



Government of the Netherlands

UABIO

*Тренінг з питань скорочення викидів
парникових газів*

Нові і перспективні технології в металургії

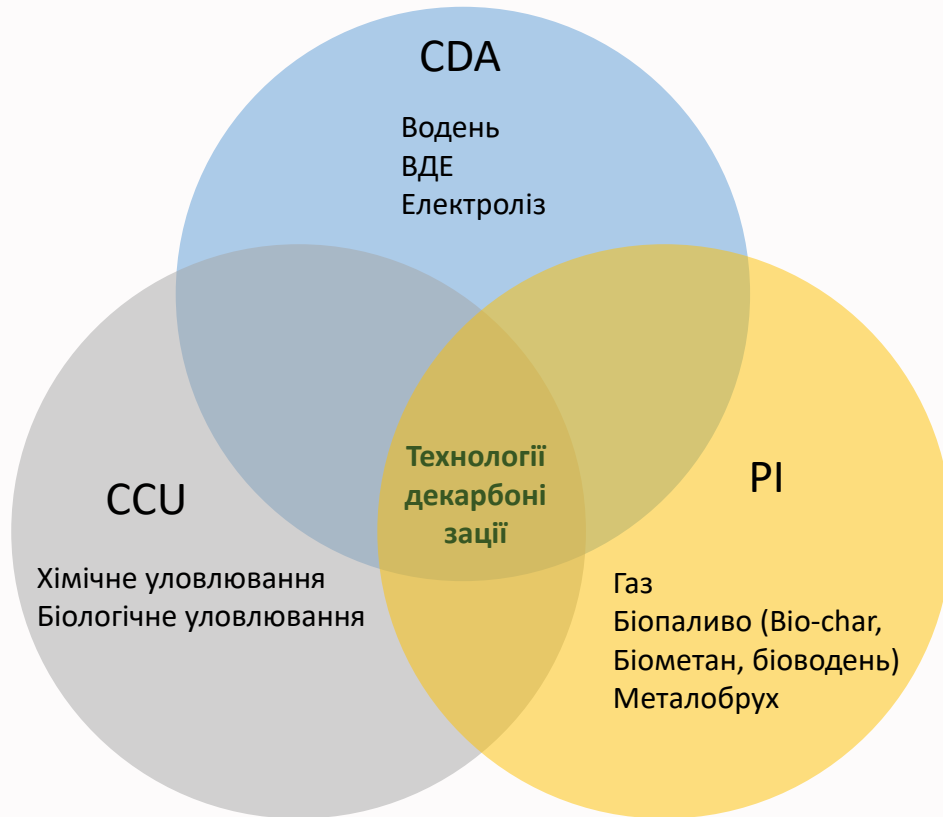
Євген Олійник,
експерт ГС «Біоенергетична
асоціація України»



Капітальні інвестиції в проекти декарбонізації

Джерело	CAPEX, \$ млрд	\$ / т сталі	Зростання ціни, %
McKinsey & Company	300-400	1850	+ 10-50% (10-30%)
BloombergNEF (BNEF)	278-384		+ 30-50 %
IEA	1200-1400	866	+ 20-40 %
Європейська асоціація виробників сталі (Eurofer)	144		+25-35 %
Breakthrough Energy	100		
World Steel Association	1400		+ 30-40%
EU Commission	50-60		
World bank	1000		
Voestalpine	8,4 (DRI + H2 - 7,5 млн т/рік)	1120	
	27,6 - інфраструктура	3680	
ArcelorMittal Europe	36-48 (DRI + H2)	1000-1500	
	240 - інфраструктура	4600	
H2 Green Steel	3 (DRI + H2 - 5 млн т/рік)	600	
Thyssenkrupp	10		+ 20-30%
SSAB	4-5		+ 20-30%

Шляхи інновацій та декарбонізації



CDA – Carbon direct avoidance
CCU – Carbon capture and Usage
PI – Process integration
SCU - Smart Carbon usage

Два головних шляхи декарбонізації металургії:

- SCU (Smart Carbon usage)
- CDA (Carbon direct avoidance)

SCU = PI + CCU

PI (Інтегровані процеси) стосується можливих модифікацій або адаптацій існуючих сталеливарних заводів з метою зменшення парникових викидів.

CCU (Технології уловнювання і використання вуглецю) складається з уловлювання CO₂ або CO з газів процесу виробництва сталі та виробництва подальших цінних продуктів на основі вуглецю з уловленого викопного вуглецю, що пом'якшує викиди, викликані викопними ресурсами в їх звичайних виробничих ланцюгах.

CDA (технології прямого уникнення викидів вуглецю) в першу чергу фокусується на розробці нових процесів сталеплавильного виробництва, пряме відновлення заліза та ВДЕ для виробництва сталі, тим самим уникаючи утворення оксидів вуглецю та його викидів.

Сценарії трансформації від EUROFER

Scenario 1: Business as Usual

- Ніякого технологічного розвитку не відбувається
- Інтенсивність CO₂ на тонну виробленої сталі залишається незмінною.

Scenario 2: Поточна модернізація

- Існуючі об'єкти оснащені технологією для подальшого обмеження викидів вуглецю
- Фундаментальні процеси не змінюються
- Передбачається використання відновлюваної електроенергії
- Скорочення викидів на 15%

Scenario 3: Поточні проекти з низьковуглицевою енергією (електроенергія та газ)

- Вихід на проектні потужності і промисловий рівень поточних проектів
- Початок впровадження нових технологій і процесів, які в даний час знаходяться в стадії розробки.
- Доступна для використання лише відновлювана електроенергія
- Уловлювання та використання вуглецю
- Зниження викидів CO₂ на 75%

Scenario 4: Альтернативний шлях з відновлюваною енергією (електроенергія та газ)

- Використання найкращих технологій використання та зберігання CO₂
- Доступна для використання лише відновлювана електроенергія, а не усі види енергії
- Зниження викидів до 80%

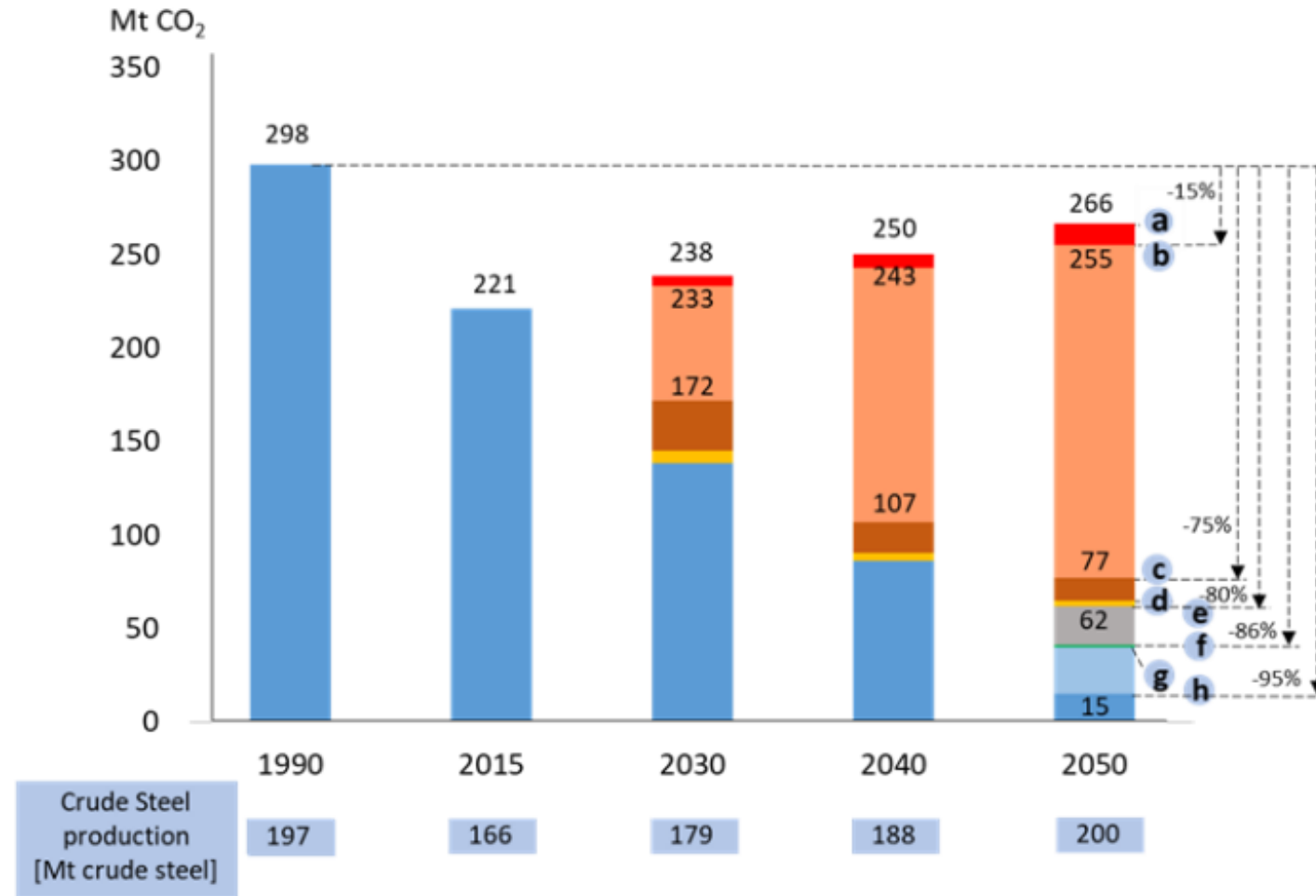
Scenario 5: Повністю CO₂ нейтральні проекти з використанням електроенергії і газу

- Поглиблена декарбонізація на усьому ланцюгу постачання і виробництва
- Повністю декарбонізовані джерела енергії
- Скорочення викидів до 85%

Scenario 6: Альтернативний сценарій з CO₂ нейтральними проектами

- Скорочення викидів до 95%

Сценарії трансформації



a) Business as Usual на рівні 2015 року

b) Поточна модернізація (BAT + EAF)

c) Проекти з низьковуглецевою енергією

d-e) Альтернативний шлях з низьковуглецевою енергією

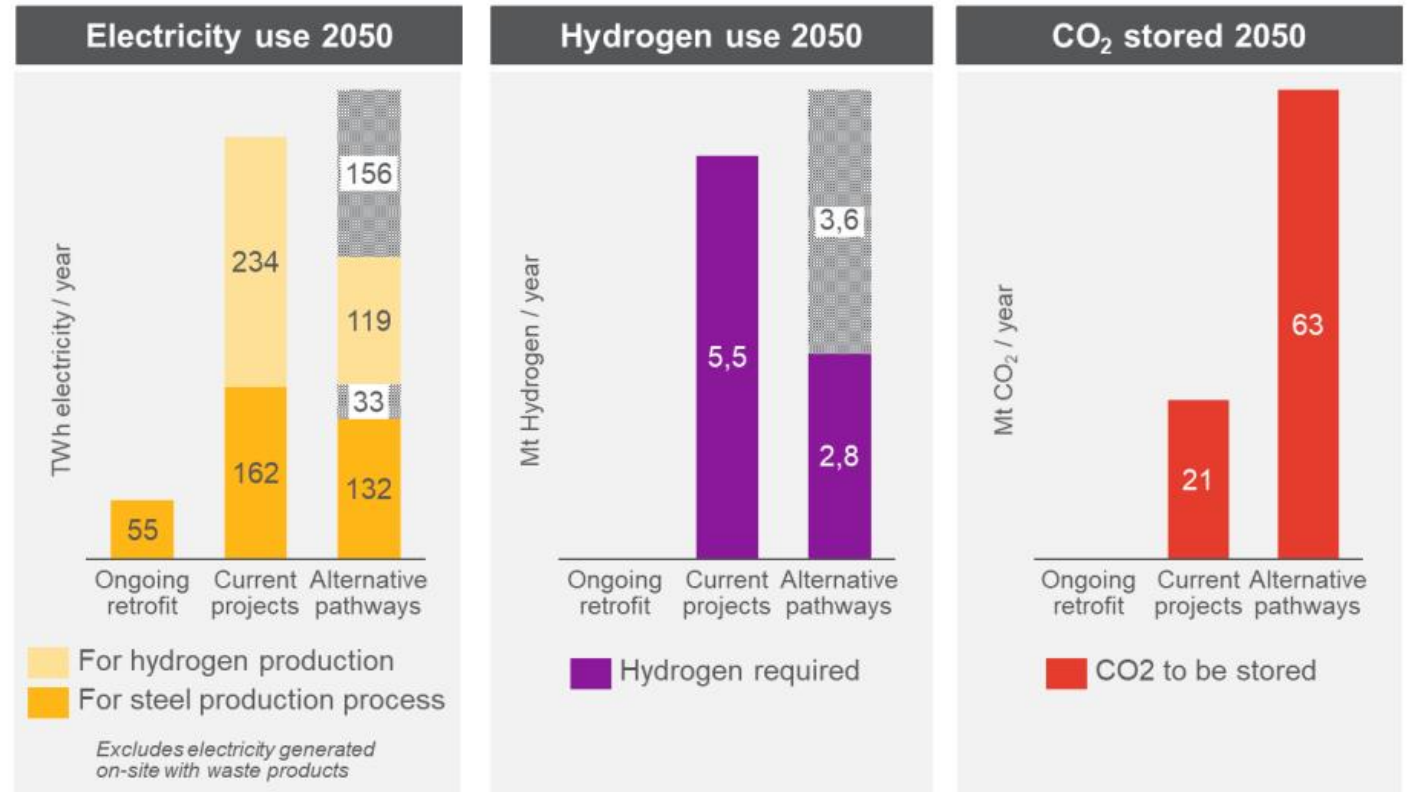
f) Повністю CO₂ нейтральні проекти з використанням електроенергії і газу

g-h) Альтернативний сценарій з CO₂ нейтральними проектами

Сценарії трансформації

Ключові умови для успіху:

- Збільшення обсягів використання металобрухту до **147 млн т**
- Зростання споживання низьковуглецевої електроенергії в 7 разів – **400 ТВт-год**, з яких 162 ТВт-год для виробництва сталі і 234 ТВт-год для виробництва водню.
- Зростання споживання водню до **6,4 млн. т**
- Подолання перешкод для впровадження технологій зберігання **21-63 млн. т CO2**
- Збільшення обсягів споживання залізнорудної сировини з низьким вуглецевим слідом.
- Доступність до фінансових ресурсів



Будь-яка успішна, далекосяжна трансформація вимагатиме радикальних змін:

- Поглиблені наукові дослідження для розробки новітніх технологій
- Інвестиції в промислове впровадження передових, проривних технологій
- Посилене міжгалузеве співробітництво
- Розвиток енергетичної система для забезпечення поставок електроенергії

Технології в металургії

BF-BOF (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace) — це традиційний метод виробництва сталі (непряме відновлення), що поєднує використання **доменної печі (BF)** та **конвертера з кисневим дуттям (BOF)**. Ця технологія широко використовується у світовій сталеливарній промисловості для переробки залізної руди в сталь.

Недолік – залежність від викопного палива і високі викиди CO₂ через використання коксу.

Одним з можливих рішень є часткове заміщення коксу біовугіллям або використання технологій уловлювання та зберігання вуглецю (CCS).

Залізо прямого відновлення (DRI) — це металургійна сировина, отримана шляхом відновлення залізної руди (окислів заліза) без її плавлення. Відновлення відбувається при використанні газоподібного відновника, найчастіше природного газу або водню, що призводить до утворення чистого заліза з низьким вмістом домішок.

DRI має пористу структуру і зазвичай представлено у вигляді гранул або губчастого заліза.

Через пористу структуру DRI є досить реактивним і може легко окислюватися, що робить його зберігання та транспортування більш ризикованим.

Гаряче брикетоване залізо (HBI) — це форма заліза, яка використовується як металургійна сировина в сталеливарній промисловості. HBI є продуктом, який отримують шляхом стиснення прямовідновленого заліза (DRI) у компактні брикети при високій температурі. **Основною метою виробництва HBI є покращення транспортувальних і зберігальних характеристик DRI**

Рівні готовності технологій (TRL)

TRL (Technology Readiness Level) — це шкала, яка використовується для оцінки рівня готовності технології до комерційного впровадження або використання. Шкала TRL допомагає:

- Визначати готовність технологій до масштабування
- Оцінювати ризики на кожному етапі розробки
- Оптимізувати процес інвестування у дослідження і розробки
- Відслідковувати прогрес технологій і приймати рішення про їх подальшу розробку або впровадження

• **TRL 1 — Початкові принципи:** Основні наукові принципи вивчені і досліджені. На цьому етапі існує лише теоретичне обґрунтування ідеї.

• **TRL 2 — Формування концепції:** Починається розробка концепції та застосування технології. Це етап формування ідеї про потенційне застосування, проте практичних експериментів ще не проводиться.

• **TRL 3 — Експериментальні докази концепції:** Наукова концепція перевіряється через аналітичні та експериментальні дослідження. Ведуться перші лабораторні експерименти для перевірки життєздатності технології.

• **TRL 4 — Технологія перевірена у лабораторії:** Технологія проходить перші експериментальні тести в лабораторних умовах, щоб підтвердити її працездатність.

• **TRL 5 — Технологія перевірена в релевантних умовах:** Технологія проходить випробування в середовищі, яке наближене до реальних умов, але ще в обмеженому масштабі.

• **TRL 6 — Прототип випробуваний у релевантних умовах:** Прототип або система тестується в умовах, які наближаються до реальних операційних умов (під час польових випробувань).

• **TRL 7 — Система продемонстрована у робочих умовах:** Технологія чи система повністю демонструється в реальних умовах (наприклад, на пілотному виробництві або в промисловій операції).

• **TRL 8 — Система готова до експлуатації:** Система чи технологія доведена до стадії, коли вона готова до впровадження та використання у комерційних умовах. Це означає наявність серійного зразка.

• **TRL 9 — Повністю впроваджена технологія:** Технологія успішно працює у своїх фінальних умовах експлуатації. Це комерційний або промисловий рівень, на якому технологія використовується в реальних операціях.

Окремі перспективні технології в металургії

- пряме відновлення на основі водню (**H₂-DR - hydrogen-based direct reduction**)
- відновна плавка на основі плазми водню (**HPSR - hydrogen plasma smelting reduction**)
- лужний електроліз залізної руди (електровідновлення) (**AIE - alkaline iron electrolysis**)
- електроліз розплавленого оксиду залізної руди (**MOE - molten oxide electrolysis**)
- перетворення оксиду вуглецю (**CCU**)
- заміщення викопних енергоносіїв біомасою
- високоякісне сталеплавильне виробництво з підвищеним використанням брухту

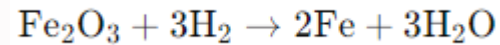


Найбільш перспективні технології в металургії (H₂-DR)

Технічний опис: Маршрут H₂-DR є продовженням відпрацьованої технології прямого відновлення на основі природного газу (NG-DR).

Робочу газову суміш можна поступово збагачувати воднем, що забезпечує високу гнучкість процесу. Для підтримання процесу необхідна додаткова теплова енергія, що може бути отримана від H₂ або електроенергії.

- Результатом є [DRI або губчате залізо з вмістом заліза 95%](#).



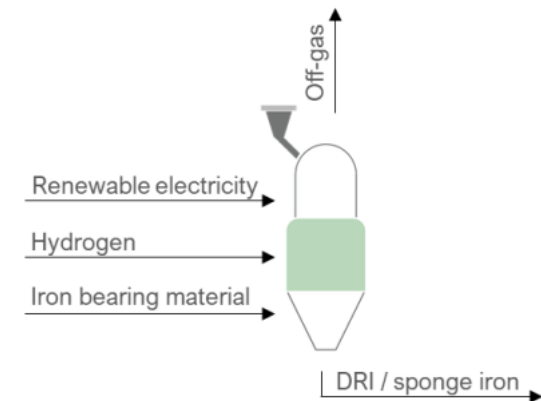
50-60 кг водню - 1 т заліза

- **Сировина, енергії та інших матеріалів:**

Виробництво водню з природного газу (метану) шляхом парового реформінгу або шляхом електролізу води з використанням ВДЕ.

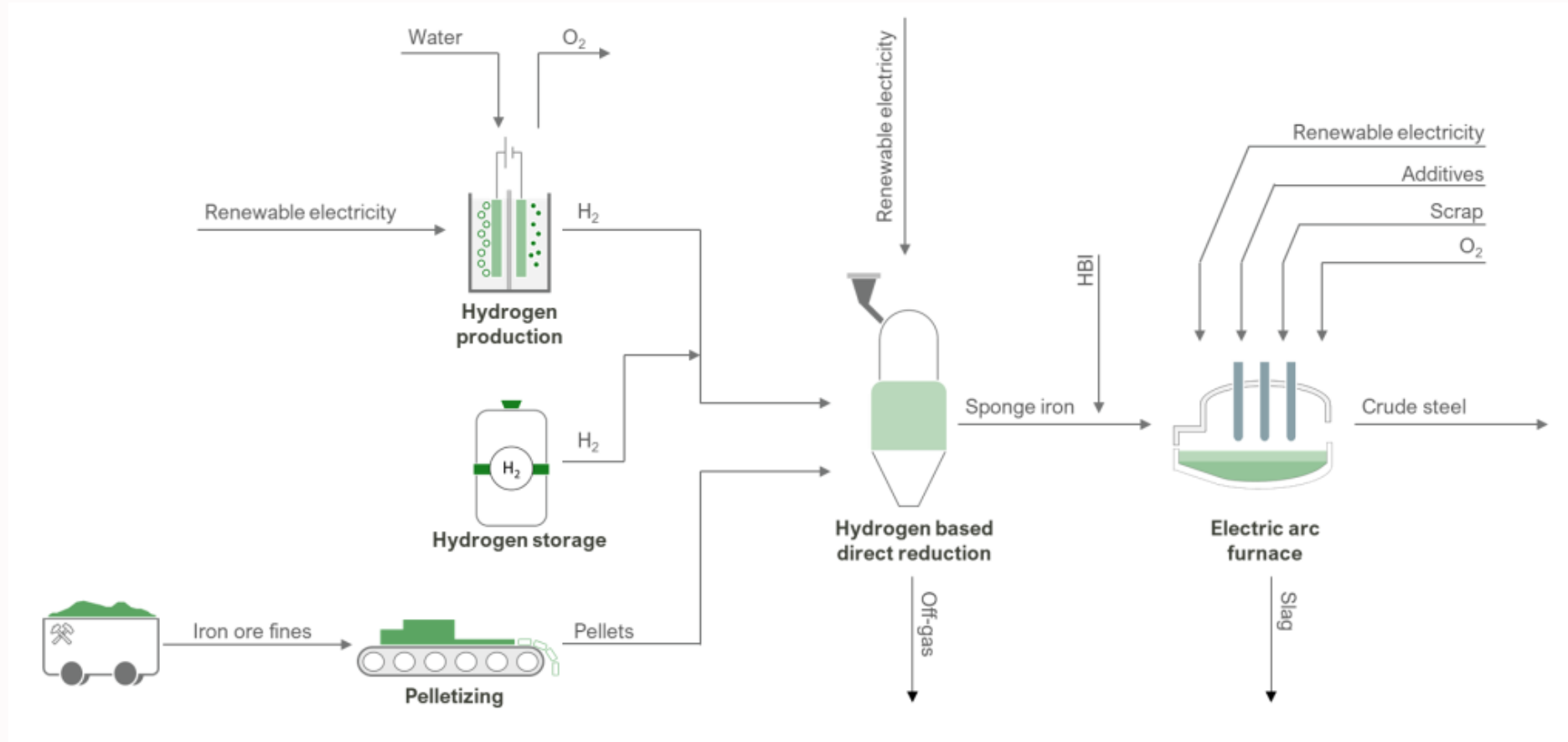
- **Проекти:** SSAB's HYBRIT, ArcelorMittal Hamburg (H2H), Salzgitter (SALCOS), ThyssenKrupp (tkH2Steel), HYFOR
- **Економічна оцінка:** CAPEX 230 €/т сталі, собівартість у 2050 green H₂-DRI + EAF 532-640 €/т сталі, OPEX +20-30%, CO₂ – 60-100 €/т
- **Енергоспоживання:** 3,3-3,5 МВт-год/т сталі, 4,1 МВт-год/т сталі з врахуванням виробництва котунів
- **Потенціал зниження викидів CO₂:** до 100% при використанні ВДЕ
- **Рівень технологічного розвитку:** TRL 6-8

Пряме
відновлення на
основі водню



Найбільш перспективні технології в металургії (H₂-DR)

Технологічний маршрут на основі прямого відновлення заліза воднем



Найбільш перспективні технології в металургії (HPSR)

HPSR (Hydrogen Plasma Smelting Reduction) — це інноваційна технологія виробництва сталі, що використовує водневу плазму для відновлення залізної руди.

Водень у плазмовій формі має високу температуру і здатен відновлювати оксиди заліза до чистого заліза (Fe).

Плазма — це іонізований газ із вільними електронами і йонами, що має високу температуру.

- **Технічний опис:**

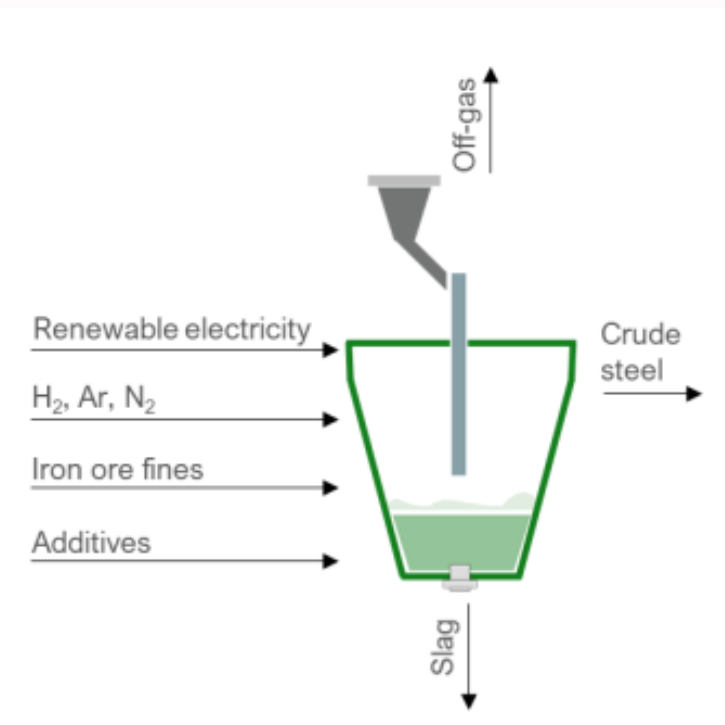
Пряме перетворення залізної руди в сталь без додаткового збагачення.

Плазма, що утворюється при проходженні електричного струму через газ, діє як відновник і генерує необхідну енергію для розплавлення металевого заліза. Для проведення струму в плазмову дугу додають аргон (Ar) або азот (N₂).

Відпрацьований газ відводиться через кришку і потім очищується на наступній стадії процесу. Невикористаний H₂ може бути повторно використаний, а продукт окислення (H₂O) відокремлюється від відхідних газів.

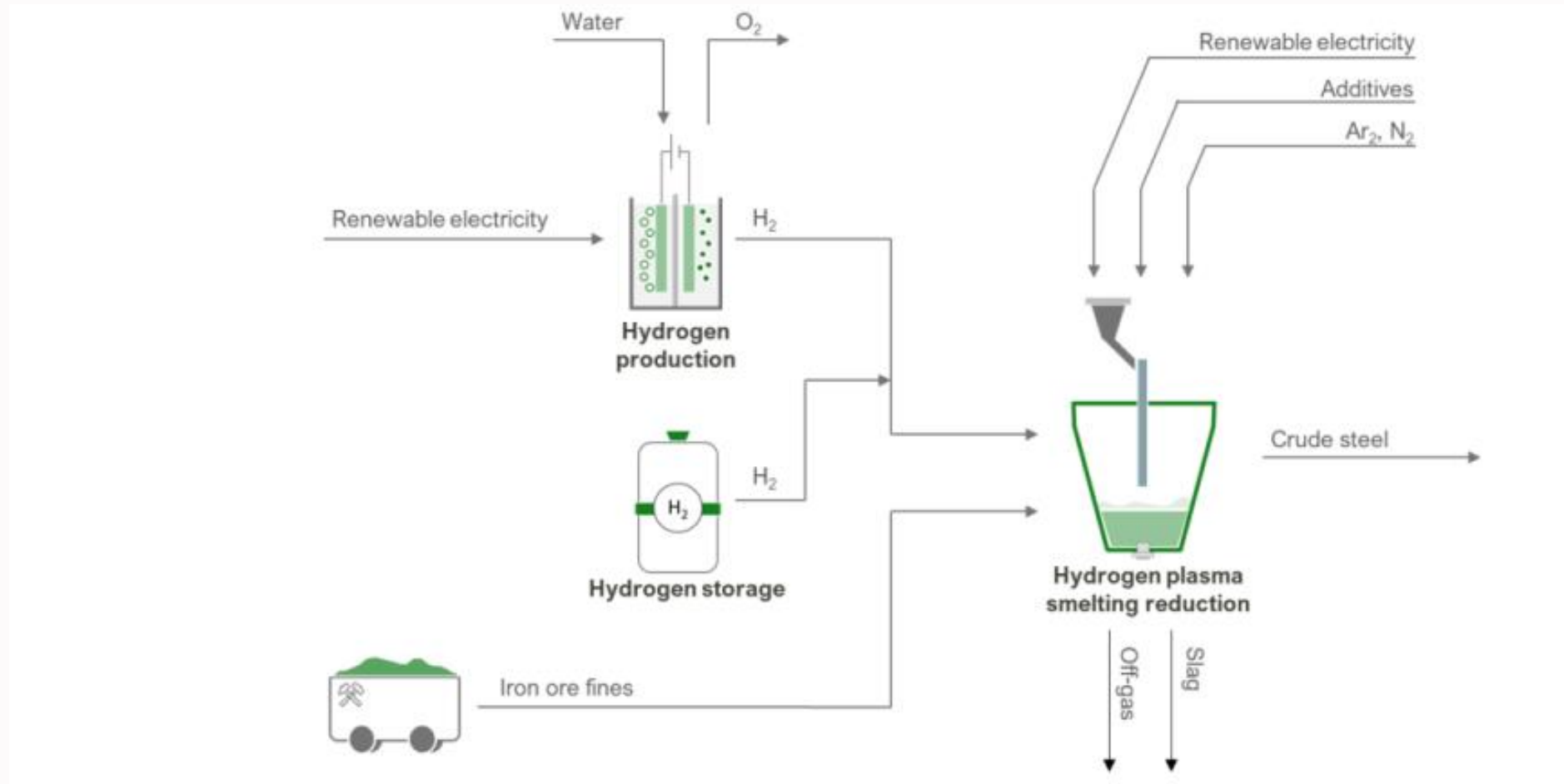
- **Проекти:** SuSteel (Austrian steel manufacturer voestalpine Stahl)
- **Енергоспоживання:** 4,2 МВт-год/т сталі
- **Потенціал зниження викидів CO₂:** до 95% при використанні ВДЕ
- **Рівень технологічного розвитку:** 5

Відновна плавка на основі плазми водню



Найбільш перспективні технології в металургії (HPSR)

Технологічний маршрут на основі відновлення водневої плазмової плавки



Найбільш перспективні технології в металургії (AIE)

AIE (Alkaline Iron Electrolysis) — це перспективна технологія виробництва заліза, що використовує електроліз залізної руди в лужному середовищі (з високим pH).

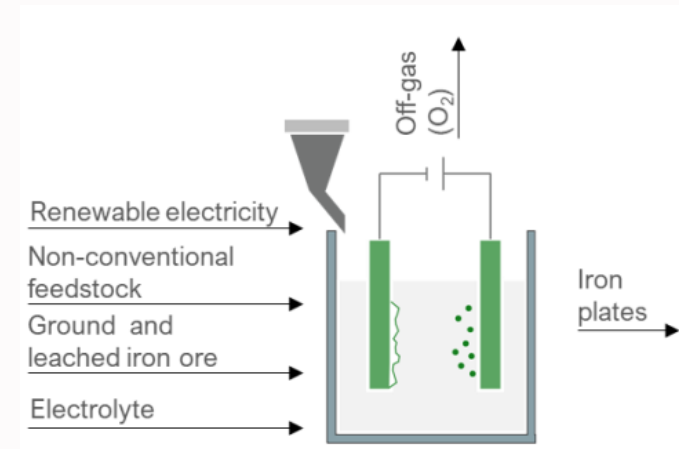
Технічний опис: Низькотемпературний лужний електроліз залізної руди, або електровідновлення - це пряме осадження заліза з руди на електроді. При електролізі струм пропускається від інертного анода через рідкий лужний розчин, що містить дрібні частинки заліза, які осаджуються і відновлюються на катоді.

- **Споживання сировини, енергії та інших матеріалів:**

Необхідне попереднє подрібнення сировини, електроліти і підтримання температури 110C.

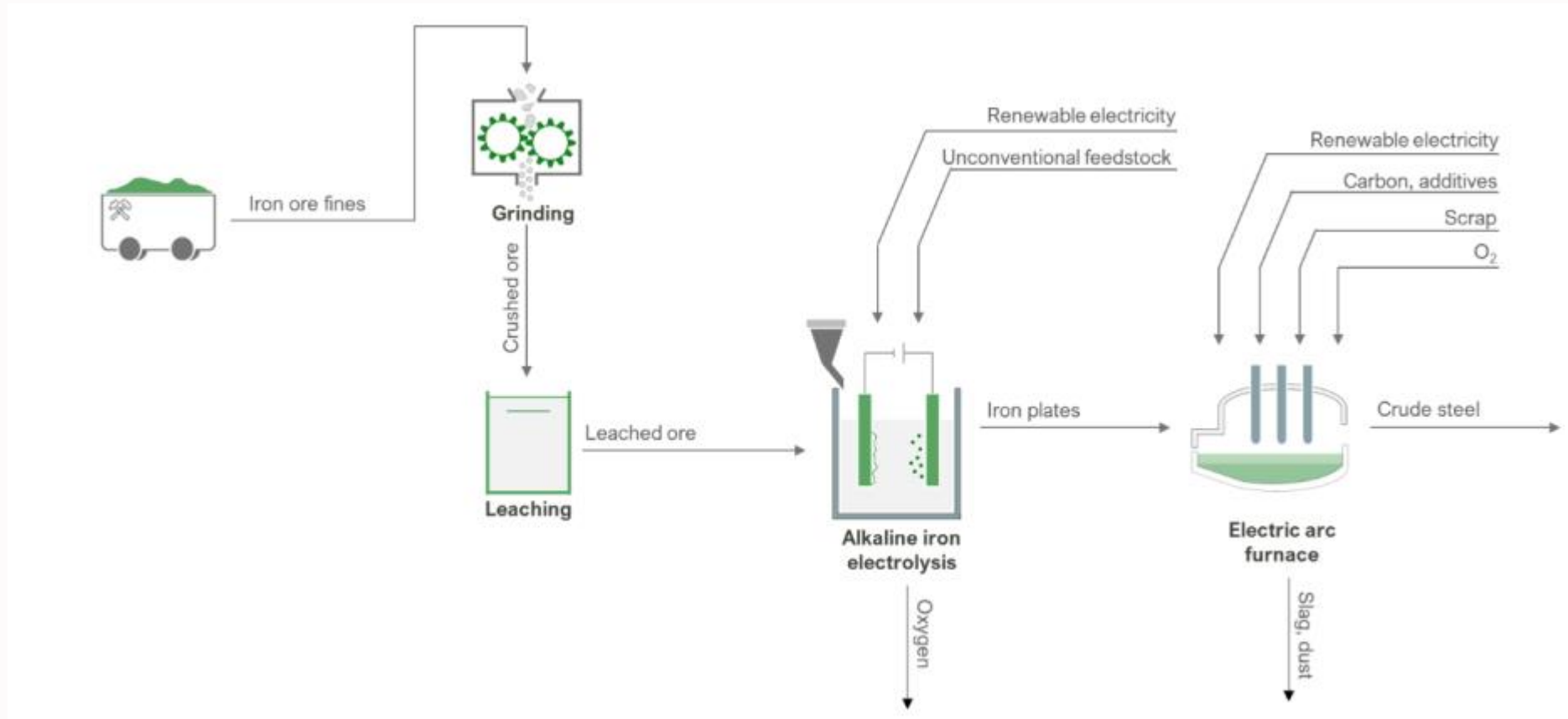
- **Проекти:** ULCOS, ASCoPE, IERO, VALORCO and SIDERWIN10, SIDERWIN
- **Економічна оцінка:** CAPEX 645-828 €/т сталі в 2050
- **Енергоспоживання:** 3,6 МВт-год/т сталі в т.ч.: 0,4 МВт-год/т – підготовка руди, 2,7 МВт-год/т – електроліз, 0,4 МВт-год/т – виплавка і розливка сталі.
- **Потенціал зниження викидів CO₂:** до 95%
- **Рівень технологічного розвитку:** 5-6

Лужний електроліз залізної руди



Найбільш перспективні технології в металургії (AIE)

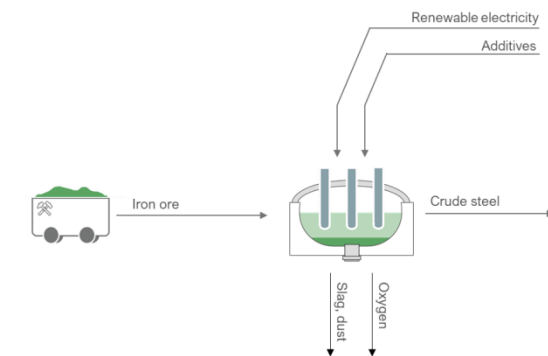
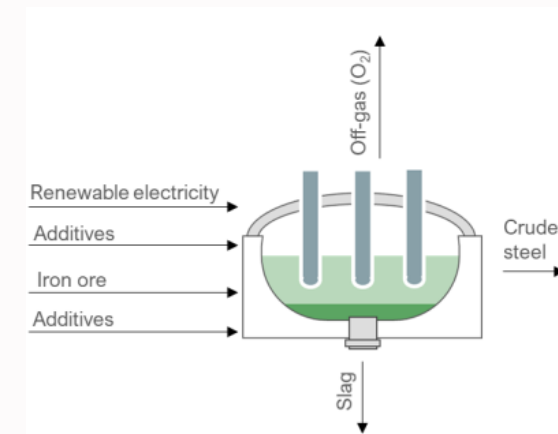
Технологічний маршрут на основі лужного електролізу залізної руди



Найбільш перспективні технології в металургії (МОЕ)

- **Технічний опис:** Електроліз розплавлених оксидів (МЕО) - це електрометалургійний метод, що дозволяє безпосередньо отримувати метал у рідкому стані (1600 С) з оксидної сировини (залізної руди).
- Суттєве спрощення процесу та значне скорочення споживання енергії. Це повністю електрифікований шлях від непідготовленої залізної руди до рідкої сталі (одностадійний процес).
- Позитивно заряджені катіони (наприклад, Fe^{2+}) з оксиду рухаються до катоду, де відбувається відновлення, в результаті чого вивільняється чисте залізо. Водночас на аноді відбувається окислення, що призводить до утворення кисню (O_2) або оксидів, які видаляються з процесу.
- **Споживання сировини, енергії та інших матеріалів:** процес потребує лише первинних руд і добавок для кондиціонування шлаку.
- Дотепер електроліз розплавлених оксидів демонструвався з використанням анодних матеріалів, які є витратними (графіт для феросплавів і титану) або недоступними для сталеплавильного виробництва (іридій для заліза).
- МОЕ вимагає або анодного матеріалу, здатного протистояти виснаженню, підтримуючи при цьому виділення кисню
- **Проекти:** ArcelorMittal (ULCOS, IERO and VALORCO projects), Boston Metal company
- **Економічна оцінка:** CAPEX 1000 €/т сталі
- **Енергоспоживання:** 4,1 МВт-год/т сталі
- **Потенціал зниження викидів CO₂:** до 96%
- **Рівень технологічного розвитку:** 3

Електроліз розплавлених оксидів залізної руди



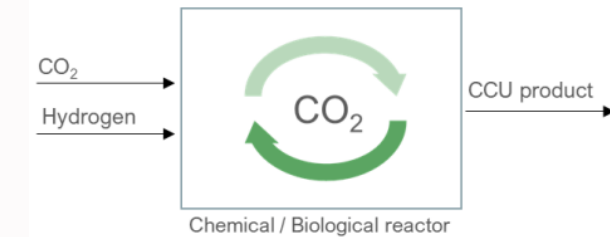
Найбільш перспективні технології в металургії

- **Технічний опис:**

У металургійній промисловості полягає в уловлюванні CO₂ з відповідних технологічних газів і перетворенні їх в інші цінні продукти. Тому типовий процес складається з декількох компонентів: спочатку оксиди вуглецю вловлюються в сепараторі, потім перетворюються на більш цінні продукти в біологічному або хімічному реакторі і, нарешті, продукти очищаються в переробному агрегаті.

- **Проекти:** Carbon2Chem® by ThyssenKrupp, BASF, Covestro, Linde and others or Carbon4PUR by ArcelorMittal, Covestro, Recticel, Dechema
- **Економічна оцінка:** додаткові витрати CAPEX 13 €/т сталі, додаткові операційні витрати: на електроенергію 30-35 €/т сталі, використання H₂ 310-526 €/т сталі, інші витрати 68 €/т сталі. Питомі витрати 230-439 €/т.CO₂ у 2030р.
- **Енергоспоживання:** 4-5 кВт-год/м.куб H₂, 3,6 МВт-год/т сталі
- **Потенціал зниження викидів CO₂:** до 60%, біологічне уловлювання 30-50%
- **Рівень технологічного розвитку:** 8, інтеграції в металургійне виробництво 4-5

Перетворення або використання вуглецю



Найбільш перспективні технології в металургії (біопаливо)

Технічний опис:

Викопне вугілля також можна замінити біомасою та вуглецевмісними відходами. Більшість матеріалів з біомаси повинні пройти певний рівень попередньої термічної обробки, наприклад, **торрефікацію або карбонізацію**.

Споживання сировини, енергії та інших матеріалів:

На заводах з доменним і конвертерним виробництвом частина попередньо обробленої біомаси може додаватися до вугільної шихти коксових печей, замінювати антрацит в шихті аглофабрики або використовуватися в доменній печі.

Місцева доступність є основним обмежувальним фактором для уникнення подальших викидів і витрат.

Проекти: SHOCOM, GREENEAF2, ACASOS, Torero, OSMET

Економічна оцінка: низькі капітальні витрати

Енергоспоживання: Споживання енергії для перетворення біомаси у придатну для використання форму (у більшості випадків - біовугілля) сильно залежить від якості вихідної біомаси.

Потенціал зниження викидів CO₂: 25-30%

Рівень технологічного розвитку: 2-7



Найбільш перспективні технології в металургії (CO₂ capture)

Технічний опис:

Відокремлення вмісту CO₂ з газових потоків може бути технічно реалізовано трьома різними способами:

- до його утилізації ('pre-combustion')
- після його звичайної утилізації ('post-combustion')
- після його утилізації з чистим киснем ("oxy-combustion").

Для застосування в металургійній промисловості найбільш актуальним є уловлювання CO₂ після спалювання є процес **хімічної абсорбції з застосування амінного скрубінгу**.

Проекти: FReSMe, STEPWISE.

Економічна оцінка: CAPEX €90/t CO₂, OPEX €40/t CO₂

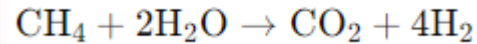
Енергоспоживання: 2.5-2.9 GJ/t CO₂, + 42-49% до BF-BOF

Рівень технологічного розвитку: 5-6

Виробництво водню (H2)

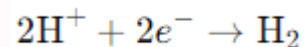
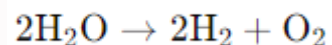
Технічний опис:

- **Паровий реформінг метану (SMR — Steam Methane Reforming)** — це основний промисловий процес для виробництва водню з природного газу (головним чином метану, CH₄). У процесі парового реформінгу метан реагує з водяною парою при високих температурах (700-1000 C, 3-25 бар), утворюючи водень і вуглекислий газ.



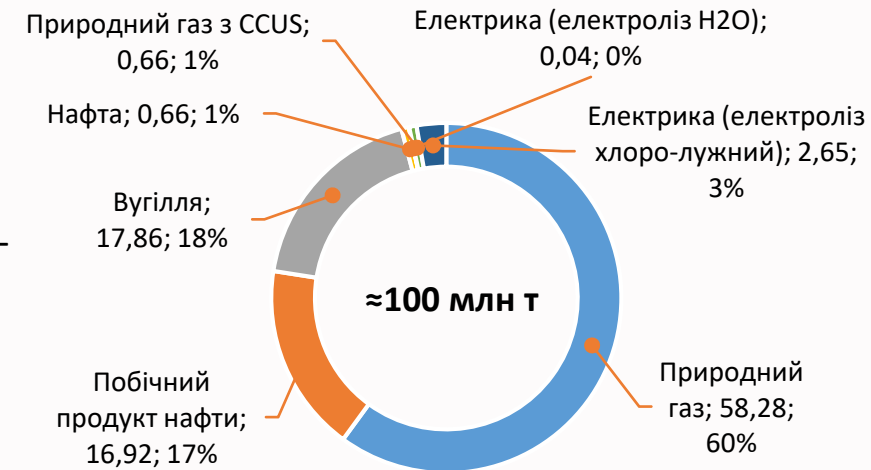
2,6 кг метану = 4,1 м.куб - 1 кг водню

- **Електроліз води** — це процес розкладу води (H₂O) на кисень (O₂) і водень (H₂) за допомогою електричного струму в середовищі електроліту (розчини лугу (KOH або NaOH) або кислоти (H₂SO₄) як електроліти).
 - **Катод (негативний електрод):** тут відбувається відновлення водню.
 - **Анод (позитивний електрод):** тут відбувається окиснення кисню.



9 кг води - 1 кг водню

Виробництво водню в світі, млн тонн



Викиди від виробництва водню, т.CO2 / т.H2



Виробництво водню (H2)

- Основні типи електролізу води:

Технологія	Експлуатаційна гнучкість	Тиск нагнітання (подачі)	Термін (років) до промислового масштабу	Використання критичної (стратегічної) сировини	Землекористування/площа, яку займає вся система	Середня ефективність системи	Інвестиційні витрати	Витрати на обслуговування та утримання	Можливість використання відпрацьованого тепла/води
Лужний (AEL)	Середня	1-7 бар	0	Мале (переважно нікель)	100-200 м ² /МВт (на основі системи ГВт класу)	57-60%	€200-€300/кВт (ГВт клас)	€10-€20/кВт·рік	Висока (стічні води при 70-90°C)
Оновлений AEL	Висока	30-80 бар	1-2	Мале (переважно нікель)	20-60 м ² /МВт (на основі системи ГВт класу)	57-60%	€400-€600/кВт (ГВт клас)	€15-€25/кВт·рік	Висока (стічні води при 70-90°C)
Протонна обмінна мембрана (PEM)	Висока	1-70 бар	1-2	Високе (іридій, титан і платина)	20-60 м ² /МВт (на основі системи 100 МВт класу)	53-54%	€500-€700/кВт (ГВт клас)	€20-€45/кВт·рік	Можливо, але потрібен додатковий тепловий насос (стічні води при 50-80 °C)
Твердо-оксидний (SOEL)	Середня	1-2 бар	1-2	Дуже мале	110 м ² /МВт (на основі системи ~3 МВт класу)	80-82%	€1,000-€1,250/кВт (1 МВт клас)	€70-€100/кВт·рік	Недоступно (SOEL використовує пару як сировину)
Аніонообмінна мембрана (AEMEL)	Висока	35 бар	4-5	Мале (переважно нікель)	28 м ² /МВт (на основі системи ~1 МВт класу)	57-60%	€500-€700/кВт (1 МВт клас)	€30-€45/кВт·рік	Можливо, але потрібен додатковий тепловий насос (стічні води при 50-80 °C)

Виробництво водню (H2)

Проекти: H2Future (voestalpine, K1-MET), GrInHy 2.0 (Salzgitter AG, Tenova, PaulWurth) or WindH2 (Salzgitter AG)

Економічна оцінка:

CAPEX:

- AEL - €3000-5000/(м3/год H2),
- PEM - €6500-7500/(м3/год H2)
- Високотемпературний - €5000-13500/(м3/год H2)

ОРЕХ:

- PEM - €11-15 /кВт.е
- Високотемпературний – €35 /кВт.е

Енергоспоживання: 3,5-5,5 кВт-год/м.куб H2
(40-55 кВт-год/кг H2)

Рівень технологічного розвитку: 5-8



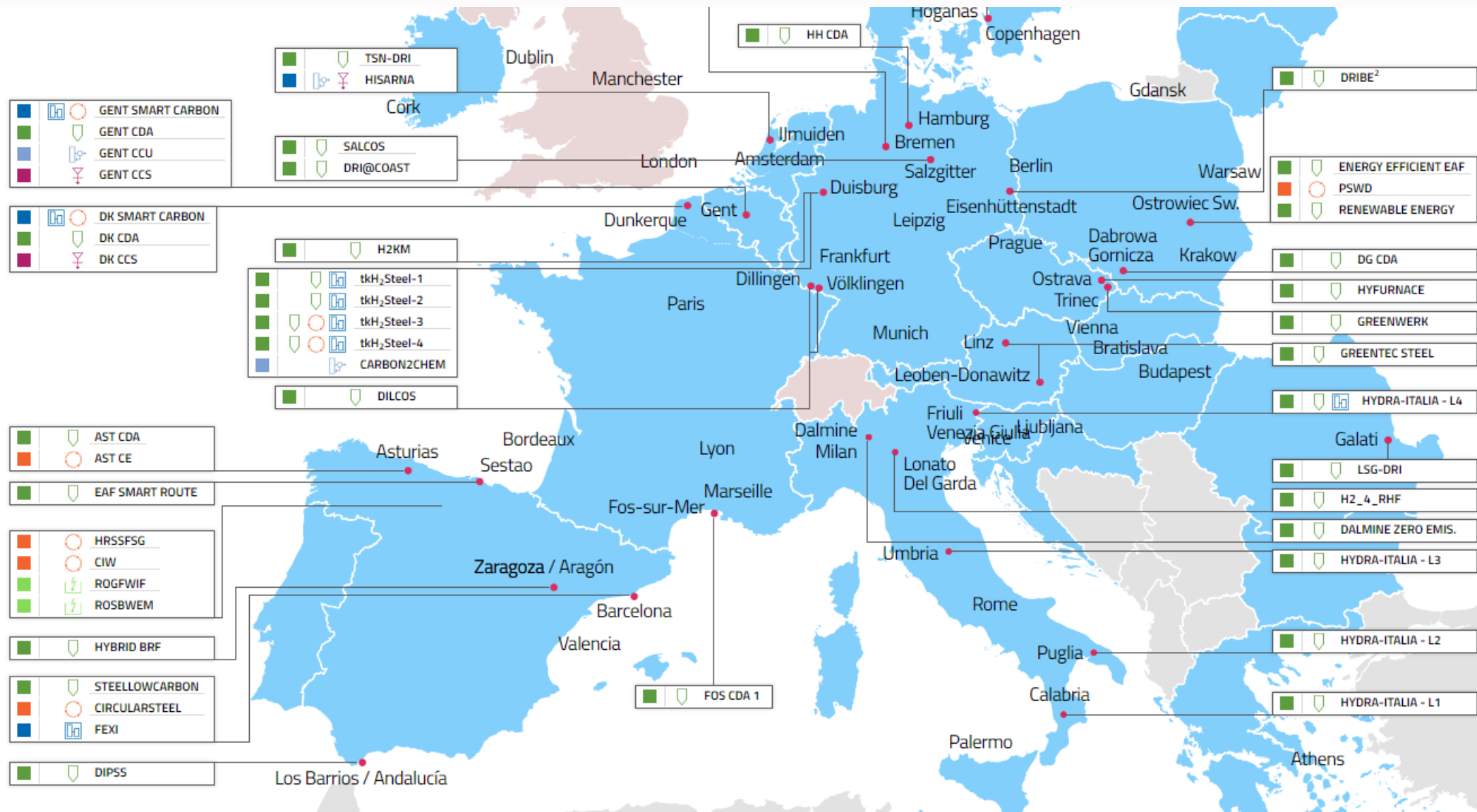
Проект водневої стратегія України до 2050 року:

- потенціал виробництва «зеленого» водню – 45 млн. т /рік
- **1,3 млн. т** до 2035 р
- **3 млн. т** до 2050 р

Національний план дій з енергетики і клімату до 2030 року:

- **до 1 млн. т** до 2035 р
- **до 5 млн. т** до 2050 р

Анонсовані проекти в металургії





Дякую за увагу!

Євген Олійник



ГС «Біоенергетична асоціація України»



+380 97 709 76 58



oliinyk@uabio.org



<https://uabio.org>

