철강산업에 일자리와 세수를 의존하는 노동자와 지역사회의 혼란을 최소화해야 한다. 정부의 인센티브와 정책은 번영하는 탄소중립 경제로의 광범위한 전환에 현재와 과거의 철강 산업 지역이 반드시 포함되도록 시행되어야 한다.
- **환경 정화:** 철강산업으로 인해 발생한 현재와 과거의 대기·수질 오염에 대하여 구제 및 보상 계획을 마련해야 한다. 이를 위해서는 철강기업들의 온전한 투명성과 책임성이 요구되며, 지역사회와 직접 교섭하여 이러한 오염이 미친 영향에 관한 합의점을 찾아야 한다. 나아가, 환경 친화적이고 책임성 있는 철강산업은 투명하고 책임을 지는 상류(upstream) 및 하류(downstream) 가치사슬을 필요로 하며, 자유의사에 따른 사전통고승인(FPIC)을 득하고 일체의 폭력적·강압적 방법을 배제해야 한다.
- **환경 친화적 구매자:** 철강 구매자(예: 자동차 제조사, 풍력발전 회사, 정부 조달)는 탄소중립 경로에 부합하는 제철 방식이 2030년까지 비용경쟁력을 확보할 수 있도록 비용 격차를 감수하겠다는 공약을 정식으로 발표해야 한다.
- **정부 지원:** 정부의 강력한 정책적 뒷받침과 재정적 인센티브는 전환을 가속화할 것이며, 이들에 명확한 조건을 부여함으로써 약속 이행의 책임을 부여하고 의도하지 않은 결과를 관리해야 한다. 기업의 강한 정치적 영향력은 정부의 정책 변화를 저지하거나 지연시키기보다 건설적으로 뒷받침하는 데 사용되어야 한다.



구체적으로 무엇을 해야 하는가?

OECD 국가 내 기존 개수 사업은 반드시 철회되어야 하며, 신흥경제국 기업은 신규 개수 사업을 계획하지 말아야 한다. 고로의 신설 및 개수 중단이라는 마지노선을 지키려면 정부와 기업 모두의 의지가 필요하다.

고로 개수 중단:

향후 6년 반 동안 기존 고로의 약 71%가 개수 예정이므로, 가장 중요하고 절박한 우선순위는 이러한 고로를 보유한 제철소가 시급히 대안을 마련하는 것이다. 향후 이루어지는 모든 개수 사업은 철강산업 전반의 1.5°C 경로와 탄소예산을 고려하여 면밀히 검토 및 검증되어야 한다.

고로 신설 중단:

석탄 기반 설비의 신설은 더 이상 정당화될 수 없다. 탄소 포집·저장(CCS)에 대한 막연한 전망을 고로에 대한 추가 투자를 정당화하는 이유로 사용하지 말아야 한다. 현재 가용하고 신뢰할 수 있는 CCS 감축 기술은 존재하지 않으므로, 석탄 기반 기술에 대한 투자도 없어야 한다.

원료탄 사용 축소:

원료탄에 대한 모든 투자는 검토와 검증을 거쳐야 하며 중국에는 전체 가치사슬의 중단으로 이어져야 한다. 연료탄 감축에는 탄력이 붙었으나 원료탄은 아직 걸음마 단계이다.⁴³ 글로벌 탈석탄 경계가 빠르게 부상하면서 석탄은 과거의 유물이 되고 있다. 원료탄도 완전히 퇴출시킬 때가 왔다.

OECD 국가와 OECD에 본사를 둔 기업이 앞장서야 한다:

탄소 배출에 대한 역사적 책임과 신기술에 대한 투자 여력을 고려할 때, OECD 국가와 OECD 국가에 본사를 둔 기업이 신규 석탄 기반 제철 시설에 대한 일몰조항 도입에 앞장서야 한다. 전 세계 석탄 기반 제철의 퇴출 시점을 앞당기기 위한 신속한 행동이 필요하다. 석탄화력발전의 단계적 퇴출과 마찬가지로 미국, 유럽연합 등 주요국들이 확고한 레드라인을 발빠르게 채택해야 한다. 이들이 모범을 보이고, 친환경 기술 시장을 개척하고, 신흥경제국의 친환경 도약을 직접 지원해야 한다. OECD 국가에 본사를 두고 신흥경제국에서 사업을 하는 기업들은 전 세계 사업장 전반에 동일하고 엄격한 OECD 기준을 적용하는 한편, 그들의 기술적 도약을 지원해야 한다.

석탄 기반 고로 방식의 감소는 철강산업의 1.5°C 온난화 경로 진입 여부를 판가름하는 중대한 지표다. 기존의 모든 고로 신설 및 개수 프로젝트들을 전면 중단해야 하는 이유다. 지금 이 순간의 투자 결정이 지구의 기후 마지노선을 지켜낼 수 있는 철강업계의 탄소 감축 역량을 강화할 것인지, 무너뜨릴 것인지 결정한다.

⁴³ 일부 투자자들은 레드라인을 설정하기 시작했다. 일례로 2022년 말, 영국의 대형은행 HSBC는 신규 탄광에 대한 기존의 투자 금지 조치를 원료탄에 대한 투자 금지로 확대했다.



참고문헌

Agora Industry and Wuppertal Institute (2023). 「글로벌 철강 전환에 대한 15가지 통찰(15 insights on the global steel transformation)」.

<https://www.agora-energiewende.de/en/publications/15-insights-on-the-global-steel-transformation-1/>

Agora Industry, Wuppertal Institute and Lund University (2021). 「기후에 선 세계의 철강. 2020년대에 세계 철강업체가 기후중립 기술에 투자해야 하는 이유(Global Steel at a Crossroads. Why the global steel sector needs to invest in climate-neutral technologies in the 2020s)」.

<https://www.agora-energiewende.de/en/publications/global-steel-at-a-crossroads/>

Bashmakov, I.A., L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, M. Fishedick, Y. Geng and K. Tanaka (2022). 「기후변화와 산업(2022): 기후변화 완화. 기후 변화에 관한 정부간 협의체 제6차 평가 보고서 중 제3 실무그룹 보고서(Industry in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)」.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter11.pdf

Bataille, C., S. Stiebert and F. G. N. Li (2021). 「시설 수준의 글로벌 철강 넷제로 경로; 넷제로 철강 프로젝트 첫 번째 시나리오에 대한 기술보고서(Global facility level net-zero steel pathways; technical report on the first scenarios of the net-zero steel project)」, Net Zero Steel, IDDRI.

http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf

BHP (Accessed 24th April 2023). 「원료탄(Metallurgical Coal)」.

<https://www.bhp.com/what-we-do/products/metallurgical-coal>

Business and Human Rights Resource Center (2019, June 7). 「남아프리카공화국: 아르셀로미탈, 환경오염 혐의로 형사 고소 당해; 회사 입장(So. Africa: ArcelorMittal criminally charged for environmental pollution; company comments)」.

<https://www.business-humanrights.org/en/latest-news/so-africa-arcelormittal-criminally-charged-for-environmental-pollution-company-comments/> (Accessed 24th May 2023).

Campbell, C. (2023). 「철강산업이 탄광의 메탄 문제를 해결해야 하는 이유(Why the steel industry needs to tackle coal mine methane)」, EMBER.

<https://ember-climate.org/insights/research/why-the-steel-industry-needs-to-tackle-coal-mine-methane/#supporting-material-downloads>

Center for Environmental Rights (2019). 「남아프리카공화국 아르셀로미탈 대공개; 2019년 5월 자료집(ASMA Full Disclosure; Fact sheet May 2019)」.

<https://cer.org.za/wp-content/uploads/2019/05/ASMA-Full-Disclosure-5-web-1.pdf>

Center for Environmental Rights (2022, May 19). 「활동가들이 거대 철강사 남아프리카공화국 아르셀로미탈을 상대로 오염을 중단하고 친환경 철강 전환을 가속화하도록 압박하다(Activists push dirty steel giant ArcelorMittal SA to stop pollution and accelerate transition to green steel)」

<https://cer.org.za/news/activists-push-dirty-steel-giant-arcelormittal-sa-to-stop-pollution-and-accelerate-transition-to-green-steel> (Accessed May 24, 2023)



Centre for Research on Energy and Clean Air and Solutions for Our Climate (2022). 「고로 오염의 진실을 파헤치다; 한국의 제철소들이 대기질과 건강에 미치는 영향(Unveiling the Truth Behind Blast Furnace Pollution; Air Quality and Health Impact Assessment of South Korean Steel Plants)」, CREA and SFOC.

[https://forourclimate.org/hubfs/%5BCREA-SFOC%5D%20Unveiling%20the%20Truth%20Behind%20Blast%20Furnace%20Pollution_South%20Korea%20\(ENG\).pdf](https://forourclimate.org/hubfs/%5BCREA-SFOC%5D%20Unveiling%20the%20Truth%20Behind%20Blast%20Furnace%20Pollution_South%20Korea%20(ENG).pdf)

Dhokal, S. 외. (2022). ‘Emissions Trends and Drivers,’ in P. Shukla 외. (eds) **Climate Change 2022:** 「기후변화 완화. 기후변화에 관한 정부간 협의체 제6차 평가보고서 중 제3 실무그룹 보고서(Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)」 (accepted version subject to final edits), IPCC.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

Ebner, J., K. Hipple, N. Messenger and I. Spector (2023). 「오하이오 리버 밸리의 친환경 철강: 청정·친환경 철강 산업이 재탄생할 적기(Green Steel in the Ohio River Valley: The Timing is Right for the Rebirth of a Clean, Green Steel Industry)」, Ohio River Valley Institute.

<https://ohiorivervalleyinstitute.org/green-steel-in-the-ohio-river-valley-the-timing-is-right-for-the-rebirth-of-a-clean-green-steel-industry/>

Energy Transitions Commission (2021). 「철강 수요: 2030년 이전 넷제로 철강이 시판되도록 하는 구매자 행동(Steeling Demand: Mobilising buyers to bring net-zero steel to market before 2030)」

<https://www.energy-transitions.org/publications/steeling-demand/>

Fan, Z., and S.J. Friedmann (2021). 「저탄소 제철: 기술적 선택지, 경제성 평가, 정책(Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy)」, Joule, 5.

[https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(21\)00095-7.pdf](https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(21)00095-7.pdf)

Forster, P., D. Rosen, R. Lamboll and J. Rogelj (2022, November 11). 「미미한 1.5°C 탄소예산이 기후정책에 시사하는 것(What is the tiny remaining 1.5C carbon budget means for climate policy)」, Carbon Brief.

<https://www.carbonbrief.org/guest-post-what-the-tiny-remaining-1-5c-carbon-budget-means-for-climate-policy/>

Global Energy Monitor (2023). 「세계 제철소 정보(Global Steel Plant Tracker)」.

<https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/> (Accessed April 2023, Most recent update)

Hasanbeigi, A. (2022). 「철강의 기후 영향 - 국가 간 에너지 및 CO₂ 집약도 벤치마킹(Steel Climate Impact - An International Benchmarking of Energy and CO₂ Intensities)」, Global Efficiency Intelligence, Florida, United States.

<https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/624ebc5e1f5e2f3078c53a07/1649327229553/Steel+climate+impact+benchmarking+report+7April2022.pdf>

Hristova, B. (2022, October 13). 「아르셀로미탈 도파스코, 2028년까지 석탄 사용 중단 위해 내년부터 코크스 공장 철거(ArcelorMittal Dofasco to demolish coke plant starting next year en route to halting coal use by 2028)」, Canadian Broadcasting Company.

<https://www.cbc.ca/news/canada/hamilton/arcelormittal-dofasco-green-steel-1.6615570>

HSBC (2023). 「넷제로 전환을 뒷받침하는 에너지 정책(Our energy policy to support net zero transition)」

<https://www.hsbc.com/news-and-media/hsbc-news/our-energy-policy-to-support-net-zero-transition> (Accessed June 5th 2023)

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). 「IPCC 제6차 종합보고서(AR6 Synthesis Report)」 (SYR).

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

International Energy Agency (2020, October). 「철강 기술 로드맵; 더 지속가능한 제철을 향해(Iron and Steel Technology Roadmap; Towards more sustainable steelmaking)」.

<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>



International Energy Agency (2021, October). 「2050년 넷제로 - 세계 에너지 부문 로드맵(Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector)」.

<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

International Energy Agency (2022a, September). 「에너지기술전망 친환경에너지 기술 안내서(ETP Clean Energy Technology Guide)」.

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide> (Most recent update September 2022)

International Energy Agency (2022b, December). 「석탄 2022(Coal 2022)」.

<https://www.iea.org/reports/coal-2022>

International Iron Metallurgy Association (Accessed 25th May 2023). 「환원철단광(Hot Briquetted Iron, HBI)」.

<https://www.metallurgy.org/hbi.html>

Lakhani, N. (2023, April 19). 「미국인 약 1억 2천만 명 유해한 검댕·스모그에 노출돼(Nearly 120 million people in US exposed to unhealthy levels of soot and smog)」 - report, The Guardian.

<https://www.theguardian.com/us-news/2023/apr/19/us-air-pollution-unhealthy-levels-smog-soot-california> (Accessed May 24, 2023)

Mission Possible Partnership (2021). 「탄소중립 철강; 철강부문 전환 전략(Net-Zero Steel; Sector Transition Strategy)」.

<https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/10/MPP-Steel-Transition-Strategy-2021.pdf>

Myers, K. (2023, May 16). 「친환경 철강이 미국의 러스티 벨트 재건한다(Green steel could help rebuild America's Rust Belt)」. Canary Media.

<https://www.canarymedia.com/articles/clean-energy-manufacturing/green-steel-could-help-rebuild-americas-rust-belt>

Nicholas, S. and S. Basirat (2023). 「아르셀로미탈: 유럽에서는 그린스틸, 인도에서는 고로(ArcelorMittal: Green steel for Europe, blast furnaces for India)」, IEEFA.

<https://ieefa.org/resources/arcelormittal-green-steel-europe-blast-furnaces-india>

Nishida, Y., T. Aikawa, Y. Okubo, A. Hirose and T. Ohno (2022). 「친환경 철강의 길, 일본에서 무탄소 제철을 추구하다(The path to green steel; pursuing zero-carbon steelmaking in Japan)」, Renewable Energy Institute.

<https://www.renewable-ei.org/en/activities/reports/20221118.php>

Pete, J. S. (2023, May 31). 「클리블랜드 클리프스, 2025년 고로 개수 예정(Cleveland-Cliffs to reline blast furnace in 2025)」, Northwest Indiana Times.

https://www.nwitimes.com/news/local/business/cleveland-cliffs-to-reline-blast-furnace-in-2025/article_25131a98-ffdf-11ed-8393-7f5bd7ca2248.html?utm_campaign=snd-autopilot&utm_medium=social&utm_source=twitter_nwi (Accessed June 5, 2023)

Rivera, A., S. Movalia, H. Pitt and K. Larsen (2022). 「전 세계 온실가스 배출량: 1990~2020년 추정치와 2021년 예비 추정치(Global Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020 and Preliminary 2021 Estimates)」, Rhodium Group.

<https://rhg.com/wp-content/uploads/2022/12/Global-Greenhouse-Gas-Emissions-1990-2020-and-Preliminary-2021-Estimates.pdf>

Sohn, H. Y. (2019). 「제철산업의 에너지 소비 및 CO₂ 배출량과 노블 플래시(Novel Flash) 기술의 개발(Energy Consumption and CO₂ Emissions in Ironmaking and Development of a Novel Flash Technology)」, Metals 10, no. 1: 54.

<https://doi.org/10.3390/met10010054>

Swalec, C. (2022). 「탈탄소 가속화 2022; 세계 철강부문 온실가스 감축 아직 늦지 않았다(Pedal to the Metal 2022; It's not too late to abate emissions from the global iron and steel sector)」, Global Energy Monitor.

https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/06/GEM_SteelPlants2022.pdf



Wang, P., M. Ryberg, Y. Yang, K. Feng, S. Kara, M. Hauschild and WQ. Chen (2021). 「세계 제철산업의 효율성 정체로 인해 공급-수요 측면의 공동 감축 노력 시급(Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts)」, *Nat Commun* 12, 2066.

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>

World Steel Association (2022a). 「2022 지속가능성 지표 보고서(Sustainability Indicators; 2022 Report)」.

<https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2022-report.pdf>

World Steel Association (2022b). 「2022 세계 철강 통계(World Steel in Figures 2022)」.

<https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>

Yu, S., J. Lehne, N. Blahut and M. Charles (2021). 「1.5C 철강: 파리조약에 부합하는 철강 탈탄소 경로(1.5C Steel: decarbonising the steel sector in Paris-compatible pathways)」, E3G.

<https://www.e3g.org/publications/1-5c-steel-decarbonising-the-steel-sector-in-paris-compatible-pathways/>

