

# Audizione Commissioni VIII e X

## 22 maggio 2024

Indagine conoscitiva sul ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica e nel processo di decarbonizzazione

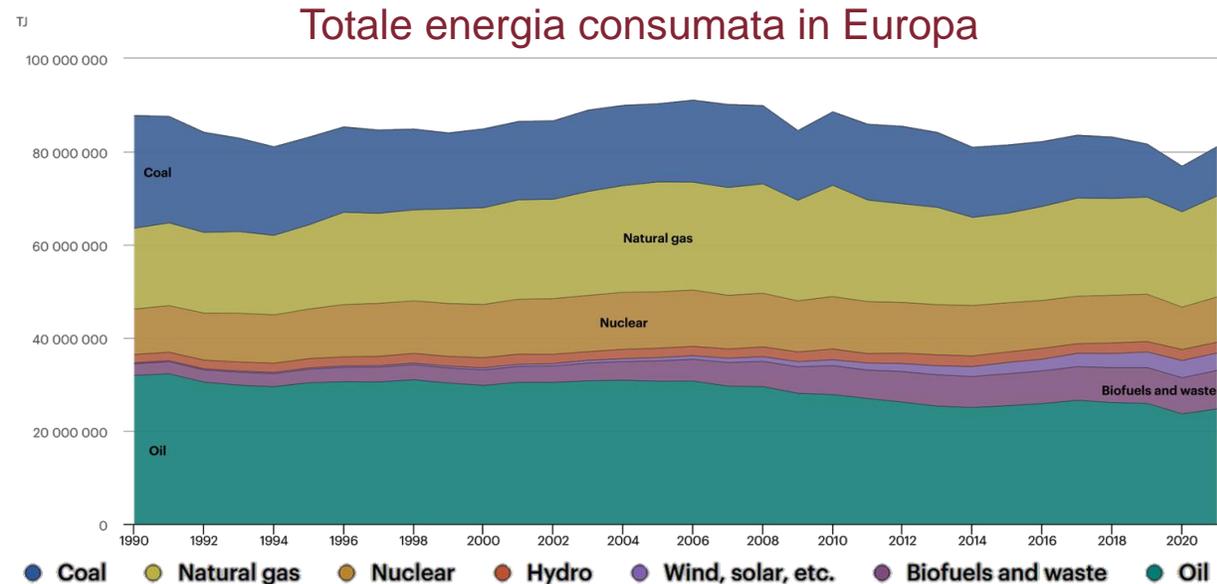
**Fabio Giannetti**



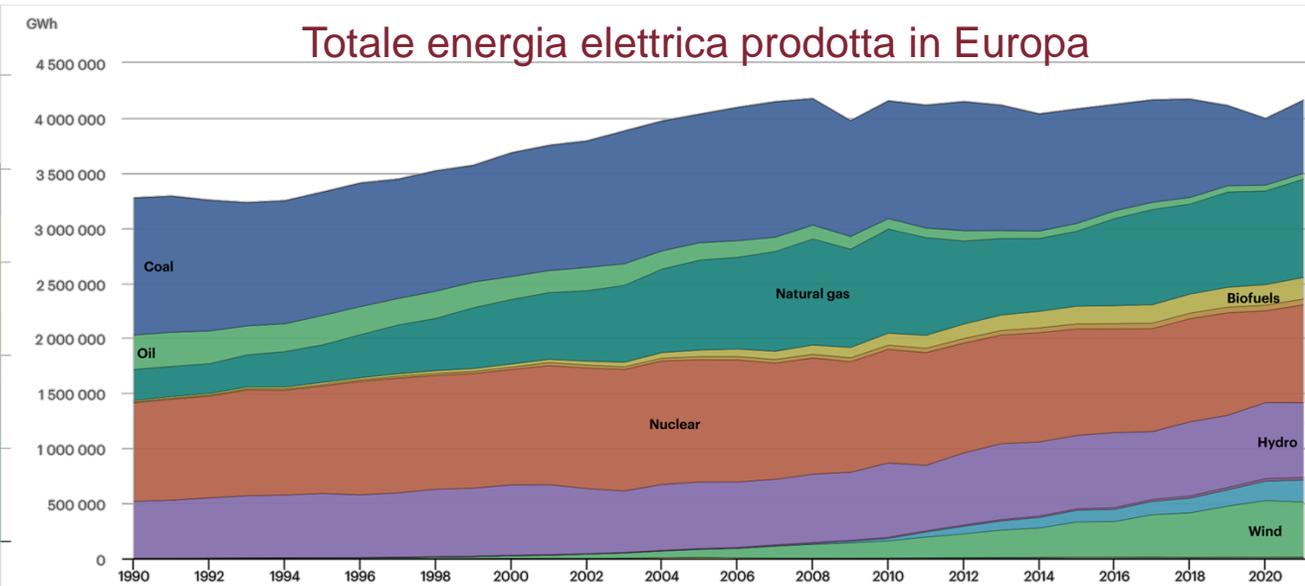
# Consumi Europei di energia diviso per fonti

La sfida è enorme e siamo soltanto all'inizio. I numerosi problemi da superare sono legati al fatto che la decarbonizzazione riguarda l'intero sistema energetico e non soltanto alla parte elettrica, oggetto di questo intervento.

### Totale energia consumata in Europa



### Totale energia elettrica prodotta in Europa



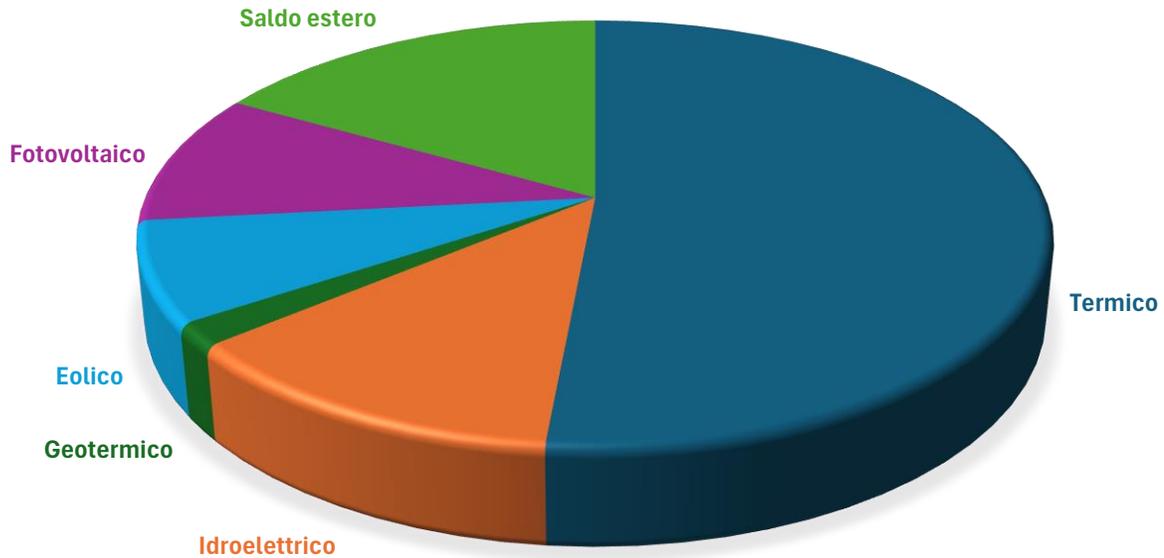
IEA (2023), *Energy Statistics Data Browser*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>

IEA (2023), *Energy Statistics Data Browser*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>



## Quanto nucleare usiamo in Italia

### BILANCIO ENERGIA ELETTRICA ITALIA 2023



Source: TERNA (<https://www.terna.it/it/media/comunicati-stampa/dettaglio/consumi-elettrici-2023>)

- Nel 2023 si è importato 54.6 TWh (saldo 51 TWh), l'equivalente della produzione annua di 6 reattori di grande taglia (es. 1.1GWe) o 20 reattori SMR (340MWe)
- La maggior parte di questa energia importata è stata prodotta da centrali nucleari in Francia, Svizzera e Slovenia e importata durante le ore di basso funzionamento delle FER.

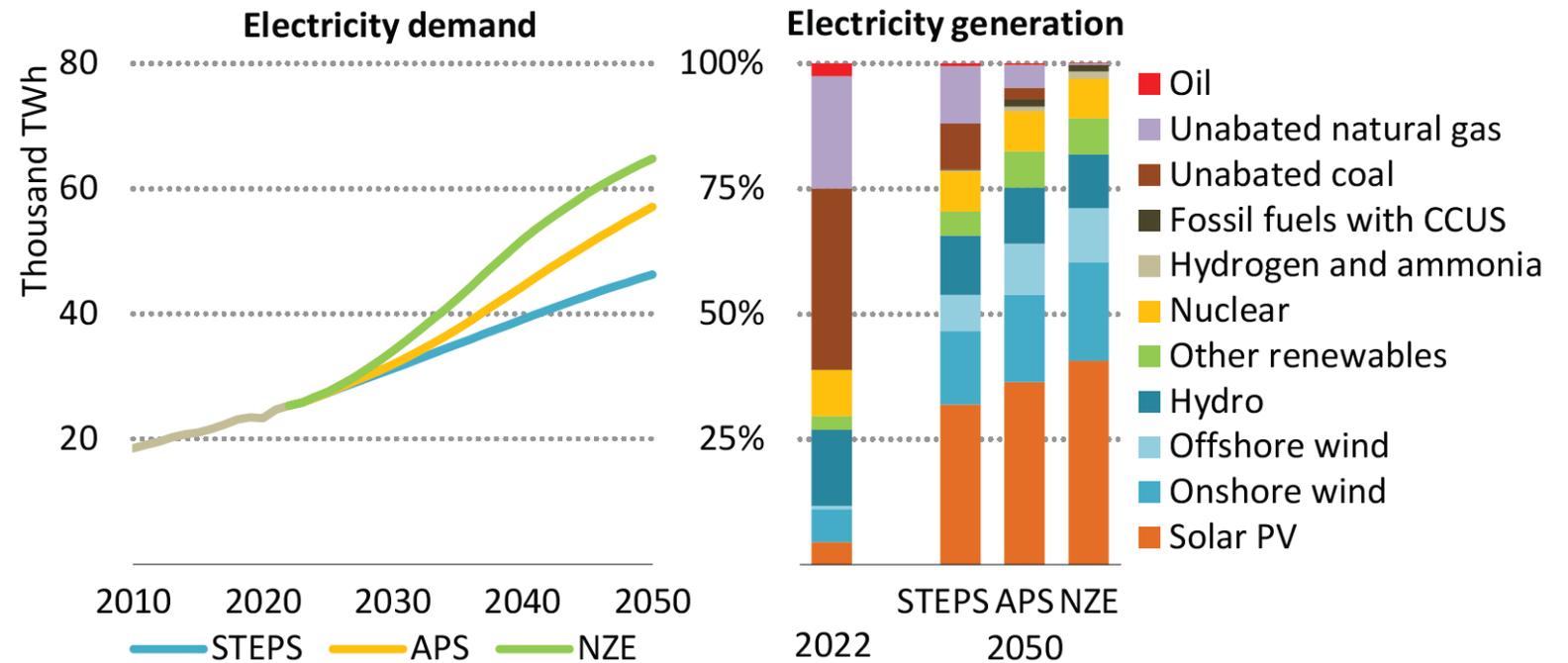


## Scenari possibili al 2050

- L'accordo sottoscritto alla COP28 riconosce anche il ruolo cruciale della tecnologia nucleare nell'assicurare la sicurezza energetica e nel contribuire agli obiettivi di sviluppo sostenibile.
- Triplicazione della produzione di elettricità da nucleare
- 10 X Rinnovabili (in NZE, compreso hydro... che aumenterà meno)

Servono entrambi, costi totali elevati, va ottimizzato il sistema (compresa rete)

## Global electricity demand, 2010-2050, and generation mix by scenario, 2022 and 2050



IEA. CC BY 4.0.

**Electricity demand rises over 80% to more than 150% by 2050 across scenarios and is met increasingly by low-emissions sources at the expense of unabated coal and natural gas**

IEA (2023), *World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>



## Ruolo dell'Energia Nucleare nella Transizione Energetica

- **Riduzione delle Emissioni di CO2**

Numerosi studi confermano che l'inclusione del nucleare nel mix energetico è una delle strategie più efficaci per ridurre le emissioni globali di CO2. Ad esempio, uno studio del Massachusetts Institute of Technology (MIT) ha mostrato che senza un contributo significativo del nucleare, i costi per raggiungere obiettivi di decarbonizzazione aumenterebbero drasticamente.

- **Affidabilità e Produzione Continua**

fornisce una fonte di energia base-load, essenziale per la stabilità della rete elettrica. A differenza delle fonti rinnovabili intermittenti, come l'eolico e il solare fotovoltaico, le centrali nucleari possono operare continuamente, fornendo un flusso costante di elettricità

- **Integrazione con le Rinnovabili**

Il nucleare può funzionare in sinergia con le fonti rinnovabili. Gli scenari attesi di decarbonizzazione includono una combinazione di nucleare, rinnovabili e tecnologie di stoccaggio energetico per garantire una fornitura elettrica affidabile e sostenibile.



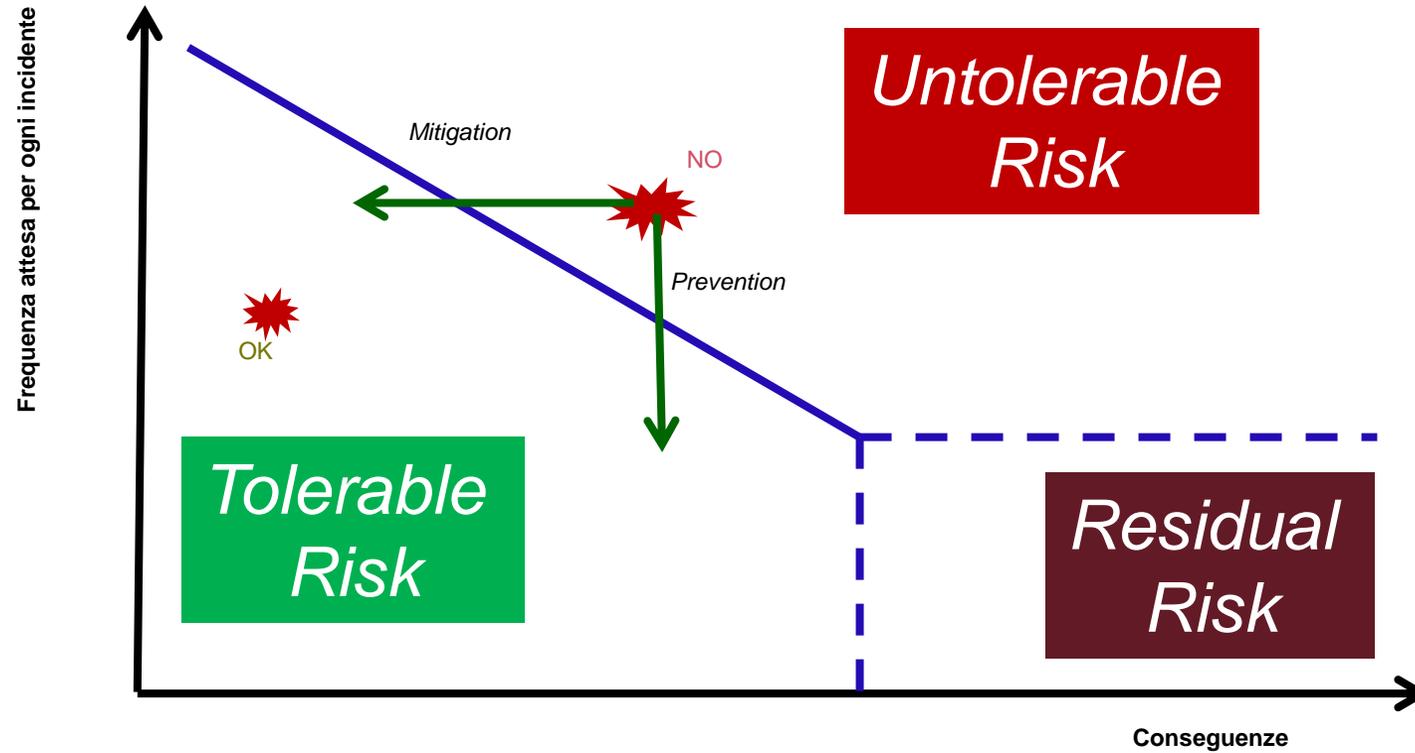
## Sicurezza nucleare

Il documento stabilisce i requisiti di sicurezza specifici per la progettazione delle centrali nucleari. I dieci principi di sicurezza chiave delineati nel documento dell'IAEA "Safety of Nuclear Power Plants: Design" (SSR-2/1) sono:

- 1. Obiettivo di Sicurezza:** Proteggere le persone e l'ambiente dagli effetti delle radiazioni ionizzanti. Questo è il principio guida che definisce l'intero quadro della sicurezza nucleare.
- 2. Leadership e Gestione della Sicurezza:** Assicurare che la leadership e la cultura della sicurezza siano integrate in tutte le fasi della progettazione, costruzione e operazione delle centrali nucleari.
- 3. Difesa in Profondità:** Applicare una strategia a più livelli per prevenire e mitigare incidenti. Ciò include barriere fisiche multiple e livelli di protezione che funzionano indipendentemente.
- 4. Gestione della Qualità:** Implementare un sistema di gestione della qualità che copra tutti gli aspetti della progettazione, costruzione, operazione e decommissioning delle centrali nucleari.
- 5. Valutazione della Sicurezza:** Condurre valutazioni della sicurezza sistematiche e complete per garantire che i rischi siano identificati e gestiti in modo efficace.
- 6. Sicurezza del Sito:** Scegliere e valutare i siti per le centrali nucleari in base a criteri rigorosi che considerano la geologia, l'idrologia e altri fattori ambientali per garantire la sicurezza a lungo termine.
- 7. Progettazione di Sicurezza:** Progettare strutture, sistemi e componenti con margini di sicurezza sufficienti per resistere a condizioni operative normali e anomale, inclusi eventi estremi e incidenti.
- 8. Controllo delle Radiazioni:** Implementare misure per controllare e limitare le radiazioni rilasciate durante il normale funzionamento e in caso di incidenti.
- 9. Preparazione e Risposta alle Emergenze:** Sviluppare piani di emergenza dettagliati e condurre esercitazioni regolari per assicurare una risposta rapida ed efficace in caso di incidenti.
- 10. Gestione dei Rifiuti:** Gestire e smaltire i rifiuti radioattivi in modo sicuro, seguendo le migliori pratiche internazionali per minimizzare l'impatto sull'ambiente e sulla salute umana.



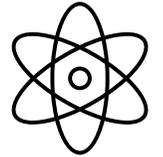
# Prevenrischio



« Farmer Curve »



# IAEA Milestones Approach



Pronti a  
impegnarsi  
con  
cognizione di  
causa

Pronti a invitare  
offerte/negoziare  
un contratto

Pronto per la  
messa in servizio  
e la gestione

studio di pre-  
fattibilità  
• perché il nucleare?

lavori  
preparatori

organizzazioni  
chiave

quadri legali e  
normativi

scelta fornitori

licensing

- Nuclear Energy Programme Implementing Organization (NEPIO)
- Implementazione di 19 infrastrutture in 3 fasi

National position	Nuclear safety	Management	Funding and financing	Legal framework	Safeguards	
Regulatory framework	Radiation protection	Electrical grid	Human resource development	Stakeholder engagement	Site and supporting facilities	Environmental protection
Emergency planning	Nuclear security	Nuclear fuel cycle	Radioactive waste management	Industrial involvement	Procurement	



**Grazie per l'attenzione**

# Audizione per indagine conoscitiva sul ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica e nel processo di decarbonizzazione

Commissioni riunite VIII e X della Camera dei Deputati del 22/05/2024

**Fabio Giannetti (Sapienza, Università di Roma)**

## **Il Contributo dell'Energia Nucleare alla Decarbonizzazione**

La lotta contro il cambiamento climatico richiede fin da subito una transizione globale verso sistemi energetici a basse emissioni di carbonio. Diversi studi e scenari indicano che l'energia nucleare può svolgere un ruolo cruciale in questo processo grazie alla sua capacità di generare elettricità in modo affidabile e con bassissime emissioni di CO<sub>2</sub> durante il funzionamento e l'intero ciclo di vita.

La sfida è enorme e siamo soltanto all'inizio. I numerosi problemi da superare sono legati al fatto che la decarbonizzazione riguarda l'intero sistema energetico e non soltanto alla parte elettrica, oggetto di questo intervento.

L'Italia al momento non produce energia elettrica da nucleare, ma la usa importandola dall'estero. Nel 2023 si è importato 54.6 TWh di energia elettrica (dati TERNA, saldo netto 51 TWh), l'equivalente della produzione annua di circa 6 reattori di grande taglia (es. 1.1GWe) o 20 reattori SMR (340MWe) e che corrisponde al 18% dei consumi italiani.

La maggior parte di questa energia importata è stata prodotta all'estero proprio sfruttando tecnologia nucleare. Essa, infatti, proviene da principalmente da Francia, Svizzera e Slovenia e importata durante le ore di basso funzionamento delle FER (principalmente di notte). Questo ci suggerisce di come il nucleare ha già un impatto positivo sul sistema elettrico italiano e garantisce la stabilità di rete. In futuro questo scenario rischierà di cambiare a causa dei notevoli aumenti previsti per la domanda elettrica dovuti in larga parte all'elettrificazione dei consumi, pertanto sarebbe opportuno muoversi per tempo e pensare a come realizzare "in casa" una quota di base-load "decarbonizzato" nazionale, contribuendo all'eliminazione dei combustibili fossili.

Entro il 2050, infatti, secondo le proiezioni dell'International Energy Agency (IEA, 2023) a fronte di un deciso aumento dei consumi elettrici, il nucleare potrebbe rappresentare circa il 10% della produzione globale di elettricità, che a seconda dei vari scenari potrebbe aumentare di un valore compreso tra 80% e 150% rispetto al valore attuale. Questa crescita, sempre secondo gli autori potrebbe essere sostenuta da vari fattori, tra cui:

- Implementazione di reattori nucleari avanzati (che includono ad esempio la GEN III+, i piccoli reattori modulari (SMR) e progetti di nuova generazione come gli AMR).
- Politiche di Supporto: Estensione della vita operativa delle centrali nucleari esistenti.

- Investimenti in R&D: Miglioramenti nella gestione dei rifiuti e riduzione dei costi dell'energia nucleare.
- Collaborazione Internazionale: Condivisione di tecnologie e best practices tra i paesi.

Pertanto, l'energia nucleare è vista come una delle tecnologie cruciali, a supporto delle rinnovabili, per raggiungere un futuro energetico a basse emissioni di carbonio entro il 2050.

In questa ottica, le dichiarazioni finali alla COP28 di Dubai contengono per la prima volta una menzione esplicita della tecnologia nucleare. Al termine della conferenza, un gruppo di 22 Paesi ha annunciato un'iniziativa per triplicare la capacità energetica nucleare globale entro il 2050. Questo annuncio fa parte di una serie di impegni presi per accelerare la decarbonizzazione e raggiungere gli obiettivi climatici, in particolare mantenere l'aumento della temperatura globale entro 1,5 °C. Tra i Paesi che hanno sottoscritto l'iniziativa ci sono Stati Uniti, Francia, Giappone e Canada.

L'inclusione per la prima volta del nucleare nel documento finale della COP28 rappresenta un cambiamento significativo nelle politiche globali sull'energia, riflettendo un consenso crescente sull'importanza di questa tecnologia per combattere il cambiamento climatico.

L'accordo sottoscritto alla COP28 sottolinea l'importanza del nucleare come fonte di energia sostenibile e affidabile, necessaria per affrontare la sfida della decarbonizzazione anche nei settori industriali "hard-to-habate" e per la produzione di idrogeno a basse emissioni (IAEA, 2023). La dichiarazione riconosce anche il ruolo cruciale della tecnologia nucleare nell'assicurare la sicurezza energetica e nel contribuire agli obiettivi di sviluppo sostenibile (Department of Energy, 2023).

Questo accordo potrebbe portare a rivedere al rialzo la percentuale di nucleare negli scenari IEA della prossima edizione.

### **Integrazione con le Rinnovabili per la Riduzione delle Emissioni di CO<sub>2</sub>**

Il nucleare può funzionare in combinazione con le rinnovabili e con le tecnologie di stoccaggio energetico per garantire una fornitura elettrica affidabile e sostenibile, anche in termini di costi e utilizzo di materie prime, oltre che in termini di emissioni di gas climalteranti.

Numerosi studi confermano che l'inclusione del nucleare nel mix energetico è una delle strategie più efficaci per ridurre le emissioni globali di CO<sub>2</sub>. Ad esempio, uno studio del Massachusetts Institute of Technology (MIT) ha mostrato che senza un contributo significativo del nucleare, i costi per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione aumenterebbero drasticamente (Massachusetts Institute of Technology, 2018).

Attualmente possono verificarsi casi in reti elettriche ad alta penetrazione di rinnovabili (come la Germania, la California) in cui i prezzi all'ingrosso sono bassi o addirittura negativi (con prezzi negativi è lo stato che colma la differenza negativa), ma il prezzo finale al consumatore continua ad aumentare a causa degli ingenti investimenti necessari, principalmente sulle reti e il mantenimento di sistemi di back-up.

La costruzione di nuove centrali nucleari richiede investimenti iniziali significativi, tuttavia, in un'ottica di lungo periodo, la presenza di una quota di nucleare nel mix di produzione permette di ridurre i costi del sistema elettrico, in particolare in uno scenario ad alta penetrazione di rinnovabili

(NEA, 2019). Tali costi sono in continuo aumento e tenderanno ancora ad aumentare in funzione della penetrazione di fonti intermittenti. Come mostrato ad esempio in (NEA, 2019), si può pensare di riformare l'attuale formulazione del costo dell'energia. Si potrebbe internalizzare parte dei costi di sistema aggiuntivi generati dalla specifica fonte (o premiare chi non li genera), i quali altrimenti sarebbero a carico dell'utilizzatore finale (o della fiscalità generale), aumentando la competitività soprattutto nei settori più energivori.

## **Valutazione LCA**

Il metodo più utilizzato per comparare globalmente l'impatto di una tecnologia tenendo conto di tutti gli aspetti a detrimento della natura e dell'uomo è il Life Cycle Assessment (LCA). L'analisi LCA compara tutte le emissioni (compresa quella di radionuclidi), i consumi (suolo, acqua, materie prime) e la produzione di rifiuti, valutandone l'impatto in termini di CO<sub>2</sub> equivalente. Per questa analisi si prendono in considerazione tutte le lavorazioni, compresa quella eventuale di estrazione e lavorazione delle materie prime, nonché la costruzione, lo smantellamento dell'impianto e lo smaltimento dei rifiuti. Questa equivalenza è complessa, pertanto ci si riferisce allo studio più accreditato in materia, che in ambito europeo è svolto dalla United Nations Economic Commission for Europe (UNECE, 2022), che riporta anche altri dati di riferimento provenienti da altre istituzioni, messi a confronto. In tutti i casi presenti i valori di CO<sub>2</sub> equivalente emessi dal nucleare risultano paragonabili a quelli delle rinnovabili (tipicamente vicino ai valori di fotovoltaico ed eolico, con l'idroelettrico che ha valori leggermente superiori).

Ancora più dettagli sulla metodologia di calcolo sono riscontrabili nel rapporto tecnico del JRC, che valuta l'energia nucleare in relazione al criterio di "non arrecare danni significativi" (Do Not Significant Harm, DNSH) del Regolamento (UE) 2020/852, noto come Regolamento sulla Tassonomia (Abusahl, S et al., 2021). I principali risultati relativi all'impatto sull'ambiente e le persone dei reattori nucleari lungo tutto il ciclo di vita sono i seguenti:

- **Impatto sulla salute umana e sull'ambiente:** Il JRC ha concluso che non ci sono prove scientifiche che l'energia nucleare faccia più danni alla salute umana o all'ambiente rispetto ad altre tecnologie di produzione di elettricità già incluse nella Tassonomia UE, come le rinnovabili. Gli impatti del nucleare sono comparabili a quelli dell'energia idroelettrica e delle rinnovabili per quanto riguarda gli effetti non radiologici.
- **Gestione dei rifiuti nucleari:** Un'attenzione particolare è stata posta sulla gestione dei rifiuti nucleari e radioattivi. Il JRC ha sottolineato che esiste un consenso scientifico e tecnico ampio sul fatto che il deposito dei rifiuti radioattivi ad alta attività e a lunga vita in formazioni geologiche profonde sia un metodo appropriato e sicuro per isolarli dalla biosfera per lunghi periodi di tempo.
- **Rischio di incidenti severi:** paragonando i reattori attuali (GEN II) alle altre tecnologie di produzione dell'energia elettrica emergono rischi (vedi definizione in appendice) inferiori agli impianti idroelettrici (facendo riferimento ai reattori delle nuove generazioni questi rischi diminuiscono molto).

Il rapporto afferma pertanto che l'energia nucleare può contribuire agli obiettivi di mitigazione del cambiamento climatico senza causare danni significativi ad altri obiettivi ambientali. Questo è stato un punto cruciale per includere il nucleare nella Tassonomia UE per gli investimenti sostenibili.

## **Affidabilità e Sicurezza**

L'energia nucleare fornisce una fonte di energia base-load, essenziale per la stabilità della rete elettrica. A differenza delle fonti rinnovabili intermittenti, come l'eolico e il solare fotovoltaico, le centrali nucleari possono operare continuamente, fornendo un flusso costante di elettricità (International Energy Agency, 2020).

La percezione pubblica del rischio nucleare è una barriera significativa; tuttavia, campagne di informazione e trasparenza possono migliorarne il consenso presso l'opinione pubblica, in quanto, a scapito della comune percezione, si tratta di una tecnologia sicura, grazie all'approccio descritto di seguito.

La sicurezza nucleare è infatti un aspetto fondamentale. Viene considerata al primo posto nella gestione delle attività nucleari ed è sottoposta a criteri internazionali, dettati dall'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), che ha anche il compito di controllarne l'effettiva applicazione in tutti gli ambiti in cui la sicurezza nucleare può avere una rilevanza.

La sicurezza nucleare trascende i confini, rendendo imperativa la cooperazione internazionale che aiuta con continuità i paesi a migliorare la loro infrastruttura nucleare e le capacità di risposta alle emergenze (grazie all'applicazione di tutti i criteri elencati in appendice).

Dando per assunto, sulla base del report JRC, che i reattori nucleari esistenti non sono causa di rischi estremi, le statistiche comparative di morti/TWh causati dalle varie tecnologie mostrano che il nucleare sia attualmente tra le migliori fonti di produzione dell'energia elettrica (assimilabile alle energie rinnovabili). I reattori di nuova generazione (ad esempio GEN III+, ma il discorso è analogo per GEN IV) hanno obiettivi di sicurezza ancora più stringenti, che riescono a ridurre ulteriormente il rischio residuo di incidenti significativi, di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto alla media dei reattori GEN II.

## **Conclusioni**

Gli scenari proposti dalle più accreditate istituzioni internazionali indicano chiaramente che l'energia nucleare è una tra le fonti necessarie (in particolare fondamentale come base-load), insieme alle rinnovabili, per la strategia globale di decarbonizzazione al 2050. La sua inclusione nel mix energetico permette di mantenere affidabile e resiliente la rete elettrica e garantisce prezzi stabili e accessibili per l'energia. Questo ultimo aspetto porta ad una riflessione anche sulla modalità di remunerazione della produzione di energia elettrica dove i costi di sistema sono una voce in continuo aumento.

L'LCA degli impianti nucleare è paragonabile a quello delle rinnovabili; pertanto, l'energia nucleare può contribuire agli obiettivi di mitigazione del cambiamento climatico senza causare danni significativi ad altri obiettivi ambientali. Questo è stato un punto cruciale per includere il nucleare nella Tassonomia UE per gli investimenti sostenibili.

L'integrazione del nucleare con fonti rinnovabili potrebbe garantire dunque una transizione energetica sicura e sostenibile, andando a mitigare il costo totale degli investimenti e di conseguenza il prezzo finale dell'energia ai consumatori.

La sicurezza nucleare richiede un impegno costante nella prevenzione, nel controllo e nella gestione dei rischi. Gli incidenti di Three Miles Island e Fukushima, in particolare, hanno evidenziato l'importanza della difesa in profondità e della necessità di prepararsi a gestire eventi estremi,

migliorando l'approccio alla sicurezza nucleare, che si è evoluto a seguito di questi incidenti andandone a migliorare gli aspetti critici evidenziati a seguito di una analisi approfondita degli eventi.

La sicurezza nucleare è una priorità globale che richiede un impegno continuo da parte dei paesi e delle organizzazioni coinvolte, ma che garantisce eccellenti livelli di sicurezza per questa tecnologia di produzione dell'energia elettrica. L'IAEA svolge un ruolo chiave nel promuovere pratiche sicure attraverso la formulazione di standard internazionali, la condivisione di conoscenze e la fornitura di assistenza tecnica. L'obiettivo finale è proteggere l'umanità e l'ambiente, garantendone un utilizzo pacifico e sicuro. Questi risultati evidenziano che l'energia nucleare, se ben gestita, può essere una delle componenti chiave della strategia di mitigazione del cambiamento climatico dell'UE, con impatti ambientali gestibili e comparabili ad altre fonti di energia sostenibili.

Per questo si suggerisce di prendere in considerazione, a valle dell'inserimento del nucleare nella strategia energetica nazionale, l'iter previsto in ambito IAEA, chiamato Milestone Approach (IAEA, 2015), che prevede la creazione di una Nuclear Energy Programme Implementing Organization (NEPIO), ad esempio in seno ad un Ministero, in grado di guidare nelle prime fasi l'iter di implementazione delle 19 infrastrutture (diviso in 3 fasi per ogni infrastruttura) che porti alla struttura necessaria a livello nazionale per gestire in modo razionale, efficiente e con i massimi standard di sicurezza questa complessa ma vantaggiosa tecnologia. La prima di queste 3 fasi riguarda un completo studio di pre-fattibilità che vada a giustificare in maniera esauriente il perché si stia considerando il nucleare, permettendo in quella sede di continuare il dibattito qualora ci siano ancora questioni aperte.

## Referenze

Abusahl, S., Carbol, P., Farrar, B., Gerbelova, H., Konings, R., Lubomirova, K., Martin Ramos, M., Matuzas, V., Nilsson, K., Peerani, P., Peinador Veira, M., Rondinella, V., Van Kalleveen, A., Van Winckel, S., Vegh, J. e Wastin, F., *Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*, EUR 30777 EN, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo, 2021, ISBN 978-92-76-40537-5, doi:10.2760/665806, JRC125953

Department of Energy. (2023, December 1). *At COP28, countries launch declaration to triple nuclear energy capacity by 2050, recognizing the key role of nuclear energy in reaching net zero.* <https://www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key>

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023, December 13). *Nuclear energy makes history as final COP28 agreement calls for faster deployment.* <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-makes-history-as-final-cop28-agreement-calls-for-faster-deployment>

IEA (2023), *World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Special Report on Global Warming of 1.5°C.* Retrieved from [IPCC website](<https://www.ipcc.ch/sr15/>)

International Atomic Energy Agency. (2015). *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, <https://doi.org/10.61092/iaea.hff3-zuam>

International Atomic Energy Agency. (2020). *Climate Change and Nuclear Power 2020.* Retrieved from [IAEA website](<https://www.iaea.org/topics/energy/climate-change-and-nuclear-power>)

Massachusetts Institute of Technology. (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World.* Retrieved from [MIT website](<https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>)

National Renewable Energy Laboratory. (2020). *Advanced Nuclear Technology.* Retrieved from [NREL website](<https://www.nrel.gov/energy-innovation/advanced-nuclear-technology.html>)

Nuclear Energy Agency. (2019). *The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables.* Report OECD/NEA No. 7299. Paris

United Nations Economic Commission For Europe. (2022). *Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources.* Retrieved from [UNECE website]([https://unece.org/sites/default/files/2022-08/LCA\\_0708\\_correction.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-08/LCA_0708_correction.pdf))

## APPENDICE

### Introduzione alla Sicurezza Nucleare

La sicurezza nucleare si riferisce all'insieme delle misure tecniche e organizzative finalizzate a prevenire incidenti nucleari e a proteggere le persone e l'ambiente dagli effetti nocivi delle radiazioni ionizzanti. L'obiettivo principale è garantire che le attività nucleari sia per la produzione di energia che per usi medici e industriali siano eseguite in modo sicuro e che i rischi associati siano minimizzati.

Possiamo considerare come cardine della sicurezza nucleare il documento dell'IAEA "Safety of Nuclear Power Plants: Design" (SSR-2/1), che stabilisce i requisiti di sicurezza specifici per la progettazione delle centrali nucleari. I dieci principi di sicurezza chiave delineati nel documento sono:

1. **Obiettivo di Sicurezza:** Proteggere le persone e l'ambiente dagli effetti delle radiazioni ionizzanti. Questo è il principio guida che definisce l'intero quadro della sicurezza nucleare.
2. **Leadership e Gestione della Sicurezza:** Assicurare che la leadership e la cultura della sicurezza siano integrate in tutte le fasi della progettazione, costruzione e operazione delle centrali nucleari.
3. **Difesa in Profondità:** Applicare una strategia a più livelli per prevenire e mitigare incidenti. Ciò include barriere fisiche multiple e livelli di protezione che funzionano indipendentemente.
4. **Gestione della Qualità:** Implementare un sistema di gestione della qualità che copra tutti gli aspetti della progettazione, costruzione, operazione e decommissioning delle centrali nucleari.
5. **Valutazione della Sicurezza:** Condurre valutazioni della sicurezza sistematiche e complete per garantire che i rischi siano identificati e gestiti in modo efficace.
6. **Sicurezza del Sito:** Scegliere e valutare i siti per le centrali nucleari in base a criteri rigorosi che considerano la geologia, l'idrologia e altri fattori ambientali per garantire la sicurezza a lungo termine.
7. **Progettazione di Sicurezza:** Progettare strutture, sistemi e componenti con margini di sicurezza sufficienti per resistere a condizioni operative normali e anomale, inclusi eventi estremi e incidenti, con concetti fondamentali quali ridondanza, diversificazione, separazione fisica, single failure per ciascuna delle barriere.
8. **Controllo delle Radiazioni:** Implementare misure per controllare e limitare le radiazioni rilasciate durante il normale funzionamento e in caso di incidenti.
9. **Preparazione e Risposta alle Emergenze:** Sviluppare piani di emergenza dettagliati e condurre esercitazioni regolari per assicurare una risposta rapida ed efficace in caso di incidenti.
10. **Gestione dei Rifiuti:** Gestire e smaltire i rifiuti radioattivi in modo sicuro, seguendo le migliori pratiche internazionali per minimizzare l'impatto sull'ambiente e sulla salute umana.

Questi principi assicurano che le centrali nucleari siano progettate, costruite e gestite per minimizzare i rischi e garantire la protezione delle persone e dell'ambiente.

### **La nozione di «rischio»**

Nel campo della sicurezza industriale, il «rischio» si definisce come l'esistenza di una probabilità di vedere un pericolo concretizzarsi in uno o più scenari, associata a conseguenze dannose su beni o persone. Il livello di rischio si quantifica quindi attraverso la valutazione della probabilità di accadimento di ciascuno scenario nonché dell'entità della gravità delle conseguenze dello scenario associato.

### **Rischio = Probabilità x Conseguenze**

Sulla base di questo concetto si fonda l'approccio probabilistico del rischio che, unito al calcolo delle conseguenze effettuato con analisi di tipo deterministico, permette di quantificare il rischio di accadimento di un evento incidentale. Considerando tutti i possibili eventi con probabilità non nulla, riusciamo a valutare con quale probabilità si possa manifestare ogni evento incidentale ed andare a valutare con una serie di strumenti sviluppati appositamente, tutti validati con moltissimi esperimenti a supporto, le eventuali conseguenze. Questo viene effettuato per ognuno dei livelli della difesa in profondità, andando a confrontare il risultato dell'analisi con il limite consentito (che cambia in funzione del livello).

### **L'obiettivo fondamentale di sicurezza**

"L'obiettivo fondamentale di sicurezza è proteggere le persone e l'ambiente contro gli effetti nocivi delle radiazioni ionizzanti" (Principi fondamentali di sicurezza – IAEA No SF-1)

L'obiettivo, in termini di conseguenze radiologiche, è il seguente:

- in funzionamento normale, le dosi ricevute dai lavoratori e dal pubblico devono essere il più basse possibile e, in ogni caso, inferiori ai limiti fissati dalla regolamentazione;
- in situazione accidentale, la presenza dell'impianto non deve comportare rischi di rilasci radioattivi inaccettabili per le persone e per l'ambiente. Più in generale, i limiti di accettabilità delle conseguenze radiologiche di un evento devono essere tanto più bassi quanto più alta è la frequenza di occorrenza di tale evento.

### **Una nozione fondamentale: la «Difesa in profondità»**

L'approccio di sicurezza internazionalmente utilizzato per tutte le installazioni nucleari si basa sui tre principi fondamentali della prevenzione, della protezione e della mitigazione degli incidenti. Per questo il concetto fondamentale è quella della difesa in profondità, che mira a trattare ogni evento interponendo linee di difesa indipendenti tra l'evento iniziatore e le sue potenziali conseguenze.

La "Difesa in profondità" si basa sull'implementazione di più livelli di protezione, ciascuno indipendente dagli altri. L'obiettivo è prevenire la realizzazione di scenari incidentali e, in caso di incidente, limitare le conseguenze per la popolazione e l'ambiente. L'origine del termine è legata

alla strategia militare: fortificazioni e schieramento di truppe per combattere il rischio di invasione e aggressione usate fin dall'antichità con l'obiettivo di costringere l'attaccante a superare diverse linee di difesa successive, indebolendolo e rallentando la sua progressione fino a fermarne l'avanzamento.

Si possono individuare cinque diversi livelli, in grado ognuno di evitare la prosecuzione di un incidente nella gran parte degli scenari:

- **Livello 1:** Prevenzione delle anomalie di funzionamento attraverso una progettazione robusta e una costruzione conforme.
- **Livello 2:** Controllo delle anomalie con sistemi di rilevamento e risposta.
- **Livello 3:** Controllo degli incidenti per evitare la loro *escalation*.
- **Livello 4:** Gestione degli incidenti gravi per limitare le conseguenze.
- **Livello 5:** Misure di protezione e mitigazione all'esterno del sito.

Ne conseguono delle specifiche condizioni operative da considerare durante la progettazione e l'esercizio di un impianto:

- **Condizioni normali:** Funzionamento previsto e autorizzato.
- **Condizioni incidentali:** Anomalie di funzionamento che richiedono interventi specifici.
- **Condizioni incidentali di progetto (Design Basis Accident, DBA):** Eventi improbabili ma possibili, che dimensionano i sistemi di sicurezza (in ambito non nucleare ci si ferma al massimo qui).
- **Estensione delle condizioni incidentali di progetto A (Design Extension Conditions A, DEC-A):** Eventi estremamente improbabili, ma con potenziale conseguenze gravi, con azioni richieste (ad esempio ulteriori sistemi di sicurezza) che puntano a prevenire la fusione del combustibile.
- **Estensione delle condizioni incidentali di progetto B (DEC B):** Eventi incredibilmente improbabili, ma con conseguenze gravi, considerate al fine di mitigare gli effetti del rilascio di radionuclidi per la popolazione in caso di incidente severo.

Questo approccio ha portato a migliorare costantemente la sicurezza dei reattori esistenti e progettare in modo ancora più sicuro i reattori che potrebbero essere usati come nuove installazioni.