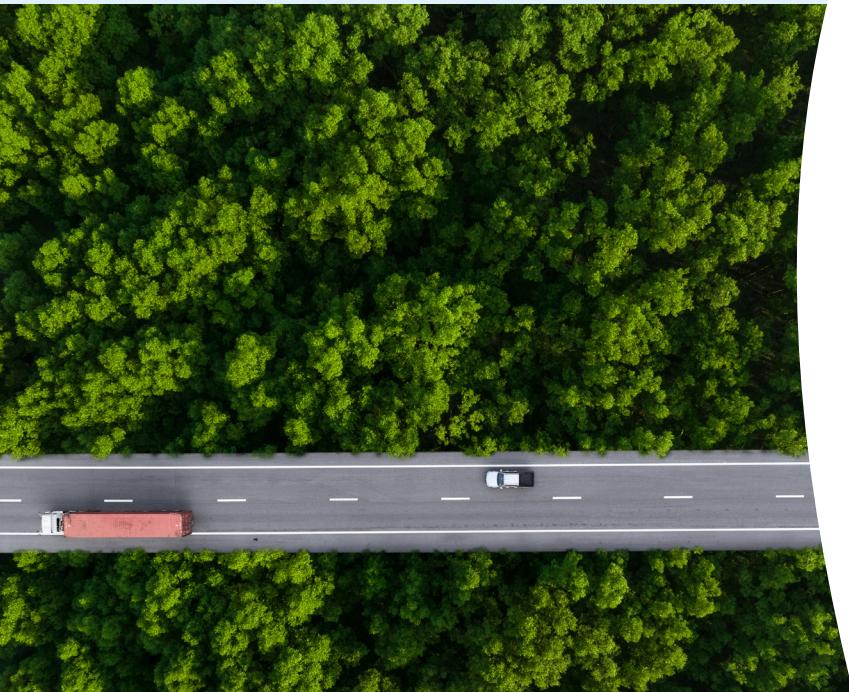


入門解說：鋼鐵行業中的碳捕集 削減高爐 - 轉爐模式的碳排放

2024年5月



數據和免責聲明

本分析僅供參考,不構成投資建議,且不應作為作出任何投資決定的依據。此文代表了作者對受評估公司自行報告的公開資訊的看法和解讀。本文提供了公司報告的參考資料,但作者並未試圖驗證這些公司提供的公開自我報告資訊。因此,作者無法保證本文提供的所有資訊的事實準確性。作者和氣候轉型亞洲 (Transition Asia) 明確對第三方使用或發布參考本文的資訊不承擔任何責任。

目 錄

簡介	2
配置、規模和氣體捕集的技術複雜性	2
碳捕集表現參差，不是一個全面的脫碳選項	3
碳捕集技術並未解決上游煤碳開採所產生的其他溫室氣體排放	4
以再生能源驅動碳捕集	5
對比其他減碳及減排方法的技術準備程度較差	5
結論	6
尾註	7

簡介

碳捕集技術主要是為了石油和天然氣行業而開發的，於五十多年前首次應用於商業用途。然而，近年來，碳捕集技術在其他高碳排放的行業（如發電、鋼鐵生產、水泥製造等）中引起了關注，希望能夠捕集二氧化碳 (CO_2)，並以此能力降低從現時的高污染技術進行低碳轉型的必要性。

在這篇「入門解說」中，我們將探討鋼鐵行業中的碳捕集，但值得注意的是，目前該行業只有兩個以商業運營的碳捕集項目，佔IEA的CCUS項目數據庫中目前運營總容量的1%¹。此外，在已公佈的全球碳捕集與封存 (CCS) 項目中，未來20年計劃用於鋼鐵行業的容量只佔0.5%，儘管鋼鐵行業佔全球排放的7-9%。到2030年，只有1個碳捕集儲存項目用於高爐-轉爐模式 (BF-BOF) 的工廠，而屆時計劃有76個氫 (H_2) 或氨基直接還原鐵 (DRI) 項目實施這項技術。²

儘管如此，仍然有鋼鐵企業指出未來將依賴該技術實現2050年淨零排放目標。同時，鋼鐵企業的脫碳途徑仍然視此技術在協助行業脫碳中擔當重要角色。相比CCS技術，具有強大脫碳潛力的氨基直接還原鐵等新型無化石原料的技術則因為目前支持數據有限，而在脫碳路徑中的代表性較低。³因此，CCS技術在成本和需求方面可能被高估。

本文將討論碳捕集技術在綜合式高爐-轉爐模式的工廠面臨的各種困難，綜合式高爐-轉爐是鋼鐵生產中最常見的碳密集型技術途徑。CCS過程的每一個步驟，包括碳捕集、運輸和儲存，都相對獨立。每個步驟可以在不同地點進行，並具有自己的處理方法和技術瓶頸。然而，對於鋼鐵行業來說，綜合鋼廠在開發碳捕集技術方面面臨著特定的挑戰，這些技術只可以協助部分運營有效地脫碳。我們亦會比較高爐-轉爐 + 碳捕集的技術準備程度以及其他吸引全球投資的行業脫碳選項。

儘管碳捕集技術需要滿足一定條件才能在減緩氣候變化方面發揮作用，但本解說將不討論二氧化碳運輸和儲存方面的技術、排放、能源或經濟挑戰。我們認為目前對二氧化碳運輸和儲存安全性的假設過於樂觀且未經證實，這需要另行探討以進一步闡述。

值得強調的是，雖然有大量學術研究對碳捕集的成本、效率和實施情況進行了理論分析，但迄今尚未在高爐-轉爐模式的工廠上完成大規模碳捕集儲存項目，因此目前缺乏具體參考數據和信息來評估氣候減緩技術的效果。本分析基於IEAGHG的鋼鐵碳捕集研究，這是迄今對將碳捕集整合到BF-BOF工廠中進行的最全面的研究。⁴

配置、規模和氣體捕集的技術複雜性

在本解說中，我們的分析將主要聚焦於燃燒後的捕集技術，因為它是所有碳捕集技術群中發展得最成熟的一項技術。作為利用化學吸收劑的燃燒後捕集技術已在許多行業找到商業應用場景，對於鋼鐵行業而言，這技術是最可行的選項，儘管它仍然處於研究和開發階段而非試點階段。本解說將不會討論其他的捕集技術，包括迴路循環捕獲、富氧燃燒和燃燒前捕集技術。⁵

無論是燃燒後捕集還是其他方式，高爐-轉爐模式的複雜性使得碳捕集實施充滿挑戰性。綜合鋼廠通常從關鍵點如發電廠、燒結廠和焦爐熱氣爐排放大量污染物。然而，由於鋼廠配置隨著地理位置不同而變化，因此鋼鐵行業在開發模塊化碳捕集系統時面臨相當多的困難。這些困難來自於其設計的複雜性和大量的定制化需求，進而限制了其廣泛部署。⁶鋼廠設有多個煙囪，並橫跨大片土地，這意味著實施規模將非常巨大，需要數十個單元來捕集所有煙道氣體，並且需要整個鋼廠之間互相連接。對鋼廠而言，實際上所需的改造是非常龐大的。

除了過程和規模之外，碳捕集廠設計、吸收劑的選擇和熱能需求必須根據煙道氣體的不同組成而有所不同，因為沒有一種技術適用於所有情況。⁷儘管鋼廠煙道氣體中的二氧化碳 (CO_2) 濃度比煤碳或天然氣發電廠的煙道氣體更高，但多種氣體（如氮氣 (N_2)、一氧化碳 (CO)、甲烷 (CH_4)、氫 (H_2) 等）的存在以及來自不同來源的不同濃度，使得在鋼鐵行業部署碳捕集技術的有效性面臨重大挑戰。⁸

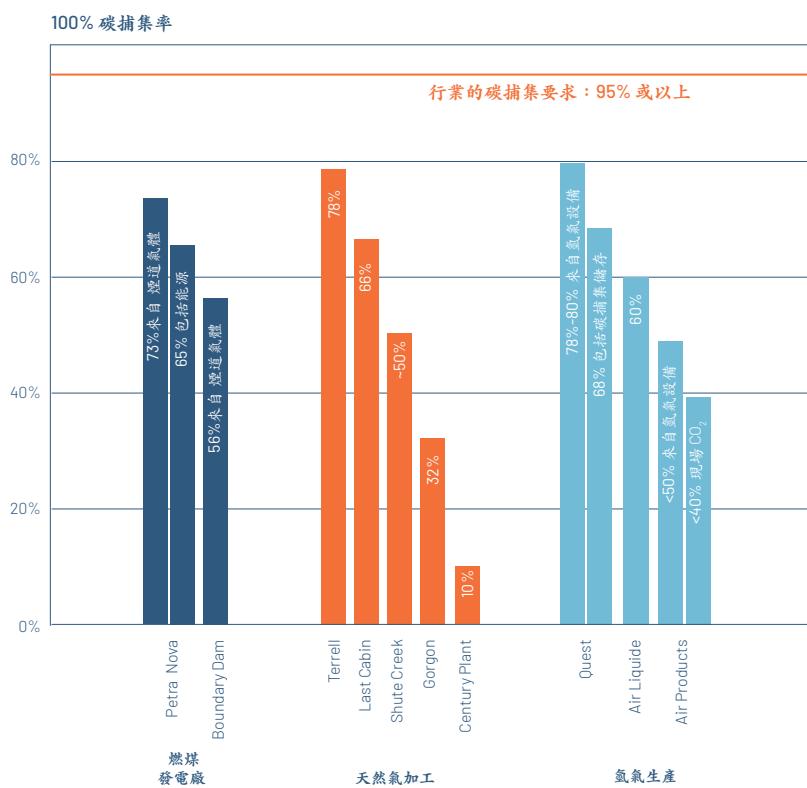
表一、在高爐轉爐模式的工序中，不同煙道氣體中 CO_2 和其他氣體濃度⁹

	熱軋帶	熱風爐	發電廠	焦爐煙囪
CO_2 (Vol%)	1.9	13.9	14	22
CO (mg/m ³)	22	38	<3	0.18%
O ₂ (Vol%)	0.17	0.092	0.076	0.035
NOX (mg/m ³)	152	87	168	300
SOX mg/m ³	171	229	300	200
VOC mg/m ³	0.14	0.039	0.43	-
PM10 mg/m ³	6.7	NR	3.3	NR

碳捕集表現參差，不是一個全面的脫碳選項

因此，碳捕集技術的減排效果取決於應用情況，通常在二氣化碳濃度較高的源點安裝碳捕集技術時，捕集率較高。然而，總體而言，碳捕集項目一直未能達到預期的捕集率，受到技術和經濟挑戰的困擾，正如IEEFA在圖一中的分析所突顯的那樣。這是我們對鋼鐵行業碳捕集技術減排潛力持消極態度的主要原因之一。

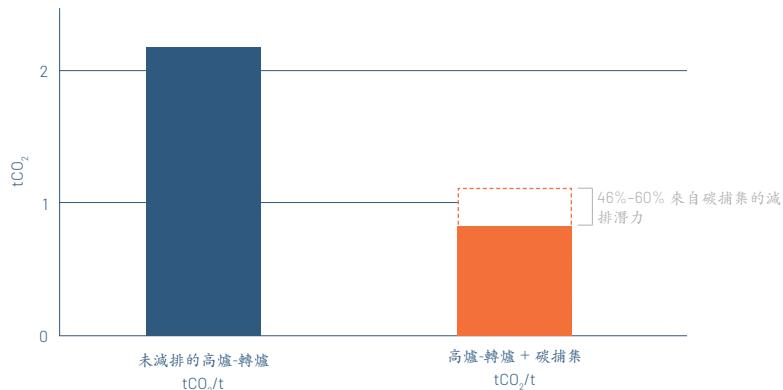
圖一、全球碳捕集項目的捕集率



來源: IEEFA, 改編自 <https://ieefa.org/ccs>

大部分高爐轉爐模式的鋼鐵廠主要排放來自自有發電廠或鋼廠的餘熱發電廠，這些廠通常使用煤炭及其他燃料源，例如高爐煙氣。這些鋼廠發電廠的煙囪二氧化碳濃度較低，與熱煤電廠相似，這增加了碳捕集項目的失敗風險，因為碳捕集項目在熱煤電廠上的成功率很低。¹⁰考慮到在綜合鋼廠中使用碳捕集技術減少二氧化碳排放的技術複雜性，我們認為鋼鐵行業會面臨與全球運營的碳捕集項目相似的挑戰和不盡如人意的結果。

圖二、綜合高爐-轉爐工廠碳捕集減少排放的範圍



此外，其他分析師已經對脫碳潛力設定了較低的標準。研究表明，典型的高爐-轉爐（碳強度約為2.1噸CO₂/噸鋼）利用燃燒後碳捕集技術，理論上可以實現46-60%的排放減少。^{12 13 14}即使如此，仍存在廣泛的不確定性。目前，碳捕集在高爐-轉爐鋼廠的應用仍然停留在理論探討階段，尚未大規模應用。

在綜合性鋼鐵廠內，雖然高爐排放的氣體大部份為二氧化碳，但同時也會產生許多其他可燃氣體。為了提高效率，這些氣體被引導到鋼廠的發電廠進行燃燒，因此大部分高爐轉爐鋼廠的二氧化碳排放來自發電廠的煙道，而非高爐的煙道。為了有效減少排放，碳捕集工作應優先考慮廠內排放量最高的源頭，例如發電廠、熱風爐和燒結廠。然而，由於排放源點分散，單一捕集技術無法處理所有排放。綜合鋼廠通常擁有約10-20個主要排放源頭，不包括逃逸排放。這種多樣性意味著為了有效減少排放並實現淨零目標，需要採用多樣性且具高捕獲率的碳捕集技術。

碳捕集技術並未解決上游煤碳開採所產生的其他溫室氣體排放

燒煤是鋼鐵行業重要的排放來源，但這些排放並不僅僅來自於高爐轉爐工藝中煤炭的使用。根據Responsible Steel等行業標準的要求，上游排放應被納入碳強度數據。^{15 16}

與燒結煤相關的甲烷排放量因為採用了深度開採過程而處於高水平。從煤碳開採運營中釋放的甲烷量相當於國家溫室氣體排放量，估計全球的冶金煤甲烷排放量可能超過德國或加拿大等國家。¹⁷考慮到煤碳開採過程中的逃逸甲烷排放，與基於高爐-轉爐的鋼鐵生產路線相關的排放可能大幅增加。

根據IEA的全球甲烷排放追蹤器(Global Methane Emission Tracker)，各國冶金煤開採的排放強度各不相同。¹⁸其中，燒結煤的排放強度從澳洲煤碳的5.4 kgCH₄/噸到俄羅斯冶金煤的22.4 kgCH₄/噸不等。考慮到

甲烷的溫室氣體潛能值（GWP）為 $28\text{tCO}_2/\text{噸}$ ，以及每噸鋼材約使用700公斤冶金煤，根據高爐轉爐工藝的鋼鐵製造過程中的額外逃逸排放，每噸鋼材的額外排放在 tCO_2e 方面範圍從0.1到 $0.44\text{tCO}_2\text{e/tLS}$ ，相當於每噸鋼材額外的5%-21%的 CO_2e 。¹⁹此外，被遺棄礦井排放的甲烷排放未納入這些密度計算中，然而它們可能對整體排放產生顯著影響。²⁰

同時，值得注意的是，碳捕集和二氧化碳壓縮將帶來額外的能源需求，這可能導致逃逸甲烷排放增加。除非使用可再生電力作為碳捕集裝置的燃料源，否則這種情況可能會發生。²¹

以再生能源驅動碳捕集

壓縮二氧化碳所需的額外電力通常由其他能源提供，往往是來自鋼廠自有的燃煤發電廠，這導致與無碳捕集的鋼廠相比，其能源消耗大幅增加。

碳捕集與封存是一個非常複雜的過程，既需要複雜的工程技術，以及大量能源供應來操作。理論上估計的能源需求範圍為 $1.0 - 5.6\text{GJ/tCO}_2$ 。考慮到生產每噸鋼材大約需要 21GJ 的能量，如果要從生產過程中消除所有排放，能源需求則將會增加10%至54%。^{22 23}鑑於捕集所有排放的可行性低，因為一個比較合理的計算，能源需求增加5%至27%以取得46%至60%的減排效果。能源需求很可能會處於估算範圍的高端，因為對於燃煤發電廠進行碳捕集，其煙氣與鋼廠的燃煤發電廠相似，後者的典型能源需求為 3.89GJ/tCO_2 。²⁴

由於碳捕集基礎設施導致的額外能源需求較高，通常需要來自其他能源源頭的電力供應，例如IEAGHG案例研究中提到的天然氣，儘管更大機會是來自鋼廠現有的電力來源--即燃煤發電廠或電網供電。這導致每單位鋼材的能源密度增加。由於碳捕集被整合到發電廠時，燃煤發電廠通常會面臨20%-30%的電力輸出損失，因此鋼廠的發電廠需要事先以較低的運營水平運行，或者從外部獲取額外的電力。²⁵為了減少進一步的間接排放增加，確保充足的自有或電網供應的可再生電力將是碳捕集技術的一個必要條件。鑑於碳捕集在鋼廠的有限減排潛力，利用可再生電力提供更有效和更深層的排放減少也是一個好的應用方向。

對比其他減碳及減排方法的技術準備程度較差

碳捕集技術在發展和實施方面目前落後於其他減排方法。與資本開支和營運開支相關的成本仍處於研究和開發階段，或屬於完全未知次數。此外，與更成熟的技術相比（例如表二中提到的技術），通過碳捕集實現的排放減少潛力較低。上游和下游的挑戰對碳捕集的可信度構成了重大障礙，主要是由於煤碳開採和運輸以及儲存挑戰，需要根據地理和地質因素作出很重大的變化。

從歷史上看，碳捕集在應用於其他行業時面臨運營問題，而且表現並不理想。相比之下，廢鋼+電弧爐工藝非常成熟，在生產應用於汽車的電工鋼等複雜鋼材方面取得了顯著進展。同樣，直接還原鐵(DRI)技術已經成熟，通常利用60%-70%來自化石源的氫。儘管將氫濃度提高到70%-80%以上仍處於試驗階段。

表二、高爐-轉爐+碳捕集與其它低碳鋼鐵生產方法的總結

	高爐-轉爐+碳捕集	氫基直接還原鐵-電弧爐	廢鐵-電弧爐
資本開支	不確定	已證實	已證實
減排效能	46%-60%	+90%	+95%
上游挑戰	煤炭開採排放	生產氫氣	廢鋼供應
生產挑戰	碳捕集技術欠缺往績、能源需求、胺類降解	超過70%-80%的氫氣濃度仍然困難	無
下游挑戰	二氧化碳的運輸及儲存	無	無
狀況	研發	試驗	生產

在2030年之前，鋼鐵製造商應該擴大投資於接近零排放的鋼鐵生產方式，重點放在廢鋼、H2-DRI工藝以及既有直接還原（DR）和高爐（BF）級礦石上。開發碳捕集技術將無法滿足低碳轉型中的客戶減排所需，並使鋼鐵公司面臨碳定價機制和碳邊界（例如CBAM）的風險。

結論

碳捕集技術面臨著重重障礙，這些障礙來自於鋼廠多樣的排放源、各種捕集應用以及綜合鋼廠所需的大規模基礎設施。

僅依靠碳捕集去減低排放是不太可能實現鋼鐵生產所需的碳減排，也令行業無法在所需的时间範圍內實現碳中和。這是因為技術上的限制阻礙了在所有排放源點部署碳捕集基礎設施，以及碳捕集項目無法交付所承諾的捕集率，加上持續依賴燃結煤導致的大量逃逸甲烷排放。

此外，額外的碳捕集基礎設施增加對能源的需求，而這些額外能源需求直接影響了碳捕集技術減排的效果。目前全球大部分的鋼廠都運營著燃煤發電廠，這些發電廠與高爐煙氣混合燃燒以產生所需的電力。如果用於碳捕集的額外能源來自燃煤發電，則排放將同時上升。雖然理論上，增加燃煤發電的排放可以被捕獲，但這將需要更多的能源，並肯定會產生更多的逃逸煤礦甲烷排放。

總的來說，單靠碳捕集並不適合完全實現鋼鐵行業的脫碳，也不符合實現淨零排放目標。鑑於行業對中國包頭碳捕集項目的商業規模持續關注，該項目即將完成。相反，鋼鐵公司應該繼續專注於像H2-DRI這樣的新生技術，這些技術對於實現該行業的脫碳更有潛力。

基於這些原因，我們認為鋼鐵行業中的碳捕集技術在可預見的未來將主要局限於研發和試點項目，而不會改變技術的發展方向，也無法實現當中的應許的潛力。鋼鐵行業長期以來一直在討論碳捕集降低排放的潛力；然而，這種潛力從未出現，更重要的是，該技術將無法在不使用其他更昂貴的選項（如直接空氣碳捕集（DACC））的情況下實現接近零排放鋼材。由於東亞在脫碳方面仍處於落後，鋼鐵行業應該將目光從碳捕集轉向氫氣直接還原鐵-電爐鋼（H2-DRI-EAF）和廢鐵-電爐鋼（scrap-EAF）等技術，並且最好由可再生電力為所有這些工藝提供所需的能源。

尾註

1. IEA. "Carbon Capture & Storage Projects Database." IEA, www.iea.org/data-and-statistics/data-product/carbon-captureus-projects-database.
2. Agora. "Global Steel Transformation Tracker." Agora, www.agora-industry.org/data-tools/global-steel-transformation-tracker.
3. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 11, www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter11.pdf
4. Iron and Steel CCS Study(Techno-Economics Integrated Steel Mill), 2013/14, July, 2013.
5. Li, X., et al. "Optimal Pricing of CO2 Storage in Coal-Fired Power Plants with Carbon Capture." Energy, vol. 248, 120977, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122038984.
6. Sievert, Katrin, et al. Why the Cost of Carbon Capture and Storage Remains Persistently High , Sept. 2023, www.iisd.org/system/files/2023-09/bottom-line-why-carbon-capture-storage-cost-remains-high.pdf.
7. Mirza, Nouman, and David Kearns . 2022, State of the Art: CCS Technologies 2022, [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2022.pdf](http://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2022.pdf).
8. Kun He, Li Wang,A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry,Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 70,2017,Pages 1022-1039,ISSN 1364-0321,https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007.
9. Pandit, J, Watson M and Qader, A, 2020. Reduction of Greenhouse Gas Emission in Steel Production Final Report. CO2CRC Ltd, Melbourne, Australia, CO2CRC Publication Number RPT20-6205.
10. U.S. Government Accountability Office. Report on Carbon Capture and Storage: Actions needed to improve DOE Management of Demonstration Projects . GAO-22-105111, U.S. Government Publishing Office, 2021.
11. Likely emission reductions are based on the upper and lower ranges as suggested by the IEAGHG techno-economic study of CCS on and iron and steel plant. Iron and Steel CCS Study(Techno-Economics Integrated Steel Mill), 2013/14, July, 2013.
12. Jose de Villafranca Casas, Maria, et al. New Climate Institute , 2022, Decarbonisation in the Global Steel Sector: Tracking the Progress, https://newclimate.org/sites/default/files/2023-01/steel_sector_05_12.pdf.
13. Iron and Steel CCS Study(Techno-Economics Integrated Steel Mill), 2013/14, July, 2013.
14. Net Zero Steel Initiative , 2021, Net Zero Steel Sector Transition Strategy, <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/12/MPP-Steel-Transition-Strategy.pdf>.
15. "Standards." ResponsibleSteel, www.responsiblesteel.org/standard/.
16. "Iron and Steel." Science Based Targets, sciencebasedtargets.org/sectors/steel.
17. Campbell, Conal. 2023, Why the Steel Industry Needs to Tackle Coal Mine Methane, <https://ember-climate.org/app/uploads/2023/01/Ember-report-Why-the-steel-industry-needs-to-tackle-coal-mine-methane.pdf>.
18. International Energy Agency, 2023, Global Methane Tracker Documentation 2023 Version, https://iea.blob.core.windows.net/assets/48ea967f-ff56-40c6-a85d-29294357d1f1/GlobalMethaneTracker_Documentation.pdf.
19. Iea. "Methane and Climate Change – Methane Tracker 2021 – Analysis." IEA, www.iea.org/reports/methane-tracker-2021/methane-and-climate-change.
20. Coalbed Methane Outreach Program, Environmental Protection Agency, United States , www.epa.gov/cmop/about-coal-mine-methane. Accessed 19 Apr. 2024.
21. Howarth RW, Jacobson MZ. How green is blue hydrogen? Energy Sci Eng. 2021; 9: 1676-1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
22. Iron and Steel CCS Study(Techno-Economics Integrated Steel Mill), 2013/14, July, 2013.
23. World Steel Association, 2023, Sustainability Indicators 2023 Report :Sustainability Performance of the Steel Industry 2004-2022, <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators-2023-report/>.
24. Yue Fu, Liyuan Wang, Ming Liu, Jinshi Wang, Junjie Yan,Performance analysis of coal-fired power plants integrated with carbon capture system under load-cycling operation conditions,Energy,Volume 276,2023,127532,ISSN 0360-5442,<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127532>.
25. OECD/NEA/IEA(2010), Projected Costs of Generating Electricity 2010, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264084315-en>.

