

*EDITORIALE***PERCHE' NON SONO FAVOREVOLE AL NUCLEARE *****FULVIO CONTI GUGLIA****Introduzione**

Nel dibattito sul cambiamento climatico e la transizione ecologica, l'energia nucleare viene spesso riproposta come soluzione a basse emissioni di carbonio per soddisfare la crescente domanda globale di elettricità. Tuttavia, un'analisi rigorosa basata su dati scientifici, economici e di sicurezza dimostra che il nucleare non rappresenta una risposta ambientalmente sostenibile e neppure economicamente ragionevole.

I rischi associati alla gestione delle scorie radioattive, la vulnerabilità e sicurezza degli impianti, i costi costruttivi e le tempistiche di realizzazione sono incompatibili con l'emergenza climatica rendono questa tecnologia non solo superata, inefficiente, ma assai pericolosa.

Lo spunto di queste riflessioni deriva dal fatto che, di recente, stiamo assistendo ad un proliferare di riviste (anche pseudo-scientifiche), associazioni, comitati, convegni pro nucleare, foraggiati da *sponsor* (quasi sempre multinazionali) e promesse già viste in passato (ad esempio quella di poter ricoprire posti di prestigio nei ministeri, nei vari consigli di amministrazione, negli organi di vigilanza nazionale per la sicurezza nucleare o più semplicemente, detto terra terra, la possibilità di portare “una sostanziosa” pagnotta a casa, sistemare qualche “familiare” oppure costruirsi una “carriera politica”...).

Di seguito si cercherà a analizzare brevemente alcune criticità dell'energia nucleare. Nella valutazione sull'opportunità di costruire una centrale nucleare si dovrebbero valutare, specificatamente, diverse variabili:

- reale transizione ecologica;
- costo totale dell'investimento;
- costo totale della dismissione e bonifica;
- costi extra (ad es. trattamento rifiuti all'estero);
- tempi lunghi per la realizzazione della centrale;
- tempi molto lunghi per la dismissione e bonifica;
- gestione dei rifiuti radioattivi e dei rischi a lungo termine;
- necessità di grossi investimenti pubblici per la costruzione di nuove centrali;
- possibilità di ottenere una riduzione delle emissioni più rapida attraverso produzioni di energia alternative;
- rischio di ritardi e sforamenti dei costi;
- necessità di rigorosi sistemi di sicurezza;
- complessità tecnica, regolatoria e industriale;
- intensità delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita;
- rischio di incidenti gravi (rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente) con rischi di contaminazione potenzialmente apocalittiche¹;

¹* Il titolo è una parafrasi di un volume del filosofo, matematico e logico **Bertrand Russell**.

L'impegno pubblico di Russell contro il nucleare è avvenuto (negli anni '50), quando fu tra i massimi promotori del pacifismo scientifico e del celebre **Manifesto Russell-Einstein** (1955) contro il pericolo della bomba

dipendenza dagli stati che producono uranio;
inosservanza della volontà popolare (referendum)²;
incomparabilità tra la sicurezza dell'energia nucleare e quella delle rinnovabili (solo questo basterebbe per una scelta lucida e razionale);
incompatibilità del nucleare con l'art. 9 della Cost.;
rischio di attacchi terroristici o altri conflitti.

Costi economici e tempi di costruzione

I progetti nucleari comportano generalmente investimenti preliminari molto elevati e sono caratterizzati da un'altissima complessità tecnica e regolatoria.

L'*International Energy Agency* ha osservato che "i progetti nucleari sono difficili da finanziare proprio a causa della loro grande scala, dell'intensità di capitale, dei lunghi tempi di costruzione e della complessità tecnica". L'agenzia sottolinea inoltre che "ritardi e superamenti dei costi costituiscono importanti fonti di rischio per gli investitori". Impianti di nuova costruzione in Nord America ed Europa hanno registrato tempi di realizzazione superiori a 13-15 anni e costi che hanno superato abbondantemente tutte le stime iniziali.

La costruzione di un reattore esige ingenti investimenti, rendendo indispensabili massicci interventi economici statali che sottraggono risorse alle "vere" energie rinnovabili (fotovoltaico, eolico, geotermico, maree...). A tutt'oggi nessuna azienda privata - al mondo - senza sussidi statali ha affrontato il costo e il rischio di una centrale nucleare, nonostante le promesse di vertiginosi guadagni.

Dal punto di vista economico, l'energia nucleare è tra le fonti energetiche meno competitive e più gravose per le finanze pubbliche. I costi di costruzione sono notoriamente soggetti a ingenti sforamenti di *budget* e ritardi cronici.

Analizzando in modo fattuale i tempi di realizzazione risultano incompatibili con gli obiettivi preposti, o legati al cambiamento climatico. La costruzione di una centrale nucleare richiede mediamente dai 10 ai 15 anni (se tutto va bene). Ma, come evidenziato dalla comunità scientifica internazionale, le riduzioni delle emissioni devono avvenire entro questo decennio, rendendo il nucleare uno strumento inefficace e superfluo per contrastare la crisi climatica attuale, anche sotto questo aspetto.

atomica e la distruzione della specie umana per causa del nucleare. Fu sottoscritto anche da altri undici scienziati e intellettuali di altissimo livello in massima parte premi Nobel (tra cui **Max Born, Linus Pauling, Joseph Rotblat e Hideki Yukawa...**). Il Manifesto conclude con un monito universale passato alla storia, un appello che trascende ogni appartenenza politica, nazionale o religiosa: *«In qualità di esseri umani, facciamo appello agli esseri umani: ricordate la vostra umanità, e dimenticate il resto. Se sarete capaci di farlo, si aprirà la via verso un nuovo Paradiso; se non lo sarete, dinanzi a voi vi è il rischio della morte universale.»* **Albert Einstein** avvertiva che *"Il potere sciolto dell'atomo ha cambiato tutto, tranne il nostro modo di pensare, e quindi ci stiamo dirigendo verso una catastrofe senza precedenti. Dobbiamo sviluppare una nuova mentalità se l'umanità vuole sopravvivere."* **Enrico Fermi**, uno dei padri della "fissione nucleare" riteneva molto difficile l'uso civile del nucleare per il problema delle scorie che riteneva pericolosissime e difficilmente eliminabile. Anche **Carlo Rubbia**, (fisico nucleare) premio nobel per la fisica nel 1984 era contrario al ritorno al nucleare.

² L'Italia ha chiuso le sue centrali nucleari dopo i referendum del 1987 e del 2011, e attualmente non ci sono reattori di potenza in funzione sul territorio nazionale. Sicuramente se il Governo continua a perseguire questa strada si arriverà a un nuovo referendum, con spreco di risorse pubbliche per vedersi bocciare l'infelice scelta per l'ennesima volta.

Rifiuti radioattivi problema irrisolvibile - radioattività, tempi di decadimento delle scorie responsabilità intergenerazionale

La gestione dei rifiuti radioattivi è una delle sfide più grandi del nucleare. Ad oggi non esiste al mondo una soluzione operativa e definitiva. La caratteristica distintiva di alcuni rifiuti prodotti dal ciclo nucleare è la presenza di radionuclidi con tempi di decadimento molto lunghi.

L'Agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA) riconosce che alcuni materiali, tra cui il combustibile nucleare esaurito e determinati rifiuti derivanti dal suo riprocessamento, contengono radionuclidi con emivite molto lunghe e possono quindi rappresentare un **pericolo per migliaia di anni**. Per questi materiali il **deposito geologico profondo** è considerato l'opzione di riferimento per l'isolamento a lungo termine, ma non può essere mai sicuro in considerazione che la crosta terrestre è in continuo assestamento.

In estrema sintesi, uno dei problemi irrisolti è che **la scienza non dispone attualmente una soluzione tecnica per il recupero o smaltimento dei rifiuti nucleari**. L'unica strada, ad oggi seguita, è il deposito geologico, con l'evidente difficoltà di non poter garantire, per tempi estremamente lunghi, la corretta localizzazione, progettazione, realizzazione e *governance* dei depositi.

I combustibili esauriti rimangono pericolosi per centinaia di migliaia di anni. "La geologia delle formazioni profonde (ad esempio la barriera d'argilla di Onkalo, Finlandia) offre una minima speranza di isolamento, ma resta comunque oggetto di grande dibattito geologico, la scienza non garantisce assolutamente la tenuta di un contenitore per un arco di tempo superiore all'intera storia dell'*Homo sapiens*" (Ewing, 2015). Si pone anche una questione di **responsabilità intergenerazionale**: la produzione di elettricità avviene nell'arco di decenni, mentre alcuni materiali risultanti dal processo richiedono sistemi di isolamento e controllo progettati per periodi enormemente più lunghi.

Ad esempio, "i rifiuti di alto livello richiedono di essere trattati, gestiti e isolati dall'ambiente esterno. Queste operazioni presentano sfide dovute al fatto che questi materiali rimangono potenzialmente pericolosi per periodi estremamente lunghi. Questo è dovuto ai prodotti di fissione di vita lunga come il **tecnezio-99 (vita media di 220000 anni)** e **iodio-129 (vita media di 15,7 milioni di anni)**, che dominano la grande maggioranza dei termini in termini di radioattività, dopo che i prodotti di fissione con breve vita media, più radioattivi, sono decaduti in elementi stabili, che prende circa 300 anni. A causa della diminuzione esponenziale di radioattività nel tempo, l'attività del combustibile nucleare esausto si riduce del 99.5% dopo 100 anni. **Dopo circa 100000 anni**, il combustibile esausto diventa meno radioattivo dei minerali di uranio naturale. I metodi più comuni per isolare dalla biosfera i rifiuti con lunga vita media comprendono la separazione e la trasmutazione, trattamenti synroc, o stoccaggio in depositi geologici profondi".

Nella prospettiva di una corretta politica energetica, questo aspetto costituisce un elemento da includere nel bilancio complessivo dei costi e dei rischi. **Il combustibile utilizzato mantiene una tossicità letale per centinaia di migliaia di anni**, ponendo un fardello intergenerazionale senza precedenti. Da non sottovalutare, inoltre, eventuali infiltrazioni nelle falde sotterranee in prossimità dei siti di stoccaggio che potrebbero causare il rilascio di radionuclidi tossici nella biosfera. *"Il problema delle scorie nucleari rimane una delle sfide tecnologiche ed etiche irrisolte più gravi del nostro tempo, poiché richiede una stabilità geologica e istituzionale che supera di gran lunga la scala temporale della civiltà umana."* - [Gruppo di Intergovernativo sul Cambiamento Climatico, riferimenti storici sui rischi tecnologici]. La questione rimane comunque complessa, o meglio impossibile, perché richiede

sistemi di confinamento, controllo e istituzioni capaci di operare su scale temporali notevolmente eterogenee e lunghe³.

Ma i rischi e il dramma delle scorie portano un fisico nucleare di fama mondiale come Rubbia, a scrivere:

"L'atomo di pace diventa atomo di guerra per la presenza dell'uranio 238 che fa del reattore, lo si voglia o no, una macchina per produrre il plutonio, l'ingrediente più comune delle bombe A.

Il plutonio si forma spontaneamente durante il processo di fissione, insieme agli altri isotopi più o meno instabili, le famose scorie radioattive generate dalla trasformazione dell'uranio.

Ogni sei mesi, un anno, il combustibile deve essere sostituito. Lo si fa inserendo nuove barre di uranio al posto di quelle consumate che tuttavia non sono inerti ma cariche di tutti i prodotti della fissione in forma solida, liquida o gassosa, che continuano a emettere raggi alfa, beta e gamma.

A questo stadio la radioattività è ancora così intensa da produrre calore e imporre quindi un energetico raffreddamento del materiale.

Le barre vanno prima trasferite in vasche di raffreddamento annesse alla centrale, dove ha luogo una parziale decontaminazione naturale con il decadimento dei radioisotopi a vita più breve; quindi sottoposte, in appositi impianti, a un trattamento chimico per la separazione dei vari elementi, con il recupero dell'uranio non trasformato dalla fissione e l'accantonamento del plutonio e delle altre scorie.

Si apre a questo punto il grave problema dell'eliminazione dei rifiuti radioattivi. Con vari metodi sono inceneriti, triturati, macinati, pressati, vetrificati e inglobati in fusti impermeabili a loro volta disposti in recipienti di acciaio inossidabile, veri e propri sarcofaghi in miniatura.

Queste "vergogne" dell'energia nucleare vengono nascoste nelle profondità sotterranee e marine. Non abbiamo la minima idea di quello che potrebbe succedere dei fusti con tonnellate di sostanze radioattive che abbiamo già seppellito e di quelli che aspettano di esserlo. Ci liberiamo di un problema passandolo in eredità alle generazioni future, perché queste scorie saranno attive per millenni."⁴

Evitiamo di analizzare in questa sede i rifiuti italiani all'estero, (in attesa di rientro, dalla c.d. manutenzione e messa in sicurezza del combustibile italiano nucleare esaurito⁵ che attualmente, viene

³ **Il deposito geologico:** il progetto di Yucca Mountain (USA) è stato abbandonato per ragioni politiche e scientifiche, mentre il deposito di Onkalo (Finlandia) è ancora in fase di sperimentazione e la sua apertura era prevista nella metà del 2026 (in ritardo rispetto alla data iniziale del 2021), con costi miliardari. Ma fonti indipendenti (es. *Nuclear Engineering International*, 2024) suggeriscono che un ulteriore slittamento al 2027-2028 è possibile, a causa della complessità del processo di saldatura e della necessità di superare tutti i controlli regolatori dell'autorità finlandese per la sicurezza nucleare (STUK). Uno studio della *National Academy of Sciences* (NAS) sottolinea che la scelta del sito e la verifica della sicurezza richiedono decenni di studi e non sono prive di controversie (NAS, 2003). **Scenario "Wait and See":** molti paesi (es. Francia, Giappone, USA) mantengono la maggior parte del combustibile esaurito in piscine di raffreddamento o stoccaggio a secco (cask) in superficie, soluzione temporanea rischiosa per incidenti e atti terroristici (Alvarez e altri, 2003).

⁴ Non esiste per i rifiuti nucleari alcun sistema per renderle innocue e la ricerca dei siti di stoccaggio definitivi e sicuri è rimasta una chimera..., e se gli incidenti sono probabili o possibili e si cerca di esorcizzarli parlando di un cosiddetto "nucleare sicuro", le scorie sono una certezza. *Nuovo manuale di diritto e gestione dell'ambiente*. a cura di ALBERTO PIEROBON, Maggioli Editore 2012

⁵ Una parte significativa del combustibile esaurito italiano (dalle centrali) è stata inviata in Francia (Orano, La Hague) e Regno Unito (Sellafield) per il ritrattamento. I rifiuti vetrificati risultanti devono essere restituiti all'Italia, ma non esiste ancora un deposito permanente che li accolga. Attualmente sono stoccati in Francia e Regno Unito in attesa di un accordo definitivo.

eseguita in Francia e Inghilterra con extra costi aggiuntivi straordinari)⁶, sarebbe assolutamente inutile come sfondare una porta già aperta.

Il rischio degli incidenti nucleari - mortalità, danni psicologici, sociali e alla salute pubblica

Il rischio di un incidente grave rappresenta uno degli aspetti più controversi dell'energia nucleare. L'esperienza storica mostra un incidente di Livello 7 (il massimo su scala INES⁷) ogni 20-30 anni (Chernobyl, Fukushima). L'incidente di Fukushima ha causato la contaminazione di vaste aree del Giappone, con una zona di esclusione di 20 km ancora parzialmente inabitabile, e costi stimati superiori a 200 miliardi di dollari (IAEA, 2015).

Eventi come Chernobyl e Fukushima hanno dimostrato che non esiste nessuna sicurezza delle centrali nucleari, e che incidenti estremi comportano evacuazioni definitive delle aree colpite (imposte dai danni prodotti dalle radiazioni), contaminazione ambientale e pesantissime conseguenze economiche e sociali.

Studi epidemiologici su Chernobyl stimano **migliaia di decessi** aggiuntivi per cancro dovuti alle radiazioni (Cardis e altri., 2006; UNSCEAR, 2013⁸). L'evacuazione stessa ha causato danni psicologici e sociali enormi, documentati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2013).

E' appena il caso ricordare, che "il principio del *"Deep Defense"* (difesa in profondità) non ha mai eliminato la possibilità di errori umani, guasti, eventi naturali estremi (terremoti, tsunami, inondazioni) o attacchi terroristici. La vulnerabilità delle centrali situate in zone sismiche o costiere rimane un punto critico" (Ramana, 2011).

Valutazione dei oneri e dei vantaggi

La valutazione di una tecnologia energetica non può limitarsi ai suoi apparenti vantaggi, ma deve valutare i benefici che si sarebbero potuti ottenere utilizzando diversamente le risorse disponibili.

⁶ La **gestione e la manutenzione dei rifiuti nucleari italiani** sono attualmente affidate a Sogin S.p.A. (Società Gestione Impianti Nucleari), la società di Stato responsabile dello smantellamento degli impianti nucleari e della gestione dei rifiuti radioattivi. Non esiste un unico deposito nazionale permanente per i rifiuti ad alta attività e a lunga vita, ma i materiali sono stoccati in depositi temporanei situati presso i siti delle ex centrali nucleari e in alcuni impianti di ricerca. L'Italia, da tanti anni, sta lavorando alla realizzazione di un **Deposito Nazionale unico e permanente per rifiuti a bassa e media attività**, e di un Parco Tecnologico per la ricerca. Il sito candidato è stato individuato tra una lista di aree (CNAPI, Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee), ma il processo di localizzazione è ancora in corso (aggiornamento al 2025). Per i rifiuti ad alta attività, si prevede un deposito geologico profondo (non ancora progettato). **Manutenzione e sicurezza.** La manutenzione consiste in: Monitoraggio continuo delle strutture di stoccaggio (perdite, radiazioni, integrità dei contenitori). Ripristino e riconfezionamento dei rifiuti (es. rifiuti solidi compressi, cementazione, vetrificazione dei fanghi). Sorveglianza attiva dei siti (sorveglianza fisica, controllo ambientale, ispezioni ISPRA e ARPA).

⁷ La Scala INES (*International Nuclear and Event Scale*) è un sistema di classificazione utilizzato a livello internazionale per comunicare la gravità degli incidenti nucleari e radiologici. Va da Livello 0 (deviazione senza importanza per la sicurezza) a Livello 7 (incidente grave). Un incidente di Livello 7 è il massimo della scala ed è definito come un **"Incidente grave"** caratterizzato da: Rilascio significativo di materiale radioattivo nell'ambiente, con effetti sulla salute umana e sull'ambiente su vasta scala. Esposizione della popolazione a dosi di radiazioni potenzialmente letali. Danni estesi all'ecosistema e necessità di evacuazione e/o ricollocazione permanente di grandi aree.

⁸ Il Comitato scientifico delle Nazioni Unite sugli effetti delle radiazioni atomiche (UNSCEAR) valuta i livelli e gli effetti dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti. Le scoperte scientifiche dell'UNSCEAR sono alla base della valutazione del rischio da radiazioni e degli standard di protezione internazionale.

Appare evidente che, se una determinata somma di capitale viene investita nella costruzione di una centrale nucleare, quella stessa somma non può essere contemporaneamente destinata, per esempio, all'efficienza energetica, all'espansione delle reti elettriche, all'accumulo, all'energia solare o all'energia eolica o altro.

L'IPCC⁹ sottolinea che *“i costi delle tecnologie rinnovabili sono diminuiti rapidamente e che sistemi elettrici caratterizzati da elevate quote di rinnovabili possono essere supportati mediante accumulo, trasmissione, gestione della domanda e altre tecnologie di flessibilità.”* Dal punto di vista della pianificazione energetica, è ragionevole, quindi, confrontare non soltanto il costo dell'elettricità prodotta, ma anche la quantità di capacità a basse emissioni che può essere installata, in un breve periodo di tempo, la sicurezza dell'impianto, l'investimento complessivo e i costi altissimi di fine vita dell'impianto.

Insostenibilità, antieconomicità, tecnologia non competitività e moribonda

I costi di costruzione per i progetti di nuova generazione (EPR, AP1000) hanno subito **moltiplicazioni di prezzi e ritardi decennali**. Il reattore EPR (*European Pressurized Reactor*) di Flamanville (Francia) ha raggiunto un costo finale di oltre 12 miliardi di euro, tre volte il *budget* iniziale, con un ritardo di 12 anni (*Cour des Comptes*, 2020). In confronto, i costi del solare fotovoltaico e dell'eolico sono diminuiti rispettivamente dell'85% e del 90% negli ultimi dieci anni, rendendo le rinnovabili la fonte di nuova capacità più economica nella maggior parte del mondo (Lazard, 2023).

Bisogna tener conto dei **costi di smantellamento e di fine ciclo** (la dismissione di una centrale nucleare avviene al termine della sua vita operativa di 40-50 anni). Il costo di *decommissioning*, sempre taciuto o sottovalutato (altrimenti già costi dello smantellamento si coglierebbe a volo l'improporzionalità economica dell'opera), infatti, può superare l'ingente costo di costruzione iniziale. “Per impianti complessi come quelli danneggiati (es. Fukushima o Three Mile Island), i costi lievitano a decine di miliardi di dollari (OECD/NEA, 2016)”. Questi oneri ricadono quasi sempre solo sui contribuenti e poco o niente sulle società elettriche, creando un rilevante sbilanciamento economico denominato **"debito ambientale differito"**.

Oggi sono in voga i reattori modulari cosiddetti di **“nuova generazione di piccola taglia” (SMR)**. Essi sono rappresentati come la soluzione futuristica gli SMR non sono in grado neanche di dimostrare la loro convenienza economica; mentre studi indipendenti (Ramana & Mian, 2022)¹⁰ confermano che i costi unitari per MWh sono superiori a quelli dei grandi reattori a causa della perdita di economie di scala e la necessità di certificazione multipla. Inoltre, producono una quantità proporzionalmente maggiore di rifiuti radioattivi per unità di energia generata rispetto ai reattori convenzionali (Krall et al., 2022).⁹

Centrale nucleare obbiettivo primario per attentati o atti di guerra

L'energia nucleare civile è intrinsecamente legata al **rischio di proliferazione delle armi atomiche**, diciamo, senza nasconderci dietro un dito. Il ciclo del combustibile (arricchimento

⁹ IPCC (acronimo di *Intergovernmental Panel on Climate Change*, in italiano Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico) è un organismo scientifico delle Nazioni Unite.

¹⁰ Studiosi di politiche globali, sicurezza nucleare. Il riferimento a Ramana e Mian (2022) riguarda le analisi e gli scritti pubblicati in particolare l'articolo su *Scientific American* dell'aprile 2022.

dell'uranio e ritrattamento del plutonio), **cd. "doppio uso tecnologico"** produce materiali che possono essere utilizzati per costruire ordigni nucleari. Ogni paese dotato di un programma nucleare civile ha la potenziale capacità di sviluppare armi nucleari, come dimostrato da India, Pakistan e, più recentemente, dalle tensioni con l'Iran (per il programma di arricchimento). Il **Trattato di Non Proliferazione** (TNP) non è riuscito a prevenire questa diffusione, nonostante i suoi sforzi (Sagan, 2011)¹¹.

Uno studio del *Bulletin of the Atomic Scientists* (2018) stima che le scorte di plutonio civile siano superiori a 300 tonnellate, sufficienti per decine di migliaia di testate nucleari. La sicurezza di questi depositi è una **preoccupazione globale per gli scienziati ma taciuta alla popolazione**, o meglio volutamente mal documentata e spiegata.

Un altro pericolo reale è il rischio di attentati terroristici o in caso di conflitto, sicuro obiettivo militare. **Le centrali nucleari e i siti di stoccaggio rappresentano bersagli primari per attacchi di guerra o terroristici**. Inoltre, anche "un attacco aereo o un sabotaggio informatico potrebbero provocare un disastro radiologico, anche senza una detonazione nucleare" (Bunn & Wier, 2006).

Le centrali nucleari in zone di conflitto (come dimostrato drammaticamente in Ucraina con la centrale di Zaporizhzhia) possono diventare bersagli strategici, con il potenziale rilascio di materiale radioattivo su scala continentale.¹²

Rischi di sicurezza, incidenti e impatto geopolitico e ambientali

Sebbene i moderni reattori pubblicizzano sistemi di sicurezza passiva avanzati, **il rischio di incidenti catastrofici non può mai essere eliminato** (rischio a detta dei fautori del nucleare a bassa probabilità ma innegabilmente a impatto catastrofico), assodato che, le centrali nucleari non limitano i cambiamenti climatici anzi sono divoratrici di risorse idriche¹³, richiedendo enormi volumi d'acqua per

¹¹ Sagan sosteneva che l'incidente di Fukushima avrebbe segnato la fine della "rinascita nucleare" (nuclear renaissance) che si stava prospettando negli anni 2000. Analizzava come l'incidente avesse dimostrato la vulnerabilità dei reattori anche nei paesi tecnologicamente avanzati (Giappone). Concludeva che la fiducia del pubblico e degli investitori nel nucleare sarebbe stata gravemente danneggiata, rallentando o fermando nuovi progetti nel mondo. SCOTT D. SAGAN articolo pubblicato su Nature nel 2011, intitolato *"The Fukushima Daiichi accident and the end of the nuclear renaissance"*, che analizzava l'impatto del disastro di Fukushima sul futuro dell'energia nucleare. **Materiali fissili** (i nuclei di questi atomi si spaccano in due parti più piccole, liberando una grande quantità di energia e nuovi neutroni). Pertanto, il plutonio separato dal combustibile esaurito tramite ritrattamento (pratica comune in Francia, Russia e Giappone) è considerato "materiale direttamente utilizzabile" per un'arma nucleare. I nuclei di questi atomi si spaccano in due parti più piccole, liberando una grande quantità di energia e nuovi neutroni (bombe a fissione). Altro pericolo può avvenire dall'uranio arricchito perché contiene una maggiore concentrazione di uranio-235, un isotopo radioattivo capace di innescare reazioni a catena incontrollate e liberare enormi quantità di energia o radiazioni nocive.

¹² Gli impianti nucleari (ma anche quelli a gas) hanno una drammatica criticità che non può essere assolutamente sottovalutata. Tutte le grandi centrali termiche (nucleari e non) diventano i primi bersagli in caso di conflitti, guerre, terrorismo o tensioni internazionali. Conosciamo gli aspetti geopolitici e le crisi degli approvvigionamenti per gas, petrolio e uranio; in quest'ultimo caso c'è la complessa catena di lavorazione e un arricchimento in mano a potenze che implicano anche opzioni militari. *Dal fotovoltaico al nucleare, costi e limiti delle tecnologie per il sistema elettrico italiano* MARCO ROSA-CLOT e ALESSANDRO CODEGONI su: QualeEnergia.it

¹³ Le centrali nucleari hanno un consumo di risorse idriche significativo, ma variabile a seconda del sistema di raffreddamento adottato. Il **Raffreddamento a circuito aperto** (*once-through*), preleva grandi volumi d'acqua da un corpo idrico (fiume, lago, mare) e la restituisce più calda. Necessita di prelievi di circa 40-80 m³ per MWh elettrico prodotto (40.000-80.000 litri per MWh), con un consumo netto per evaporazione di 1-2 m³/MWh (la

il raffreddamento. Durante le ondate di calore e le siccità estive - purtroppo fenomeni sempre più frequenti a causa del riscaldamento globale - i fiumi si surriscaldano o si riducono, costringendo spesso a ridurre la potenza dei reattori o a spegnerli del tutto. Per altro verso si vedano anche i divieti e restrizioni delle navi a propulsione nucleare¹⁴.

Millantata autonomia energetica italiana

L'emissioni del *ciclo vita* derivano principalmente dall'estrazione e lavorazione dell'uranio¹⁵, dalla costruzione dell'impianto, dalla produzione dei rifiuti, dalle attività di gestione del combustibile, dal raffreddamento e altri fattori.

Molti sostengono, sventatamente, che *dependere fortemente da gas naturale, petrolio e carbone importati espone l'Italia alla volatilità dei prezzi e alle interruzioni delle forniture. L'energia nucleare consente invece di produrre grandi quantità di elettricità*. Ma, purtroppo, l'Italia è sprovvista di giacimenti sfruttabili di uranio, quindi cambierà forse solamente il fornitore dello “**spaccio energetico**”, rimanendo sempre dipendente da qualcuno alle condizioni del nuovo “padrone energetico”.

D'altra parte, invece, l'**Italia ha risorse energetiche naturali gratis e inesauribili** ma che sfrutta molto poco e che potrebbe utilizzare in piena sovranità e autonomia senza dipendere da nessuno, sole, vento, o come ad esempio quelle idriche (energia idroelettrica), mari (energia prodotta dalle maree), zone vulcaniche (energia geotermica¹⁶)...¹⁷

maggior parte dell'acqua viene restituita). L'impatto principale sull'ambiente è l'inquinamento termico. Mentre nel **raffreddamento a circuito chiuso** con torri di raffreddamento, l'acqua viene ricircolata e raffreddata per evaporazione in torri. Il consumo netto per evaporazione e spurgo è di circa 2-3 m³/MWh (2.000-3.000 litri per MWh). Il prelievo è molto inferiore rispetto al circuito aperto, ma il consumo effettivo (acqua persa) è maggiore.

¹⁴ L'La NS Mutsu: nell'agosto 1974, durante le prove di criticità del reattore al largo della prefettura di Aomori, una fuga di radiazioni di entità trascurabile e contenuta nello scafo provocò il rifiuto della comunità di Mutsu City e dell'associazione locale dei pescatori di accogliere il rientro della nave nel proprio porto di registrazione, sicché per oltre cinquanta giorni l'unità rimase alla deriva. L'episodio dimostra che, nel nucleare navale, anche un evento tecnicamente irrilevante può tradursi in una crisi di accettabilità sociale tale da rendere impossibile l'operatività della nave. Il dato si conferma, infine, con la NS Sevmorput, alla quale, nel 1988, fu negato l'accesso ai porti di Nakhodka, Vostochny, Magadan e Vladivostok per effetto delle proteste popolari maturate nell'immediato post-Chernobyl. Le opposizioni delle popolazioni rivierasche al naviglio nucleare ripropongono, sul terreno marittimo, la sequenza ben nota nel settore delle infrastrutture strategiche - dal LULU (Locally Unwanted Land Uses) al NIMBY (Not In My Back Yard) e ai suoi epigoni più radicali, NIABY (Not In Any Back Yard) e BANANA (Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anything) e altri⁶³ - in cui l'assenza di un procedimento amministrativo trasparente determina lo scivolamento dal «non qui» al «in nessun luogo». *Il dilemma della propulsione nucleare mercantile tra innovazione tecnologica, transizione energetica e politica del rischio* ANDREA CRISMANI su AmbienteDiritto.it, Fasc. 2/2026

¹⁵ I principali Stati con estrazione e lavorazione su larga scala di uranio sono: Kazakistan, Canada, Russia, Australia, Namibia, Niger, Cina, USA, Francia (lavorazione), Ucraina, Sudafrica. Ma così come il petrolio e gli altri combustibili fossili sono in via di esaurimento, anche l'uranio è destinato a scarseggiare entro pochi decenni, come del resto anche l'oro, il platino, il rame, le terre rare, ecc.. “*Non possiamo continuare perciò a elaborare piani energetici sulla base di previsioni sbagliate che rischiano di portarci fuori strada. Dobbiamo sviluppare la più importante fonte energetica che la natura mette da sempre a nostra disposizione, senza limiti, a costo zero: e cioè il sole che ogni giorno illumina e riscalda la terra*”. D. Se è così semplice, perché allora non si fa? R. “*Il sole non è soggetto ai monopoli. E non paga la bolletta. Mi creda questa è una grande opportunità per il nostro Paese: se non lo faremo noi, molto presto lo faranno gli americani, com'è accaduto del resto per il computer vent'anni fa*”. Intervista a C. Rubbia del 30/03/2008, su Repubblica

Produzione continua e stabilità della rete

È totalmente falso che le centrali nucleari hanno una capacità di produrre elettricità in modo continuo per lunghi periodi. Le centrali nucleari hanno necessità di manutenzione periodica e continua, una centrale nucleare rimane ferma da 2 a 3 mesi per la **manutenzione ordinaria**, ispezione dei componenti critici (pompe, valvole, generatori di vapore), test di sicurezza, manutenzione delle turbine e riparazioni minori e la sostituzione del combustibile, mentre, per interventi più complessi **o per manutenzione straordinaria**, il fermo può prolungarsi per anni - le tempistiche sono dettate anche per tipo di reattore¹⁸. In alcuni casi per i *c.d. guasti non programmati* (es. corrosione dei coperchi delle vasche dei reattori in Belgio o Francia, verifiche di sicurezza post-Fukushima), o per interventi di *retrofit* o adeguamenti normativi, le centrali sono rimaste ferme per 1-2 anni¹⁹.

Le Rinnovabili come alternativa più rapida, sicura ed economiche.

La transizione energetica non richiede necessariamente il nucleare²⁰. Le fonti rinnovabili (solare, eolico...) abbinate a sistemi di accumulo (batterie, pompaggio idroelettrico) stanno dimostrando di poter soddisfare la domanda in modo affidabile e a costi totalmente inferiori.

¹⁶ Un'alternativa importante all'atomo, secondo il premio Nobel C. Rubbia, sono invece le fonti rinnovabili e tra queste, insiste a sorpresa sulla geotermia, generata per mezzo di fonti geologiche di calore. «In pochi sanno che 1 GW di potenza (di una centrale geotermica, ndr) genera tanto quanto un reattore nucleare», ha spiegato Rubbia. «Visto che alcune zone dell'Italia sono particolarmente ricche di calore geotermico, perché non costruire nuove centrali di questo tipo o, quantomeno, iniziare una discussione sulla geotermia? È a basso costo e non produce emissioni».

¹⁷ Tra parentesi, ma non tanto fuori tema, anche la costruzione dei rigassificatori è stata una follia di politica, considerato che comunque dobbiamo acquistare il gas ai costi imposti da Stati terzi. A ciò si aggiunga che, anche l'efficienza delle centrali elettriche a gas diminuisce con l'aumentare delle temperature. A 40 °C, una centrale elettrica a gas può aspettarsi una riduzione della sua capacità del 13% e della sua efficienza del 7% rispetto a quando funziona a 20 °C. Diversi tipi di centrali elettriche a gas richiedono il raffreddamento ad acqua come parte del loro processo tra il vapore gassoso e il ciclo combinato turbine (CCGT). Poiché i CCGT a gas si basano sulla combustione di una miscela di gas e aria, questa densità inferiore significa che l'aria occupa più spazio, lasciando meno spazio al gas. In definitiva, ciò significa che quando l'aria è calda, le centrali elettriche a gas non possono generare tanta elettricità. Ad esempio, in due notti nell'agosto 2020, ci sono stati blackout continui in California, negli Stati Uniti, poiché la domanda ha superato l'offerta a causa di un'ondata di caldo.

¹⁸ Una centrale nucleare può fermarsi dai 3 ai 6 mesi ad es. in caso di corrosione dei generatori di vapore. O durante l'ondata di caldo a luglio 2026, tre reattori nucleari in Francia sono stati spenti mentre la produzione è stata ridotta in altri sette. (Si tratta di un fenomeno ben noto, la Francia ha assistito a sempre più consistenti riduzioni della produzione nucleare a causa delle ondate di calore in tutto l'ultimo ventennio). Ad esempio, solo nell'agosto 2026, il basso livello del Danubio ha colpito i reattori nucleari in Romania e Ungheria. In Svizzera, un'altro reattore nucleare è stato chiuso a causa delle alte temperature del fiume. Le centrali nucleari generalmente utilizzano l'acqua dei fiumi o del mare per contribuire a raffreddare i reattori. Ciò sta "spingendo alcuni paesi dell'Europa orientale, che avevano puntato sul nucleare, sull'orlo dell'emergenza energetica. Secondo la società di dati Montel, lunedì 3 agosto, oltre 2,44 GW ovvero il 40%-50% della capacità nucleare dell'Europa sudorientale era fuori servizio a causa della siccità nel Danubio. Su l'argomento si veda, anche, l'articolo, apparso su la Repubblica dal titolo *"Il Danubio in secca, l'Europa resta senz'acqua. Oltre 40 gradi in Ungheria, chiusa centrale nucleare"* di Tonia Mastrobuoni del 3 agosto 2026)

¹⁹ Fonte: IAEA Power Reactor Information System (PRIS); World Nuclear Association (WNA) *"Nuclear Power in the World Today"*; NRC (US) *"Outage Trends"*

²⁰ Al 2020 l'energia nucleare costituisce circa il 10% della produzione di energia elettrica globale. Fonte: Wikipedia

Mentre una centrale nucleare richiede 10-15 anni per essere costruita, un parco solare o eolico può essere installato in 1-2 anni. Per affrontare l'emergenza climatica, la velocità è cruciale. L'IPCC (2022) sottolinea che "le rinnovabili possono fornire la maggior parte della riduzione delle emissioni necessaria entro il 2030, mentre il nucleare ha un impatto marginale in questo lasso di tempo". Inoltre, le rinnovabili permettono una generazione distribuita, riducendo la vulnerabilità a singoli punti di fallimento e aumentando la resilienza della rete. Al contrario, il nucleare richiede grandi centrali centralizzate, la cui interruzione (per manutenzione o incidente) crea grossi vuoti di potenza.

Recenti studi modellistici (Sepulveda et al., 2018; Jacobson et al., 2022) dimostrano che è possibile raggiungere un sistema energetico 100% rinnovabile (combinando solare, eolico, idroelettrico, geotermico e accumulo) a costi inferiori rispetto a un *mix* che includa il nucleare. La flessibilità delle rinnovabili, unita a reti intelligenti e a una maggiore efficienza energetica, rende superfluo il contributo nucleare.

Conclusioni

La decarbonizzazione del settore energetico rappresenta una delle principali sfide tecnologiche del XXI secolo. L'aumento della domanda di elettricità, dovuto in particolare al cambiamento climatico e ai *data center* per l'intelligenza artificiale (IA) e di numerosi vetusti processi industriali, rende necessario aumentare rapidamente la produzione di energia a basse emissioni. Ma nel contempo bisogna muoversi verso uno stile di vita più sobrio.

L'energia nucleare non è una soluzione ecologica, non è efficiente, non è sicura, oggi si tratta in realtà di una distrazione di fondi, costosa e rischiosa rispetto alla transizione verso un sistema energetico basato interamente su fonti rinnovabili, sull'efficienza energetica e su sistemi di accumulo avanzati. Continuare, o peggio iniziare, oggi, a investire nel nucleare significa sottrarre capitali preziosi alle tecnologie che garantiscono una decarbonizzazione rapida, sicura ed economica.

Scegliere di realizzare una centrale nucleare, con i suoi rischi intrinseci (incidenti catastrofici, gestione irrisolta delle scorie per migliaia di anni, costi di costruzione e smantellamento insostenibili, minaccia di proliferazione di armi) è la scelta peggiore rispetto a quella di ricorrere alle rinnovabili (in ogni loro forma).

Mentre il mondo ha bisogno di azioni climatiche rapide e decisive, politiche di risparmio energetico, assenza di guerre e genocidi, investire sul nucleare significa dirottare risorse finanziarie, (spesso foriero di tangenti, corruzione e malaffare), umane e temporali lontano da soluzioni più efficienti, immediate e sicure. La scienza e l'economia indicano chiaramente che il futuro dell'energia è rinnovabile, privo di rischi con effetti prevedibili e immediati²¹.

Bibliografia

Alvarez, R., et al. (2003). "Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States." *Science & Global Security*, 11(2-3), 101-135.

²¹ Ai margini un'ultima riflessione, non è da escludere che il ritorno al nucleare sia il mezzo per arrivare alla costruzione di armi nucleari. Governanti senza morale, scrupoli e onestà con in mano mezzi di distruzione di massa; qualcuno si pone la domanda della compatibilità del cambiamento climatico del c.d. *Green Deal*, con la guerra e il nucleare e relative scorie? Qualcuno si pone la domanda che pochi delinquente per soli interessi economici stanno distruggendo l'umanità?

- Bunn, M., & Wier, A. (2006). "Terrorist Nuclear Weapon Construction: How Difficult?" *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, 607(1), 133-148.
- Burger, J., & Kruetli, P. (2017). "Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants: A Review of the State of the Art." *Nuclear Engineering and Design*, 323, 1-15.
- Cardis, E., et al. (2006). "Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years on." *Journal of Radiological Protection*, 26(2), 127-140.
- Cour des Comptes (2020). *Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs. Rapport public thématique.*
- Ewing, R. C. (2015). "Long-term storage of nuclear waste." *Elements*, 11(4), 239-244.
- IAEA (2015). *The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General.* International Atomic Energy Agency.
- IPCC (2022)..
- Environmental Surveillance, Education and Research Program, su stoller-eser.com, Idaho National Laboratory. URL consultato il 5 gennaio 2009 (archiviato dall'url originale il 21 novembre 2008).
- A. Hedin, *Spent nuclear fuel - how dangerous is it? A report from the project 'Description of risk'*, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 1997.
- Jordi Bruno, Laura Duro e François Diaz-Maurin, Chapter 13 - Spent nuclear fuel and disposal, in *Advances in Nuclear Fuel Chemistry*, Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, 2020, pp. 527-553, DOI:10.1016/B978-0-08-102571-0.00014-8, ISBN 9780081025710.
- Ojovan, M.I. e Lee, W.E., *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 2005, p. 315, ISBN 978-0-08-044462-8.
- National Research Council, *Technical Bases for Yucca Mountain Standards*, Washington, DC, National Academy Press, 1995, p. 91, ISBN 978-0-309-05289-4.
- The Status of Nuclear Waste Disposal*, su aps.org, The American Physical Society, gennaio 2006. URL consultato il 6 giugno 2008.
- Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada; Proposed Rule (PDF)*, su epa.gov, United States Environmental Protection Agency, 22 agosto 2005. URL consultato il 6 giugno 2008.
- CRS Report for Congress. *Radioactive Waste Streams: Waste Classification for Disposal (PDF)*, su fas.org.
- «The Nuclear Waste Policy Act of 1982 (NWSA) defined irradiated fuel as spent nuclear fuel, and the byproducts as high-level waste.»
- Duncan Clark, *Nuclear waste-burning reactor moves a step closer to reality* | Environment | guardian.co.uk, in *Guardian*, London, 9 luglio 2012. URL consultato il 14 giugno 2013.
- George Monbiot, *A Waste of Waste*, su monbiot.com. URL consultato il 14 giugno 2013.
- Energy From Thorium: A Nuclear Waste Burning Liquid Salt Thorium Reactor*, su youtube.com, YouTube, 23 luglio 2009. URL consultato il 14 giugno 2013 (archiviato dall'url originale il 2 luglio 2013).
- Nuclear Reprocessing: Dangerous, Dirty, and Expensive*, su ucsusa.org, Union of Concerned Scientists. URL consultato il 26 gennaio 2020.
- Is nuclear power the answer to climate change?*, su wiseinternational.org, World Information Service on Energy. URL consultato il 1° febbraio 2020.
- World Nuclear Waste Report*, su worldnuclearwastereport.org. URL consultato il 25 ottobre 2021.
- (EN) Brice Smith, *Insurmountable Risks: The Dangers of Using Nuclear Power to Combat Global Climate Change* - Institute for Energy and Environmental Research, su ieer.org. URL consultato il 24 novembre 2021.
- Remus Prăvălie e Georgeta Bandoc, *Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications*, in *Journal of Environmental Management*, vol. 209, 1° marzo 2018, pp. 81-92, DOI:10.1016/j.jenvman.2017.12.043, ISSN 1095-8630 (WC · ACNP), PMID 29287177.
- (EN) John F. Ahearne, *Intergenerational Issues Regarding Nuclear Power, Nuclear Waste, and Nuclear Weapons*, in *Risk Analysis*, vol. 20, n. 6, 2000, pp. 763-770, DOI:10.1111/0272-4332.206070, ISSN 1539-6924 (WC · ACNP), PMID 11314726.

CoP 26 Statement | Don't nuke the Climate!, su dont-nuke-the-climate.org. URL consultato il 24 novembre 2021 (archiviato dall'url originale il 25 novembre 2021).

I TEMPI PER LO SMANTELLAMENTO, basandosi sui dati di progetti reali (come quelli in USA, Germania e Francia) e sui report dell'OCSE/NEA (*Nuclear Energy Agency*) e dell'IAEA, si possono ritenere stime affidabili.

1. Tempi: Da 15 a 60+ anni (e oltre)

Lo smantellamento completo di una centrale nucleare non si conclude in pochi anni. Le strategie principali sono tre:

Smantellamento immediato (DECON - *Decontamination*): Inizia subito dopo la chiusura. La centrale viene smantellata e il sito bonificato per un uso futuro (es. "greenfield").

Tempo: 15-30 anni. È la strategia più veloce, ma richiede un grande investimento iniziale e la disponibilità immediata di depositi per i rifiuti.

Smantellamento differito (SAFSTOR - *Safe Storage*): La centrale viene messa in sicurezza e posta in "custodia vigilata" per un periodo di decadimento radioattivo. Solo dopo 40-60 anni si procede allo smantellamento vero e proprio.

Tempo: 50-70 anni totali (periodo di attesa + smantellamento). È la strategia più comune (es. molti siti USA e francesi). Vantaggio: la radioattività decade, riducendo i rischi per i lavoratori e i costi di gestione dei rifiuti.

Seppellimento in loco (ENTOMB - *Entombment*): I materiali radioattivi vengono sigillati in una struttura di cemento armato e sorvegliati per sempre. È una strategia molto rara, usata solo per impianti gravemente danneggiati (es. Chernobyl, Three Mile Island-2).

Esempi concreti:

USA (Maine Yankee): Smantellamento immediato completato in 15 anni (1997-2012), uno dei casi più veloci.

Francia (EDF - Sito di Brennilis): Iniziato nel 1985, ancora in corso. Stima di completamento: >50 anni.

Giappone (Fukushima Daiichi): Si stima che lo smantellamento durerà 30-40 anni (a partire dal 2011), ma molti esperti ritengono che possa durare **fino a 100 anni** a causa della contaminazione estrema.

2. Costi: Da centinaia di milioni a miliardi di euro

I costi sono anch'essi estremamente variabili. Una stima generale per una centrale di media taglia (1 GW) è:

Smantellamento standard (immediato o differito, senza incidenti): 500 milioni - 1,5 miliardi di euro per reattore.

Smantellamento di centrali danneggiate (incidenti): 2 miliardi - 20+ miliardi di euro. Esempio: La centrale di Fukushima Daiichi (giapponese) ha già superato i 200 miliardi di dollari in costi di bonifica e smantellamento (stima del Governo giapponese, 2020).

Problema dei "costi nascosti"

Spesso i fondi accantonati dalle utility durante la vita operativa sono insufficienti. Ad esempio, negli USA, molti gestori hanno fondi insufficienti per coprire i costi reali di smantellamento (GAO, 2021).

3. Perché i costi sono così alti? (Fattori chiave)

Robotica e telecomandata: La maggior parte delle operazioni in aree ad alta radioattività (es. camera del nocciolo) deve essere eseguita con robot, estremamente costosi da sviluppare e gestire.

Gestione dei rifiuti

I materiali strutturali (cemento, acciaio) diventano radioattivi per attivazione neutronica. Devono essere smaltiti come rifiuti a media e bassa attività (LLW/ILW), ma la loro quantità è enorme (10.000-50.000 tonnellate per reattore). I costi di trasporto e deposito sono altissimi.

Decontaminazione

Ogni superficie contaminata (tubature, pavimenti) deve essere decontaminata con acidi, ultrasuoni o altri metodi, processo lungo e costoso.

Mano d'opera e sicurezza.

Richiede migliaia di lavoratori altamente specializzati, con tute, respiratori e turni brevi per limitare l'esposizione alle radiazioni. I costi assicurativi sono folli.

Riepilogo: Tabella dei costi e tempi stimati

• Tipo di smantellamento	• Tempo totale	• Costo stimato (per reattore da 1 GW)	• Esempi reali
• Immediato (DECON)	• 15-30 anni	• 500M - 1,5 miliardi €	• Maine Yankee (USA) - 15 anni
• Differito (SAFSTOR)	• 50-70 anni	• 700M - 2 miliardi €	• Molti siti francesi e USA
• Post-incidente grave	• 30-100+ anni	• 2 - 200+ miliardi €	• Fukushima (Giappone)

In conclusione, lo smantellamento è una delle voci di costo più nascoste dell'energia nucleare. Molti operatori e governi non hanno accantonato risorse sufficienti, creando un enorme debito ambientale e finanziario per le generazioni future. In alcuni casi (es. Marcia in Italia o Greifswald in Germania), i costi di smantellamento hanno superato il valore di tutta l'energia prodotta dalla centrale durante la sua vita operativa.

Fonti:

OECD/NEA (2016). Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants.

IAEA (2018). Decommissioning of Nuclear Power Plants: Status and Challenges.

US Government Accountability Office (GAO) (2021). Nuclear Power: NRC Needs to Take Action to Fully Ensure the Timely Collection of Decommissioning Funds.

World Nuclear Association (WNA) - Decommissioning Nuclear Facilities.

Tendenza Globale: verso il declino del nucleare per la produzione di energia.

Di seguito un elenco aggiornato degli Stati che stanno attivamente chiudendo o dismettendo centrali nucleari, con le motivazioni principali e lo stato attuale (dati 2023-2024).

1. Germania (la più rapida e completa)

Situazione: Ha chiuso tutti i 6 reattori rimasti nell'aprile 2023 (Isar 2, Emsland, Neckarwestheim 2).

Causa: Decisione politica post-Fukushima (2011) e accelerazione della transizione energetica (Energiewende).

Stato smantellamento: I reattori chiusi tra 2011 e 2023 sono già in fase di Decommissioning (SAFSTOR o DECON). La maggior parte richiederà 15-20 anni per la bonifica totale.

2. Italia (ferma da decenni, mai più riavviata)

Situazione: Ha chiuso tutte le 4 centrali dopo il referendum del 1987 (post-Chernobyl). L'ultima (Caorso) fu spenta nel 1990.

Stato smantellamento: In corso - SOGIN (società statale) sta smantellando i siti (Caorso, Trino, Garigliano, Latina). Tempi previsti: 15-20 anni (orrore: Latina, una vecchia centrale Magnox, è ancora in fase di smantellamento dal 1999).

3. Svizzera (uscita graduale)

Situazione: Mühleberg chiusa nel 2019; Beznau 1 e 2 e Gösgen e Leibstadt hanno date di chiusura variabili (decisione del 2011, senza data fissa, ma senza nuovi reattori).

Stato smantellamento: Mühleberg è già in DECON (smantellamento immediato, previsto entro 2034). Le altre seguono.

4. Belgio (uscita ritardata)

Situazione: Ha chiuso definitivamente Doel 3 (settembre 2022) e Tihange 2 (febbraio 2023). Avrebbe dovuto chiudere tutte le centrali entro il 2025, ma nel 2023 ha prorogato di 10 anni la vita di Doel 4 e Tihange 3 per motivi energetici (crisi Ucraina).

Stato smantellamento: Doel 3 e Tihange 2 sono in fase di preparazione allo smantellamento (previsto 10-15 anni).

5. Spagna (uscita programmata)

Situazione: Accordo del 2019 per chiudere tutti i 7 reattori entro il 2035. Il primo (José Cabrera) è già stato smantellato; Garoña è chiusa dal 2012; Santa María de Garoña e Ascó seguiranno.

Stato smantellamento: José Cabrera (già completato nel 2017). Per gli altri, il Decommissioning inizierà dopo la chiusura (2030-2035).

6. Corea del Sud (uscita parziale)

Situazione: Il governo Moon Jae-in (2017-2022) aveva deciso la chiusura anticipata di Kori 1 (già spenta nel 2017) e Wolsong 1 (spenta nel 2019), e aveva bloccato nuovi reattori.

Cambiamento di rotta: Dal 2022 il nuovo governo Yoon ha invertito la rotta e sta riavviando progetti nucleari. Tuttavia, i due reattori chiusi restano in smantellamento.

7. Taiwan (uscita in corso)

Situazione: Ha chiuso la centrale di Chinshan (1 e 2) nel 2018 e 2019. La centrale di Kuosheng è attualmente ferma (non operativa). Il referendum del 2021 ha bloccato la chiusura totale, ma la centrale di Maanshan resta in funzione fino al 2025.

Stato smantellamento: Chinshan è in fase di DECON (10-15 anni).

8. Giappone (chiusure post-Fukushima, ma parziali)

Situazione: Dopo Fukushima 2011, tutti i reattori furono fermati. Molti sono stati definitivamente chiusi (es. Fukushima Daiichi 1-4, Fukushima Daini 1-4, Mihama 1-2, Ohi 1-2, Tsuruga 1, Tokai 2 - quest'ultimo chiuso nel 2023 dopo danni sismici).

Stato smantellamento: Fukushima Daiichi è il più grande cantiere di Decommissioning al mondo (previsto 30-40 anni). Altri siti (es. Tokai 2) sono in DECON.

9. Stati Uniti (chiusure per motivi economici)

Situazione: Negli ultimi 10 anni sono state chiuse oltre 10 centrali (es. Vermont Yankee - 2014; Oyster Creek - 2018; Diablo Canyon 1 prevista per 2025; Palisades - 2022; Indian Point 3 - 2021; Duane Arnold - 2020).

Causa principale: Nucleare non competitivo economicamente - il nucleare non regge contro gas e rinnovabili a basso costo. Solo Indian Point e Palisades sono state chiuse definitivamente nonostante i sussidi.

Stato smantellamento: Vermont Yankee è già in DECON; Oyster Creek è in fase di SAFSTOR (50 anni di attesa).

10. Svezia (chiusura progressiva, ma non totale)

Situazione: Ha chiuso Barsebäck 1 e 2 (1999-2005) e Oskarshamn 1 e 2 (2015-2016). Attualmente ha 6 reattori in funzione (Forsmark 1-3, Oskarshamn 3, Ringhals 3-4).

Stato smantellamento: Barsebäck è in DECON già completato (bonifica totale); Oskarshamn 1 e 2 sono in SAFSTOR.

11. Regno Unito (chiusure per fine vita)

Situazione: Ha chiuso Hunterston B (2021), Dungeness B (2021), Hinkley Point B (2022) e sta per chiudere Torness e Hartlepool (2025). Fresatori AGR sono in fase di smantellamento.

Stato smantellamento: Il sito di Sellafield (vecchie centrali Magnex e Magnox) è il più grande cantiere di Decommissioning d'Europa, con costi miliardari e previsto fino al 2120.

12. Francia (chiusure per invecchiamento, non per scelta politica)

Situazione: La Francia ha 18 centrali (56 reattori). Fessenheim (chiusa nel 2020) è l'unico sito dismesso finora. Sono previste chiusure per fine vita di 12 reattori tra il 2025 e il 2035 (per motivi tecnici, non politici). EDF ha annunciato lo smantellamento di Fessenheim (in corso, previsto 15-20 anni) e sta studiando il decommissioning di Bugey e Tricastin (più vecchi). La Francia non ha una volontà politica di uscita dal nucleare, ma l'invecchiamento impone chiusure.

Stato smantellamento: Fessenheim è in fase di DECON (smantellamento immediato). Gli altri siti attendono la fine della vita operativa (40-50 anni).

13. Lituania (chiusura anticipata per accordo UE)

Situazione: Ha chiuso Ignalina 1 e 2 (due reattori RBMK, simili a Chernobyl) nel 2004 e 2009, come condizione per l'ingresso nell'Unione Europea. Non ha più centrali nucleari in funzione.

Stato smantellamento: Ignalina è attualmente il più grande cantiere di Decommissioning in Europa (costi stimati oltre 3 miliardi di euro, con fondi UE). Il progetto è in fase di smantellamento del nocciolo e gestione dei rifiuti, previsto fino al 2038-2040.

14. Armenia (chiusura prevista, ma posticipata)

Situazione: Ha un solo reattore (Metsamor, VVER-440) che doveva chiudere entro il 2016 per ragioni di sicurezza sismica, ma la scadenza è stata posticipata al 2026 per motivi energetici. Tuttavia, l'Armenia ha annunciato la chiusura definitiva per il 2026 e la costruzione di un nuovo reattore.

Stato smantellamento: Non ancora iniziato (in fase di preparazione).

15. Svizzera (completamento)

Situazione: Oltre a Mühleberg (chiusa 2019), anche Beznau 1 e 2 (le più vecchie centrali in funzione al mondo, 1969) e Gösgen e Leibstadt hanno date di chiusura non fissate, ma la legge del 2011 vieta nuove costruzioni. Il governo elvetico ha confermato che non ci saranno nuove centrali. Lo smantellamento di Mühleberg è avviato e durerà fino al 2031.

16. Austria (nessuna centrale nucleare in funzione, ma ha dismesso)

Situazione: L'Austria non ha mai avuto centrali in funzione. L'unica centrale costruita (Zwentendorf, 1978) è stata fermata da un referendum prima dell'avvio e convertita in impianto dimostrativo e parco solare. Non ci sono stati smantellamenti veri, ma la questione è puramente simbolica.

17. Paesi Bassi (chiusura parziale)

Situazione: La centrale di Dodewaard (50 MW) è stata chiusa nel 1997 e completamente smantellata (bonifica completata nel 2016). La centrale di Borssele (485 MW) doveva chiudere nel 2033, ma è stata prorogata fino al 2034 e si valuta una estensione a 2040. Non ci sono nuove centrali in costruzione (il progetto Borssele 2 è stato cancellato).

Stato smantellamento: Dodewaard è stata completamente bonificata (caso esemplare di DECON rapido).

18. Bulgaria e Romania (chiusure per invecchiamento)

Situazione: La Bulgaria ha chiuso i 4 reattori di Kozloduy 1-4 (VVER-440) tra il 2002 e il 2006 (condizioni UE). Romania ha chiuso Cernavodă 1 e 2? No, sono ancora in funzione. La Romania ha in funzione due reattori CANDU, ma non ha chiuso alcun reattore.

19. Ucraina (chiusure post-Chernobyl)

Situazione: Dopo il disastro di Chernobyl (1986), l'Ucraina ha chiuso definitivamente Chernobyl 1, 2, 3 (1991-2000) e sta smantellando il sito con il nuovo sarcofago (NSC). Ha inoltre chiuso Zaporizhzhia 1, 2, 3, 4, 5, 6? No, sono ancora in funzione (occupate dalla Russia). L'Ucraina ha chiuso Rivne 1 e 2? No, sono ancora operative. Solo Chernobyl è in smantellamento.

Stato smantellamento: Chernobyl è il più grande progetto di decommissioning al mondo, con tempi previsti fino al 2065.

20. Russia (chiusure selettive)

Situazione: La Russia ha chiuso Novovoronezh 1 e 2 (anni '60), Leningrad 1 e 2 (RBMK, 2018-2020), Kursk 1 (2021) e Smolensk 1 (prevista 2025). Sono chiusure per fine vita, ma la Russia sta costruendo molti nuovi reattori (VVER-1200).

Stato smantellamento: Leningrad e Kursk sono in fase di SAFSTOR (30-50 anni di attesa prima dello smantellamento).

21. Altri paesi con chiusure minori:

Canada: Ha chiuso Gentilly-2 (2012), Pickering A (2007-2014) e sta smantellando Douglas Point (chiuso 1984). Bruce A unità 1 e 2 sono in smantellamento.

Svezia (completamento): Oskarshamn 1 e 2, Barsebäck 1 e 2 sono già in fase di smantellamento (Barsebäck completato).

Finlandia: Ha chiuso Loviisa 1 e 2? No, sono ancora operative fino al 2027-2030. Solo Olkiluoto 3 è nuovo. Nessuna chiusura recente.

Slovacchia: Ha chiuso Bohunice V1 (VVER-440) nel 2006-2008. Bohunice V2 è ancora in funzione.

Le motivazioni per i Paesi che stanno uscendo dal nucleare (o riducendo drasticamente) sono: i costi insostenibili, la concorrenza delle rinnovabili, i problemi di gestione rifiuti, la paura degli incidenti (Fukushima), l'invecchiamento degli impianti e la pressione politica/elettorale.

In Europa occidentale (Germania, Italia, Svizzera, Belgio, Spagna, Svezia, Lituania, Austria, Danimarca - quest'ultima ha abbandonato il programma nucleare negli anni '80).

In Giappone (parziale, ma con molti reattori chiusi definitivamente), Taiwan, Corea del Sud (inversione di rotta parziale), Stati Uniti (chiusure economiche).

VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE DIVERSE TECNOLOGIE

Petrolio, Gas, (carbone) e centrali termiche

costi elevati

relativa rapidità di installazione e di risposta

forti fluttuazioni di costo dovuti a ragioni geopolitiche

dipendenza da forniture estere (Usa e paesi arabi), con costi molto elevati

criticità in determinati periodi

Nucleare:

costi elevati e tempi di realizzazione molto lunghi

rigidità della produzione che non può essere facilmente modulata

problema di una dismissione molto costosa

limiti di produzione (caldo, siccità...)

dipendenza da forniture estere, con costi molto elevati

incognita sulla gestione dei rifiuti radioattivi (non dimentichiamo il caso Ilaria Alpi in Somalia e l'affondamento di navi cariche di rifiuti radioattivi nel canale di Sicilia).

Eolico:

costi sempre più bassi

elevato impatto visivo

intermittenza

Idroelettrico:

costi bassi

tempi di realizzazione lunghi

rilevante impatto ambientale

criticità nei periodi estivi

Fotovoltaico:

costi bassi

rapidità di installazione

necessità di grandi superfici e intermittenza (se non si utilizzano batterie di accumulo)

Nota:

Il **problema del caldo e della siccità** e del suo impatto sulle **centrali nucleari, termiche a gas o idroelettriche** non ha soluzioni, probabilmente senza il fotovoltaico rischiamo diversi black out.