

Pubblichiamo la traduzione dell'articolo "Evaluating nuclear power's suitability for climate change mitigation: technical risks, economic implications and incompatibility with renewable energy systems", di Fabian Präger, Christian Breyer, Hans-Josef Fell, Christian von Hirschhausen, Claudia Kemfert, Björn Steigerwald, Thure Traber e Ben Wealer recentemente uscito sulla rivista "Frontiers in Environmental Economics", a riguardo di un tema di grande attualità per le politiche climatiche e ambientali anche in Italia.

VALUTAZIONE DELL'IDONEITÀ DELL'ENERGIA NUCLEARE ALLA MITIGAZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: RISCHI TECNICI, IMPLICAZIONI ECONOMICHE E INCOMPATIBILITÀ CON I SISTEMI DI ENERGIA RINNOVABILE

Fabian Präger^{1,*}, Christian Breyer², Hans-Josef Fell³, Christian von Hirschhausen^{1,4}, Claudia Kemfert^{4,5,6}, Björn Steigerwald^{1,4}, Thure Traber³ e Ben Wealer¹

¹ Workgroup for Infrastructure Policy, Technical University of Berlin (TU), Berlin, Germany

² School of Energy Systems, LUT University, Lappeenranta, Finland

³ Energy Watch Group, Berlin, Germany

⁴ German Institute for Economic Research (DIW) Berlin, Department Energy, Transport, Environment, Berlin, Germany

⁵ German Advisory Council on the Environment (SRU), Berlin, Germany

⁶ Energy Economics and Energy Policy, Leuphana University Lüneburg, Lüneburg, Germany

Sommario

Il contributo presenta un'analisi approfondita di valutazione dell'idoneità dell'energia nucleare come opzione per contrastare la crescente emergenza climatica. Riassumendo e valutando gli argomenti chiave, chiariamo perché l'energia nucleare non è un'opzione idonea ad affrontare il cambiamento climatico. L'argomento principale è incentrato sui rischi tecnici e umani irrisolti di incidenti e proliferazione, che difficilmente potranno essere efficacemente mitigati in futuro. Inoltre, evidenziamo le significative disparità di costo tra l'energia nucleare e altre fonti energetiche non fossili, come il solare fotovoltaico e l'energia eolica, considerando i costi medi netti dell'elettricità valutati sulla vita utile delle opere di generazione dell'energia. Affrontiamo anche l'incompatibilità dell'energia nucleare con i sistemi di energia rinnovabile, sottolineando la necessità di flessibilità a fronte delle risorse solari ed eoliche, per loro natura variabili. Le tecnologie alternative dei reattori nucleari non saranno disponibili in tempo per dare un contributo importante. L'energia nucleare pone anche sfide nel funzionamento delle centrali elettriche nel contesto dei cambiamenti climatici e delle situazioni di conflitto armato. In definitiva, riteniamo che dovrebbero essere esplorate altre motivazioni per giustificare il continuo interesse per l'energia nucleare in alcuni Paesi, poiché, da sole, le argomentazioni relative all'approvvigionamento energetico non sono sufficienti a giustificare nuovi investimenti.

Parole chiave: *energia nucleare, mitigazione del cambiamento climatico, rischi, economia, sistema energetico, rinnovabili*

EVALUATING NUCLEAR POWER'S SUITABILITY FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION: TECHNICAL RISKS, ECONOMIC IMPLICATIONS AND INCOMPATIBILITY WITH RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Abstract

This paper presents a comprehensive analysis of the suitability of nuclear power as an option to combat the escalating climate emergency. Summarizing and evaluating key arguments, we elucidate why nuclear power is unsuitable for addressing climate change. The primary argument centers around the unresolved technical and human risks of accidents and proliferation, which are unlikely to be effectively mitigated in the future. Furthermore, we highlight the significant cost disparities between nuclear power and other non-fossil energy sources, such as solar photovoltaics and wind power, considering levelized costs of electricity. We also address the incompatibility of nuclear power with renewable energy systems, emphasizing the need for flexibility in the face of variable solar and wind resources. Alternative reactor technologies will not be available in time to make a major contribution. Nuclear power also poses challenges in power plant operation amid climate change and war. Ultimately, we argue that other motivations should be explored to explain the continued interest in nuclear power in some countries, as energy supply arguments alone are insufficient to justify new investments.

Keywords: *nuclear power, climate change mitigation, risks, economics, energy system, renewables*

* Per contatti: info@ingegneriadellambiente.net

1. Introduzione

Considerata l'evoluzione sempre crescente dell'emergenza climatica, vi è una sempre maggiore attenzione all'importanza dell'energia nucleare nell'affrontare i rischi legati al clima. Attualmente, l'energia nucleare rappresenta circa il ~9.8% della produzione mondiale dell'energia elettrica, equivalente a circa 2,800 TWh (BP, 2022).

Numerose organizzazioni internazionali (IEA, 2019, 2021; IAEA, 2020) e imprese private (Gates, 2021), sostengono che l'energia nucleare dovrebbe assumere una importanza maggiore nel settore energetico. Anche le valutazioni e i rapporti speciali del Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC) includono contributi di energia nucleare (IPCC, 2018, 2022). Tuttavia, la storia dell'energia nucleare è piena di sfide tecniche irrisolte che possono essere controllate solo in una certa misura, e per questo motivo non vanno trascurati i rischi per la sicurezza e, anche, di fallimento economico (MIT, 2018; OCSE e NEA, 2020). Dal punto di vista dei sistemi di innovazione tecnologica, l'energia nucleare è in declino da diverso tempo (Markard et al., 2020) e non è mai diventata una tecnologia economica in grado di competere con le altre (Davis, 2012; Wealer et al., 2021a; Aghahosseini et al., 2023; Haywood et al., 2023).

In questo documento si riporta una valutazione per quanto possibile completa degli argomenti tecnici, economici e politici che ruotano intorno al dibattito sul ruolo dell'energia nucleare nella lotta al cambiamento climatico. Dalla valutazione condotta, si evidenzia che l'energia nucleare non offre un contributo vitale alla mitigazione del cambiamento climatico, ma piuttosto ne rappresenta un ostacolo. Alcune evidenze possono fornire argomenti ai politici e ai decisori, così come agli sviluppatori di scenari energetici, a supporto dell'abbandono dell'uso dell'energia nucleare o per non intraprendere una strada che porti allo sviluppo dell'energia nucleare. Di seguito si espongono le motivazioni, organizzate per argomenti, e una sezione conclusiva che sintetizza i risultati della valutazione.

2. L'energia nucleare è pericolosa e gli incidenti non possono essere evitati

Anche se non esiste un modo per quantificare in modo affidabile il rischio di incidenti nucleari (Downer e Ramana, 2021), si può affermare che l'energia nucleare è una tecnologia per la quale non è possibile escludere incidenti gravi, oltre ai problemi di sicurezza legati ai materiali radioattivi. Garantire la sicurezza durante la vita del reattore e oltre implica il raggiungimento di tre obiettivi critici: (i) confinare efficacemente gli elementi di combustibile radio-

attivo e altri materiali, (ii) monitorare e controllare costantemente la reattività e (iii) gestire e dissipare adeguatamente il calore generato all'interno del nucleo del reattore e dal continuo raffreddamento degli elementi combustibili. Queste considerazioni sulla sicurezza si estendono non solo per tutta la durata operativa del reattore, ma anche per centinaia di migliaia di anni¹.

Dall'avvento dell'energia nucleare ad oggi, la prevenzione di incidenti gravi e il raggiungimento di livelli di sicurezza ritenuti socialmente accettabili, cioè quelli per i quali la società può stabilire misure di salvaguardia, sono ancora irraggiungibili. Eventi critici e incidenti si sono verificati ripetutamente fin dall'inizio dell'energia nucleare. I primi esempi sono la fusione parziale del nocciolo a Chalk River (Canada, 1952), l'incendio nel nocciolo del reattore della centrale nucleare di Windscale (1957), e l'esplosione di materiale radioattivo nel complesso nucleare sovietico di Mayak (Unione Sovietica, 1957; Wealer et al., 2021b, pag. 56).

Nonostante le diverse e talora controverse metodologie impiegate per valutare gli incidenti nucleari, tutti gli indicatori mostrano come non sia possibile escludere incidenti, anche con l'avvento di nuove generazioni di reattori. L'Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA) classifica gli eventi utilizzando la scala internazionale degli eventi nucleari (scala INES), che varia da 0 a 7². Tuttavia, la scala INES è stata oggetto di critiche per non essere stata in grado di includere tutti gli incidenti rilevanti e la mancanza di significatività statistica della scala di gravità degli eventi. Il disastro di Fukushima, ad esempio, corrisponderebbe a un livello di 10,6 sulla scala INES, superando il livello più alto pari a 7 (Wheatley et al., 2016, p. 98). Per affrontare queste limitazioni, un approccio alternativo potrebbe comportare l'adozione della Nuclear Accident Magnitude Scale of Radiation Release, che si riferisce all'entità della radioattività rilasciata e non impone un limite superiore (Smythe, 2011).

Tradurre gli incidenti e gli eventi in costi monetari aiuta a comprendere l'impatto complessivo e i rischi connessi. Pertanto, Wheatley et al. (2016) hanno rilevato che, mentre la frequenza degli incidenti gravi ha mostrato una tendenza mediamente decrescente a

¹ Per dettagli si veda Wealer et al., 2021b, sul quale si basa questo paragrafo.

² Scala INES: Livello 0: Deviazione dalla normalità, Livello 1: Anomalia, Livello 2: Incidente di processo, Livello 3: Incidente di processo grave, Livello 4: Incidente con conseguenze locali, Livello 5: Incidente con conseguenze più ampie del livello locale, Livello 6: Incidente grave, e Livello 7: Incidente molto grave. Si veda <https://www.iaea.org/resources/databases/international-nuclear-and-radiological-event-scale> (visualizzato il 16 Luglio 2024).

partire dagli anni '70, si sono verificati incidenti o inconvenienti gravi ogni decennio³.

Inoltre, si sono verificati incidenti su piccola scala che hanno causato danni fino a 20 milioni di dollari, con un valore atteso di tali eventi in aumento ogni anno. Statisticamente parlando, un incidente della portata del disastro di Fukushima si potrà verificare ogni 60-150 anni con una probabilità del 50%, mentre un incidente come quello di Three Mile Island si può verificare ogni 10-20 anni. È interessante notare che “il costo medio degli eventi all'anno si aggira intorno al costo della costruzione di un nuovo impianto” (Wheatley et al., 2016, p. 96).

Bassi tassi di utilizzo e l'incertezza sui tempi di interruzione della produzione di energia elettrica suggeriscono anche la possibilità di problemi sostanziali nel padroneggiare la tecnologia nucleare su larga scala. Il fattore di utilizzo del capitale aggregato di tutte le centrali nucleari dagli anni '70 è stato stimato pari al 66%; in altri termini, un terzo della capacità non è stata utilizzata per generare elettricità, in gran parte a causa di lunghi fermi impianto⁴.

Uno sguardo alla storia dell'energia nucleare commerciale rivela che le questioni legate alla sicurezza dei reattori erano largamente ignorate all'inizio dell'era nucleare. Così, da un lato, la Commissione per l'Energia Atomica degli Stati Uniti annunciò che l'energia nucleare sarebbe diventata “troppo economica per essere misurata” (The New York Times, 1954) in quella che sarebbe diventata una “economia del plutonio” (Seaborg, 1970). Ma d'altro canto, durante lo sviluppo dell'energia nucleare commerciale, sia il settore energetico sia quello assicurativo operavano partendo dal presupposto che la società si assumesse la responsabilità di questi rischi. Questo fatto vale ancora oggi: i rischi derivanti dall'energia nucleare non sono assicurabili e i gestori delle centrali nucleari si assumono solo una responsabilità simbolica⁵.

Nessuno degli operatori di centrali nucleari nel mondo è adeguatamente assicurato contro il rischio di incidenti (Käberger, 2019). Negli Stati Uniti, ad esempio, il Price-Anderson Act del 1957 esonera le aziende nucleari dall'obbligo di assicurarsi contro gli incidenti, obbligandole soltanto a pagare una piccola tassa. In Germania, tutti gli operatori delle centrali nucle-

ari hanno condiviso il rischio di potenziali incidenti, ma questo è stato limitato a 2,5 miliardi di euro, una somma molto modesta se paragonata ai potenziali costi degli incidenti.

3. L'energia nucleare non è economica

Le numerose precauzioni contro gli incidenti adottate dall'industria sono conseguenza dell'esperienza maturata attraverso gli incidenti (“trial and error”). L'affermazione che una fissione nucleare sia “sicura e controllata” implica misure tecniche estremamente complesse, che sono state identificate come i principali fattori di costo (insieme all'inesperienza, alla mancanza di competenza e di manodopera). L'energia nucleare è costosa, sia per un potenziale investitore che considera di investire capitale privato in un progetto di centrale nucleare, sia per la società in quanto tale che deve ancora affrontare gli effetti ambientali negativi che vanno dall'attività estrattiva agli incidenti, dovuti, oltre che a cause tecniche, anche al rischio terrorismo. La valutazione economica delle centrali nucleari non deve trascurare che la ragione per cui l'energia nucleare fu sviluppata su scala industriale negli anni '40 fu il suo utilizzo militare, i cui costi non avevano importanza (Groves, 1983; Lévêque, 2015). Sin dalla Seconda guerra mondiale, ci si aspettava che l'energia nucleare commerciale sarebbe diventata rapidamente economica nel decennio successivo (Ullmann, 1958; Pittman, 1961) e sarebbe diventata la principale fonte di energia per la generazione di elettricità (Seaborg, 1970; Weinberg, 1971; Rose, 1974). Nessuno degli oltre 600 reattori realizzati dal 1951 è stato costruito esclusivamente attraverso capitale privato e in un contesto di mercato competitivo (Bradford, 2012; Wealer et al., 2018).

Gli studi condotti dal MIT (2003, 2009, 2018) e dall'Università di Chicago (2004, 2011) concordano sul fatto che l'energia nucleare non era già competitiva rispetto al carbone e al gas naturale all'inizio del secolo, una valutazione che rimane valida oggi. Già Joskow (1982) ha documentato le difficoltà economiche dell'energia nucleare, un argomento successivamente ripreso da Grubler (2010) e da Escobar Rangel e Lévêque (2015). Altre valutazioni su larga scala includono i lavori di D'haeseleer (2013) e Linares e Conchado (2013). Davis (2012, p. 50) conclude che, nonostante siano trascorsi sette decenni di “fissione nucleare controllata”, manca ancora una giustificazione economica a favore dell'energia nucleare.

Un'analisi degli investimenti attuali e futuri nelle centrali nucleari definite di “terza generazione” rivela che queste non sono economicamente profittevoli, come dimostra questo esempio: l'investitore in una centrale nucleare di terza generazione da 1.600 MW, con

³ Si veda Spencer Wheatley, Benjamin K. Sovacool, Didier Sornette, Reassessing the safety of nuclear power, Energy Research & Social Science, Volume 15, 2016, Pages 96-100, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.026>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629615301067>)

⁴ Calcoli effettuati dagli autori utilizzando i dati del database PRIS dell'AIEA (<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>).

⁵ Le stime dei costi esterni totali dell'energia nucleare vanno da circa 0,01 US\$/kWh (Friedrich e Voss, 1993) a 0,34 US\$/kWh (Meyer, 2012).

un investimento iniziale di circa 10 miliardi di dollari USA, si troverebbe ad affrontare una perdita, ovvero un valore attuale netto negativo, nell'ordine dei 5-10 miliardi di dollari USA al 2018 (Wealer et al., 2021a). Questo è esattamente ciò che sta accadendo attualmente in tutti i siti di nuova costruzione che sopravvivono solo grazie a massicci sussidi, come il progetto Vogtle in Georgia (USA), i progetti Olkiluoto (Finlandia) e Flamanville (Francia) (Barkatullah e Ahmad, 2017, p. 133–134) e il progetto Hinkley Point C nel Regno Unito⁶.

Le analisi sui progetti di energia nucleare esportate in altri Paesi hanno rivelato che le difficoltà economiche della tecnologia nucleare cinese, coreana e russa sono comparabili (Ram et al., 2018).

Le ragioni principali di queste ingenti perdite sono gli elevati costi di costruzione, compresi i costi di capitale, i lunghi periodi di progetto e le entrate incerte e basse. Anche un prolungamento della durata di vita dei reattori a 60 anni non migliora significativamente i risultati. Inoltre, in questi calcoli non vengono presi in considerazione i costi aggiuntivi (smantellamento, stoccaggio a lungo termine dei rifiuti radioattivi) e i costi sociali degli incidenti. I costi medi netti attesi dell'elettricità valutati sulla vita utile delle opere di generazione dell'energia (levelized costs of electricity, LCOE) valutati secondo un'analisi statistica Monte Carlo su larga scala che comprende costi di investimento, durata di costruzione e prezzi dell'elettricità variabili, producono un valore atteso dell'elettricità nucleare di 160 dollari USA/MWh compreso in un intervallo di stima compreso tra 91 e 222 US\$/MWh (Wealer et al., 2021a), comparabile alla stima di Lazard (2023, p.9) pari a 180 US\$/MWh per investimenti che non godano di sussidi.

I calcoli attuali dei costi medi di produzione dell'elettricità negli USA confermano gli svantaggi strutturali dell'energia nucleare in termini di costi: mentre i costi delle fonti energetiche rinnovabili diminuiscono drasticamente, i costi dell'elettricità proveniente dall'energia nucleare continuano ad aumentare (Lazard, 2023). Non vengono presi in considerazione i costi di sistema delle rispettive tecnologie, ad esempio i costi di smantellamento, stoccaggio finale e assicurazione per le centrali nucleari e le opzioni di flessibilità nel caso delle energie rinnovabili. Tuttavia, tenuto conto della tendenza sopra descritta, non si prevede che le grandi centrali nucleari diventino competitive. Per le fonti rinnovabili eolica e solare (non sovvenzio-

nate), gli LCOE a livello di una singola unità di generazione sono ora rispettivamente intorno a 50 e 60 dollari USA/MWh (Lazard, 2023, p. 9). Analisi dettagliate condotte con risoluzione oraria in 145 regioni in tutto il mondo, concentrandosi su sistemi energetici completamente rinnovabili, hanno rivelato che l'LCOE su scala a livello di sistema, incorporando fattori come lo stoccaggio di elettricità, la riduzione e le perdite di rete, può raggiungere un massimo di due volte il LCOE delle singole unità di produzione (Ram et al., 2017; Bogdanov et al., 2019). Tuttavia, anche con questi costi aggiuntivi, il LCOE totale dell'unità di generazione rinnovabile, compresi i costi di sistema, ammonta a un massimo di circa 80 US\$/MWh, che è meno della metà del costo stimato dell'energia nucleare senza sussidi. Da notare che quest'ultimo non si adegua alla variabilità del carico, a differenza di un sistema di energia completamente rinnovabile con risoluzione oraria.

La prospettiva senza sussidi, in un'ottica di investimento privato adottata sopra, non considera un'ampia gamma di altri costi per la società. Seguendo la catena di produzione, questi includono costi esterni valutabili significativi, ad esempio, i costi sanitari, come l'incremento dei casi di cancro ai polmoni derivante dall'attività estrattiva dell'uranio (Jacobson, 2020), le malattie derivanti dalle emissioni del cantiere di costruzione e altri rischi per la salute derivanti dal normale funzionamento, dallo smantellamento e dallo smaltimento di scorie e residui di demolizione. Inoltre, l'adozione di una prospettiva intergenerazionale indica che i benefici limitati offerti dall'energia nucleare nel presente sono oscurati dagli oneri imposti alle generazioni future, che sosterebbero costi sostanziali per lo stoccaggio e lo smaltimento di scorie e residui di demolizione (Barron e Hill, 2019). Schulze et al. (1981) hanno presentato una prima motivazione per considerare il benessere delle generazioni future attraverso la scelta appropriata di un tasso di sconto sociale.

Considerato che l'utilizzo delle centrali nucleari non è economica, è necessario prendere in considerazione altri aspetti che ne giustifichino l'adozione. Tra gli altri ci sono i tentativi di mantenere l'energia nucleare civile come complemento alle attività militari (Cox et al., 2016).

4. Nemmeno estendendone la vita utile

Oltre due terzi dei 415 reattori in funzione nel 2021 hanno superato la soglia dei 30 anni di durata operativa (AIEA, 2022b). Dato che questi reattori nucleari sono stati originariamente progettati per un periodo operativo previsto di 30-40 anni, sorge la necessità di sostituirli con altre tecnologie, o con nuovi reattori o

⁶ In altri paesi come la Russia o la Cina, l'intera industria nucleare è di proprietà statale, per cui non sono disponibili dati affidabili sui costi o costi livellati, tanto meno confrontabili con i valori di mercato.

estendendone la durata utile. L'estensione della durata comporta costi elevati dovuti ai crescenti costi di manutenzione e agli investimenti e agli aggiornamenti necessari per la sicurezza. L'Agenzia internazionale dell'energia (IEA) (2019) ha richiesto che per prolungare la durata dei reattori esistenti si ricorra a sussidi. Un aspetto chiave è la valutazione da parte delle autorità di vigilanza di quali misure siano necessarie per portare il sistema allo "stato dell'arte" (INRAG et al., 2021). Ciò comporta ostacoli finanziari significativi. Ad esempio, in Francia, il paese con il parco di reattori più standardizzato al mondo, la Corte dei conti ha stimato che l'operatore EDF dovrà investire fino a 100 miliardi di euro entro il 2030 per prolungare la vita del suo parco reattori di ulteriori 10 anni, portandoli da 40 a 50 anni. Ciò rappresenta più di tre volte il valore di mercato azionario di EDF e una media di 1,7 miliardi di euro per reattore, o circa 1.500 euro/kW di investimento per l'estensione della vita utile, o circa 55 US\$/MWh per mantenerlo in funzione per altri 10 anni (Cour des Comptes, 2016). Nel complesso, l'IEA stima che il costo dell'elettricità per estensioni della vita utile di 10-20 anni sia compreso tra 40 e 55 dollari USA/MWh. Questo è più o meno equivalente al costo attuale dell'elettricità prodotta da fonti rinnovabili. Pertanto, non vi è alcun vantaggio economico ottenibile dall'estensione della durata rispetto all'espansione delle energie rinnovabili.

In definitiva, anche l'estensione della vita utile non garantisce la redditività dell'impianto alle condizioni attuali del mercato elettrico. I dati provenienti dagli Stati Uniti mostrano che gli impianti più vecchi hanno costi operativi e di manutenzione significativamente più elevati e necessitano di regolari iniezioni di capitale, e non sono in grado di reggere la concorrenza nelle aste del mercato elettrico (Bradford, 2013; vedere ad esempio Lovins, 2013, 2017; Schneider et al., 2019, pag. 238). Negli ultimi anni le società di servizi pubblici hanno perseguito attivamente leggi e contratti statali per fornire sostegno finanziario a reattori economicamente non sostenibili. Dei 23 reattori programmati per il pensionamento anticipato tra il 2009 e il 2025, 13 sono già stati chiusi, otto hanno subito una chiusura ritardata a causa di programmi di sussidi e il destino di due reattori al Diablo Canyon (California, USA) rimane incerto (Schneider et al., 2023).

5. L'espansione dell'energia nucleare non sarebbe abbastanza rapida per contribuire adeguatamente alla mitigazione dell'emergenza climatica

Anche nello scenario di sostegno finanziario pubblico per la costruzione di centrali nucleari economicamente non sostenibili, come accaduto in passato, i

lungi tempi necessari per un loro incremento non consentono di fornire un contributo significativo agli impegni di decarbonizzazione su larga scala. Il processo di pianificazione, progettazione e costruzione delle centrali nucleari è caratterizzato da una considerevole durata. Negli Stati Uniti, la durata media della costruzione di centrali nucleari a partire dagli anni '70 è stata di circa 9 anni (Kooimey e Hultman, 2007, p. 5634), mentre su scala globale è stata di 7,4 anni nel 2015 (Berthélemy e Escobar Rangel, 2015, pag. 125). A questo bisogna aggiungere il tempo necessario per le procedure di pianificazione e autorizzazione. Jacobson (2020) stima che il tempo complessivo necessario per la messa in esercizio delle centrali nucleari sia compreso tra 10 e 19 anni.

Considerando l'ultimo decennio (2012–2021), questa stima sembra addirittura molto ottimistica, poiché la durata media di costruzione da sola (senza pianificazione) è salita a 9,2 anni per 62 reattori completati, di cui 37 costruiti in Cina (Schneider et al., 2022). Considerando i pochi progetti in corso nell'OCSE, la durata media appare ancora più sfavorevole. Ad esempio, la costruzione di Olkiluoto-3 in Finlandia è durata 17 anni (2005-2022), mentre Flamanville-3 in Francia, è in costruzione dal 2007, e le procedure per la costruzione delle Unità 3 e 4 dell'impianto Vogtle negli Stati Uniti, avviate nel 2013, potrebbero richiedere un periodo di tempo ancora lungo per il completamento.

La portata e la criticità temporale delle sfide associate alla trasformazione socio-ecologica non incoraggiano la via dell'incremento della produzione di energia nucleare affinché possa svolgere un ruolo significativo nella decarbonizzazione della produzione di energia elettrica. Per raggiungere gli obiettivi delineati nel Percorso 3 del rapporto dell'IPCC (IPCC, 2018), che include un aumento previsto dell'energia nucleare del 98% entro il 2030 e del 501% entro il 2050, sarebbe necessario raddoppiare il parco nucleare esistente di circa 440 centrali elettriche entro i prossimi 10 anni e raggiungere un aumento di 6 volte entro i prossimi tre decenni (Wealer, 2020).

Anche se si trascura la lunga durata della costruzione, un altro motivo per cui l'energia nucleare non può essere ampliata in misura rilevante è la disintegrazione della catena di approvvigionamento. I tradizionali venditori di reattori Westinghouse e Framatome sono in difficoltà finanziarie e continuano a lottare per sopravvivere: Westinghouse è fallita nel 2017 e Framatome (allora Areva) è stata salvata dallo Stato francese con 4-5 miliardi di euro. Dal 2000, la Russia è il fornitore nucleare emergente (Drupady, 2019) e domina il mercato dei reattori con più accordi tecnologici rispetto agli altri quattro principali fornitori (Francia, Stati

Uniti, Cina, Corea) messi insieme (Jewell et al., 2019). Considerando l'imperativo geopolitico di limitare la produzione nucleare russa, unito allo stato di difficoltà dell'economia russa e alle sfide della Cina nell'assicurarsi i clienti, è improbabile che le iniziative nucleari di questi due Paesi possano avere successo (Thomas, 2018, 2019).

6. I piccoli reattori modulari e lo sviluppo di reattori non convenzionali richiedono decenni e hanno prospettive economiche peggiori

L'industria ha in corso lo sviluppo di nuove tipologie di reattori, che qui ora consideriamo nel contesto dell'emergenza climatica. Queste nuove tipologie includono i cosiddetti piccoli reattori modulari SMR ("Small Modular Reactors") con capacità relativamente bassa (<300 MWel) e progetti di reattori non convenzionali (ossia non raffreddati ad acqua leggera). Quest'ultima categoria comprende i primi stadi di sviluppo di tecnologie nucleari come i reattori veloci autofertilizzanti, i reattori a sali fusi e i reattori ad alta temperatura. Tuttavia, i reattori non convenzionali sono ancora a uno stadio iniziale di ricerca e sviluppo, compresi quelli promossi dalla "Generation IV International Forum" (GIF), ancora lontani diversi decenni dal potenziale sviluppo commerciale, sempre che diventino fattibili, ed è improbabile che raggiungano uno status competitivo nel prossimo futuro (Cochran et al., 2010; Lyman, 2021; Pistner et al., 2023; Bose et al., 2024). Una sintesi delle questioni in gioco è fornita da Wimmers et al. (2023).

Inoltre, osservando più da vicino i reattori proposti e studiati, si nota che sono solo in parte basati su concetti tecnologici fundamentalmente diversi (Locatelli et al., 2013; Pioro, 2023). Ad esempio, i reattori ad alta temperatura esistono da almeno mezzo secolo, il concetto di reattori autofertilizzanti veloci e di reattori al torio è noto già dagli anni '50 (Weinberg, 1959; Pittman, 1961; Rose, 1974). Quasi tutti i progetti ad alta temperatura o con autofertilizzazione rapida sono stati abbandonati a causa di problemi tecnologici o semplicemente perché antieconomici. Tuttavia, il portafoglio tecnologico dello scenario di riferimento della Commissione Europea fino al 2050 comprende anche le cosiddette tecnologie dei reattori di quarta generazione (CE, 2016, p. 41).

Le recenti esperienze con gli SMR suggeriscono che sviluppi commerciali competitivi sono improbabili nel medio termine. In precedenza, l'industria aveva cercato di costruire centrali nucleari con capacità sempre maggiori, per sfruttare potenziali economie di scala. Gli SMR seguono la strada opposta, essendo definiti dall'AIEA come "reattori avanzati che producono

energia elettrica fino a 300 MWel, progettati per essere costruiti in fabbrica e spediti ai fornitori di energia per essere installati in base alla domanda".⁷ Attualmente sono riposte notevoli speranze nello sviluppo di SMR come soluzione a lungo termine per l'energia nucleare (Lokhov et al., 2013; Locatelli et al., 2014; Sainati et al., 2015; NEA, 2016; Black et al., 2019). Inoltre, vengono pubblicizzati come più flessibili, ad esempio fornendo funzionalità aggiuntive come il teleriscaldamento. Anche alcune startup statunitensi, come NuScale o TerraPower supportate da Gates, stanno lavorando in questa direzione, (2021).

Tuttavia, tra gli 80 progetti SMR elencati dall'AIEA (AIEA, 2022a,b) solo quattro impianti pilota sono attualmente in costruzione o già operativi (uno in Russia, due in Cina e uno in Argentina) (Böse et al., 2024). Le stime dei futuri costi di produzione sono molto speculative; tuttavia, diverse analisi indicano che gli SMR saranno per qualche tempo più costosi delle attuali centrali nucleari su larga scala. Oltre ai costi variabili di funzionamento e manutenzione più elevati (Carelli et al., 2010; Cooper, 2014), le analisi attuali mostrano che i costi di capitale overnight sono tra il 6 e il 26% più alti rispetto al costo medio dell'attuale nucleare ad alta capacità. Alonso et al. (2016) stimano LCOE di 175 US\$/MWh, ancora superiori a quelli degli attuali reattori.

Si può considerare improbabile il fatto che le tecnologie non convenzionali e gli SMR raggiungano numeri significativi, poiché la loro potenziale espansione potrebbe essere limitata anche per altre cause, come l'ottenimento di licenze o i vincoli imposti dalla normativa nazionale, nonché di una base limitata di potenziali investitori (Böse et al., 2024). Lo stesso discorso vale per i reattori ad acqua leggera. Ricordiamo che durante i settant'anni di "grande" energia nucleare, gli effetti di "apprendimento", cioè la diminuzione dei costi unitari di capitale dovuti alla diffusione della tecnologia, non sono mai stati raggiunti. Al contrario, vi sono prove che suggeriscono una discontinuità nelle curve di apprendimento relative ai costi e ai tempi di costruzione (Portugal-Pereira et al., 2018), indicando che la standardizzazione e le sinergie tra Paesi non sono state sfruttate (Grubler, 2010; Rangel e Leveque, 2012). Alcune delle regioni più ambiziose, ad esempio il Medio Oriente o l'Asia, hanno poca esperienza con la normativa della sicurezza (Ramana et al., 2013; Yamashita, 2015). Inoltre, un gran numero di reattori con capacità ridotte implica rischi significativi di proliferazione del materiale fissile (Glaser et al., 2013; Lyman, 2013). Secondo un recente sondaggio condot-

⁷ IAEA (2016): "SMR - Nuclear Power." December 12, 2016. <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>.

to da Thomas e Ramana (2022), è emerso che anche i progetti di reattori basati su una tecnologia accuratamente testata non potranno essere implementati prima del 2030. Inoltre, il sondaggio suggerisce che progetti più radicali potrebbero potenzialmente non essere mai implementati.

7. L'energia nucleare è difficilmente compatibile con un sistema energetico basato sulle rinnovabili

L'approccio convenzionale alla generazione e alla fornitura di elettricità dall'energia nucleare è generalmente associato a un modello di generazione del carico di base. Tuttavia, in un sistema energetico che fa progressivamente affidamento su energie rinnovabili variabili, questo modello di generazione del carico di base viene sostituito da un modello altamente flessibile, basato sull'offerta, come mostrato da Hodge et al. (2020). Fattori tecnici ed economici impongono limitazioni alla flessibilità e ai tassi di incremento delle centrali nucleari, come riconosciuto dall'industria (OCSE/NEA, 2012, p. 46). Questi fattori comprendono restrizioni sulle operazioni di riciclaggio, come la necessità di mitigare i fenomeni di fatica dei materiali, nonché vincoli di esecuzione e considerazioni sui costi. L'impatto di queste limitazioni diventa più pronunciato quando si valutano interi parchi di reattori nucleari piuttosto che singole unità (Morris, 2018). Le centrali nucleari tipicamente generano elettricità nello spettro del carico di base con vincoli di funzionamento obbligatorio (must-run)⁸ che per soddisfare le richieste di carico di punta deve essere supportato con unità di generazione operative flessibili come turbine a gas, centrali elettriche a carbone, ma anche elettricità rinnovabile disacciabile, in particolare dall'idroelettrico, e stoccaggio, come lo stoccaggio di energia idroelettrica tramite pompaggio.

Sebbene i progetti di reattori più recenti possiedano tecnicamente migliori capacità per le operazioni a domanda variabile (Cany et al., 2018; Jenkins et al., 2018), le centrali esistenti sono generalmente utilizzate come centrali elettriche a carico di base continuo per considerazioni economiche, tecniche e di sicurezza. Tuttavia, ottenere un'energia nucleare flessibile, come proposto da Duan et al. (2022), richiede l'integrazione dello stoccaggio di energia termica e di tre o quattro volte la capacità della turbina a vapore di una centrale nucleare di carico di base convenziona-

le, ipotizzando una riduzione delle ore a pieno carico da 8.000 a 2.000 all'anno per la fornitura di energia elettrica flessibile. Ciò si traduce in un peggioramento economico per le nuove centrali nucleari a causa dell'aumento dei costi di capitale associati allo stoccaggio dell'energia termica e alla maggiore capacità delle turbine a vapore. Inoltre, la flessibilità fornita dallo stoccaggio dell'energia termica è limitata a pochi giorni, limitandone l'efficacia nel soddisfare i requisiti di bilanciamento stagionale. Al contrario, gli impianti idroelettrici con stoccaggio in serbatoi, gli impianti di bioenergia e lo stoccaggio stagionale basato sull'elettricità rinnovabile con idrogeno verde o metano da fonti rinnovabili (e-metano o elettrometano) offrono il potenziale per soddisfare le fluttuazioni della domanda stagionale in modo più efficace, come evidenziato da Bogdanov et al. (2019).

I sistemi energetici altamente rinnovabili comprendono l'intero sistema energetico, ovvero energia elettrica, calore, trasporti e industria (Breyer et al., 2022b) e la sinergia tra questi settori consente ulteriore flessibilità e quindi efficienza del sistema energetico ed efficacia in termini di costi (Breyer et al., 2022a). Il valore potenziale dell'energia nucleare flessibile sarà ridotto dalle opzioni di flessibilità emergenti come la ricarica intelligente dei veicoli elettrici e i concetti Vehicle-to-Grid (Uddin et al., 2018; Yao et al., 2022) che offrono flessibilità anche su base settimanale a un costo notevolmente inferiore (Child et al., 2018b; Taljegard et al., 2019). Secondo alcuni autori la fornitura continua di carico di base fornita dall'energia nucleare è una peculiarità significativa (Sepulveda et al., 2018). Tuttavia, è importante notare che una fornitura così continua di carico di base non è essenziale. Le fonti variabili di energia rinnovabile devono soddisfare un profilo di carico diversificato (Toktarova et al., 2019), ma il solare fotovoltaico e l'energia eolica, in combinazione con soluzioni di stoccaggio a breve termine e stagionale, possono comunque fornire un profilo di generazione simile al carico di base a un costo inferiore rispetto a quella resa da nuovi impianti nucleari (Fasihi e Breyer, 2020; Lazard, 2021).

Le questioni di compatibilità tra l'energia nucleare e le fonti energetiche rinnovabili variabili, in particolare il solare fotovoltaico e l'energia eolica, pongono ulteriori sfide, considerando la prevista predominanza di queste energie rinnovabili nella fornitura di energia elettrica (Bogdanov et al., 2019; IEA, 2021). Queste sfide derivano dalla convergenza dei profili di generazione, che rende difficile integrare e coordinare il funzionamento dell'energia nucleare accanto a quella solare ed eolica. Lo spettro di generazione cumulativa di elettricità da varie unità di energia rinnovabile copre tutte le aree del profilo di carico, dal carico di base alla fornitura

⁸ Il livello obbligatorio della flotta tedesca, considerata la più flessibile al mondo, è pari al 20-50% per i reattori ad acqua pressurizzata (PWR) e al 60% per i reattori ad acqua pressurizzata (BWR) (Grünwald e Caviezel, 2017, pag. 11).

di carico di punta e all'elettricità in eccesso (Verbruggen e Yurchenko, 2017). In un sistema energetico che dipenda prevalentemente dalle centrali nucleari, le fonti di energia rinnovabile potrebbero teoricamente fornire l'alimentazione di picco se combinate con sistemi di stoccaggio e sistemi flessibili. In uno scenario del genere, però, le rinnovabili non riuscirebbero a realizzare appieno il proprio potenziale economico e di efficienza di sistema. Ciò comporterebbe anche un aumento della domanda di capacità di stoccaggio nelle ore di basso consumo energetico (Verbruggen e Yurchenko, 2017), complicando ulteriormente l'integrazione tra le diverse fonti energetiche. Dare la priorità alle energie rinnovabili all'interno del sistema energetico comporterebbe l'eliminazione virtuale della domanda di generazione del carico di base (Hirth et al., 2015; Bogdanov et al., 2019; Child et al., 2019; Breyer et al., 2022a, Fig. 16). Integrare le centrali nucleari in un tale sistema sarebbe impegnativo, poiché richiederebbe sostanziali inconvenienti economici e modifiche tecniche per adattarne il funzionamento. Infatti, i sistemi energetici basati principalmente su energie rinnovabili variabili sono orientate a sistemi che garantiscano flessibilità, come le energie rinnovabili dispacciabili, la sinergia tra settori energivori diversi, l'interconnessione tra reti elettriche e la risposta alla domanda variabile (ad esempio, ricarica di veicoli elettrici, pompe di calore ed elettrolizzatori per la produzione di carburanti e prodotti chimici) (Brown et al., 2018; Child et al., 2018a; Bogdanov et al., 2021; Breyer et al., 2022b).

La tendenza verso un maggiore utilizzo dell'energia nucleare richiede un esame del suo contesto storico e delle sue implicazioni per i processi di trasformazione socio-ecologica (Geels et al., 2016; Cherp et al., 2017). Inoltre, l'espansione e la perpetuazione delle tecnologie di generazione del carico di base ostacolano la transizione verso un sistema energetico altamente flessibile e rinnovabile al 100%, creando un quadro a doppio sistema (fossile-nucleare e rinnovabili), che rafforza l'effetto "lock-in" associato alla logica di generazione del carico di base (REN21, 2017, p. 158 ss.). Inoltre, emergono aspetti finanziari contrastanti. Sia il proseguimento che l'espansione della produzione di energia nucleare, come anche la transizione verso un sistema di energia rinnovabile al 100%, necessitano di finanziamenti statali e sussidi pubblici per la ricerca, lo sviluppo e la conversione del sistema. Ciò può generare competizione per l'accesso ai finanziamenti destinati ai due percorsi, invece di favorire il sostegno reciproco.

8. Le sfide nel contesto dei cambiamenti climatici e dei conflitti armati

Sebbene l'energia nucleare sia spesso pubblicizzata come una potenziale soluzione per mitigare il cambiamento climatico, sta emergendo la preoccupazione

che l'energia nucleare sia particolarmente sfavorevole in un futuro con temperature più elevate e maggiori minacce militari. In un mondo in via di riscaldamento, in cui i reattori sono esposti a crisi idriche con potate di magra dei fiumi o con il riscaldamento dei mari, la perdita di acqua di raffreddamento porta a riduzioni della produzione o addirittura a fermi di produzione (Averyt et al., 2011), mentre questo rischio è trascurabile nel caso di sistemi di energia elettrica rinnovabile (Lohrmann et al., 2019). Altre questioni legate al cambiamento climatico sono l'innalzamento del livello del mare, l'erosione delle coste e condizioni meteorologiche estreme come tempeste costiere o inondazioni. Tutte questioni che sollevano gravi preoccupazioni in termini di sicurezza, soprattutto per i reattori ubicati sulle coste, considerando che nel mondo un quarto dei reattori nucleari è situato in zone costiere (Kopytko e Perkins, 2011). Tsunami e inondazioni, come ha dimostrato l'incidente di Fukushima, possono essere catastrofiche per una centrale nucleare, perché possono mettere fuori uso i propri sistemi elettrici, disabilitarne i meccanismi di raffreddamento, portare al surriscaldamento e alla possibile fusione. Inondazioni sono sempre più frequenti lungo la costa degli Stati Uniti, specialmente in molte località lungo la costa orientale e quella del Golfo, dove sono situati numerosi reattori. Anche dopo lo spegnimento dei reattori, negli USA i rifiuti ad alto livello radioattivo sotto forma di combustibile esaurito sono ancora immagazzinati presso il sito di produzione e soggetti ai rischi derivanti dall'innalzamento del livello del mare (Jenkins et al., 2020).

Altre minacce sono la proliferazione nucleare, il sabotaggio, gli attacchi terroristici e i conflitti armati come la guerra Russo-Ucraina (Schneider et al., 2022, cap. "Energia nucleare e guerra"). Il rischio di proliferazione nucleare è fortemente connesso all'energia nucleare, sia verticalmente con gli Stati dotati di armi nucleari (ad esempio, USA, Regno Unito, Francia, Russia, Cina) che accumulano maggiori scorte e costruiscono nuove armi nucleari (Sorge e Neumann, 2021), sia orizzontalmente verso nuovi Paesi come, ad esempio, l'Iran e l'Arabia Saudita.⁹

Sebbene vi siano prove che "il legame tra i programmi di energia nucleare e la proliferazione sia sopravvalutato" (Miller, 2017), il rischio di proliferazione di armi nucleari è comunque possibile (Schneider e Ramana, 2023). Inoltre, senza soluzioni adeguate e sicure

⁹ Anche se ci sono stati senza propri programmi di armi nucleari che gestiscono o pianificano di gestire centrali nucleari per ragioni di indipendenza (Mazzucchi, 2022) (ad esempio, Giappone, Belgio, Finlandia, Brasile e altri), il rischio di proliferazione in questi casi rimane possibile (Schneider e Ramana, 2023).

re per lo smaltimento, il materiale nucleare è ancora immagazzinato in loco o in strutture centralizzate e quindi esposte ad azioni di gruppi terroristici che vogliono impossessarsene. Bunn et al. (2016) riferiscono di alcuni casi in cui sono state sottratte quantità dell'ordine di chilogrammi di plutonio o di uranio altamente arricchito. Inoltre, i gruppi terroristici (tra cui Al Qaeda) potrebbero intraprendere seri sforzi per ottenere armi nucleari (Futter, 2021). Infine, la maggior parte del combustibile esaurito è ancora immagazzinato in serbatoi pieni di acqua, ad esempio, l'81% di tutto il combustibile europeo si trova in vasche riempite di acqua (Besnard et al., 2019), spesso non protette da strutture di contenimento, il che le rende altamente vulnerabili agli attacchi terroristici (Gronlund et al., 2007).

10. Conclusioni

Nel contesto dell'emergenza climatica è in corso un intenso dibattito sul potenziale dell'energia nucleare nel contribuire alla decarbonizzazione dei sistemi energetici. In questo articolo abbiamo sviluppato e valutato sette argomenti per cui riteniamo che l'energia nucleare sia inappropriata nel contrasto al cambiamento climatico.

L'argomento principale è di natura tecnica, ovvero l'incapacità di evitare gli incidenti e i rischi ad essi connessi. I considerevoli costi associati all'implementazione di misure per prevenire fusioni del nucleo, fughe radioattive e altri incidenti sono la causa principale delle elevate spese legate all'utilizzo commerciale dell'energia nucleare. Di conseguenza, l'alta intensità di costi, unita a considerazioni sulla sicurezza, implica che l'energia nucleare non sia una fonte di energia sostenibile e conveniente per la transizione energetica verso sistemi a basse emissioni di carbonio. In realtà, questo è anche il motivo per cui l'energia nucleare non è stata in grado di raggiungere la competitività con altre fonti energetiche, e nemmeno gli interventi per estendere la vita utile delle centrali esistenti si sono rivelate economicamente convenienti.

L'energia nucleare è caratterizzata da tempi di costruzione molto lunghi, e tempi ancora maggiori sono prevedibili per lo sviluppo di sistemi nucleari innovativi, la cui realizzazione appare troppo lontana e incerta per contribuire in tempi brevi alla mitigazione del cambiamento climatico.

Dal punto di vista del sistema energetico, il nucleare non è compatibile con un sistema basato sulle rinnovabili, ma anzi ne ostacola l'espansione.

Ultimo ma non meno importante, l'energia nucleare è particolarmente sfavorevole in un futuro caratterizzato da temperature più elevate, condizioni meteorologiche estreme e maggiori minacce militari. Oltre

a queste motivazioni, la ricerca futura dovrebbe esplorare la relazione tra l'energia nucleare e i processi di trasformazione energetica in termini più generali. Le considerazioni qui presentate suggeriscono di considerare anche altre ragioni (ad esempio, la sovranità energetica) per cui alcuni Paesi stanno ancora perseguendo l'energia nucleare, citando regolarmente il clima come motivazione principale.

Riferimenti Bibliografici

- Aghahosseini, A., Solomon, A. A., Breyer, C., Pregger, T., Simon, S., Strachan, P., et al. (2023). Energy system transition pathways to meet the global electricity demand for ambitious climate targets and cost competitiveness. *Appl. Energy* 331:120401. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120401
- Alonso, G., Bilbao, S., and del Valle, E. (2016). Economic competitiveness of small modular reactors versus coal and combined cycle plants. *Energy* 116, 867–879. doi: 10.1016/j.energy.2016.10.030
- Averyt, K., Fisher, J., Huber-Lee, A., Lewis, J., Macknick, J., Madden, N., et al. (2011). *Freshwater Use by U.S. Power Plants: Electricity's Thirst for a Precious Resource*. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/attach/2014/08/ew3-freshwater-use-by-us-power-plants.pdf>
- Barkatullah, N., and Ahmad, A. (2017). Current status and emerging trends in financing nuclear power projects. *Energy Strat. Rev.* 18, 127–140. doi: 10.1016/j.esr.2017.09.015
- Barron, R. W., and Hill, M. C. (2019). A wedge or a weight? Critically examining nuclear power's viability as a low carbon energy source from an intergenerational perspective. *Energy Res. Soc. Sci.* 50, 7–17. doi: 10.1016/j.erss.2018.10.012
- Berthélemy, M., and Escobar Rangel, L. (2015). Nuclear reactors' construction costs: the role of lead-time, standardization and technological progress. *Energy Policy* 82, 118–130. doi: 10.1016/j.enpol.2015.03.015
- Besnard, M., Buser, M., Fairlie, I., MacKerron, G., Macfarlane, A., Matyas, E., et al. (2019). *The World Nuclear Waste Report*. Berlin; Brussels: Focus Europe. <https://worldnuclearwastereport.org/>
- Black, G. A., Aydogan, F., and Koerner, C. L. (2019). Economic viability of light water small modular nuclear reactors: general methodology and vendor data. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 103, 248–258. doi: 10.1016/j.rser.2018.12.041
- Bogdanov, D., Farfan, J., Sadovskaia, K., Aghahosseini, A., Child, M., Gulagi, A., et al. (2019). Radical transformation pathway towards sustainable electricity

- via evolutionary steps. *Nat. Commun.* 10:1077. doi: 10.1038/s41467-019-08855-1
- Bogdanov, D., Gulagi, A., Fasihi, M., and Breyer, C. (2021). Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: Integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination. *Appl. Energy* 283:116273. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116273
 - Böse, F., Wimmers, A., Steigerwald, B., and von Hirschhausen, C. (2024). Questioning nuclear scale-up propositions: availability and economic prospects of light water, small modular and advanced reactor technologies. *Energy Res. Soc. Sci.* 1, 103448. doi: 10.1016/j.erss.2024.103448
 - BP (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*. London. Available online at: www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf
 - Bradford, P. (2012). The nuclear landscape. *Nature* 483, 151–152. doi: 10.1038/483151a
 - Bradford, P. (2013). How to close the US nuclear industry: do nothing. *Bull. Atom. Sci.* 69, 12–21. doi: 10.1177/0096340213477996
 - Breyer, C., Bogdanov, D., Ram, M., Khalili, S., Vartiainen, E., Moser, D., et al. (2022a). Reflecting the energy transition from a European perspective and in the global context—Relevance of solar photovoltaics benchmarking two ambitious scenarios. *Progr. Photovolt.* 31, 1369–1395. doi: 10.1002/pip.3659
 - Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., et al. (2022b). On the history and future of 100% renewable energy systems research. *IEEE Access* 10, 78176–78218. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193402
 - Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., and Greiner, M. (2018). Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost- optimised, highly renewable European energy system. *Energy* 160, 720–739. doi: 10.1016/j.energy.2018.06.222
 - Bunn, M., Malin, M. B., Roth, N., and Tobey, W. H. (2016). *Preventing Nuclear Terrorism. Continuous Improvement or Dangerous Decline?* Cambridge: Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School. <https://www.belfercenter.org/publication/preventing-nuclear-terrorism-continuous-improvement-or-dangerous-decline>
 - Cany, C., Mansilla, C., Mathonnière, G., and da Costa, P. (2018). Nuclear power supply: going against the misconceptions. Evidence of nuclear flexibility from the French experience. *Energy* 151, 289–296. doi: 10.1016/j.energy.2018.03.064
 - Carelli, M. D., Garrone, P., Locatelli, G., Mancini, M., Mycoff, C., Trucco, P., et al. (2010). Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors. *Progr. Nucl. Energy* 52, 403–414. doi: 10.1016/j.pnucene.2009.09.003
 - Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Suzuki, M., and Antal, M. (2017). Comparing electricity transitions: a historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan. *Energy Policy* 101, 612–628. doi: 10.1016/j.enpol.2016.10.044
 - Child, M., Kemfert, C., Bogdanov, D., and Breyer, C. (2019). Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renew. Energy* 139, 80–101. doi: 10.1016/j.renene.2019.02.077
 - Child, M., Koskinen, O., Linnanen, L., and Breyer, C. (2018a). Sustainability guardrails for energy scenarios of the global energy transition. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91, 321–334. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.079
 - Child, M., Nordling, A., and Breyer, C. (2018b). The impacts of high V2G participation in a 100% renewable Ål and energy system. *Energies* 11:2206. doi: 10.3390/en11092206
 - Cochran, T. B., Feiveson, H. A., Mian, Z., Ramana, M. V., Schneider, M., and von Hippel, F. N. (2010). It's time to give up on breeder reactors. *Bull. Atom. Sci.* 66, 50–56. doi: 10.2968/066003007
 - Cooper, M. (2014). Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States. *Energy Res. Soc. Sci.* 3, 161–177. doi: 10.1016/j.erss.2014.07.014
 - Cour des Comptes (2016). *La maintenance des centrales nucléaires: une politique remise à niveau, des incertitudes à lever*. Paris: Cour des Comptes.
 - Cox, E., Johnstone, P., and Stirling, A. (2016). Understanding the Intensity of UK Policy Commitments to Nuclear Power. SWPS 2016 - 16. https://sussex.figshare.com/articles/report/Understanding_the_intensity_of_UK_policy_commitments_to_nuclear_power_the_role_of_perceived_imperatives_to_maintain_military_nuclear_submarine_capabilities/23434295
 - Davis, L. W. (2012). Prospects for nuclear power. *J. Econ. Perspect.* 26, 49–66. doi: 10.1257/jep.26.1.49
 - D'haeseleer, W. D. (2013). *Synthesis on the Economics of Nuclear Energy – Study for the European Commission, DG Energy*. Leuven: KU Leuven. Available at: https://www.mech.kuleuven.be/en/tme/research/energy_environment/Pdf/wpen2013-14.pdf
 - Downer, J., and Ramana, M. V. (2021). Empires built on sand: on the fundamental implausibility of reactor safety assessments and the implications for nuclear regulation. *Regul. Govern.* 15, 1304–1325. doi: 10.1111/rego.12300
 - Drupady, I. M. (2019). Emerging nuclear vendors in the newcomer export market: strategic considerations. *J. World Energy Law Bus.* 12, 4–20. doi: 10.1093/jwelb/jwy033

- Duan, L., Petroski, R., Wood, L., and Caldeira, K. (2022). Stylized least-cost analysis of flexible nuclear power in deeply decarbonized electricity systems considering wind and solar resources worldwide. *Nat Energy*, 7, 260–269. doi: 10.1038/s41560-022-00979-x
- EC (2016). EU Reference Scenario 2016: Energy, Transport and GHG Emissions – Trends to 2050. Brussels: European Commission. Available online at: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/full_referencescenario2016report_en.pdf
- Escobar Rangel, L., and Lévêque, F. (2015). Revisiting the cost escalation curse of nuclear power: new lessons from the french experience. *Econ. Energy Environ. Policy* 4, 103–126. doi: 10.5547/2160-5890.4.1.Iran
- Fasihi, M., and Breyer, C. (2020). Baseload electricity and hydrogen supply based on hybrid PV-wind power plants. *J. Clean. Prod.* 243:118466. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118466
- Friedrich, R., and Voss, A. (1993). External costs of electricity generation. *Energy Policy* 21, 114–122. doi: 10.1016/0301-4215(93)90133-Z
- Futter, A. (2021). *The Politics of Nuclear Weapons: New, Updated and Completely Revised*. Cham: Springer International Publishing.
- Gates, B. (2021). *How to Avoid a Climate Disaster - The Solutions We Have and the Breakthroughs We Need*. New York, NY: Alfred A. Knopf.
- Geels, F. W., Kern, F., Fuchs, G., Hinderer, N., Kungl, G., Mylan, J., et al. (2016). The enactment of socio-technical transition pathways: a reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990–2014). *Res. Policy* 45, 896–913. doi: 10.1016/j.respol.2016.01.015
- Glaser, A., Hopkins, L. B., and Ramana, M. V. (2013). Resource requirements and proliferation risks associated with small modular reactors. *Nucl. Technol.* 184, 121–129. doi: 10.13182/NT13-A19873
- Gronlund, L., Lochbaum, D., and Lyman, E. (2007). *Nuclear Power in Warming World: Assessing the Risks, Addressing the Challenges*. Cambridge: Union of Concerned Scientists. Available online at: <https://www.ucsusa.org/resources/nuclear-power-warming-world>
- Groves, L. M. (1983). *Now It Can Be Told: The Story of the Manhattan Project*. New York, NY: Da Capo Press.
- Grubler, A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: a case of negative learning by doing. *Energy Policy* 38, 5174–5188. doi: 10.1016/j.enpol.2010.05.003
- Grünwald, R., and Caviezel, C. (2017). *Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke: Monitoring*. Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.
- Haywood, L., Leroutier, M., and Pietzcker, R. (2023). Why investing in new nuclear plants is bad for the climate. *Joule* 7, 1675–1678. doi: 10.1016/j.joule.2023.07.006
- Hirth, L., Ueckerdt, F., and Edenhofer, O. (2015). Integration costs revisited – an economic framework for wind and solar variability. *Renew. Energy* 74, 925–939. doi: 10.1016/j.renene.2014.08.065
- Hodge, B. S., Jain, H., Brancucci, C., Seo, G., Korpås, M., Kiviluoma, J., et al. (2020). Addressing technical challenges in 100% variable inverter-based renewable energy power systems. *WIREs Energy Environ.* 9:e376. doi: 10.1002/wene.376
- IAEA (2020). *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*. Vienna.
- IAEA (2022a). *Advances in Small Modular Reactor Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. Vienna: International Atomic Energy Agency. Available online at: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
- IAEA (2022b). *Nuclear Power Reactors in the World*. Vienna: International Atomic Energy Agency. Available online at: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
- IEA (2019). *Nuclear Power in a Clean Energy System*. Paris: International Energy Agency. Available online at: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>
- IEA (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- INRAG, Arnold, N., Becker, O., Dorfman, P., Englert, M., Frieß, F., et al. (2021). *Risiken von Laufzeitverlängerungen alter Atomkraftwerke*. Vienna: INRAG. https://www.nuclearfree.eu/wp-content/uploads/2021/04/INRAG_Risiken_von_Laufzeitverlaengerungen_alter_Atomkraftwerke_Langfassung.pdf.
- IPCC (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. New York, NY: IPCC. Available online at: <https://www.ipcc.ch/sr15/download/>
- IPCC (2022). “Summary for Policymakers,” in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama (Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press), 3–33. doi: 10.1017/9781009325844.001

- Jacobson, M. Z. (2020). “Evaluation of nuclear power as a proposed solution to global warming, air pollution, and energy security,” in *100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Jenkins, L. M., Alvarez, R., and Jordaan, S. M. (2020). Unmanaged climate risks to spent fuel from U.S. nuclear power plants: the case of sea-level rise. *Energy Policy* 137:111106. doi: 10.1016/j.enpol.2019.111106
- Jenkins, L. M., Zhou, Z., Ponciroli, R., Vilim, R. B., Ganda, F., de Sisternes, F., et al. (2018). The benefits of nuclear flexibility in power system operations with renewable energy. *Appl. Energy* 222, 872–884. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.002
- Jewell, J., Vetier, M., and Garcia-Cabrera, D. (2019). The international technological nuclear cooperation landscape: a new dataset and network analysis. *Energy Policy* 128, 838–852. doi: 10.1016/j.enpol.2018.12.024
- Joskow, P. L. (1982). “Problems and prospects for nuclear energy in the United States,” in *Energy Planning, Policy and Economy*, ed. P. L. aneke (Washington, DC: Heath and Co), 231–245.
- Kåberger, T. (2019). “Economic management of future nuclear accidents,” in *The Technological and Economic Future of Nuclear Power*, eds R. Haas, L. Mez, and A. Ajanovic (Wiesbaden: Springer VS), 211–220.
- Koomey, J., and Hultman, N. E. (2007). A reactor-level analysis of busbar costs for US nuclear plants, 1970–2005. *Energy Policy* 35, 5630–5642. doi: 10.1016/j.enpol.2007.06.005
- Kopytko, N., and Perkins, J. (2011). Climate change, nuclear power, and the adaptation–mitigation dilemma. *Energy Policy* 39, 318–333. doi: 10.1016/j.enpol.2010.09.046
- Lazard (2021). *Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis*. New York, NY. <https://www.lazard.com/media/sptlfats/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>
- Lazard (2023). *Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis*. Available online at: <https://www.lazard.com/media/2ozoovyg/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>
- Lévêque, F. (2015). *The Economics and Uncertainties of Nuclear Power*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Linares, P., and Conchado, A. (2013). The economics of new nuclear power plants in liberalized electricity markets. *Energy Econ.* 40, S119–S125. doi: 10.1016/j.eneco.2013.09.007
- Locatelli, G., Bingham, C., and Mancini, M. (2014). Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progr. Nucl. Energy* 73, 75–85. doi: 10.1016/j.pnucene.2014.01.010
- Locatelli, G., Mancini, M., and Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: current status and future prospects. *Energy Policy* 61, 1503–1520. doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.101
- Lohrmann, A., Farfan, J., Caldera, U., Lohrmann, C., and Breyer, C. (2019). Global scenarios for significant water use reduction in thermal power plants based on cooling water demand estimation using satellite imagery. *Nat. Energy* 4, 1040–1048. doi: 10.1038/s41560-019-0501-4
- Lokhov, A., Cameron, R., and Sozoniuk, V. (2013). OECD/NEA study on the economics and market of small reactors. *Nucl. Eng. Technol.* 45, 701–706. doi: 10.5516/NET.02.2013.517
- Lovins, A. B. (2013). The economics of a US civilian nuclear phase-out. *Bull. Atom.Sci.* 69, 44–65. doi: 10.1177/0096340213478000
- Lovins, A. B. (2017). Do coal and nuclear generation deserve above-market prices? *Electricity J.* 30, 22–30. doi: 10.1016/j.tej.2017.06.002
- Lyman, E. (2013). *Small Isn’t Always Beautiful Safety, Security, and Cost Concerns about Small Modular Reactors*. Cambridge: Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2019-10/small-isnt-always-beautiful.pdf>
- Lyman, E. (2021). “Advanced” isn’t Always Better: Assessing the Safety, Security, and Environmental Impacts of Non-Light-Water Nuclear Reactors. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists. doi: 10.47923/2021.14000
- Markard, J., Bento, N., Kittner, N., and Nuñez-Jimenez, A. (2020). Destined for decline? Examining nuclear energy from a technological innovation systems perspective. *Energy Res. Soc. Sci.* 67:101512. doi: 10.1016/j.erss.2020.101512
- Mazzucchi, N. (2022). Nuclear power can help the democratic world achieve energy independence. *Nature* 606, 841–841. doi: 10.1038/d41586-022-01733-9
- Meyer, B. (2012). *Externe Kosten der Atomenergie und Reformvorschläge zum Atomhaftungsrecht – Dokumentation von Annahmen, Methoden und Ergebnissen*. Berlin. https://foes.de/pdf/2012-09-Externe_Kosten_Atomenergie.pdf
- Miller, N. L. (2017). Why nuclear energy programs rarely lead to proliferation. *Int.Secur.* 42, 40–77. doi: 10.1162/ISEC_a_00293
- MIT (2003). *The Future of Nuclear Power*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology. <https://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-full.pdf>
- MIT (2009). *Update of MIT 2003 Future of Nuclear Power*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology. <https://web.mit.edu/nuclearpower/>
- MIT (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

- <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf>
- Morris, C. (2018). Can Reactors React? Is a Decarbonized Electricity System With a Mix of Fluctuating Renewables and Nuclear Reasonable? IASS Discussion Paper. <https://www.rifs-potsdam.de/en/output/publications/2018/can-reactors-react-decarbonized-electricity-system-mix-fluctuating>
 - NEA (2016). Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development/ Nuclear Energy Agency. Available online at: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14924
 - OECD and NEA (2020). Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders. OECD & Nuclear Energy Agency. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14924
 - OECD/NEA (2012). The Economics of Long-term Operation of Nuclear Power Plants. Paris: OECD. doi: 10.1787/9789264992054-en
 - Pioro, L. (ed.). (2023). Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. Woodhead Publishing.
 - Pistner, C., Englert, M., von Hirschhausen, C., Böse, F., Steigerwald, B., and Gast, L. (2023). Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens für sogenannte neuartige Reaktorkonzepte. Berlin: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2023032937041>
 - Pittman, F. K. (1961). Nuclear power development in the United States. *Science* 133, 1566–1572. doi: 10.1126/science.133.3464.1566
 - Portugal-Pereira, J., Ferreira, P., Cunha, J., Szklo, A., Schaeffer, R., and Araújo, M. (2018). Better late than never, but never late is better: risk assessment of nuclear power construction projects. *Energy Policy* 120, 158–166. doi: 10.1016/j.enpol.2018.05.041
 - Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Oyewo, S., Gulagi, A., Child, M., et al. (2017). Global Energy System Based on 100% Renewable Energy - Power Sector. Lappeenranta; Finland and Berlin: Lappeenranta University of Technology (LUT) and Energy Watch Group. https://ccsi.columbia.edu/sites/default/files/content/docs/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf
 - Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A., and Breyer, C. (2018). A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030. *J. Clean. Prod.* 199, 687–704. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.159
 - Ramana, M. V., Hopkins, L. B., and Glaser, A. (2013). Licensing small modular reactors. *Energy* 61, 555–564. doi: 10.1016/j.energy.2013.09.010
 - Rangel, L., and Leveque, F. (2012). Revisiting the Cost Escalation Curse of Nuclear Power: New Lessons from the French Experience. https://minesparis-psl.hal.science/file/index/docid/780566/filename/13WP_12-ME-08.pdf
 - REN21 (2017). Renewables 2017. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st century. <https://ren21.net/gsr-2017/>
 - Rose, D. J. (1974). Nuclear eclectic power. *Science* 184, 351–359. doi: 10.1126/science.184.4134.351
 - Sainati, T., Locatelli, G., and Brookes, N. (2015). Small modular reactors: licensing constraints and the way forward. *Energy* 82, 1092–1095. doi: 10.1016/j.energy.2014.12.079
 - Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Katsuta, T., Lovins, A. B., Ramana, M. V., et al. (2019). World Nuclear Industry Status Report 2019. Paris: Mycle Schneider Consulting. <https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2019-HTML.html>
 - Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., von Hirschhausen, C., Ramana, M. V., Wimmers, A. J., et al. (2022). World Nuclear Industry Status Report 2022. Paris: Mycle Schneider Consulting. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-hr.pdf>
 - Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., von Hirschhausen, C., Ramana, M. V., Wimmers, A. J., et al. (2023). World Nuclear Industry Status Report 2023. Paris: Mycle Schneider Consulting. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2023-v5.pdf>
 - Schneider, M., and Ramana, M. V. (2023). Nuclear energy and the non-proliferation treaty: a retrospective examination. *J. Peace Nucl. Disarm.* 6, 165–174. doi: 10.1080/25751654.2023.2205572
 - Schulze, W. D., Brookshire, D. S., and Sandler, T. (1981). The social rate of discount for nuclear waste storage: economics or ethics? *Nat. Resour. J.* 21, 811–832. <https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2065&context=nrj>
 - Seaborg, G. T. (1970). The Plutonium Economy of the Future. <http://fissilematerials.org/library/aec70.pdf>
 - Sepulveda, N. A., Jenkins, J. D., de Sisternes, F. J., and Lester, R. K. (2018). The role of firm low-carbon electricity resources in deep decarbonization of power generation. *Joule* 2, 2403–2420. doi: 10.1016/j.joule.2018.08.006
 - Smythe, D. (2011). An objective nuclear accident magnitude scale for quantification of severe and catastrophic events. *Phys. Today*. doi: 10.1063/PT.4.0509
 - Sorge, L., and Neumann, A. (2021). Warheads of Energy: exploring the linkages between civilian nuclear power and nuclear weapons in seven

- countries. *Energy Res. Soc. Sci.* 81:102213. doi: 10.1016/j.erss.2021.102213
- Taljegard, M., Göransson, L., Odenberger, M., and Johnsson, F. (2019). Impacts of electric vehicles on the electricity generation portfolio – A Scandinavian-German case study. *Appl. Energy* 235, 1637–1650. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.133
 - The New York Times (1954). Abundant Power From Atom Seen; It Will Be Too Cheap for Our Children to Meter, Strauss Tells Science Writers. <http://www.nytimes.com/1954/09/17/archives/abundant-power-from-atom-seen-it-will-be-too-cheap-for-our-children.html>
 - Thomas, S. (2018). Russia's nuclear export programme. *Energy Policy* 121, 236–247. doi: 10.1016/j.enpol.2018.06.036
 - Thomas, S. (2019). Is it the end of the line for Light Water Reactor technology or can China and Russia save the day? *Energy Policy* 125, 216–226. doi: 10.1016/j.enpol.2018.10.062
 - Thomas, S., and Ramana, M. V. (2022). A hopeless pursuit? National efforts to promote small modular nuclear reactors and revive nuclear power. *WIREs Energy Environ.* 11, e429. doi: 10.1002/wene.429
 - Toktarova, A., Gruber, L., Hlusiak, M., Bogdanov, D., and Breyer, C. (2019). Long term load projection in high resolution for all countries globally. *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* 111, 160–181. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.03.055
 - Uddin, K., Dubarry, M., and Glick, M. B. (2018). The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy* 113, 342–347. doi: 10.1016/j.enpol.2017.11.015
 - Ullmann, J. E. (1958). Economics of nuclear power. *Science* 128, 95–96. doi: 10.1126/science.128.3315.95
 - University of Chicago (2004). *The Economic Future of Nuclear Power*. Chicago, IL: University of Chicago.
 - University of Chicago (2011). *Analysis of GW-Scale Overnight Capital Costs*. Chicago, IL: University of Chicago. https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy_files/files/attachments/111129_EPIC_OvernightCost_Report.pdf
 - Verbruggen, A., and Yurchenko, Y. (2017). Positioning nuclear power in the low-carbon electricity transition. *Sustainability* 9:163. doi: 10.3390/su9010163
 - Wealer, B. (2020). The economic organization of nuclear power construction projects: Organizational models for production and financing. *J. Mega Infrastruct. Sustain. Dev.* 2, 206–219. doi: 10.1080/24724718.2021.2012353
 - Wealer, B., Bauer, S., Hirschhausen, C., von, Kemfert, C., and Göke, L. (2021a). Investing into third generation nuclear power plants - review of recent trends and analysis of future investments using Monte Carlo Simulation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 143:110836. doi: 10.1016/j.rser.2021.110836
 - Wealer, B., Bauer, S., Landry, N., Seiß, H., and von Hirschhausen, C. (2018). *Nuclear Power Reactors Worldwide – Technology Developments, Diffusion Patterns, and Country-by-Country Analysis of Implementation (1951–2017)*. Berlin: DIW Berlin, TU Berlin. https://www.diw.de/de/diw_01.c.583380.de/publikationen/data_documentation/2018_0093/nuclear_power_reactors_worldwide_technology_developments_and_country-by-country_analysis_of_implementation_1951-2017.html
 - Wealer, B., von Hirschhausen, C., Kemfert, C., Präger, F., and Steigerwald, B. (2021b). Ten Years after Fukushima: Nuclear Energy Is Still Dangerous and Unreliable. Berlin: DIW Berlin, German Institute for Economic Research. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.812103.de/dwr-%2021-07-1.pdf
 - Weinberg, A. M. (1959). Some thoughts on reactors. *Bull. Atom. Sci.* 15, 132–137. doi: 10.1080/00963402.1959.11453944
 - Weinberg, A. M. (1971). Nuclear energy A Prelude to H. G. Wells' dream. *For. Aff.* 49, 407–418. doi: 10.2307/20037848
 - Wheatley, S., Sovacool, B. K., and Sornette, D. (2016). Reassessing the safety of nuclear power. *Energy Res. Soc. Sci.* 15, 96–100. doi: 10.1016/j.erss.2015.12.026
 - Wimmers, A., Böse, F., Kemfert, C., Steigerwald, B., Hirschhausen, C. V., and Weibezahn, J. (2023). Plans for Expanding Nuclear Power Plants Lack Technological and Economic Foundations. *DIW Weekly Report*. doi: 10.18723/DIW_DWR:2023-10-1
 - Yamashita, K. (2015). "History of nuclear technology development in Japan," in *AIP Conference Proceedings* (Tokyo).
 - Yao, X., Fan, Y., Zhao, F., and Ma, S.-C. (2022). Economic and climate benefits of vehicle-to-grid for low-carbon transitions of power systems: a case study of China's 2030 renewable energy target. *J. Clean. Prod.* 330:129833. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129833
-
- Traduzione dall'inglese e adattamento a cura di Roberto Canziani.
- Articolo originale: Präger F, Breyer C, Fell H-J, von Hirschhausen C, Kemfert C, Steigerwald B, Traber T and Wealer B (2024) Evaluating nuclear power's suitability for climate change mitigation: technical risks, economic implications and incompatibility with renewable energy systems. *Frontiers in Environmental Economics* 3:1242818. <https://doi.org/10.3389/frevc.2024.1242818>

REMTECH EXPO

FERRARA FIERE

18 - 20
SETTEMBRE
2024

RemTech Expo è l'unico Hub Tecnologico Ambientale,
specializzato sui temi del risanamento, della
rigenerazione e dello sviluppo sostenibile dei territori

REGISTRAZIONE ONLINE
www.remtechexpo.com



Un marchio di:



Società del gruppo:



RemTech è certificato da:





INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2024 è sostenuta da:



better together

