

L'energia nucleare è davvero carbon-free?

di [Sergio Zobot](#), QualEnergia - 29 Maggio 2023

Le centrali nucleari non emettono CO₂, ma se si guarda alla lunga e complessa filiera e al loro ciclo di vita si possono stimare significative emissioni, che potrebbero aumentare molto in futuro.

Uno dei cavalli di battaglia di chi sostiene il nucleare è che le **centrali nucleari non emettono CO₂** e che, quindi, il ricorso massiccio all'atomo è una reale opportunità per contrastare il cambiamento climatico.

Se però si ragiona in una **logica di filiera**, analizzando il ciclo di vita complessivo della centrale, si scopre che solo le operazioni nel reattore sono "carbon free" (cioè senza emissioni di CO₂).

Tutte le **altre operazioni** della filiera del combustibile, dall'estrazione dalle miniere, frantumazione e macinazione, fabbricazione del combustibile, arricchimento e gestione delle scorie, oltre che la stessa costruzione della centrale, il suo futuro "*decommissioning*" per non parlare della gestione di tutte le scorie radioattive, necessitano di parecchia energia da fonte fossile e conseguentemente **provocano forti emissioni di CO₂**.

Queste emissioni sono state **quantificate** ormai da molti ricercatori indipendenti dall'industria nucleare.

Uno studio molto dettagliato è stato condotto da Jan Willem Storm Van Leeuwen, docente dell'Università di Groningen, consulente indipendente e membro del "*Nuclear Consulting Group*". Questo studio del 2019, [Radioactive waste management – future CO₂ emissions](#) (pdf), rivela che le emissioni di CO₂ dipendono fondamentalmente dalla **concentrazione di ossido di uranio** (U₃O₈ – detto anche "*yellowcake*") nel minerale estratto.

Se consideriamo il minerale "*high grade*" con un **minimo di 0,1% di ossido di uranio**, da ogni tonnellata di minerale grezzo si ricava un kg di ossido di uranio. Se prendiamo in esame il più diffuso "*low grade*", ossia con concentrazioni non inferiori allo 0,01% di ossido di uranio, per ottenere un kg di *yellowcake* occorre trattare 10 tonnellate di minerale grezzo.

Se poi consideriamo che nello "*yellowcake*" la concentrazione di uranio fissile (235) rispetto l'uranio naturale (238) è intorno allo 0,5% e che per alimentare i comuni reattori di potenza nel mondo occorre operare un processo di arricchimento che porti l'isotopo fissile 235 tra il 3 e il 5%, Storm van Leeuwen ha calcolato che il consumo di energia fossile per questi processi di fabbricazione è così grande che le quantità di **CO₂** emessa è **comparabile con quella emessa da un equivalente ciclo combinato** alimentato a gas naturale.

Tra tutte le filiere esistenti per produrre energia elettrica, l'energia nucleare è sicuramente il sistema più complesso mai realizzato. La centrale nucleare non è un sistema stand-alone, ma è solo la parte più visibile di **un sistema lungo e complesso di vari processi industriali**. La **catena dei processi industriali** per produrre energia elettronucleare si può suddividere in tre parti principali: **front-end, mid section e back-end**.

Il front-end (chiamato anche *up-stream* o processo a monte) comprende i processi industriali necessari per fabbricare il combustibile nucleare (uranio arricchito), partendo dal minerale di Uranio che si trova in natura.

La sezione centrale (**mid-section**) include la costruzione della centrale elettronucleare e il suo funzionamento, compresa la conduzione e la manutenzione (O&M).

Il **back-end** (chiamato anche *down-stream* o processo a valle) include i processi industriali necessari per smaltire in sicurezza tutti i rifiuti radioattivi generati dal reattore e da altri processi della filiera: **la cosiddetta eredità nucleare**.

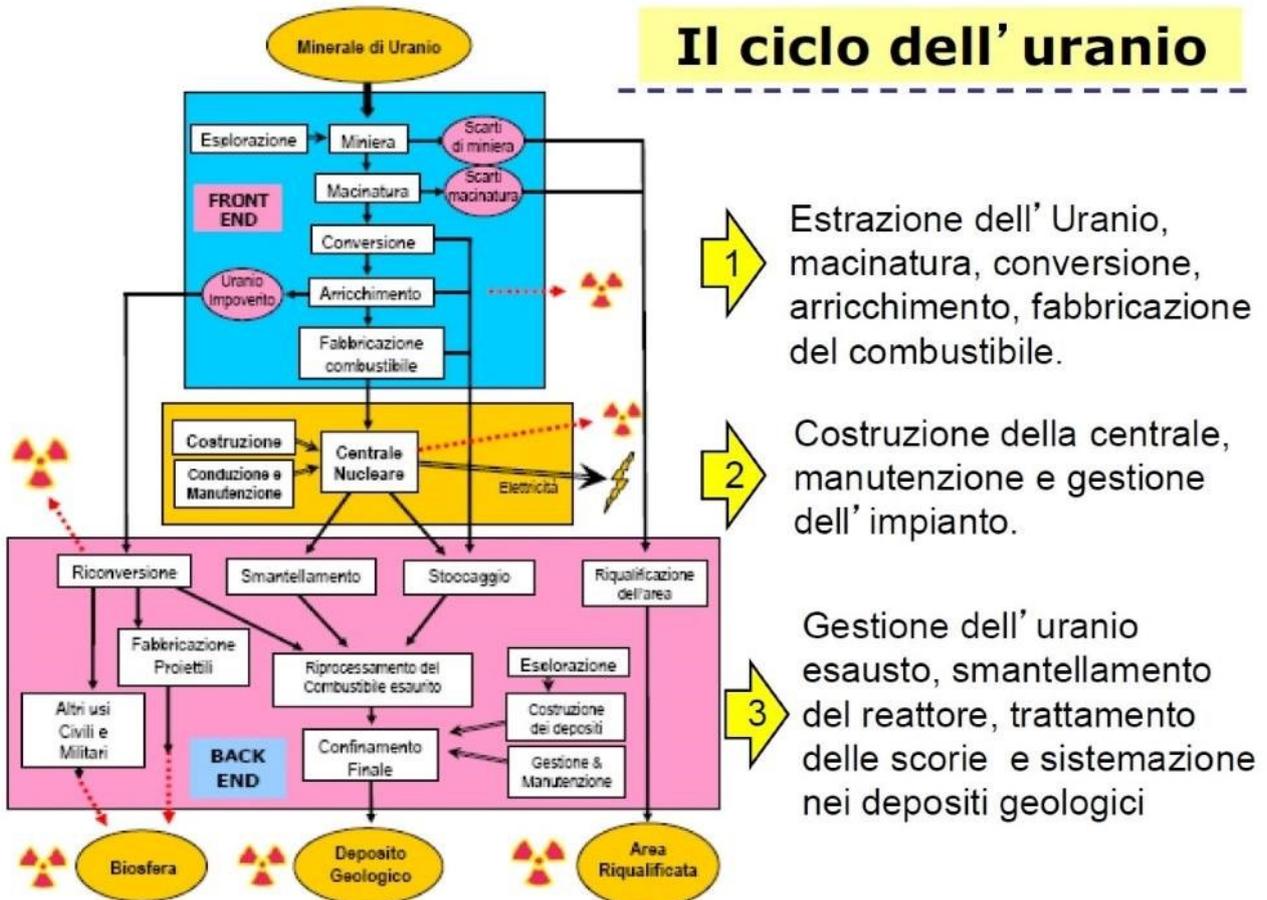
Ogni processo della catena nucleare consuma materiali ed energia ed emette CO₂, oltre che ad altri gas a effetto serra.

La fissione dell'uranio nel reattore nucleare è l'unico processo della catena che non emette CO₂.

Le emissioni di **altri gas serra** del sistema non sono menzionate dall'industria nucleare, sebbene un certo numero di processi della catena molto probabilmente emettano anche altri gas serra.

In sintesi, dobbiamo ribadire questo concetto: la valutazione delle emissioni di CO₂ di un impianto elettronucleare deve includere il sistema completo di processi necessari a generare l'energia elettrica, dall'estrazione dell'uranio fino alla gestione delle scorie radioattive, non solo la centrale di potenza.

Nella figura è illustrato il processo completo, dalla culla alla tomba, di un impianto nucleare.



Le emissioni attuali di CO₂ della filiera nucleare

Storm van Leeuwen ha **stimato le emissioni di CO₂** (gCO₂/kWh) del processo **a monte** (up-stream) dall'estrazione del minerale uranifero fino alla costruzione e gestione di una centrale termonucleare di tipo avanzato:

Processo		g CO ₂ /kWh
		Reattori avanzati
1	Estrazione Uranio + macinazione (minerale allo 0,10% di U)	32,3
2	Raffinazione + conversione	2,8
3	Arricchimento	2,6
4	Riconversione + fabbricazione combustibile + zircalloy	3,4
5	Costruzione del reattore	24,9
6	Condizione + Manutenzione ordinaria e straordinaria	24,4
Totale dei processi di Up-stream (arrotondato)		90

L'autore ha stimato anche le emissioni di CO₂ del **processo a valle**, vale a dire le emissioni future per le operazioni di decommissioning delle centrali, la gestione dei rifiuti radioattivi e il confinamento definitivo dei rifiuti nucleari.

Processo		g CO ₂ /kWh
		Reattori avanzati
1	Riconversione gestione rifiuti di raffinazione e riconversione + smaltimento	0,65
2	Gestione rifiuti arricchimento + smaltimento	0,37
3	Gestione dei rifiuti riconversione + fabbricazione	0,90
4	Gestione rifiuti dei reattori + smaltimento	12,06
5	Condizionamento all'uranio impoverito + gestione rifiuti.	5,70
6	Dismissione + smantellamento + gestione rifiuti della Centrale	40,85
7	Recapito del combustibile esaurito + smaltimento finale	8,22
8	Riabilitazione della miniera	4,83
Totale dei processi di Down-stream (arrotondato)		74

Il **totale delle emissioni di CO₂ per l'intero processo**, dalla culla alla tomba, di un attuale reattore avanzato che utilizza uranio con un grado di purezza dello 0,10% (ovvero un grammo di U per kg di minerale grezzo), conduce a un valore intorno ai **164 grammi di CO₂ per ogni kWh prodotto**.

Processo	g CO ₂ /kWh
	Reattori avanzati
Totale emissioni dei processi di Up-stream	90
Totale emissioni dei processi di Down-stream	74
Totale delle emissioni	164

L'energy cliff o la scogliera energetica

La **qualità termodinamica** di una risorsa di uranio è il fattore determinante per essere considerata o meno una fonte di energia netta.

Essa è definita come la quantità netta di energia utile che può essere estratta da 1 kg di uranio naturale, ovvero la quantità di elettricità disponibile per il consumatore, meno il lavoro necessario per estrarre e lavorare 1 kg di uranio puro dalla crosta terrestre.

Se l'estrazione e la lavorazione di 1 kg di uranio richiede più lavoro della quantità che può essere generata da quell'uranio, la risorsa in questione non è una fonte di energia, ma un dissipatore di energia.

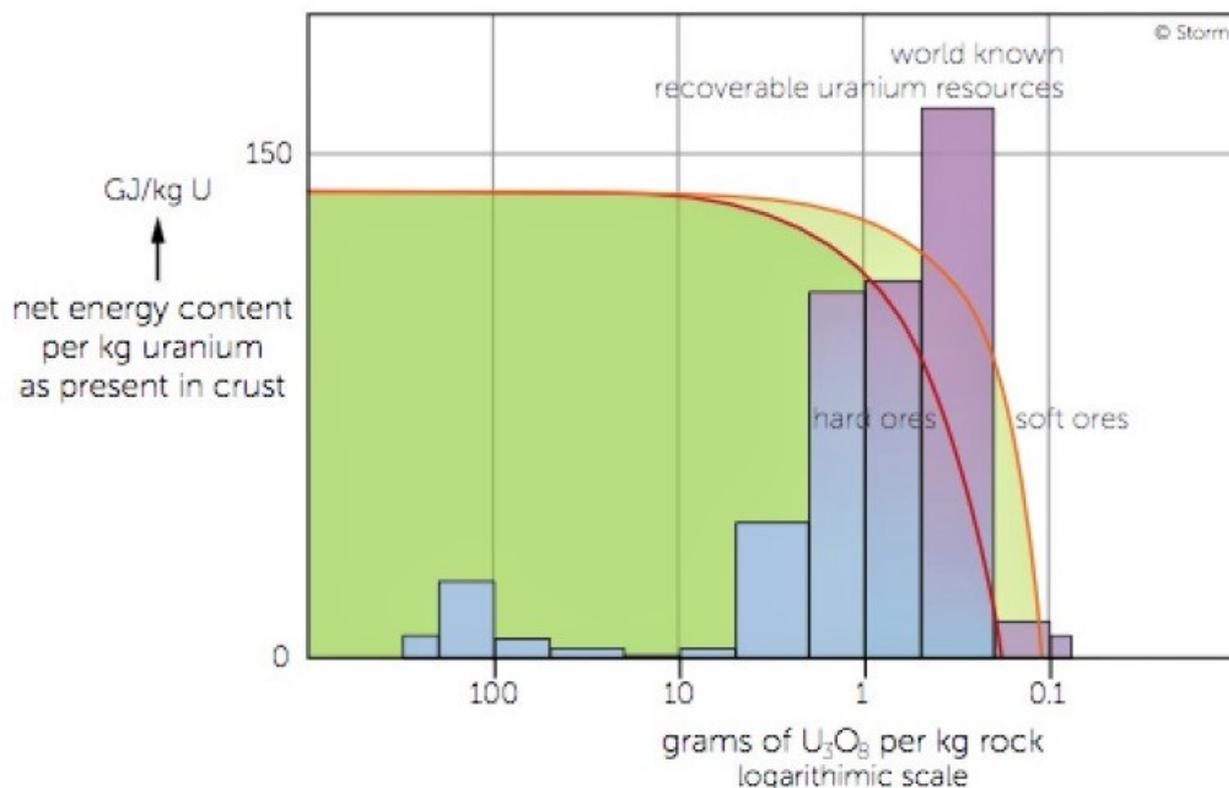
Il **contenuto energetico netto** dell'uranio naturale è quindi funzione della qualità del minerale, ossia del grado di concentrazione di uranio nel minerale estratto.

Al di sotto di un "grade" di 0,01% (0,1 g di uranio per kg di minerale grezzo), nessuna generazione netta di energia è possibile.

Il diagramma a barre (fonte: www.stormsmith.nl/novelnotions.html) rappresenta la distribuzione del "grade" dell'uranio attualmente recuperabile in base alle risorse conosciute.

I minerali di uranio più "magri" contengono circa 2.000 volte meno uranio per kg di roccia rispetto a quelli più ricchi: 0,1 g U/kg minerale contro circa 200 g U/kg di minerale.

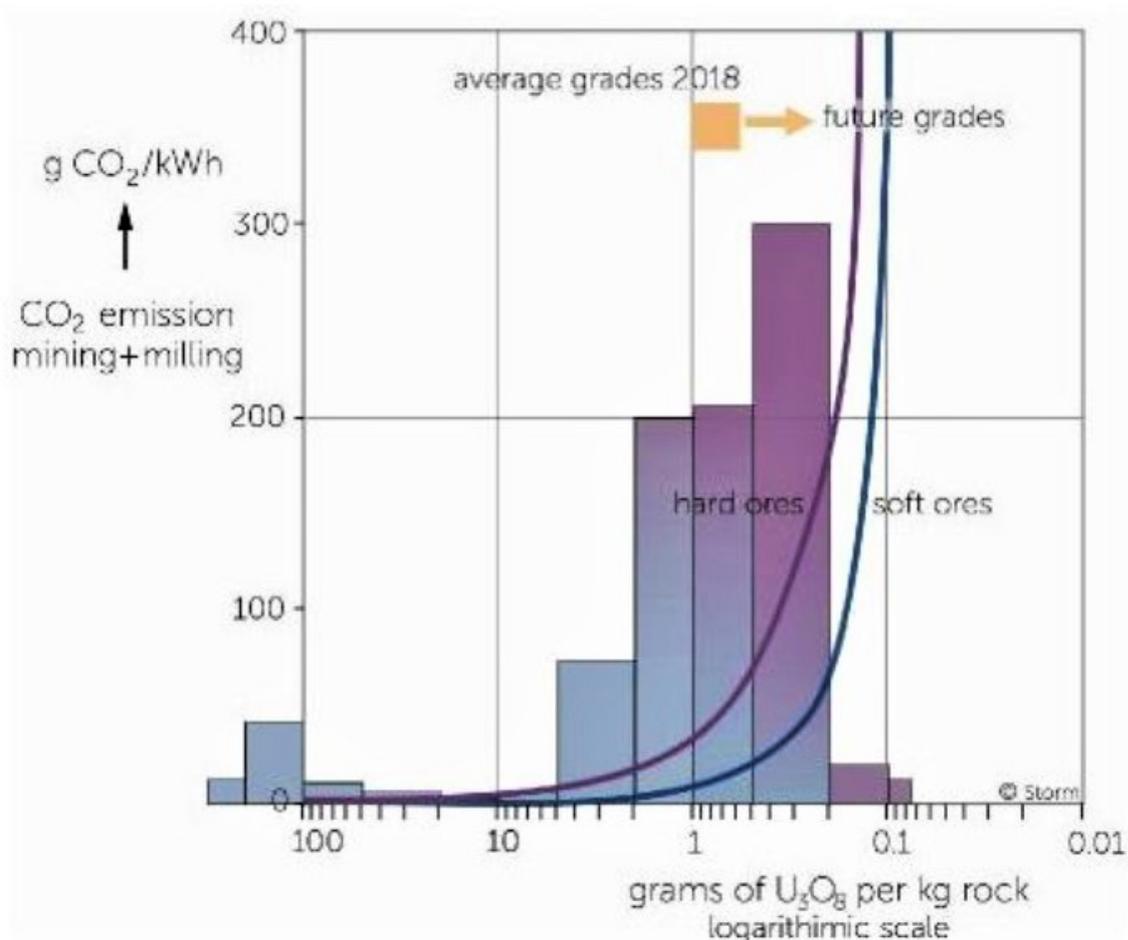
Il grado medio mondiale delle miniere attualmente operative si trova nella gamma tra **0,2 e 2 g U/kg** di minerale.



La trappola della CO2

Con l'aumento del consumo di energia dovuta alla diminuzione della qualità del minerale di uranio estratto si verifica, evidentemente, un aumento delle emissioni di CO₂ per kg uranio recuperato.

La figura successiva rappresenta la **curva delle emissioni di CO₂** in funzione del grado di purezza dei minerali uraniferi estratti.



Attualmente, una centrale a ciclo combinato a gas di nuova generazione emette intorno ai 320 grammi di CO₂ per ogni kWh prodotto.

Un impianto nucleare odierno, che utilizza uranio proveniente da minerale con una concentrazione o "grade" dello 0,10%, emette circa il **30% della CO₂ rispetto ad un ciclo combinato a gas**, considerando però solo i **processi up-stream**.

Per cui è vero che il nucleare emette molta meno CO₂ di un impianto a gas, per non parlare di un impianto a carbone che ne emette 6 volte di più. Ma la pacchia durerà finché sarà disponibile uranio con una concentrazione di almeno lo 0,10%.

Man mano che la **purezza del minerale di uranio diminuisce**, le **emissioni di CO₂ aumentano**. Ad una concentrazione di 0,1 gU/kg (grade di 0,01%), le emissioni di una filiera nucleare eguagliano le emissioni up-stream di un impianto a gas.