

IL NUCLEARE IN EUROPA E IN ITALIA:

analisi del quadro
normativo, scenari e
opportunità di mercato





AUTORI

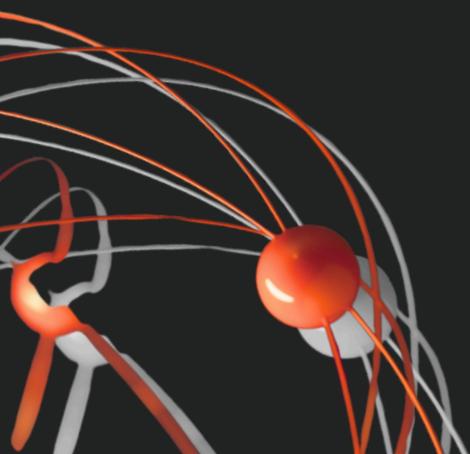
Eleonora Alagna
Lisa Castiglioni
Federico Ciolfi

CURATORI

Marco Ciancarini

SI RINGRAZIANO

Fiammetta Del Mancino
Ginevra Denei
Alessia Sementilli



CHI SIAMO

AWARE è un Think Tank nato nell'**ottobre del 2019** che si pone l'obiettivo ultimo di contribuire alla definizione del futuro che verrà stimolando la **riflessione** e il **dibattito** sulle nuove sfide del mondo contemporaneo.

Per farlo sono stati individuati due macro argomenti che meglio rappresentano le chiavi per leggere e guidare il futuro del nostro pianeta:

- **l'evoluzione delle tecnologie e del settore digitale nelle sue declinazioni;**
- **lo sviluppo sostenibile**, basato su tre pilastri (sociale, economico ed ambientale).

INDICE

<u>Glossario degli acronimi</u>	p. 1
<u>Introduzione</u>	p. 3
<u>1. Contesto di riferimento ed analisi delle competenze</u>	p. 5
1.1 Principi di funzionamento di una centrale nucleare	p. 5
1.2 Competenze e settori	p. 7
1.2.1 Realizzazione di un reattore	p. 9
1.3 Aziende leader	p. 10
1.3.1 Filiera industriale per categoria - esempi e progetti	p. 10
1.3.2 Casi studio rappresentativi della partecipazione italiana alla fusione	p. 13
1.3.3 Considerazioni conclusive	p. 14
1.4 La value chain del combustibile nucleare: esclusione italiana, vulnerabilità strategiche e possibili strategie alternative	p. 15
1.4.1 Materie prime e rischi di approvvigionamento	p. 15
1.4.2 L'assenza italiana nella filiera del combustibile nucleare	p. 17
1.4.3 Strategie di resilienza e diversificazione della value chain del combustibile nucleare	p. 19
<u>2. Il peso del nucleare in Italia</u>	p. 21
2.1 Ricadute in Italia in termini di PIL, bilancia energetica e R&S	p. 21
2.1.1 La creazione di valore	p. 21
2.1.2 BILANCIA ENERGETICA: Contributo del nucleare ad una resilienza di mercato e alla decarbonizzazione	p. 24
2.1.3 RICERCA E SVILUPPO	p. 27
2.2 Posizionamento dell'Italia nel mercato internazionale	p. 30

<u>3. Analisi del regulatory framework europeo e delle politiche energetiche di diversi stati europei</u>	p. 32
3.1 Francia	p. 34
3.2 Germania	p. 36
3.3 Nord Europa	p. 38
3.3.1 Norvegia	p. 38
3.3.2 Svezia	p. 38
3.3.3 Finlandia	p. 39
3.4 Italia	p. 40
3.4.1 Quadro regolatorio e istituzionale	p. 41
3.4.2 Fattori di contesto e prospettive	p. 42
<u>4. Stato attuale ed evoluzioni possibili del mercato nucleare in Europa</u>	p. 43
4.1 Occupazione del settore nucleare in Europa	p. 43
4.2 Un confronto con le rinnovabili	p. 44
4.2.1 Come è cresciuta l'energia rinnovabile	p. 45
4.2.2 Il nucleare è un'alternativa alle rinnovabili?	p. 46
4.2.3 Il nucleare come back-up plan	p. 48
<u>5. Proposte di policy</u>	p. 49
5.1 Proposte di policy internazionali	p. 50
5.1 Proposte di policy nazionali	p. 51
<u>Indice delle figure e delle tabelle</u>	p. 54
<u>Bibliografia</u>	p. 55
Contatti	p. 59

Glossario degli acronimi

Sigla	Nome per esteso (IT / EN)	Caratteristiche principali
AIEA / IAEA	Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica / International Atomic Energy Agency	Organismo delle Nazioni Unite che promuove l'uso sicuro e pacifico dell'energia nucleare.
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare	Rete di sette atenei italiani che coordina formazione e ricerca nel campo dell'ingegneria nucleare.
COM(2011) 112 / 2010 639 / 2015 80	Comunicazioni della Commissione Europea / European Commission Communications	Documenti strategici che definiscono le politiche UE su decarbonizzazione, sicurezza ed efficienza energetica.
Decommissioning	Smantellamento impianti nucleari / Decommissioning of Nuclear Facilities	Operazioni per la disattivazione e bonifica di impianti nucleari e gestione dei rifiuti radioattivi.
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile	Ente di ricerca italiano su energia, ambiente e innovazione tecnologica.
ENEN	Rete Europea di Educazione Nucleare / European Nuclear Education Network	Coordina programmi di formazione, mobilità e standard di qualità nel settore nucleare europeo.
EURATOM	Comunità Europea dell'Energia Atomica / European Atomic Energy Community	Trattato che coordina la ricerca, la sicurezza e lo sviluppo dell'energia nucleare nell'UE.
ETS	Sistema di Scambio delle Quote di Emissione / Emissions Trading System	Meccanismo europeo di mercato per ridurre le emissioni di gas serra nei settori energivori.
I&C	Strumentazione e Controllo / Instrumentation and Control	Sistemi elettronici e meccanici che garantiscono sicurezza e funzionamento degli impianti nucleari.

ITS	Istituti Tecnici Superiori / Higher Technical Institutes	Percorsi post-diploma per la formazione di tecnici specializzati in settori industriali avanzati.
NDT	Controlli Non Distruttivi / Non-Destructive Testing	Tecniche per verificare l'integrità di materiali e saldature senza danneggiarli.
PNIEC	Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima / Integrated National Energy and Climate Plan	Documento nazionale che definisce obiettivi e misure di politica energetica e climatica fino al 2030.
RCC-M	Codice francese di progettazione e costruzione / French Design and Construction Code for Mechanical Components	Standard tecnico per la progettazione di componenti meccanici delle installazioni nucleari.
RED II / RED III	Direttive europee sulle energie rinnovabili / Renewable Energy Directives	Norme UE che fissano gli obiettivi vincolanti di quota rinnovabili: 32% (RED II) e 42,5% (RED III).
RWM	Gestione dei Rifiuti Radioattivi / Radioactive Waste Management	Raccolta, trattamento, condizionamento, stoccaggio e smaltimento dei rifiuti radioattivi.
SMR	Reattore Modulare di Piccola Taglia / Small Modular Reactor	Reattore compatto e prefabbricato, progettato per maggiore sicurezza e flessibilità operativa.
STEM	Scienza, Tecnologia, Ingegneria e Matematica / Science, Technology, Engineering and Mathematics	Ambiti disciplinari fondamentali per la formazione tecnico-scientifica.
WENRA	Associazione dei Regolatori Nucleari dell'Europa Occidentale / Western European Nuclear Regulators Association	Organismo che promuove standard comuni di sicurezza tra le autorità nazionali.
WWER / PWR / BWR	Tipologie di Reattori ad Acqua Pressurizzata o Bollente / Water-Water Energetic Reactor, Pressurized Water Reactor, Boiling Water Reactor	Reattori ad acqua leggera: WWER di origine russa, PWR occidentali, BWR giapponesi e statunitensi.

Introduzione

Negli ultimi anni l'energia nucleare ha riconquistato un ruolo centrale nel dibattito pubblico e istituzionale europeo e italiano. Tuttavia, le radici di questo percorso affondano già alla fine degli anni Cinquanta, quando la corsa internazionale all'atomo come simbolo di progresso spinse l'Italia a essere tra i pionieri nel nucleare civile: nel 1952 fu infatti istituito il CNRN (Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari), poi divenuto CNEN e infine confluito nell'ENEA. Negli anni Sessanta entrarono in funzione tre centrali di prima generazione a cui seguì Caorso (1978), primo impianto di seconda generazione in Italia e tra i più avanzati in Europa. Il disastro di Černobyl' (1986) segnò però una svolta radicale: con il referendum del 1987 oltre il 70 % degli italiani votò per la sospensione del programma nucleare, avviando la graduale chiusura degli impianti e l'avvio di complessi processi di decommissioning, tuttora in corso sotto la responsabilità di SOGIN, con un budget di circa 8,5 miliardi di euro e un completamento previsto entro il 2030. Il secondo referendum del 2011, in scia all'incidente di Fukushima, sancì la definitiva rinuncia alla produzione elettrica da fonte nucleare, collocando l'Italia tra i pochi Paesi industrializzati privi di capacità nucleare attiva. Negli anni successivi si è assistito in Europa a una pluralità di strategie: in diversi casi il nucleare è stato mantenuto o rilanciato (Francia, Regno Unito, Finlandia), mentre altri Paesi hanno scelto l'uscita graduale, come la Germania, che dopo un lungo dibattito interno ha completato il phase-out nel 2023. Nonostante ciò, pur in assenza di una filiera industriale nazionale attiva, l'Italia ha continuato a valorizzare le competenze acquisite, partecipando a programmi internazionali come ITER e orientando la ricerca verso SMR e reattori avanzati, in un quadro energetico europeo sempre più integrato.

Recentemente, il dibattito è tornato con vigore:

sondaggi demoscopici registrano un crescente consenso dell'opinione pubblica italiana sul nucleare, mentre sul piano politico si è distinto l'impegno del Ministro Pichetto Fratin nella promozione del disegno di legge sul nucleare, elemento che ha contribuito a riportare la questione nell'agenda istituzionale.

A livello europeo, il nucleare è oggi formalmente sdoganato: il Green Deal, il pacchetto Fit for 55 e la tassonomia degli investimenti sostenibili lo riconoscono come fattore chiave per centrare l'obiettivo di decarbonizzazione entro il 2050. Tale riconoscimento, tuttavia, non è equiparabile a quello attribuito alle fonti rinnovabili, che restano al centro delle priorità di policy e di finanziamento. In questo quadro, l'Italia non può aspirare a diventare un grande produttore di energia atomica, ma può cogliere l'opportunità di

collocarsi in modo qualificato nella filiera europea, valorizzando competenze tecnologiche e industriali consolidate e mantenendo il proprio posizionamento economico.

Il presente paper nasce quindi dalla necessità di fornire un quadro oggettivo e sistematico sullo stato attuale della filiera nucleare italiana, con particolare attenzione al mercato del lavoro specializzato e alle sfide legate al mismatch di competenze. Lo scopo è duplice: da un lato descrivere in dettaglio la struttura industriale, le ricadute economiche e le politiche nazionali ed europee; dall'altro proporre linee di policy concrete per colmare le lacune identificate, sostenere la formazione e l'attrazione di talenti, nonché favorire la partecipazione dell'Italia al rilancio del nucleare in Europa.

Entrando nello specifico del paper, nella prima parte viene illustrata la panoramica sulla filiera nucleare italiana: si descrivono lo stato dell'arte degli operatori industriali, i profili professionali coinvolti lungo l'intera catena del valore dalla progettazione fino alla manutenzione, le competenze distintive presenti sul territorio e le attività che restano escluse dalla filiera nazionale.

Successivamente, il paper analizza il peso economico e strategico del nucleare in Italia. Vengono valutate le ricadute sul prodotto interno lordo, l'effetto sulla bilancia energetica nazionale e gli investimenti in Ricerca & Sviluppo, nonché il posizionamento competitivo dell'Italia sul mercato internazionale.

Nella sezione comparativa si confrontano le politiche nucleari dei principali Paesi europei con impianti attivi: dalla leadership tecnologica e nella produzione di combustibile della Francia, all'expertise tedesca nella sicurezza e nella gestione delle scorie nonostante la dismissione, fino alle best practice scandinave nella realizzazione di depositi geologici.

Il quarto capitolo affronta lo stato attuale e le possibili evoluzioni del mercato del lavoro nucleare in Europa, partendo dai dati più aggiornati su numero di occupati, distribuzione di genere, profili e competenze richieste e arrivando a mettere a fuoco mismatch e carenze professionali. Un confronto con il mercato delle rinnovabili, analizzato sulla finestra 2000–2025, completa il quadro, evidenziando dinamiche comuni e differenze nella gestione delle risorse umane e una presentazione di quelli che sono i programmi di formazione a livello italiano ed europeo.

Infine, nelle conclusioni verranno presentate delle proposte di policy per sostenere una spinta politica e sociale verso un percorso concreto di crescita e innovazione del settore.

1. Contesto di riferimento ed analisi delle competenze

1.1 Principi di funzionamento di una centrale nucleare

Il funzionamento di una centrale nucleare si basa sulla fissione nucleare controllata, un processo in cui il nucleo di un atomo pesante, come l'uranio-235, viene scisso da un neutrone, liberando energia sotto forma di calore e nuovi neutroni. Questa reazione, mantenuta sotto controllo all'interno di un reattore, consente di generare calore in modo continuo e prevedibile.

Le tecnologie oggi in discussione si distinguono soprattutto per livello di maturità industriale e costi di generazione, aspetti cruciali per valutarne la sostenibilità economica e il ruolo nella transizione energetica. I PWR e le varianti europee (EPR) o russe (VVER) rappresentano lo standard consolidato a livello internazionale, con costi operativi stimati intorno a 49 €/MWh per l'impianto EPR di Olkiluoto 3 in Finlandia, a fronte però di investimenti iniziali molto elevati (oltre 10–15 milioni €/MW in alcuni casi europei). I BWR e gli AGR hanno una diffusione più limitata e circoscritta a pochi Paesi, mentre i PHWR si caratterizzano per la possibilità di utilizzare uranio naturale, riducendo i costi associati all'arricchimento. La principale innovazione in fase di sviluppo è rappresentata dagli SMR, che puntano a ridurre tempi e costi di costruzione grazie alla prefabbricazione modulare: stime recenti indicano un LCOE medio attorno a 85 €/MWh, con progetti come il Rolls-Royce SMR che fissano target inferiori a 70 £/MWh (80–90 €/MWh).

Tecnologia	Diffusione / Paesi principali	Range potenza (MW)	Vantaggi	Criticità
PWR	USA, Francia, Cina, gran parte UE	900–1.600	Standard consolidato, alta affidabilità, filiera globale ampia	Costi elevati, tempi lunghi
EPR	Francia (Flamanville), Finlandia (Olkiluoto), UK (Hinkley Point C)	1.600+	III gen., maggiore efficienza e sicurezza	Ritardi, extracosti
VVER	Russia, Europa dell'Est, Cina	1.000–1.200	Diffusione ampia in area post-sovietica	Dipendenza tecnologica da Mosca
BWR	USA, Giappone, Svezia	700–1.400	Schema semplificato	Sicurezza percepita minore post-Fukushima
AGR	Regno Unito	500–660	Buona efficienza termica	Tecnologia obsoleta, fine vita imminente
PHWR	Canada (CANDU), India, Romania	600–900	Usa uranio naturale, meno dipendenza da arricchimento	Gestione complessa dell'acqua pesante
SMR	In sviluppo (USA, UK, Canada, Francia)	50–300	Modularità, costruzione rapida, flessibilità	Tecnologia immatura, costi ancora elevati (LCOE ~85 €/MWh)

Tabella 1: Differenti tipi di tecnologie per la generazione di energia nucleare a confronto

Questo confronto mostra come solo alcune tipologie di reattori costituiscano oggi uno standard industriale consolidato, mentre altre si collocano in segmenti di nicchia o restano in fase di sviluppo. Per l'Italia ciò implica un duplice orientamento: contribuire alla filiera dei reattori maturi (PWR/EPR), dove può inserirsi con componentistica e servizi, e al contempo presidiare le traiettorie emergenti legate agli SMR, che potrebbero aprire spazi più accessibili a Paesi privi di un'industria nucleare completa.

1.2 Competenze e settori

La filiera industriale italiana è articolata (Figura 1) e conserva competenze rilevanti lungo quasi tutta la supply chain nucleare, ad esclusione del settore di fornitura e arricchimento dell'uranio e di fabbricazione del combustibile [1].

Investimento in ricerca, sviluppo, formazione e passaggio di know-how

Engineering

Procurement

Reperimento materiali e combustibile

Manufacturing & (componentistica)

Qualificazione e verifica delle strutture

Costruzione preparazione on site

Installazione

Electrical, control and instrumentation system (EC&I) e verifica

Commissioning e verifica

Mantenimento e stoccaggio scorie

Figura 1: Stadi della filiera in cui è presente il contributo italiano

La partecipazione industriale italiana si articola su due livelli complementari: lo sviluppo di know-how tecnico e scientifico, e la produzione materiale delle apparecchiature necessarie alla costruzione di un reattore.

In generale, come emerge dall'analisi del TEHA [1], le aziende italiane specializzate nel settore dell'energia nucleare sono circa 70, nei diversi segmenti della supply chain di un progetto nucleare da società di ingegneria/progettazione, a società specializzate nella produzione di singole componenti, come valvole e tubazioni, fino ad arrivare ad EPC (Engineering, Procurement, Construction)/General Contractor, società che cioè gestiscono tutto il progetto "chiavi in mano" (Tabella 1).

Segmento	Presenza italiana
Fornitura combustibile	0 aziende
Grandi componenti	17 aziende
Società di ingegneria	13 aziende
Strumentazione	13 aziende
Materiali e forgiatura	11 aziende
Montaggio/installazione	5 aziende
EPC/General Contractor	4 aziende
Smaltimento	3 aziende
Valvole	2 aziende
Tubazioni e raccordi	2 aziende

Tabella 2: Numero di aziende per servizio o prodotto funzionale alla costruzione e mantenimento di una centrale nucleare, Fonte: elaborazione TEHA Group su dati Istat, Aida e fonti varie, 2024

Sebbene i settori coinvolti siano numerosi, l'analisi si concentrerà esclusivamente sulle fasi di ricerca, sviluppo e produzione della componentistica, con l'obiettivo di mettere in luce il contributo italiano alla costruzione di un reattore — ambiti in cui la partecipazione nazionale risulta particolarmente significativa.

Saranno inoltre presentate, ove pertinente, le principali aziende italiane che si distinguono per competenze e specializzazione nel settore nucleare.

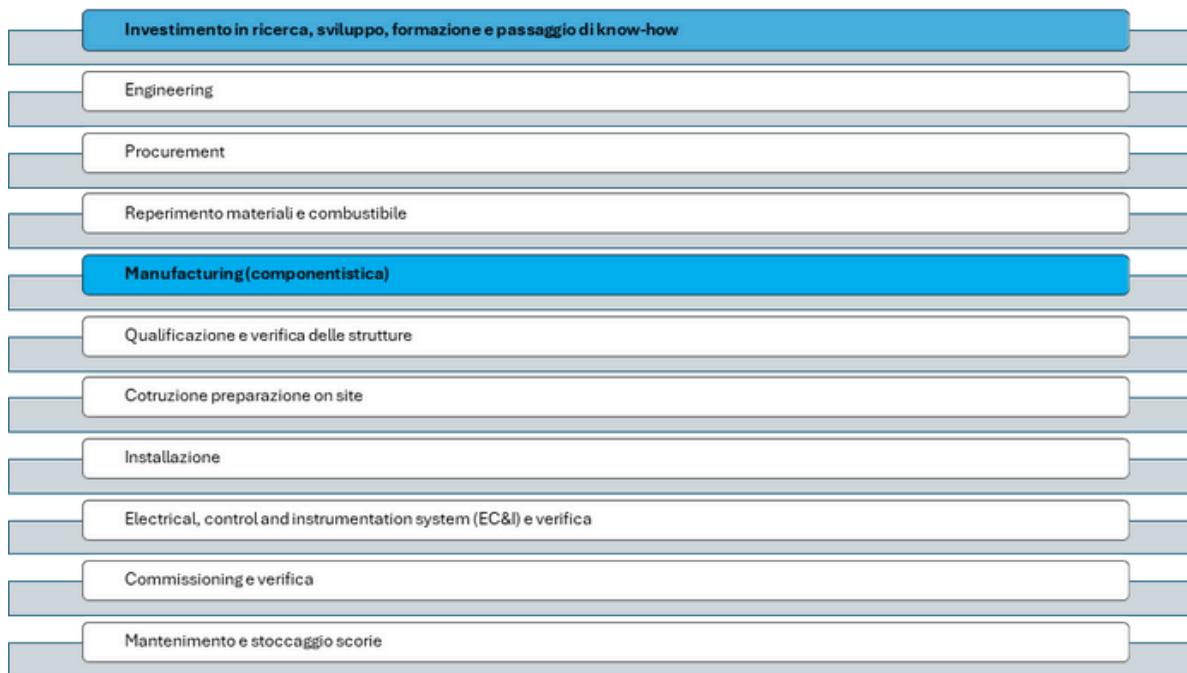


Figura 2: Stadi in cui risulta significativo il ruolo delle aziende italiane

1.2.1 Realizzazione di un reattore

La realizzazione di un impianto nucleare, per la sua complessità e i rischi tecnologici associati, richiede competenze trasversali dall'ingegneria alla sicurezza, dal diritto alla digitalizzazione. Le scelte operative si articolano su un doppio binario:

- **Progettazione integrata dell'impianto.**

Comprende lo sviluppo coordinato di aspetti funzionali, ingegneristici e normativi per garantire il funzionamento sicuro ed efficiente dell'intero sistema. In questa fase assumono un ruolo centrale le imprese **EPC (Engineering, Procurement, Construction)**, che fungono da capofila per progettazione, approvvigionamento e costruzione (modello EPC). L'obiettivo è bilanciare **innovazione e standardizzazione**, ottimizzando tempi e costi e riducendo il rischio di ritardi o modifiche in corso d'opera [2]. I contratti EPC consentono il passaggio dallo studio di fattibilità all'esecuzione, includendo la messa in opera di componenti specializzati (es. **sistemi di sicurezza passiva e moduli nucleari avanzati**);

- **Progettazione integrata dell'impianto.**

Attiene alla pianificazione e gestione dell'acquisto o produzione di apparecchiature e parti specialistiche, spesso **realizzate su misura (tailored)** da fornitori altamente qualificati. Questa filiera copre componenti critici (forgiati, generatori di vapore, pressurizzatori, sistemi di raffreddamento, contenitori in pressione, cask per combustibile esausto) e servizi (manutenzione, refurbishment, life extension).

La complessità dei progetti nucleari richiede inoltre soluzioni digitali integrate in grado di coordinare progettisti, fornitori e autorità di regolazione. In questo contesto svolgono un ruolo pivotale le piattaforme digitali, che permettono di gestire in modo unitario dati tecnici, assicurano la tracciabilità dei materiali, ottimizzano la pianificazione delle attività e svolgono il ruolo di controllo qualità, permettendo così l'implementazione di un approccio sistematico alla costruzione e alla manutenzione. Ulteriori strumenti digitali, parimenti ai precedenti sono le tecnologie come il Building Information Modeling (BIM) e i digital twin consentono la modellazione virtuale dell'impianto e la simulazione di scenari operativi, mentre software specializzati, come COMOS (Siemens) e AVEVA Engineering, assicurano coerenza tra le discipline progettuali, tracciabilità della documentazione e controllo dei costi. A ciò si aggiunge l'impiego di database interoperabili e centralizzati, che favoriscono la diffusione di best practice, l'armonizzazione delle procedure e l'adeguamento tempestivo alle evoluzioni normative.

Questo approccio digitale non solo migliora l'efficienza operativa, ma contribuisce anche a garantire trasparenza, sicurezza e sostenibilità lungo l'intero ciclo di vita dell'impianto.

Pur in assenza di progetti immediatamente cantierabili, il coinvolgimento delle imprese italiane in queste fasi permette di consolidare il **know-how**, rafforzare le competenze e mantenere vitale una **filiera nazionale** capace di rispondere alle sfide tecnologiche future. Una descrizione più approfondita degli operatori e delle rispettive specializzazioni è presentata nel paragrafo successivo.

1.3 Aziende leader

L'Italia rappresenta un terreno fertile anche per imprese provenienti da altri settori che hanno investito nel nucleare. Gli attori coinvolti sono **centinaia** e, pur in assenza di una mappatura ufficiale completa, il ruolo nazionale è confermato dal mondo della ricerca: **su 47 progetti approvati da EURATOM** (organizzazione europea il cui obiettivo è quello di favorire il progresso nel campo dell'energia nucleare), **oltre il 50%** vede la partecipazione o la leadership di soggetti italiani – aziende, enti di ricerca, università [12].

1.3.1 Realizzazione di un reattore

Il panorama industriale italiano legato al nucleare si articola lungo più segmenti della supply chain, ciascuno caratterizzato da competenze specifiche e da un contributo diretto a progetti internazionali. Per una maggiore chiarezza, le principali realtà possono essere distinte in **macro-categorie di attività**, riportando al loro interno gli esempi più significativi.

A) Forgiati, meccanica pesante e componenti in pressione

- **Acciai Speciali Terni** (Gruppo Arvedi), **Tectubi Raccordi, IBF**: produzione di forgiati in acciaio destinati a componenti ad alta criticità come pressurizzatori e generatori di vapore per impianti EPR e CPR1000 (centrali PWR) [4]. Le stesse aziende forniscono forgiati per tubazioni a EDF per la manutenzione dei 56 reattori francesi [5][6].
- **SIMIC**: realizzazione di componenti critici a pressione per il circuito primario, tra cui contenitori in pressione, generatori di vapore e tubazioni; attiva anche nella meccanica di precisione [4].
- **Mangiarotti – Westinghouse Italia**: fornitura di pressurizzatori, scambiatori di calore, generatori di vapore e accumulatori per i reattori AP1000 [11].

B) Scambio termico e sistemi di raffreddamento

- **Belleli Energy CPE, Walter Tosto**: realizzazione di componenti per lo scambio termico ad alta efficienza, come quelli destinati alla centrale inglese di Hinkley Point C [7].
- **Demont, Officine Zanetti**: progettazione e produzione di sistemi di raffreddamento e condizionamento, che includono scambiatori di calore, torri di raffreddamento, sistemi di ventilazione, volute, corpi pompa, diffusori e bruciatori [9].

C) Cask e logistica nucleare

- **ATB Group**: produzione di contenitori (cask) per il trasporto e lo stoccaggio del combustibile esausto [10].

D) Ingegneria di sistema e servizi EPC

- **Ansaldo Nucleare**: fornitura di servizi di manutenzione (refurbishment) e life extension per centrali estere, come nel caso della centrale di Krško in Slovenia [8].
- **Fincantieri**: capacità di assumere un ruolo da EPC contractor, con responsabilità “chiavi in mano” dalla progettazione alla costruzione.

E) Ricerca e innovazione

- **ENEA, ASG Superconductors, Vitrociset (Leonardo), Termomeccanica, Vernazza, IREM, Criotec, Cestaro Rossi:** attori attivi nello sviluppo di soluzioni innovative, dalla supercondutività applicata alla fusione fino alle infrastrutture sperimentali per nuovi reattori.

Per completezza si riporta una tabella riassuntiva (Tabella 2) delle aziende, le attività di competenza nonché i principali progetti in cui sono state chiamate ad essere coinvolte.

Aziende	Attività / Componenti	Progetti / Paesi (esempi)
Acciai Speciali Terni (Arvedi), Tectubi Raccordi, IBF	Forgiati in acciaio per pressurizzatori, generatori di vapore e tubazioni	EPR e CPR1000 (centrali PWR); manutenzione 56 reattori EDF (Francia)
SIMIC	Componenti critici a pressione per circuito primario (contenitori, generatori, tubazioni)	Forniture internazionali su reattori PWR
Mangiarotti – Westinghouse Italia	Pressurizzatori, scambiatori di calore, generatori di vapore, accumulatori	Reattori AP1000 (Westinghouse)
Belleli Energy CPE, Walter Tosto	Scambiatori di calore ad alta efficienza	Centrale Hinkley Point C (Regno Unito)
Demont, Officine Zanetti	Sistemi di raffreddamento e condizionamento (torri, scambiatori, ventilazione, corpi pompa, diffusori, bruciatori)	Progetti europei vari
ATB Group	Contenitori (cask) per trasporto e stoccaggio combustibile esausto	Forniture internazionali
Ansaldo Nucleare	EPC, refurbishment, life extension	Centrale Krško (Slovenia)
Fincantieri	EPC e ingegneria integrata	Progetti complessi 'chiavi in mano'
ENEA	Progetti sperimentali su fissione e fusione	DTT, DEMO, collaborazioni EURATOM
ASG Superconductors	Magneti supercondutivi	ITER (UE + partner internazionali)
Vitrociset (Leonardo), Termomeccanica, Vernazza, IREM, Criotec, Cestaro Rossi	Soluzioni innovative e infrastrutture sperimentali	Progetti vari di ricerca e filiera nucleare

Tabella 3: Sintesi delle principali aziende italiane coinvolte per progetti e componenti afferenti al nucleare

1.3.2 Casi studio rappresentativi della partecipazione italiana alla fusione

Oltre al contributo diffuso lungo la filiera, alcune realtà italiane si distinguono per il ruolo di primo piano in progetti internazionali di frontiera, in particolare nel campo della **fusione nucleare**. Questi esempi mostrano come l'Italia non si limiti a fornire componenti, ma sia in grado di presidiare segmenti tecnologici avanzati, attrarre commesse significative e contribuire allo sviluppo delle soluzioni che potrebbero segnare il futuro dell'energia.

- **ASG Superconductors (Gruppo Malacalza) — ITER (fusion, tokamak).**

ASG partecipa al progetto ITER, il più grande esperimento al mondo sulla fusione nucleare, che coinvolge l'Unione europea insieme a Stati Uniti, Russia, Cina, India, Giappone e Corea del Sud [13]. L'azienda italiana fornisce bobine superconduttrici di grandi dimensioni, fondamentali per creare il campo magnetico che tiene "intrappolato" il plasma ad altissima temperatura necessario alla fusione [14]. Si tratta di componenti tecnologicamente tra i più avanzati mai realizzati, che confermano il know-how di ASG anche in altri settori come quello medico (risonanze magnetiche), aerospaziale e navale [43];

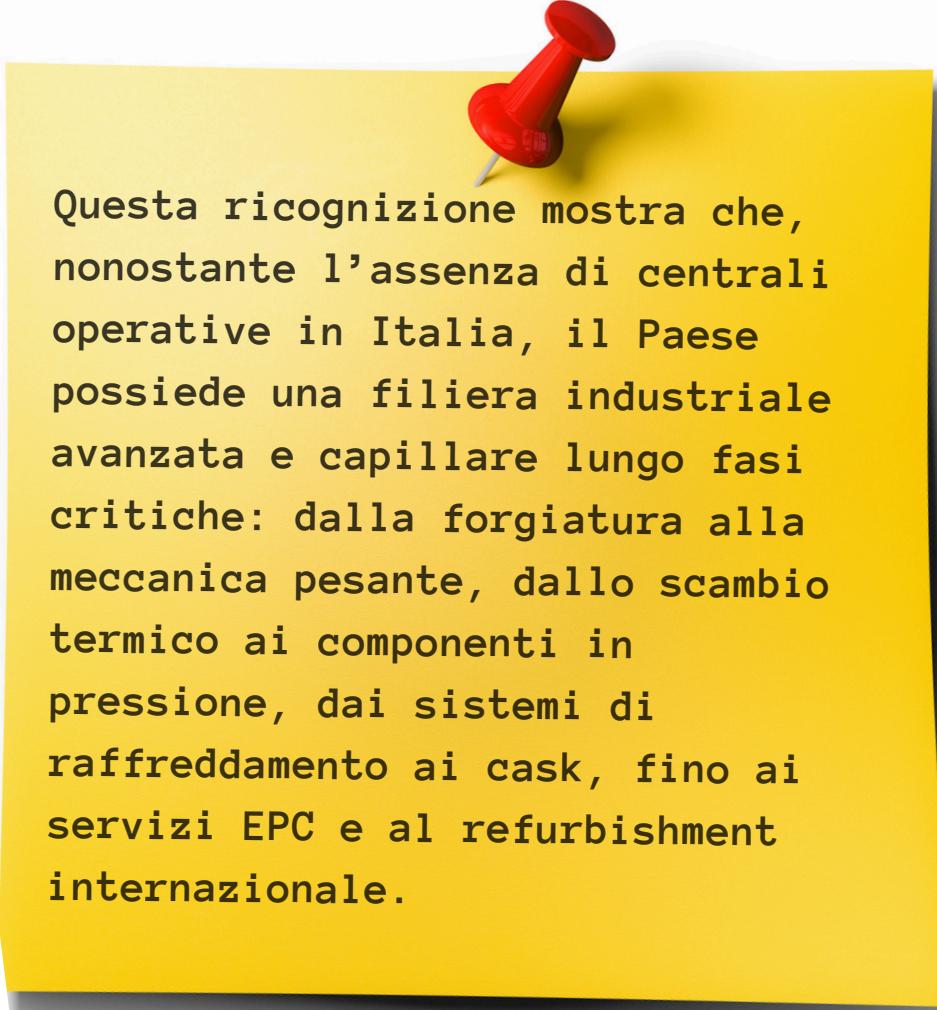
- **ENEA — DTT (Divertor Tokamak Test Facility) e DEMO (fusion).**

Nel quadro della ricerca europea verso il reattore dimostrativo DEMO, successore di ITER, la sfida principale è gestire i carichi termici estremi che si concentrano sul cosiddetto divertore, la parte del reattore che smaltisce il calore in eccesso e filtra le impurità del plasma [15]. Per questo in Italia è stato sviluppato il progetto DTT, una macchina sperimentale che servirà a testare soluzioni e materiali in condizioni simili a quelle dei futuri reattori. Il progetto DTT-U (Upgrade), interamente italiano e promosso da ENEA insieme a Eni e diverse università, è finanziato anche con fondi del PNRR per 55 milioni di euro e dovrebbe essere completato entro il 2028 [44].

- **Eni — MIT / Commonwealth Fusion Systems (CFS) — Fusione a confinamento magnetico.**

Un ulteriore esempio riguarda Eni, che collabora con il MIT di Boston e con la spin-off Commonwealth Fusion Systems. L'obiettivo è sviluppare una nuova generazione di reattori compatti a fusione, basati su magneti superconduttori ad alta temperatura (HTS). Il percorso prevede due tappe: SPARC, il primo prototipo sperimentale, e ARC, un futuro impianto dimostrativo con potenzialità industriali. Questa partnership rafforza il legame tra la ricerca internazionale e il sistema industriale italiano, collocando Eni tra i protagonisti del settore.

1.3.3 Considerazioni conclusive



Tale competenza favorisce export, innovazione e autonomia tecnologica, con ricadute positive anche in settori affini ad alta intensità ingegneristica. I casi di ASG, ENEA (DTT/DEMO) ed Eni-MIT/CFS confermano la capacità italiana di giocare un ruolo di primo piano nella nuova fase globale dell'energia atomica e della fusione, catalizzando investimenti pubblici e commesse internazionali.

1.4 La value chain del combustibile nucleare: esclusione italiana, vulnerabilità strategiche e possibili strategie alternative

Fino ad ora sono state analizzate le competenze interne al nostro paese, con un'analisi di dettaglio sul ruolo di alcune aziende italiane, ma per condurre un'analisi coerente, bisogna anche considerare cosa al nostro paese manca e cosa potrebbe mettere in crisi il settore della produzione di energia da fonte nucleare.

In questo senso, una fase fondamentale per il funzionamento di un reattore nucleare è la presenza del combustibile fissile, che rappresenta un elemento ad alta criticità strategica. La produzione, l'arricchimento e la gestione post-utilizzo del combustibile non sono soltanto fasi tecniche, ma snodi geopolitici che condizionano l'autonomia, la resilienza e la sicurezza di un sistema energetico. È proprio sotto questa lente che devono essere fatti emergere ed analizzati i principali rischi di approvvigionamento, soprattutto per i Paesi che si stanno affacciando alla possibilità di investire sul nucleare come energia a basse emissioni, come l'Italia, non possedendo o presidiando alcun know how del segmento del ciclo vita del combustibile.

1.4.1 Materie prime e rischi di approvvigionamento

Uno dei punti più critici nella catena di approvvigionamento del combustibile nucleare riguarda la disponibilità e il controllo del materiale fissile. Infatti, anche se la disponibilità globale di uranio non rappresenta, almeno nel breve periodo, un limite fisico alla diffusione dell'energia nucleare, tuttavia, la forte concentrazione geografica delle risorse e la dipendenza da un numero ristretto di fornitori rappresentano un rischio strutturale per la sicurezza energetica dei Paesi importatori, come dimostrato con evidenza dalla crisi del gas scatenata dal conflitto russo-ucraino.

Le principali riserve mondiali di uranio sono localizzate in:

- **Australia (25,4%)**
- **Kazakistan (12%)**
- **Canada (10,8%)**
- **Federazione Russa (8,2%)**
- **Namibia (6,2%)**

L'Unione Europea fino al 2023 importava circa il 25% del proprio fabbisogno dal Niger, Paese anch'esso politicamente instabile, e in cui erano in gioco tensioni geopolitiche significative legate al controllo delle miniere, infatti a luglio 2023 il Niger è stato oggetto di un colpo di stato e l'UE ha dovuto interrompere le importazioni [16].

Dal punto di vista della produzione effettiva (cioè l'uranio realmente estratto e vendibile), i dati sono ancora più sbilanciati:

- il Kazakistan guida con il 43% della produzione mondiale,
- seguito da Canada (14,9%), Namibia (11,4%), Australia (9,2%) e Uzbekistan (6,7%) [17].

Risulta evidente che l'accesso effettivo alle risorse dipende quindi non solo dalla loro presenza geografica, ma anche da condizioni economiche, stabilità politica, capacità industriale e tecnologia estrattiva.

Ad oggi, però, il punto di vulnerabilità nella value chain del combustibile nucleare, più evidente e ravvicinato, non risiede nella disponibilità dell'uranio grezzo, ma nel controllo delle fasi successive, ovvero l'arricchimento isotopico e la fabbricazione degli elementi di combustibile. Si tratta di segmenti industriali ad altissima specializzazione, che richiedono infrastrutture costose e complessi regimi autorizzativi.

In questo contesto, la **Federazione Russa** gioca un ruolo dominante:

- Esporta uranio arricchito e HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) su larga scala, servendo sia i mercati europei sia Paesi in via di sviluppo;
- Possiede il maggior numero di impianti di arricchimento attivi al mondo, con tecnologie avanzate (es. centrifughe di ultima generazione) e capacità produttiva altamente scalabile;
- Gestisce il trattamento e il riciclo del combustibile esausto, offrendo questo servizio anche a clienti esteri, rafforzando la sua posizione strategica nelle fasi finali del ciclo.

In particolare, la Russia è oggi l'unico fornitore su scala industriale di HALEU, il combustibile con concentrazione di U-235 tra il 5% e il 20%, richiesto da molti reattori di nuova generazione. La sua esclusiva capacità di produrre a costi competitivi e in volumi rilevanti la rende un attore insostituibile nel breve termine.

Paese	Australia	Kazakistan	Canada	Federazione Russa	Namibia	Sudafrica	Brasile	Uzbekistan	Stati Uniti	Altri Paesi
Reservoir	28%	15%	9%	8%	7%	5%	4%	3%	2%	19%
Production	9%	43%	15%	6%	11%	1%	0%	7%	0%	8%
Enrichment	0%	5%	0%	40%	0%	0%	1%	0%	10%	44%
Export	15%	25%	10%	8%	10%	0%	0%	5%	2%	25%

Tabella SEQ Tabella | * ARABIC 4: Sintesi dei principali stadi di trattamento ed esportazione del combustibile nucleare

In particolare, la Russia è oggi l'unico fornitore su scala industriale di HALEU, il combustibile con concentrazione di U-235 tra il 5% e il 20%, richiesto da molti reattori di nuova generazione. La sua esclusiva capacità di produrre a costi competitivi e in volumi rilevanti la rende un attore insostituibile nel breve termine.

Il conflitto in Ucraina ha mostrato quanto sia fragile una filiera energetica basata su fornitori unici o difficilmente sostituibili. Nel caso del gas, la dipendenza dall'infrastruttura russa ha generato una crisi sistematica. Nel caso del nucleare, la situazione è meno acuta, ma potenzialmente simile.

Per ora, non si registrano segnali di interruzione della fornitura di combustibile nucleare, anche grazie a:

- scorte accumulate presso operatori europei;
- capacità di arricchimento interna all'UE (Francia, Germania, Paesi Bassi);
- strategie di diversificazione e sostituzione in fase avanzata, che coinvolgono nuove realtà per l'estrazione dell'uranio [18].

Tuttavia, questa relativa stabilità non deve indurre a sottovalutare i rischi latenti. La continuità della fornitura dipende in larga parte da scelte politiche e da equilibri internazionali estremamente volatili. Se da un lato un'interruzione unilaterale da parte della Russia appare improbabile, dall'altro non può essere esclusa un'azione restrittiva deliberata da parte dell'Unione Europea, come forma di pressione o sanzione. In tale scenario, i reattori VVER attualmente in funzione e lo sviluppo di progetti basati su combustibile HALEU sarebbero tra i più esposti alle conseguenze.

1.4.2 L'assenza italiana nella filiera del combustibile nucleare

Per comprendere le criticità legate all'approvvigionamento del combustibile nucleare, occorre partire da un dato essenziale: l'uranio naturale contiene solo una minima parte (circa 0,7%) dell'isotopo fissile U-235, necessario a sostenere la reazione a catena. Per poter essere utilizzato nella maggior parte dei reattori commerciali, in particolare nei reattori ad acqua leggera (LWR), è quindi indispensabile un processo di arricchimento, che porta la concentrazione di U-235 a valori più elevati e compatibili con la produzione di energia.

Nella pratica, questo significa che **nessun Paese può utilizzare l'uranio così come disponibile in natura, ma è sempre necessaria una filiera industriale dedicata, che richiede tecnologie sofisticate e grandi investimenti, che possano provvedere all'arricchimento dell'uranio naturale.**

A seconda della tipologia di reattore, il grado di arricchimento varia: i reattori commerciali si collocano su valori standard (intorno al 3–5%), mentre i reattori di ricerca e quelli avanzati utilizzano combustibili con concentrazioni più alte, oggi al centro del dibattito sul futuro del settore.

Tra questi, un ruolo crescente è attribuito al cosiddetto HALEU, un combustibile con arricchimento superiore ai valori standard, ritenuto strategico per i reattori di nuova generazione e per gli Small Modular Reactor (SMR).

Tipo di uranio / combustibile	Percentuale U-235	Utilizzo tipico
Uranio naturale	~0,7%	Non utilizzabile direttamente nei reattori commerciali
Uranio arricchito (standard)	3–5%	Reattori ad acqua leggera (LWR), i più diffusi al mondo
HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium)	5–20%	Reattori di ricerca e reattori avanzati (es. SMR, nuove)

Tabella 5: differenze tra diversi combustibili nucleari a seconda dell'arricchimento di uranio

Il ciclo del combustibile prevede diverse fasi – dall'estrazione alla conversione, dall'arricchimento fino alla fabbricazione degli elementi combustibili. Tutte queste attività sono oggi concentrate in pochi Paesi al mondo e richiedono infrastrutture altamente specializzate, nonché un presidio continuo per garantire sicurezza, tracciabilità e conformità agli obblighi internazionali di non proliferazione.

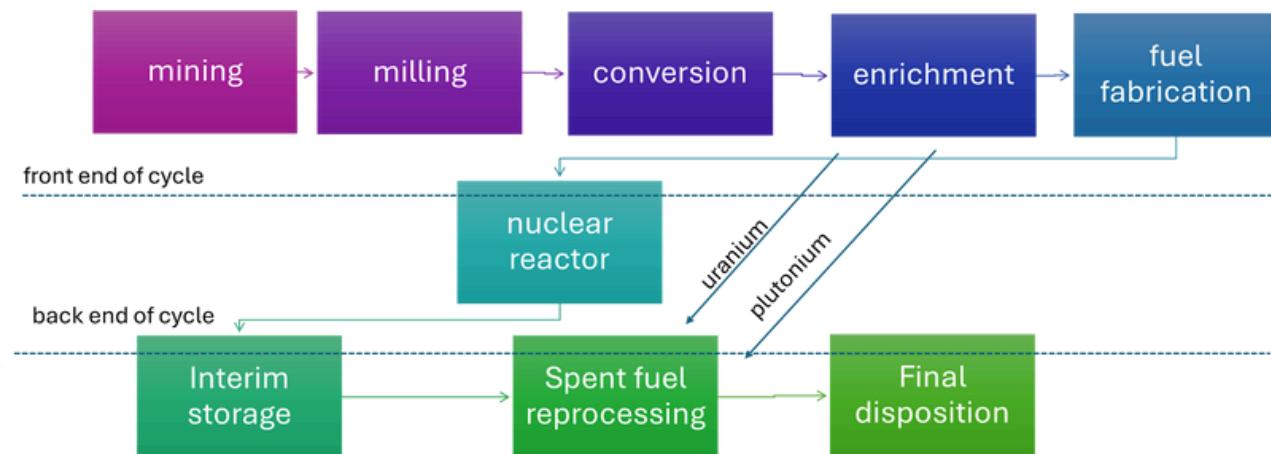


Figura 3: Ciclo del combustibile nucleare dall'estrazione allo smaltimento, passando per il recupero. Fonte: Pennsylvania State University Radiation Science and Engineering Center (public domain)

Ed è qui che si colloca la debolezza italiana: a differenza di altri segmenti del nucleare civile, dove il Paese dispone di competenze di eccellenza, l'Italia non ha mai sviluppato impianti né know-how operativo nel campo dell'arricchimento e della fabbricazione del combustibile. Ne deriva una dipendenza totale dall'estero, che limita la possibilità di garantire autonomia di approvvigionamento e di giocare un ruolo di rilievo nelle scelte strategiche sulla filiera nucleare europea.

1.4.3 Strategie di resilienza e diversificazione della value chain del combustibile nucleare

I rischi relativi al combustibile nucleare sono ben noti ai principali operatori economici del settore e anche ai decisori politici che, di fronte ai rischi di approvvigionamento evidenziati dalle recenti dinamiche geopolitiche, stanno sviluppando strategie di resilienza e diversificazione della filiera. L'obiettivo è ridurre la dipendenza da fornitori dominanti, in particolare dalla Federazione Russa, e potenziare la capacità autonoma di produzione e riciclo, soprattutto per i reattori di nuova generazione.

Le principali direttive strategiche si articolano su tre fronti:

1 Riciclo del combustibile esausto per massimizzare l'uso della materia fissile disponibile:

Una delle soluzioni più promettenti è il riutilizzo degli attinidi minori e del plutonio presenti nel combustibile esaurito, riducendo la quantità di rifiuti radioattivi a lunga vita e recuperando materiale utile. Tra le iniziative di punta:

- a. FAIRFUELS (Fabrication, Irradiation and Reprocessing of Fuels and Targets for Transmutation): progetto europeo volto a sviluppare nuovi combustibili derivati dalle scorie, tramite processi di re-irradiazione e trasmutazione degli attinidi. È orientato soprattutto ai reattori veloci e ai sistemi nucleari di IV generazione;
- b. L'Argonne National Laboratory (USA) sta sviluppando una tecnologia di elettro-raffinazione, che separa l'uranio non fissionato dai prodotti di fissione e dagli attinidi pesanti nel combustibile esausto. Il materiale recuperato può essere riutilizzato nei reattori veloci, migliorando l'efficienza del ciclo e riducendo la dipendenza dall'estrazione primaria [19].

2 Sviluppo di supply chain autonome per i reattori VVER e avanzati (IV generazione)

La dipendenza europea dal combustibile VVER di matrice russa ha spinto la Commissione Europea a finanziare una filiera alternativa:

- a. Il programma APIS (Accelerated Programme for Implementation of Secure VVER Fuel Supply), avviato nel 2023, mira a sviluppare combustibile interamente europeo compatibile con i reattori VVER presenti in Slovacchia, Bulgaria, Ungheria e Repubblica Ceca, attualmente serviti quasi esclusivamente da Rosatom [19].

L'obiettivo è svincolare il mercato europeo dalla dipendenza tecnologica e politica da Mosca, anche attraverso investimenti in impianti di fabbricazione e arricchimento dedicati, e la qualificazione di nuovi fornitori internazionali.

3 Impiego di combustibili alternativi (MOX, torio, combustibili per la fusione), che richiedono infrastrutture e know-how dedicati

Parallelamente, si stanno sperimentando fonti combustibili diverse dall'uranio arricchito, in grado di rispondere a esigenze tecniche o geopolitiche specifiche:

- a. MOX (Mixed Oxide Fuel): miscela di ossidi di uranio e plutonio derivati dal combustibile esausto, già utilizzata in reattori francesi e giapponesi. Richiede impianti dedicati per la fabbricazione, come Melox (Francia) o impianti previsti in India e Cina;
- b. Combustibile a base di torio (Th-232): impiegato in reattori autofertilizzanti (breeder), in grado di generare U-233, un isotopo fissile. Il torio è più abbondante dell'uranio in natura e si trova in Paesi come India (che lo sta studiando attivamente), Brasile, USA e Norvegia. Richiede però una tecnologia ancora non pienamente industrializzata;
- c. Deuterio e trizio, isotopi dell'idrogeno, sono i candidati principali per il combustibile della fusione nucleare. Il deuterio è relativamente abbondante nell'acqua di mare, mentre il trizio è estremamente raro in natura e può essere prodotto artificialmente da litio irradiato, motivo per cui la filiera della fusione includerà anche la produzione controllata di questi isotopi. I programmi ITER e DEMO ne rappresentano il fronte più avanzato.

La realizzazione di questa visione richiederà tempi lunghi e cooperazione internazionale, ma rappresenta una leva cruciale per garantire sicurezza energetica, indipendenza strategica e sostenibilità nel futuro nucleare europeo.

2. Il peso del nucleare in Italia

Secondo il World Energy Outlook 2023 dell'International Energy Agency, in uno scenario orientato alla neutralità climatica la produzione mondiale da fonte nucleare potrebbe raggiungere i 5 500 TWh entro il 2050, con una crescita media annua dell'1,8 %. Tale espansione, tuttavia, non risulta distribuita in modo uniforme: gran parte dell'incremento previsto è riconducibile ai programmi della Cina, che concentra oltre la metà dei reattori attualmente in costruzione, mentre in Europa e Nord America lo sviluppo appare più contenuto e legato soprattutto a progetti dimostrativi come gli SMR.

Questa asimmetria incide anche sull'Italia, che pur avendo cessato la produzione nazionale continua a importare energia nucleare da Francia e Svizzera. Nel 2023 tali importazioni hanno raggiunto circa 14 TWh – pari al 5 % del fabbisogno elettrico nazionale – per un valore stimato di 1 miliardo di euro, considerando un prezzo medio all'ingrosso di 70 €/MWh (fonte: GME, ARERA). Più che evidenziare la “mancanza” di nucleare domestico, questo dato riflette i meccanismi di funzionamento del mercato elettrico europeo e le scelte di politica energetica francese: in un sistema a prezzo marginale unico, i vantaggi derivanti dal basso costo operativo del nucleare francese non si traducono in automatico in tariffe più basse per i consumatori italiani, ma concorrono alla formazione del Prezzo Unico Nazionale (PUN) secondo la logica del *merit order*. Ne deriva un interrogativo aperto: quale sarebbe l'impatto di una capacità nucleare interna sulla volatilità dei prezzi e sulla posizione dell'Italia all'interno della borsa elettrica europea?

2.1 Ricadute in Italia in termini di PIL, bilancia energetica e R&S

2.1.1 La creazione di valore

Nonostante la sospensione della produzione nazionale di energia nucleare,

il tessuto industriale italiano mantiene competenze consolidate lungo gran parte della value chain, come già evidenziato nei capitoli precedenti. Questa base tecnica ha generato, nel 2022, un **“valore esteso”** (inteso come l'impatto complessivo del settore, incluse le attività connesse e l'indotto economico e occupazionale) **pari a circa 4,1 miliardi di euro, con un valore aggiunto diretto di 1,3 miliardi e 13.500 addetti impiegati lungo la filiera.** [29]

Limitando invece l'analisi al **“valore core”**, ovvero alle sole attività direttamente riconducibili al comparto nucleare (progettazione, componentistica, gestione impianti e ciclo del combustibile), **si registrano 457 milioni di euro di fatturato, 161 milioni di valore aggiunto e circa 2.800 occupati.** [29]

Il contributo diretto della filiera al PIL nazionale – che nel 2023 ha raggiunto i 2.128 miliardi di euro (fonte ISTAT) – è quindi modesto (0,02%), ma va interpretato alla luce degli **effetti indiretti e indotti generati da ricerca, innovazione, formazione tecnica e specializzazione industriale.**

Studi internazionali confermano che gli investimenti in infrastrutture nucleari hanno un elevato moltiplicatore economico, con un impatto sul PIL pari a 1,5–2 volte l'investimento iniziale, grazie alla creazione di occupazione, all'attivazione di filiere nazionali e all'incremento della produttività.

Nel contesto italiano, come citato dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, nel *Piano Nazionale Integrato Energia e Clima 2023* i progetti previsti dal PNIEC per lo sviluppo di reattori modulari di piccola taglia (SMR) e tecnologie nucleari avanzate stimano un risparmio di circa 17 miliardi di euro rispetto a scenari privi di nucleare, e potrebbero generare fino a 500 milioni di euro annui di PIL nel primo decennio operativo. Guardando all'opportunità europea, il nuovo nucleare potrebbe aprire un mercato potenziale di oltre 20 miliardi di euro per le aziende italiane, soprattutto se in grado di espandersi verso segmenti ad alto valore aggiunto come la produzione di turbine, sistemi di controllo e componentistica specializzata.

Parallelamente, un programma nazionale coordinato potrebbe generare ulteriori opportunità di mercato per circa 25 miliardi di euro entro il 2050. Complessivamente, la combinazione dei due scenari – europeo e nazionale – delineerebbe un mercato potenziale di circa 46 miliardi di euro, con un valore aggiunto diretto pari a 14,8 miliardi. Considerando un moltiplicatore economico pari a 3,4, l'impatto complessivo sul sistema-Paese potrebbe arrivare a 50,3 miliardi di euro, ovvero il 2,5% del PIL nazionale, includendo 35,5 miliardi di euro di benefici indiretti e indotti [1].

A fronte di tali prospettive, è necessario sottolineare che gli impianti nucleari tradizionali e non – inclusi gli SMR – si confrontano a livello globale con sfide significative: **i costi complessivi di costruzione risultano spesso superiori alle stime iniziali e i tempi medi di messa in esercizio**, soprattutto per i reattori di grande taglia, possono arrivare a 15–18 anni dal concept alla connessione in rete. Questi fattori riducono la prevedibilità degli investimenti e rendono cruciale un'analisi prudente di fattibilità, anche per i programmi nazionali.

Anche **sotto il profilo occupazionale**, il nuovo nucleare rappresenta un volano importante: si stimano **fino a 39.000 posti di lavoro diretti e altri 78.000 tra indiretti e indotti**, per un totale di 117.000 nuovi posti di lavoro lungo tutta la filiera [29].

Ai fini comparativi, si può accostare questo scenario a quello di un grande polo industriale come l'ex Ilva di Taranto. L'Ilva (oggi ArcelorMittal) è la più grande acciaieria italiana, con circa 14.000 addetti complessivi (10.000 dipendenti diretti più 3.000/3.500 nell'indotto). Secondo le analisi econometriche dello Svimez, il comparto siderurgico che l'Ilva rappresenta genera circa l'1,4 % del PIL nazionale. È importante sottolineare che questo peso non deriva dal semplice numero di addetti, ma dalla rilevanza strategica della siderurgia come settore ad alta intensità energetica e a forte capacità di generare valore aggiunto. Il paragone serve dunque a rendere più tangibile l'ordine di grandezza delle stime relative al nucleare: un comparto in grado di incidere sul PIL nazionale in misura analoga a un polo siderurgico di rilevanza sistematica[30].

La presenza di una filiera nucleare avanzata stimola anche un significativo impatto indiretto sull'economia, in termini sia di occupazione qualificata sia di crescita dei settori tecnologici correlati. L'intensità di spesa in R&D, pari all'1,48% del PIL (dati 2021), di cui lo 0,55% di origine pubblica, può beneficiare di una strategia di rafforzamento proprio in settori chiave come quello nucleare, ad alta intensità di innovazione.

In conclusione, il rilancio del nucleare in Italia si configura come un'opportunità industriale ed economica strategica: non solo per il **valore aggiunto generato e l'occupazione creata**, ma anche per il **contributo strutturale alla transizione energetica**, grazie a una tecnologia **a basse emissioni**, scalabile e in grado di rafforzare **la competitività del sistema produttivo nazionale**.

2.1.2 BILANCIA ENERGETICA: Contributo del nucleare ad una resilienza di mercato e alla decarbonizzazione

Uno dei principali punti di fragilità strutturale del sistema energetico italiano è rappresentato dalla bilancia energetica, intesa come il saldo tra energia prodotta internamente e energia importata.

Si tratta di un indicatore strategico per valutare l'autonomia del Paese e la sua capacità di resistere a shock esterni, siano essi geopolitici, economici o infrastrutturali.

Nel 2023 l'Italia ha registrato un tasso di autosufficienza energetica pari al 25,4%, grazie soprattutto al calo dei consumi e a un maggiore contributo delle rinnovabili. Nonostante ciò, il Paese continua a dipendere in misura rilevante dalle importazioni di combustibili fossili: il gas naturale rappresenta ancora la voce principale, il petrolio copre circa il 30% della domanda primaria, in lieve aumento; il carbone, invece, è sceso drasticamente. L'assenza di una produzione nucleare interna limita ulteriormente la diversificazione del mix, accentuando la vulnerabilità nei confronti dei mercati esteri e delle tensioni geopolitiche [31]. L'integrazione dell'energia nucleare nel sistema nazionale offre una **doppia leva strategica**: da un lato, riduce la necessità di importazioni di combustibili fossili; dall'altro, introduce una **fonte stabile e a basso costo operativo**, in grado di attenuare la volatilità dei prezzi elettrici e rafforzare la resilienza complessiva del mercato. Tuttavia, come evidenzia la Banca d'Italia, la sostituzione delle fonti fossili non elimina il problema della dipendenza energetica, ma ne muta la natura: la minore esposizione al gas naturale si accompagna infatti a nuove dipendenze da uranio arricchito e da tecnologie nucleari, spesso concentrate in aree geopoliticamente sensibili [20].

Secondo alcune stime, **ogni GW di capacità nucleare installata** potrebbe sostituire annualmente **3–4 miliardi di metri cubi di gas naturale**, generando **risparmi fino a 400 milioni di euro sulla bilancia energetica** (dato in fase di verifica).

Il **fattore di capacità del nucleare**, stabilmente superiore al **90%**, garantisce un'elevata continuità produttiva, in netta controtendenza rispetto all'intermittenza delle fonti rinnovabili. Proprio questa **programmabilità** rende il nucleare un **complemento strategico** alle rinnovabili, anziché un'alternativa.

Se si analizza il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) si evince che il nucleare è considerato in uno scenario di lungo termine che ipotizza, al 2050, fino a 7,6 GW di capacità complessiva (inclusi 400 MW da fusione), con un primo contributo di circa 400 MW da reattori modulari di piccola taglia (SMR) al 2035. Il PNIEC, però, non fornisce certezze programmatiche: non si tratta di una scelta definita, bensì di un esercizio di previsione ipotetica, condizionata dall'evoluzione tecnologica, dalla sostenibilità economica e dal consenso politico e sociale.

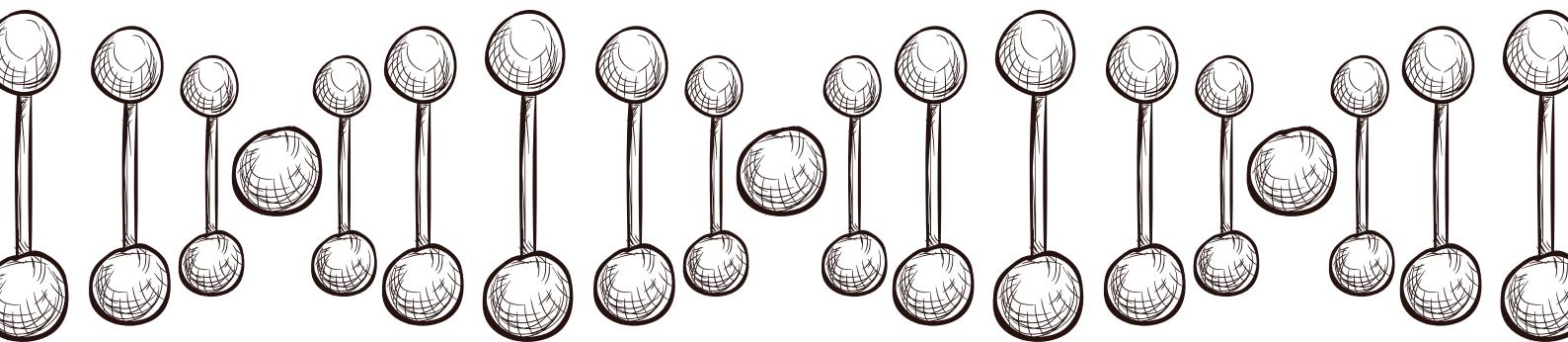
La costruzione di una **filiera nucleare nazionale** rappresenta un ulteriore volano per **ridurre il disavanzo commerciale energetico**, migliorare la **competitività dell'industria** e **rafforzare la sicurezza degli approvvigionamenti**. Sebbene gli investimenti iniziali siano elevati, i **costi di generazione livellati nel tempo (LCOE)** risultano competitivi, contribuendo alla **stabilità dei prezzi energetici**.

L'introduzione di SMR e tecnologie a fusione consentirebbe anche una serie di benefici sistematici:

- riduzione del costo complessivo del sistema elettrico;
- abbattimento delle esigenze di accumulo e degli investimenti infrastrutturali;
- progressiva marginalizzazione delle fonti fossili, fino a un possibile phase-out.

In questo quadro, il PNIEC evidenzia che lo scenario "con nucleare" comporterebbe anche **una drastica riduzione della necessità di ricorrere a tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS)**, attualmente previste come misura compensativa in scenari alternativi. In particolare, la produzione da **impianti a gas con CCS** si ridurrebbe del **65,2%** (da **11,5 TWh a 4 TWh**), e quella da **bioenergie con CCS** passerebbe da **12,5 TWh a 6 TWh**. Questo risultato sottolinea il ruolo del nucleare nel **semplificare la traiettoria di decarbonizzazione**, riducendo il peso di soluzioni tecnologicamente complesse o economicamente onerose.

A confermare questa traiettoria è anche lo **studio congiunto di Edison, Ansaldo Nucleare, Politecnico di Milano, Nomisma Energia ed ENEA**, secondo cui l'Italia potrebbe installare **15–20 impianti SMR/AMR** entro il 2050, per una capacità complessiva tra **5,1 e 6,8 GW**, con una produzione annua stimata tra **42 e 57 TWh**, pari a circa il **10% della domanda elettrica nazionale**.



In sintesi, l'inclusione del nucleare nel mix italiano appare come una possibile risposta alla fragilità strutturale della bilancia energetica, con il potenziale di ridurre la dipendenza dalle fonti fossili, stabilizzare i costi del sistema elettrico e contribuire al raggiungimento degli obiettivi climatici nazionali.

Tuttavia, tali benefici vanno letti alla luce di due fattori di equilibrio:

- da un lato, **la reale competitività dei costi complessivi di costruzione e gestione**, che a livello internazionale mostrano spesso scostamenti significativi rispetto alle stime iniziali;
- dall'altro, **la dipendenza che deriverebbe dalle importazioni di combustibile nucleare e di alcune tecnologie critiche**, concentrate in paesi geopoliticamente sensibili.

A ciò si aggiungono i tempi lunghi di realizzazione degli impianti – che per i reattori di grande taglia superano spesso i 15 anni e che, anche per gli SMR, difficilmente consentiranno risultati concreti prima del prossimo decennio – e la necessità di considerare l'evoluzione parallela delle alternative tecnologiche. Rinnovabili, accumuli e CCS potrebbero infatti rafforzare la loro competitività economica mentre il nucleare affronta le sue fasi autorizzative e realizzative.

In questo quadro, il nucleare non si configura come una soluzione definitiva, ma come una delle opzioni possibili nella strategia energetica di lungo termine.

La sua eventuale adozione richiederà non solo una valutazione comparativa con le altre tecnologie disponibili, ma anche un chiaro sostegno politico e sociale, senza il quale qualsiasi percorso rischierebbe di restare sulla carta.

2.1.3 RICERCA E SVILUPPO

L'Italia vanta una tradizione consolidata nel settore della ricerca nucleare, posizionandosi tra i Paesi leader a livello globale.

Sul fronte universitario, le università italiane di punta nel settore sono sette, distribuite da Sud a Nord.¹

Il capitale umano generato da questi poli nazionali per lo studio e la ricerca nel campo della fisica nucleare, ha un altissimo valore di mercato, lo dimostra il tasso di occupazione che è prossimo a tassi di totale impiego. Il PoliMI riporta che quasi il 100% [20] dei laureati magistrali, in questo campo, negli ultimi anni accademici hanno trovato impiego al più tardi entro sei mesi dalla laurea (80%), o hanno proseguito gli studi, e di questi la percentuale di occupati con un posto a tempo indeterminato è intorno al 50%. A 5 anni dalla laurea presentano un tasso di occupazione del 100% e il 59% ha trascorso almeno sei mesi all'estero, mentre il 64% ha conseguito un ulteriore titolo di studio (50% PhD), mentre altre fonti [21] riportano un dato del 75,6% per il tasso di occupazione post-laurea.

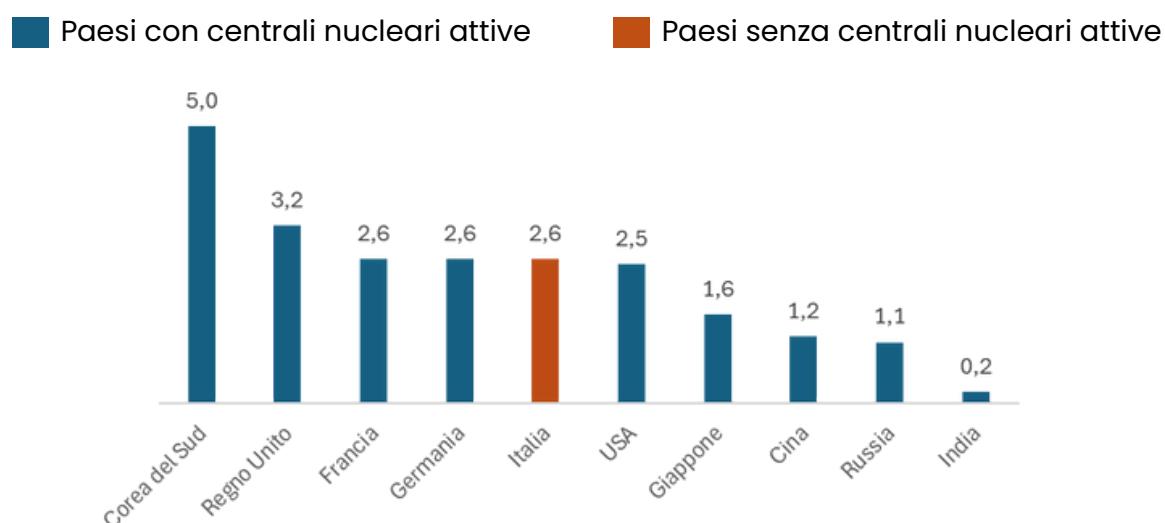


Figura 4: Pubblicazioni scientifiche in ingegneria nucleare per volume di ricerca sul tema tra il 2021 e il 2023 (pubblicazioni per 100.000 abitanti), Fonte: TEHA Group, 2024

Inoltre, nonostante l'assenza di reattori attivi, la ricerca italiana risulta essere comunque tra le più influenti, con una media delle citazioni per pubblicazione (5,7) seconda solo a quella del Regno Unito (7,6) [1].

¹ Palermo; Roma "La Sapienza"; Pisa; Bologna; Padova; Torino; Milano.

Questi risultati quantitativi sono anche merito dei singoli atenei di fisica, che hanno mantenuto una linea di continuità nella collaborazione e supporto nei reattori per la ricerca sul territorio nazionale, e per la produzione a livello internazionale, tramite l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), con progetti che vanno dalla costruzione di acceleratori, basati sulla tecnologia di accelerazione a plasma da realizzarsi in Europa e con sede italiana ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN [22], alla costruzione del Future Circular Collider (FCC) per ampliare le frontiere dell'energia e dell'intensità dei collisori di particelle.

Con le università, inoltre, collaborano enti pubblici, istituti di ricerca, aziende, società di consulenza per analisi, studio e ricerca applicata all'intero settore energetico.

Tra questi sicuramente spiccano:

1. **ENEA** (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile), che si occupa di ricerca e sviluppo nel campo della fisica e dell'ingegneria nucleare e delle altre discipline connesse, e principale riferimento per il coordinamento di progetti nazionali ed internazionali in ambito nucleare;
2. **Ansaldi nucleare s.p.a.** [8] che copre attività a partire dalla produzione di componenti critici, fino alla progettazione e costruzione di nuovi impianti, oltre che il decommissioning di vecchi reattori e la ricerca avanzata nel campo del waste management, della fusione e di impianti di nuova generazione;
3. **RINA**, gruppo multinazionale con sede a Genova che offre servizi di ingegneria e consulenza, collaudo, ispezione e certificazione, per ogni fase dei progetti, dalla fattibilità alla dismissione;
4. **CNR-Ino**, un istituto di ricerca specializzato negli ambiti dell'ottica, della fotonica, della fisica atomica e molecolare;
5. **RSE** che svolge analisi, studio e ricerca applicati all'intero settore energetico;
6. **Leonardo**;
7. **Eni**;
8. **Enel**;
9. **Edison**.

Tali enti forniscono servizi dalla progettazione di sistemi ausiliari e di verifiche, alla qualifica di contenitori destinati al contenimento dei rifiuti radioattivi, dall'ingegnerizzazione di componenti specifiche, alla progettazione e realizzazione destinati all'estero, di impianti nucleari di grande taglia tipo PHWR e AP1000 [8]. Infine, un ruolo strategico nella ricerca del settore, viene ricoperto dai centri con dotazioni per la sperimentazione come SIET s.p.a. [23] detentrice di

impianti sperimentali unici per dimensioni, potenza e flessibilità, indirizzati alla R&D nel campo della Termoidraulica e Termomeccanica di componenti e sistemi di centrali per la produzione di energia (generatori di vapore, valvole, condensatori, eiettori a vapore, macchine a fluido, separatori di vapore, ecc.). A sostegno di queste attività, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha allocato fondi rilevanti per la transizione verde, riservando circa 135 milioni di euro specificamente al comparto nucleare. Parallelamente, l'Italia partecipa attivamente ai programmi europei Euratom e internazionali come EUROfusion e ITER, con contratti che hanno superato i 2,3 miliardi di euro nel periodo 2018–2024.

L'introduzione o il potenziamento del nucleare civile in Italia stimolerebbe inoltre lo sviluppo di tecnologie ad alto contenuto innovativo, dai sistemi di reazione avanzati ai dispositivi di sicurezza passiva, con applicazioni potenzialmente trasversali all'intero comparto high-tech. La natura multidisciplinare della ricerca nucleare funge da catalizzatore per la collaborazione tra università, enti pubblici e industria, favorendo il trasferimento tecnologico, la creazione di spin-off e l'internazionalizzazione della ricerca. Tale sinergia è essenziale per mantenere la competitività del sistema innovativo italiano e posizionarlo come attore rilevante a livello europeo.

Investimenti in questo ambito possono inoltre rafforzare capitoli strategici della R&S, dalla digitalizzazione dei sistemi complessi all'ingegneria dei materiali e alla robotica, favorendo la creazione di nuovi poli di eccellenza. Ne deriva un rafforzamento complessivo della base tecnologica del Paese e un'accelerazione nei processi di decarbonizzazione, sicurezza industriale e sviluppo sostenibile.

In uno scenario globale che vede Paesi come Regno Unito e Francia impegnati in ambiziosi programmi di sviluppo degli SMR e AMR – con investimenti pubblici superiori a 250 milioni e 1 miliardo di euro rispettivamente – l'Italia dispone di tutte le competenze scientifiche e tecnologiche per inserirsi in questa nuova traiettoria, purché supportata da una visione strategica di lungo periodo.

Il consolidamento della filiera R&S nucleare nazionale rappresenta quindi non solo un'opportunità per garantire sicurezza energetica e sostenibilità, ma anche un asset strategico per l'autonomia tecnologica del Paese nel prossimo decennio.

2.2 Posizionamento dell'Italia nel mercato internazionale

Nonostante l'assenza di una produzione nazionale di energia nucleare da oltre trent'anni, l'Italia mantiene un ruolo competitivo nel mercato internazionale della filiera nucleare, grazie a un tessuto industriale altamente specializzato e integrato in progetti di respiro globale. A livello mondiale, la produzione nucleare ha continuato a rappresentare una quota stabile dell'elettricità generata (12,5% in media negli ultimi cinquant'anni), mentre in Europa, sebbene abbia ridotto la propria incidenza sul totale globale, costituisce tuttora la prima fonte di generazione elettrica (22% del mix), con una forte concentrazione in 11 Stati membri dell'UE tra i primi 16 al mondo per incidenza del nucleare[1].

Nel quadriennio 2018–2022, l'Italia si è classificata 15^a a livello globale e 7^a tra i Paesi UE per export di reattori, componentistica e strumentazione nucleare, con un valore medio annuo di circa 530 milioni di euro e una quota del 3,2% sul mercato globale.

Secondo il Nuclear Trade Atlas (CEPII/UN Comtrade), il nostro Paese ha registrato 140 milioni di euro di export diretto nel comparto, salendo però al 15^o posto mondiale se si considerano solo le componenti.

La crescita registrata nell'ultimo biennio (+106% rispetto al 2018–2019) segnala una tendenza positiva, trainata dal comparto componenti e strumentazione (44,2% del totale), in particolare per prodotti ad alto valore tecnologico come gli elementi in tungsteno. Oltre il 75% dell'export è destinato a Paesi UE, ma si registra una crescente proiezione verso Regno Unito, Bulgaria e Belgio.

Il posizionamento italiano si fonda su imprese leader come **Ansaldo Nucleare**, attiva nello sviluppo di tecnologie avanzate (IRIS, ELSY, reattori veloci al piombo) e soluzioni per SMR; **Leonardo**, impegnata in cybersecurity e radioprotezione; **CNH Industrial** nei sistemi di controllo. Ma la competitività italiana si estende anche ad applicazioni non energetiche, come la **medicina nucleare**, **l'aerospazio** e **l'industria di precisione**, grazie ad attori come **CAEN**, **COMEGER** e **ITEL**.

L'Italia partecipa attivamente alle principali **reti europee e globali** di ricerca e normazione, come **ITER**, **Broader Approach**, **Euratom**, **IAEA**, **WENRA**, **ENSREG** e il programma **Horizon Europe**. Tali presenze non solo rafforzano il capitale tecnologico nazionale, ma contribuiscono a orientare gli standard di sicurezza e le normative internazionali, conferendo all'Italia un ruolo strategico anche come regolatore e diplomazia tecnica.

Un altro ambito di eccellenza è la gestione del decommissioning, affidata a Sogin, che ha sviluppato competenze riconosciute a livello europeo nella disattivazione sicura di impianti e nel trattamento dei rifiuti radioattivi. Queste capacità sono sempre più richieste in un contesto in cui molti Paesi europei si preparano a dismettere reattori a fine vita.

Sul piano della formazione e R&D, l'Italia contribuisce attraverso università (Politecnico di Milano, Università di Bologna, La Sapienza), consorzi (CIRTEC) e centri di eccellenza come ENEA Casaccia, partecipando anche ai programmi Erasmus+ e Eurofusion. Questo ecosistema alimenta una pipeline stabile di competenze tecniche e manageriali, condizione chiave per cogliere le opportunità della nuova ondata di investimenti nucleari.

Infine, l'Italia è parte attiva della European SMR Alliance, al fianco di Francia, Germania, Spagna e Regno Unito, per armonizzare le normative e accelerare la standardizzazione delle soluzioni modulari. La cooperazione bilaterale con attori come EDF e NuScale Power consente inoltre alle imprese italiane di accedere a progetti globali ad alta intensità tecnologica, rafforzando la capacità di anticipare e adattarsi alle nuove esigenze del mercato.

In un contesto globale in cui oltre il 65% dei nuovi reattori in costruzione si concentra nell'area Asia-Pacifico (APAC), **il consolidamento della presenza italiana nelle catene del valore ad alta intensità di know-how rappresenta una leva strategica per la sovranità industriale europea, la diversificazione dei mercati di sbocco e la valorizzazione dell'eccellenza tecnologica nazionale.**



3. Analisi del regulatory framework europeo e delle politiche energetiche di diversi stati europei

L'assetto normativo dell'Unione Europea in materia energetica si è evoluto lungo un percorso di crescente integrazione, culminato in un quadro legislativo che, pur riconoscendo formalmente la sovranità degli Stati membri sul proprio mix energetico, ne condiziona fortemente l'attuazione concreta. Strumenti come il Green Deal, il pacchetto "Fit for 55" e la riforma del mercato elettrico hanno progressivamente ristretto i margini di autonomia strategica, imponendo vincoli ambientali, regolatori e di mercato sempre più stringenti. In questo scenario, il nucleare rappresenta una tecnologia abilitante ma non centralmente promossa, il cui utilizzo resta affidato alla capacità – e alla volontà – degli Stati membri di integrarlo all'interno delle proprie strategie nazionali, nel rispetto del complesso framework europeo vigente.

Dal punto di vista infrastrutturale, l'Europa occidentale è già ampiamente interconnessa sul piano elettrico, ma richiede investimenti significativi per gestire l'integrazione crescente delle fonti intermittenti e il progressivo phase-out del carbone e del gas. Il mercato unico dell'energia, avviato con il "Target Model", promuove la concorrenza transfrontaliera e l'efficienza, ma limita sempre più la capacità degli Stati di orientare in modo indipendente il proprio mix energetico.

A questa evoluzione si affianca una stratificazione normativa crescente. La Direttiva 2009/28/CE, nell'ambito del Pacchetto Clima-Energia, ha introdotto obiettivi vincolanti sulle rinnovabili, riducendo lo spazio di manovra nazionale. A seguire, il Green Deal e il pacchetto "Fit for 55" hanno ulteriormente rafforzato l'impostazione centralizzata della governance energetica, fissando target comuni anche su efficienza energetica, decarbonizzazione e interconnessioni.

Anche il quadro degli aiuti di Stato è stato ridefinito per evitare distorsioni alla concorrenza: gli Stati membri devono oggi ottenere l'approvazione della Commissione Europea per qualsiasi supporto diretto a tecnologie energetiche, nucleare incluso. Il sistema ETS (Emissions Trading Scheme) è stato riformato con l'introduzione della "Market Stability Reserve", rendendo il prezzo delle emissioni più dinamico e influenzando la competitività relativa delle varie fonti.

L'attuale cornice europea orienta le politiche energetiche degli Stati membri, ponendo alcuni vincoli strutturali ma anche stimolando un processo di transizione condiviso verso un modello più sostenibile. Questo approccio, pur limitando in parte la libertà degli Stati di definire strategie completamente autonome – come nel caso dell'Italia e del dibattito sul rilancio del nucleare – mira a garantire coerenza a livello continentale, valorizzando soluzioni a minor impatto ambientale. La strategia dell'UE si basa su una forte spinta

verso le fonti rinnovabili e l'efficienza energetica, con obiettivi come:

- riduzione delle emissioni dell'80-95% al 2050 rispetto ai livelli 1990 [45];
- minimo 27% di consumo da fonti rinnovabili [46];
- riduzione della dipendenza dalle importazioni e dei costi energetici [47].

Questi obiettivi sono tecnicamente compatibili con il nucleare, ma non lo incentivano esplicitamente. L'assenza di un endorsement politico univoco lascia spazio a un mosaico di scelte nazionali, spesso in tensione tra loro.

In questo contesto, ogni Stato membro ha definito un proprio "modello energetico in house", integrando – o escludendo – il nucleare dalla strategia nazionale in modo autonomo. Nei paragrafi seguenti si analizzeranno alcuni case study emblematici (Francia, Germania, Nord-Europa ed Italia), con l'obiettivo di comprendere quali strumenti e margini esistano per riaffermare un ruolo nazionale nel contesto di un framework europeo sempre più vincolante.

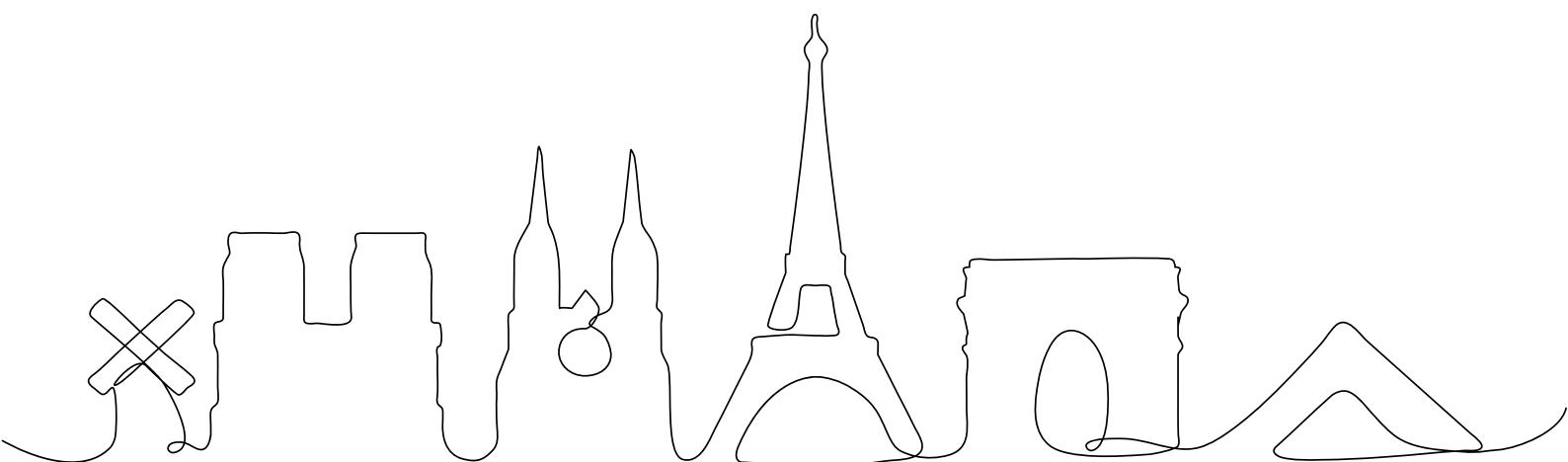
3.1 Francia

La Francia rappresenta il caso emblematico di un modello "in house" fortemente centralizzato, dove lo Stato gioca un ruolo chiave nella governance e nello sviluppo della politica nucleare. Con circa il 70% dell'elettricità nazionale prodotta da reattori nucleari, il Paese si colloca stabilmente ai vertici mondiali per incidenza del nucleare nel mix energetico. Questa dipendenza strutturale riflette una precisa scelta strategica, storicamente fondata sulla sicurezza degli approvvigionamenti e sull'autonomia energetica, ed è oggi al centro di un rinnovato piano di rilancio.

Negli anni successivi all'approvazione della Loi de Transition Énergétique (2015), la Francia aveva ipotizzato una riduzione della quota nucleare al 50% entro il 2025. Tuttavia, la pressione degli obiettivi climatici e la crisi energetica europea post-2022 hanno portato a un deciso cambio di rotta. Il nucleare è stato ridefinito come pilastro irrinunciabile per la decarbonizzazione e la resilienza energetica, in sinergia con lo sviluppo delle rinnovabili. L'obiettivo è duplice: assicurare stabilità alla rete elettrica e sostenere la competitività industriale del Paese.

Nel 2023 è stata approvata una nuova legge finalizzata ad accelerare le procedure autorizzative per la costruzione di impianti nucleari, intervenendo in particolare sulla semplificazione delle valutazioni ambientali e dei processi decisionali. Il piano del governo prevede la realizzazione di sei reattori EPR 2 entro il 2050, con la possibilità di costruirne ulteriori otto in una fase successiva. Parallelamente, è stato avviato un programma nazionale di sviluppo per i reattori modulari di piccola taglia (SMR), considerati una possibile soluzione tecnologica per la produzione di energia in modo più flessibile e con minori impatti ambientali e territoriali.

In questo contesto, va anche segnalata la riforma del meccanismo Arenh in Francia, che dal 2011 permetteva ai fornitori alternativi di acquistare energia nucleare a prezzi regolati da EDF. La nuova impostazione, in via di definizione con la Commissione europea, punta a superare il vecchio sistema per introdurre un regime più coerente con il mercato elettrico integrato dell'UE e con i futuri investimenti nel parco nucleare francese.

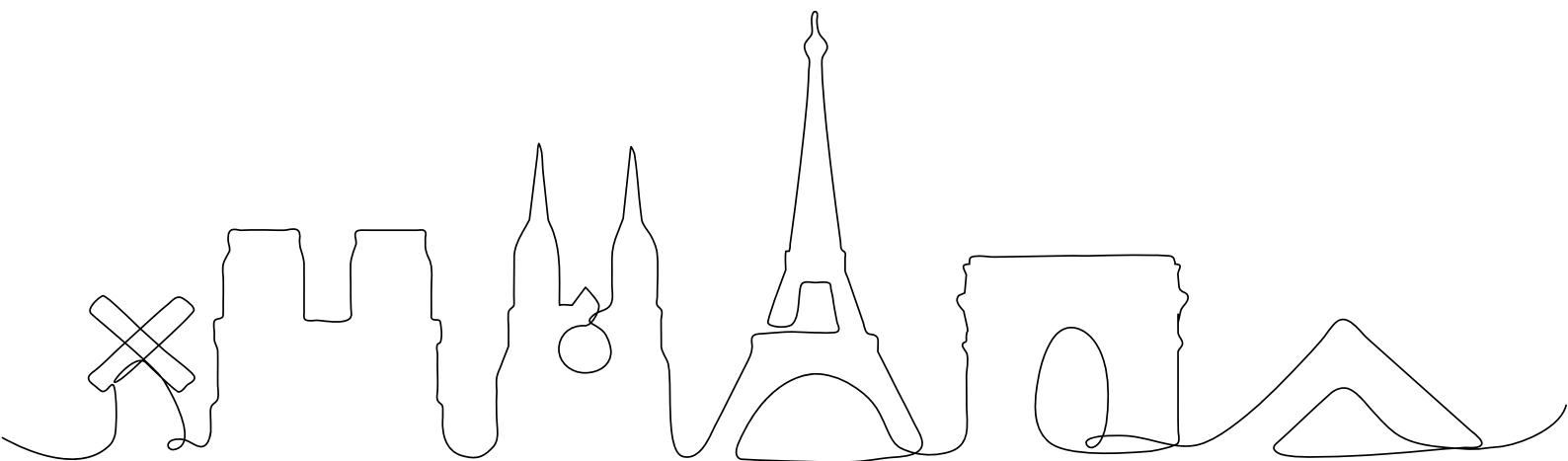


EDF guida il progetto Nuward, la proposta francese per un SMR a tecnologia proprietaria, con ambizioni di esportazione e cooperazione europea.

Parallelamente, la Francia riveste un ruolo centrale nel programma **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor), il più ambizioso progetto globale sulla fusione nucleare, con sede a Cadarache. La partecipazione al consorzio – che coinvolge 33 Paesi tra cui UE, USA, Cina, Russia e India – conferma la proiezione internazionale del Paese nel campo dell'innovazione energetica avanzata.

L'assemblaggio del reattore è in corso, con l'obiettivo di ottenere le prime accensioni sperimentali entro il 2026. ITER rappresenta anche un modello di diplomazia scientifica multilaterale, oltre che una scommessa sulla sostenibilità tecnologica di lungo termine.

Il modello francese si caratterizza per una forte integrazione verticale, in cui soggetti pubblici come EDF, CEA (Commissariat à l'énergie atomique) e Orano coprono l'intera filiera, dalla progettazione al combustibile, fino al decommissioning. Questa struttura garantisce coerenza strategica, economie di scala e una capacità di intervento rapida nelle politiche industriali, rendendo la Francia un partner di riferimento nella costruzione di una filiera europea del nuovo nucleare. Le scelte francesi, in questo senso, influenzano profondamente l'equilibrio tra centralizzazione e sovranità nel contesto energetico dell'Unione [1].



3.2 Germania

La Germania rappresenta uno dei casi più controversi e studiati a livello internazionale in materia di politiche energetiche. Dopo aver completato il phase-out nucleare nel 2023, con la chiusura dei suoi ultimi sei reattori (36 dismessi complessivamente dal 2000), il Paese ha puntato tutto su rinnovabili e gas, rinunciando strutturalmente a una fonte programmabile a zero emissioni. Questa scelta, fortemente influenzata dall'opinione pubblica post-Fukushima e dalla pressione dei partiti verdi, ha generato un modello di transizione particolarmente esposto a rischi di volatilità e dipendenza dalle condizioni atmosferiche.

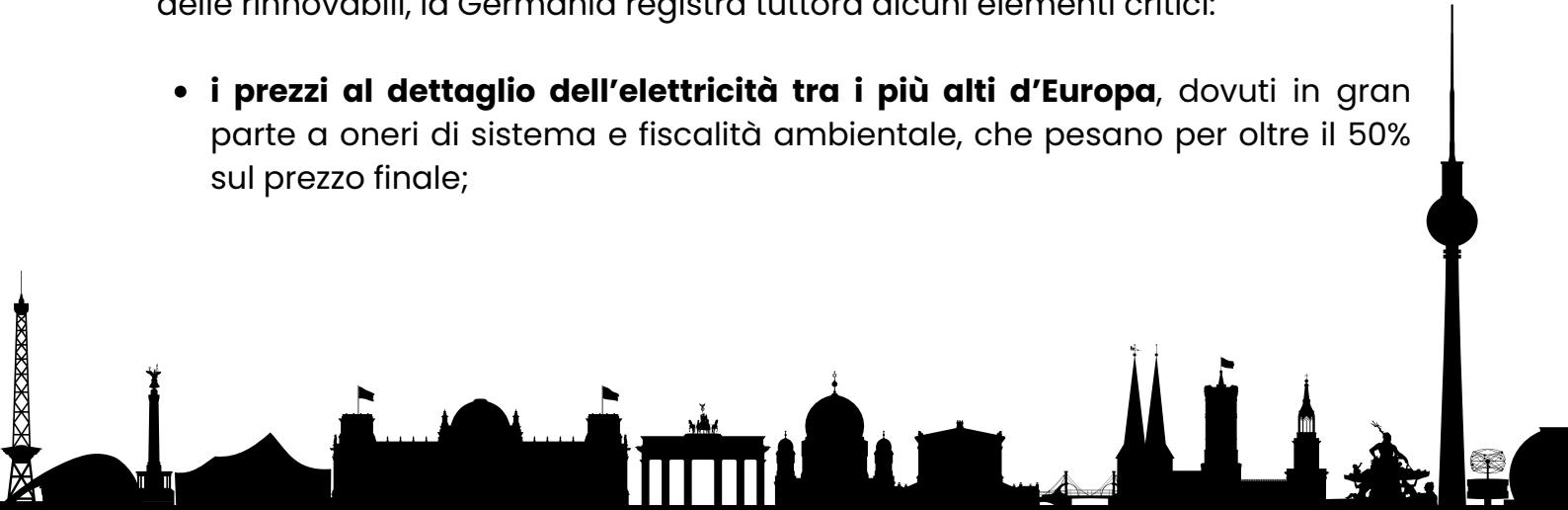
Il mix elettrico tedesco si basa oggi su quattro pilastri principali e cioè eolico, carbone (lignite), gas naturale e solare, come si evince dai dati sotto riportati [24]:

- **Rinnovabili totali: 52%**
 - **Eolico: 31,1%**
 - **Solare: 12,1%**
 - **Biomassa: 8,4%**
 - **Idroelettrico: 3,4%**
- **Fonti fossili:**
 - **Carbone (lignite e antracite): 24,9%**
 - **Gas naturale: 15,1%**
- **Altro (inclusi rifiuti e importazioni): circa 8%**

A livello di sistema, ciò comporta una forte **dipendenza da fonti intermittenti**. Nel **dicembre 2024**, un prolungato periodo di assenza di vento ha determinato un crollo della produzione eolica, costringendo il Paese ad aumentare il ricorso alle centrali a carbone e gas, con impatti immediati sul prezzo dell'elettricità all'ingrosso (oltre 1.000 €/MWh in alcune ore) e su quello finale al consumo [25]. L'episodio ha riaperto il dibattito sul mix ottimale, evidenziando la mancanza di una fonte di back-up stabile e a basse emissioni come il nucleare.

Nonostante l'ambizione della Energiewende e la leadership europea sul fronte delle rinnovabili, la Germania registra tuttora alcuni elementi critici:

- **i prezzi al dettaglio dell'elettricità tra i più alti d'Europa**, dovuti in gran parte a oneri di sistema e fiscalità ambientale, che pesano per oltre il 50% sul prezzo finale;



- **una forte esposizione alla lignite**, nonostante l'impegno per il phase-out al 2038: la centrale a carbone Datteln 4 è stata inaugurata nel 2020 (1.100 MW), mentre altri impianti restano in funzione per garantire la stabilità della rete;
- una domanda elettrica prevista in forte crescita, fino a 700 TWh nel 2030 secondo BDEW, per alimentare 14 milioni di veicoli elettrici, 6 milioni di pompe di calore e 15 GW di elettrolizzatori.

In questo contesto, il nucleare potrebbe rappresentare una soluzione di equilibrio tra decarbonizzazione e sicurezza, anche alla luce del **mutato orientamento dell'opinione pubblica**. Un sondaggio Innofact del 2025 ha rilevato che il 55% dei tedeschi sarebbe favorevole a un ritorno al nucleare, con una maggioranza relativa (32%) favorevole alla costruzione di nuovi impianti. Le differenze territoriali e generazionali restano marcate, ma il tema è tornato centrale nel dibattito politico.

La CDU/CSU ha recentemente proposto una valutazione di fattibilità tecnica e finanziaria per la riattivazione degli impianti più recenti, mentre SPD e Verdi restano contrari a qualsiasi apertura in tal senso. La questione dei rifiuti è gestita attraverso una governance avanzata: il Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) coordina la selezione dei siti e il quadro normativo di lungo termine definito dallo **StandAG**, legge federale che disciplina il deposito geologico finale e la sicurezza radiologica.

Nel complesso, la Germania si confronta con il dilemma di una transizione energetica che ha puntato sull'intermittenza senza dotarsi di una base stabile. L'assenza del nucleare lascia un vuoto tecnologico e sistematico che, alla luce delle sfide future su elettrificazione, domanda e clima, potrebbe diventare sempre più rilevante.



3.3 Nord Europa

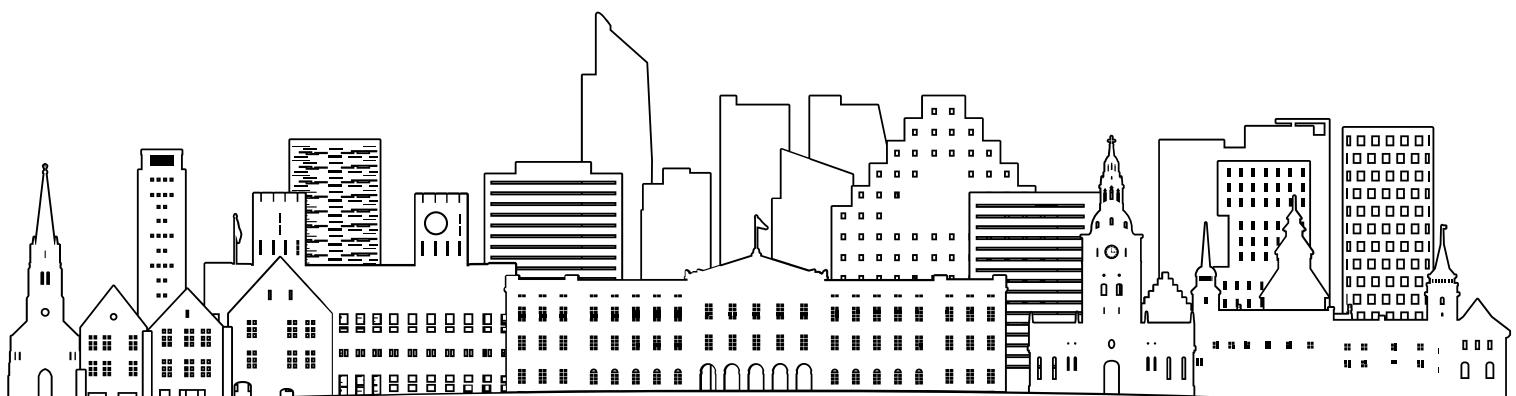
Nel contesto europeo, i Paesi del Nord Europa stanno progressivamente rivalutando il ruolo del nucleare come leva per garantire sicurezza energetica, decarbonizzazione e indipendenza dai combustibili fossili. Pur con traiettorie nazionali differenti, si osserva una convergenza crescente verso l'integrazione del nucleare – anche nella sua forma più innovativa, come gli SMR – all'interno delle rispettive strategie energetiche di lungo periodo [26].

3.3.1 Norvegia

Tradizionalmente esclusa dalle politiche nucleari grazie alla sua abbondante dotazione di idroelettrico, petrolio e gas, la Norvegia ha recentemente aperto un dibattito istituzionale sulla fattibilità dell'energia atomica. Nel giugno 2024, il governo ha istituito un comitato pubblico indipendente con il compito di valutare il potenziale del nucleare nel mix nazionale. Il mandato prevede l'analisi del quadro normativo, della sostenibilità tecnologica ed economica e delle implicazioni ambientali. Pur non esistendo oggi alcun piano operativo per la costruzione di impianti, il tema è tornato al centro dell'agenda politica e scientifica, anche in risposta agli obiettivi climatici a lungo termine e alla crescente domanda di energia elettrica decarbonizzata [26].

3.3.2 Svezia

Dopo una lunga stagione di disimpegno, la Svezia ha formalmente reintegrato il nucleare nella propria strategia nazionale a partire dall'accordo politico di Tidö (ottobre 2022), che ha sostituito l'obiettivo del "100% rinnovabili" con quello del "100% carbon-free". Questo cambio di paradigma ha abilitato un piano di rilancio strutturale: nel novembre 2023 il governo ha pubblicato una roadmap che prevede la costruzione di due nuovi reattori su larga scala entro il 2035 e di un totale equivalente a 10 nuovi reattori entro il 2045, inclusi reattori modulari. In parallelo, è in corso la realizzazione a Forsmark del secondo impianto al mondo di deposito geologico definitivo per combustibile esausto, che sarà finanziato direttamente dall'industria nucleare. La riforma normativa ha inoltre rimosso il limite al numero complessivo di reattori operabili, ampliando le possibilità di localizzazione a nuovi siti [26].



3.3.3 Finlandia

La Finlandia rappresenta oggi uno dei modelli più avanzati di gestione del nucleare in chiave sistematica. Con una quota nucleare superiore al 30% del proprio mix elettrico e l'entrata in funzione del nuovo reattore EPR di Olkiluoto-3 (1.600 MW), il Paese ha consolidato il proprio orientamento pro-nucleare come asse portante della strategia di decarbonizzazione. In parallelo, ha sviluppato la prima infrastruttura al mondo per lo stoccaggio geologico definitivo del combustibile esausto (Onkalo), localizzata nei pressi del sito di Olkiluoto, con avvio operativo previsto per il 2025. L'approccio finlandese si distingue per la coerenza tra sviluppo tecnologico, consenso pubblico e governance istituzionale, rappresentando un benchmark per i Paesi europei che valutano un rilancio del nucleare su basi di sicurezza, trasparenza e accettabilità sociale [26].



3.4 Italia

L'Italia è oggi il **secondo maggior importatore netto di elettricità al mondo**

L'assenza di una produzione nucleare interna, conseguente al referendum del 1987, ha reso il Paese **fortemente dipendente dall'approvvigionamento estero**, esponendolo a una **strutturale vulnerabilità della bilancia energetica** e a **prezzi elettrici stabilmente superiori alla media europea**.

Negli ultimi anni questa condizione ha alimentato **un significativo mutamento dell'opinione pubblica** nei confronti del nucleare. I principali sondaggi mostrano un'evoluzione evidente rispetto al decennio precedente:

Sondaggio / Fonte	Data	Principali risultati / indicazioni
Ipsos / Legambiente, Kyoto Club, Nuova Ecologia	Luglio 2024	Il 75% degli italiani ritiene che il nucleare non sia una valida alternativa — percepito come pericoloso e poco conveniente. (ANSA.it)
Ipsos "Gli italiani e l'energia"	Novembre 2024	L'81% degli intervistati è contrario al ritorno al nucleare, una percentuale in aumento rispetto a giugno dello stesso anno (75%). (greenreport.it)
SWG per Fondazione Lottomatica	Maggio 2025	Circa il 57% guarda positivamente al ritorno del nucleare; il 64% favorevole agli investimenti in nuove generazioni di impianti nucleari. (Finanza Repubblica)
Havas / Repubblica	Giugno 2025	Il consenso verso il nucleare si avvicina al 50% (46%) - ma cresce se viene fornita informazione adeguata, soprattutto riguardo alle tecnologie più recenti. (la Repubblica)
SWG / iWeek	Novembre 2024	Il 48% favorevole alla costruzione di nuove centrali nucleari, 24% contrario; un segmento significativo resta indeciso. (AmbientelnSalute.it)

Tabella 6: Principali sondaggi sull'opinione pubblica nei confronti del nucleare

3.4.1 Quadro regolatorio e istituzionale

Sul piano **regolatorio**, la situazione resta ancora parziale. L'Italia dispone di un inventario previsto di circa **91.000 m³ di rifiuti radioattivi** per i prossimi 50 anni (di cui 1.000 m³ ad alta attività), ma **non è stato ancora individuato il sito del Deposito Nazionale**.

Il progetto prevede un impianto superficiale per i rifiuti a bassa e media attività e un **deposito temporaneo** per quelli ad alta attività.

Sul piano **politico-istituzionale**, invece, si osserva una **decisa accelerazione**.

Il **3 marzo 2025** il Consiglio dei Ministri ha approvato un **disegno di legge delega** che affida al Governo il compito di definire entro 24 mesi **il quadro normativo necessario al rilancio del nucleare civile**.

Il **Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC)**, aggiornato il 3 luglio 2024, prevede uno **scenario di penetrazione nucleare tra l'11% e il 22% della domanda elettrica entro il 2050** (stimata in 583 TWh) [27]. Il piano contempla lo sviluppo di **reattori di III e IV generazione**, inclusi gli **SMR**, con un approccio orientato alla **sicurezza, alla competitività tecnologica e all'autonomia industriale**.

Il quadro normativo in via di definizione include misure per:

- istituire un'Autorità per la sicurezza nucleare;
- incentivare ricerca, formazione e cooperazione internazionale;
- definire procedure autorizzative più snelle e trasparenti;
- gestire in modo integrato il ciclo del combustibile e il decommissioning.

Tra le prime iniziative già operative figura la **costituzione di Nuclitalia**, società partecipata da **Enel, Ansaldo Energia e Leonardo**, nata per **coordinare le competenze industriali e tecnologiche nazionali** nello sviluppo dei reattori modulari di piccola taglia (SMR), in linea con la strategia europea di rilancio del settore.

3.4.2 Fattori di contesto e prospettive

La scelta di riaprire il dibattito sul nucleare si inserisce anche nella necessità di **gestire la crescita esponenziale dei carichi elettrici** legata all'espansione dei **data center**: oltre **160 impianti operativi** e **83 in progetto**, per investimenti stimati fino a **15 miliardi di euro**.

Il fabbisogno del settore è destinato a **raddoppiare tra il 2024 e il 2028**, superando i **1.200 MW**, con effetti rilevanti sulla **resilienza della rete** e sulla domanda di **energia stabile, programmabile e a basse emissioni**.

In tale scenario, la **riattivazione della filiera nucleare italiana** — ricca di competenze in ingegneria, componentistica e sicurezza — rappresenta **una risposta strutturale alle criticità energetiche** e **un'opportunità strategica** per rafforzare la **sovranità energetica**, attrarre investimenti e sostenere la **transizione climatica** con tecnologie **mature e ad alto valore aggiunto**^[28] ^[29] ^[32].

4. Stato attuale ed evoluzioni possibili del mercato nucleare in Europa

4.1 Occupazione del settore nucleare in Europa

Il settore nucleare europeo sostiene un numero consistente di occupati, sia direttamente coinvolti nel nucleo degli impianti sia indirettamente nella filiera. Un'analisi commissionata da Foratom (European Atomic Forum) e realizzata da Deloitte nel 2019 ha stimato che l'industria nucleare UE supporti oltre 1,1 milioni di posti di lavoro e generi più di 500 miliardi di euro di PIL. Questo dato include gli addetti alla generazione elettrica nucleare vera e propria e quelli della filiera connessa (forniture, servizi, R&S, ecc.).

Secondo uno studio della World Nuclear Association (2020), in media **un reattore da 1 GWe** richiede circa **500 addetti** per le **operazioni e la manutenzione** (Operation & Maintenance, O&M); di conseguenza un parco nucleare ipotetico da **3 GWe** necessiterebbe di circa **1.500 addetti** locali dedicati alle O&M. È importante sottolineare che tali lavoratori sono quasi esclusivamente impiegati a livello locale (entro ~20 km dall'impianto), consolidando l'impatto occupazionale sul territorio. In generale, per un parco nucleare da 3 GWe la distribuzione complessiva degli occupati (diretti e indiretti) è stata stimata come segue:

Gestione ed esercizio degli impianti (O&M): **1.500 addetti (15%)**

Filiera di approvvigionamento continuativa (supply chain): **8.200 addetti (80%)**

Attività di costruzione e installazione: **600 addetti (5%)**

Totale complessivo: ~10.300 addetti

La forza lavoro nel nucleare vanta profili altamente qualificati. Solo a titolo d'esempio, oltre il 92% dei dipendenti di China General Nuclear (CGN), grande operatore nucleare cinese, possiede una laurea. Nel contesto europeo, si rileva che l'**82%** degli addetti diretti nel nucleare sono «lavoratori qualificati», con laurea o altra qualifica tecnica. Ciò riflette la complessità delle attività legate al nucleare (ingegneria nucleare, fisica dei reattori, radioprotezione, gestione dei rifiuti, ecc.), che richiedono competenze STEM avanzate. Parallelamente, i salari medi nel nucleare tendono a essere più elevati rispetto ad altri segmenti energetici: nel 2017 i lavoratori nel settore nucleare guadagnano mediamente circa il **33% in più** rispetto a quelli nei settori eolico e solare, sottolineando l'elevato profilo professionale richiesto.

Purtroppo, nonostante gli ultimi anni abbiano visto moltiplicate le iniziative internazionali per attrarre più talenti femminili nel nucleare (tra queste spicca la **IAEA**, che promuove programmi come le borse di studio Marie Skłodowska-Curie e il Lise Meitner Programme per favorire l'ingresso di laureate STEM nel settore nucleare), la forza lavoro di questo settore rimane ancora oggi sbilanciata verso il genere maschile. Nel complesso del settore energetico europeo le donne rappresentano solo circa il **22%** degli occupati, e nel settore nucleare la percentuale femminile è ancora più bassa. Secondo **Women in Nuclear Global**, meno di un quarto dei professionisti nucleari a livello mondiale è di genere femminile, e dati OECD/NEA indicano che nei paesi membri dell'agenzia (OECD NEA) le donne costituiscono solo circa il **20%** della forza lavoro nelle discipline nucleari (STEM).

4.2 Un confronto con le rinnovabili

Il confronto rinnovabili-nucleare non è propriamente corretto.

Le due fonti energetiche non sono equivalenti né per tecnologia, né impatto ambientale, e neanche in termini di costi o tempi di realizzazione.

>> Si parla spesso di queste due fonti come opposte, tuttavia entrambe contribuiscono globalmente alla decarbonizzazione, in maniera complementare.

Se l'energia proveniente da fonti rinnovabili è sicuramente in opposizione e con quella prodotta da fonti fossili, e finalizzata alla loro riduzione, lo stesso non vale per l'energia prodotta con la fissione e (forse) la fusione nucleare.

4.2.1 Come è cresciuta l'energia rinnovabile

Nell'arco temporale di più di vent'anni l'energia da fonti rinnovabili è cresciuta a un tasso altissimo. Nel 2000, meno del 19% dell'energia elettrica prodotta in Italia proveniva da fonti rinnovabili. La percentuale è più che raddoppiata negli anni successivi. Ad oggi, poco meno della metà dell'energia prodotta proviene da fonti rinnovabili: il 49% contro il 51% di fonti fossili [33].

Tra le rinnovabili in Italia, il solare e l'eolico sono le due fonti la cui produzione è aumentata di più. **Fino al 2010 meno dell'1% dell'energia utilizzata proveniva dall'energia solare, mentre nell'ultimo anno essa ha raggiunto più del 13%.** L'idroelettrico ha avuto invece un andamento ondivago, all'interno un'ampia banda di oscillazione che va dal 10%, il minimo raggiunto nel 2007, e il massimo del 21%, raggiunto nel 2014, con oscillazioni legate soprattutto alla variabilità delle condizioni idrologiche e agli effetti della siccità. Se però ci si sposta dall'analisi della sola energia prodotta a quella della potenza installata, il quadro appare diverso. Nel 2008 la capacità idroelettrica era di circa 17,6 GW, mentre nel 2024 ha raggiunto i 21,7 GW, segnalando una crescita costante nel tempo. Questo aumento non è stato determinato da nuove grandi dighe, ormai difficilmente realizzabili per vincoli ambientali e territoriali, ma piuttosto da interventi di revamping, dal potenziamento di impianti esistenti e dall'integrazione di nuovi impianti di piccola taglia (mini-hydro). È quindi evidente il divario tra la crescita della potenza installata e l'andamento della produzione effettiva, fortemente condizionata dal regime delle precipitazioni e dall'impatto del cambiamento climatico sulla disponibilità idrica.

Se ampliamo lo sguardo a livello mondiale, **lo share delle rinnovabili è aumentato fino al 31% rispetto a poco più della metà nel 2000**, soprattutto grazie all'aumento del solare e dell'eolico. A livello europeo, invece, la percentuale di energia proveniente da fonti rinnovabili arriva quasi al 48% e solo il 34% proviene da fonti fossili. Il resto dell'energia è prodotto dal nucleare. La Francia contribuisce ampiamente a spostare l'asticella verso questa fonte, con una produzione che copre più del 70% del fabbisogno.

La produzione elettrica attraverso il nucleare ha quindi un notevole rilievo per permettere all'Europa di centrare l'obiettivo di phase out dai combustibili fossili e al contempo la fonte nucleare sta acquisendo una crescente importanza in Asia. Tuttavia, in termini assoluti, gli USA detengono la maggior capacità operativa (circa 103 GW con 94 reattori sul proprio territorio), ma investono meno in nuovi progetti rispetto a Cina o Europa. La Cina ha 55-58 reattori operativi, con altri 27 in cantiere. Quella che investe di più nella tecnologia è però l'Europa, circa 132 miliardi, e altri 241 miliardi entro il 2050 per il raggiungimento della decarbonizzazione [34].

Complessivamente negli ultimi 20 anni i paesi asiatici hanno avuto una crescita molto più forte, ma senza mai sorpassare il primato indiscusso statunitense e l'altissima produzione francese, tranne la Cina. Il gigante asiatico è passato da una produzione di 74 TWh nel 2010 a più di 434 TWh nel 2023 [35]. In termini di investimenti l'Asia è la capofila di una tendenza che sembra essere anche sotto gli auspici delle grandi istituzioni economico-finanziarie mondiali [36] anche in ragione della crescente necessità di soddisfare imprese energivore connesse allo sviluppo dell'Intelligenza Artificiale (IA).

4.2.2 Il nucleare è un'alternativa alle rinnovabili?

Per una comparazione utile delle varie fonti energetiche è necessario stabilire il confine di analisi di ciò che si sta cercando di studiare, in questo paragrafo si tenterà di analizzare principalmente l'impatto in termini di GWP (Global Warming Potential), senza tralasciare altri indici di impatto significativi, delle diverse fonti di energia primaria, con impianti di conversione energetica, secondo un approccio LCA (Life Cycle Assesmant) con un'analisi C2G (from cradle to grave).

Analizzando quindi le emissioni di CO₂eq sia le fonti rinnovabili che il nucleare ne emettono, seppur indirettamente. I risultati cambiano anche in base agli indicatori scelti, che siano cambiamento climatico, influenza sulla potabilità e disponibilità di acqua, tossicità, radiazioni ionizzanti, occupazione della terra o altro.

In termini di emissioni, il ciclo di vita dell'energia nucleare causa ~5–15 gCO₂eq per kWh, con la maggior parte delle emissioni che si verificano nei processi iniziali dall'estrazione, alla conversione, dall'arricchimento dell'uranio e fabbricazione del combustibile. Il nucleare è la fonte di energia con minori emissioni di CO₂eq, ma rispetto alle fonti rinnovabili dissipava molta più acqua, usata all'interno dei reattori [37].

Nelle tecnologie fotovoltaiche solari (PV) e eoliche, anch'esse di basse emissioni, la maggior parte dei gas serra sono incorporati nelle infrastrutture. Con l'eccezione del silicio policristallino nei pannelli fotovoltaici in alcune regioni, le tecnologie fotovoltaiche generalmente producono tra 15 e 70 gCO₂eq per kWh durante il ciclo di vita, con una media che si attesta intorno a 20–40 gCO₂eq per kWh. Le turbine eoliche offrono emissioni costantemente basse (dai 16 ai 23 gCO₂eq per kWh, in base al tipo di tecnologia analizzata).

Secondo i dati UNECE [38], l'energia solare fotovoltaica richiede una quantità maggiore di materie prime per ogni megawattora prodotto rispetto all'energia nucleare, principalmente a causa della minore densità energetica e della natura intermittente della fonte solare.

I dati non includono l'uso di terre rare, che però ha un impatto marginale nel fotovoltaico: un'eventuale inclusione difficilmente modificherebbe il confronto a sfavore del nucleare. Questo perché come riportato nel grafico sottostante (Figura 5) l'inclusione di queste tipologie di materie prime critiche potrebbe solo peggiorare la posizione del fotovoltaico nei confronti del nucleare.

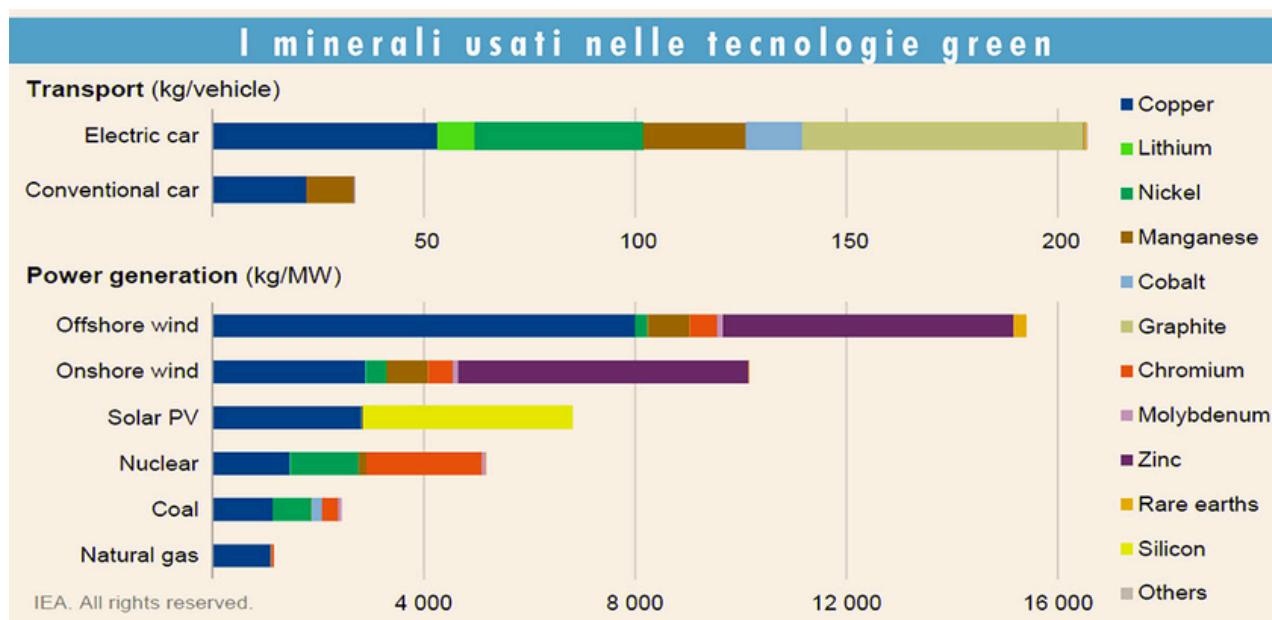


Figura 5: Materie prime critiche necessarie in kg per unità di veicolo o per MW installato

Tuttavia, secondo l'UNECE la valutazione degli impatti ambientali nel contesto di un singolo anno non è sufficiente per supportare politiche a lungo termine, perché la transizione energetica è in corso d'opera, e i modi di produzione potrebbero subire cambiamenti radicali, e avere un profilo ambientale significativamente diverso nel 2050.

Inoltre, alcune organizzazioni ambientaliste criticano la validità di certi risultati, poiché non tutte le tipologie di emissioni sono considerate nei calcoli per il nucleare a causa dell'assenza di dati.

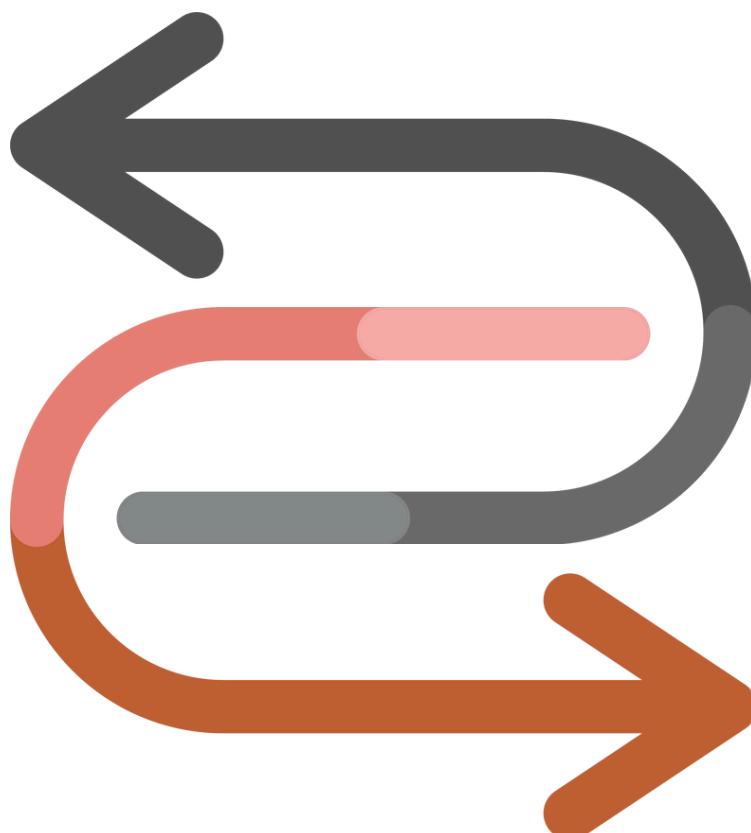
4.2.3 Il nucleare come back-up plan

Ogni sistema elettrico presenta una domanda minima costante di energia, detta carico di base (base load), che rappresenta il livello di consumo elettrico che si mantiene stabile durante tutte le ore del giorno, anche nei periodi di bassa domanda. Questo parametro è rilevante per la pianificazione energetica, poiché richiede capacità di generazione in grado di operare in modo affidabile e continuo.

Tra le fonti rinnovabili in grado di garantire questo servizio, c'è solo l'idroelettrico. Comunemente, infatti, per coprire questi bisogni, vengono usate le centrali termoelettriche a carbone o gas, e, per chi ne dispone, le centrali nucleari. Considerando questo, la scelta del nucleare potrebbe apparire preferibile rispetto al gas e addirittura il carbone [39].

La costruzione, in Italia o altrove, di centrali nucleari dovrebbe essere anzitutto preceduta dalla corretta pianificazione delle fonti energetiche, soprattutto per evitare di investire tutto in un'unica fonte senza avere una corretta diversificazione delle fonti, con una road map ben definita, al fine di evitare il riprodursi di episodi come quello spagnolo dello scorso aprile [40] oppure in Francia, dove l'elevata concentrazione del parco di generazione sull'energia nucleare, ha reso il sistema vulnerabile in fase di manutenzione e revamping degli impianti esistenti, determinando criticità nella disponibilità di energia [41].

Tali situazioni evidenziano l'importanza di una pianificazione energetica resiliente, capace di anticipare e gestire i cicli di vita tecnologici delle diverse fonti.



Proposte di Policy

Perché il nucleare possa contribuire in modo stabile e sostenibile alla transizione energetica europea, **è necessario un approccio coordinato che coniughi sicurezza, innovazione e competitività industriale.**

In questa direzione, le seguenti proposte di policy delineano un percorso realistico e progressivo per valorizzarne il ruolo nel quadro energetico italiano ed europeo, rafforzandone la governance, la sicurezza e l'integrazione con gli obiettivi di transizione verde.

Proposte di policy internazionali

L'evoluzione del nucleare non può essere affrontata in modo isolato: la dimensione transfrontaliera delle tecnologie, della sicurezza e della gestione dei materiali impone una governance multilivello, in cui l'Italia e l'Unione Europea assumano un ruolo attivo nella definizione di standard comuni e strumenti di cooperazione.

In questa prospettiva, le proposte che seguono mirano a consolidare il quadro normativo e istituzionale internazionale, rafforzando sicurezza, trasparenza e competitività tecnologica a livello globale. I principali ambiti di intervento individuati sono i seguenti:

>> Un rafforzamento della governance multilaterale e della sicurezza nucleare globale

Un primo asse d'azione riguarda la necessità di aggiornare il quadro internazionale di regole sulla sicurezza e sulla non proliferazione. Le convenzioni oggi vigenti – dalla Convention on Nuclear Safety (1994) a quella sulla gestione del combustibile esaurito (1997) – fissano principi comuni, ma lasciano ampio margine di discrezionalità agli Stati. È auspicabile un loro riesame coordinato sotto l'egida della IAEA, per introdurre standard minimi globali vincolanti e uniformare i requisiti tecnici di progettazione, costruzione e decommissioning degli impianti.

Parallelamente, dovrebbero essere previsti incentivi concreti all'adesione e al rispetto dei trattati, offrendo accesso agevolato a fondi internazionali e assistenza tecnica ai Paesi che dimostrano impegno nel recepimento delle convenzioni;

>> Una maggiore garanzia in termini di sicurezza e trasparenza nella gestione transfrontaliera dei materiali nucleari

La tracciabilità dei rifiuti radioattivi resta frammentata e gestita in modo eterogeneo. Si propone l'istituzione di un database globale gestito dall'IAEA, aggiornato annualmente e vincolante per gli Stati membri, per assicurare la trasparenza su quantità, tipologia e ubicazione dei rifiuti.

A questo si aggiunge la necessità di introdurre standard tecnici minimi per la costruzione e manutenzione dei depositi definitivi, nonché di rendere obbligatoria una Valutazione d'Impatto Ambientale transfrontaliera per i nuovi siti prossimi ai confini nazionali.

Per il trasporto di materiali radioattivi, la proposta mira a creare unità di sicurezza multinazionali incaricate di scortare i convogli e a implementare sistemi di tracciamento in tempo reale lungo i principali corridoi logistici europei;

» Riformare il quadro istituzionale europeo

L'Unione Europea dovrebbe aggiornare il mandato di Euratom, ampliandone le competenze per includere il supporto diretto alla transizione energetica, in particolare per la diffusione degli SMR e per la produzione di idrogeno di origine nucleare.

Un quadro normativo armonizzato per le licenze e la regolamentazione degli impianti ridurrebbe le disparità oggi esistenti tra Stati membri. Inoltre, come suggerito dal Rapporto Draghi, la politica industriale europea deve evolvere da approccio prescrittivo a strategia proattiva, in cui gli obiettivi climatici siano accompagnati da strumenti di competitività, semplificazione normativa e compatibilità con le regole di concorrenza.

Proposte di policy nazionali

Perché la partecipazione italiana al rinascimento nucleare europeo sia credibile, è necessario consolidare una base solida a livello nazionale, fondata su regole chiare, capacità istituzionale e valorizzazione del capitale umano.

In questa direzione, le proposte che seguono delineano una strategia integrata che unisce pianificazione, innovazione e formazione, con l'obiettivo di rafforzare le fondamenta del sistema energetico italiano e consentire al Paese di contribuire in modo attivo e competente allo sviluppo di tecnologie nucleari sicure e sostenibili.

I seguenti ambiti d'intervento rappresentano le priorità su cui concentrare l'azione nazionale nei prossimi anni.

» Sviluppare una Strategia Nazionale per l'Energia Nucleare

L'Italia necessita di un piano organico che reintegri il nucleare nel percorso di decarbonizzazione e sicurezza energetica.

La definizione di una **Strategia Nazionale per l'Energia Nucleare** dovrebbe costituire il quadro di riferimento per tutti gli interventi pubblici e privati del settore. Il piano dovrà:

- individuare obiettivi di medio-lungo periodo, coerenti con la neutralità carbonica al 2050 e con le priorità del PNIEC;
- stabilire una **roadmap temporale** per lo sviluppo di impianti di nuova generazione, la gestione del combustibile e dei rifiuti, la formazione di competenze e la ricerca;

- prevedere la creazione di un gruppo di lavoro interministeriale (MASE, MIMIT, MIUR) incaricato del coordinamento tecnico e dell'aggiornamento quinquennale del piano;
- integrare il nucleare all'interno del mix energetico nazionale, riconoscendone il ruolo di tecnologia di base a supporto della sicurezza e della competitività del sistema elettrico.

» Promuovere la sperimentazione degli Small Modular Reactors (SMR)

Gli SMR rappresentano la principale opportunità per un ritorno graduale e sostenibile del nucleare in Italia. Occorre avviare una fase pilota per testarne la fattibilità tecnica, economica e sociale. Le azioni prioritarie includono:

- **individuare siti idonei** alla costruzione dei primi impianti dimostrativi, privilegiando aree con infrastrutture esistenti o interessate da programmi di decommissioning;
- **costruire partenariati pubblico-privati** tra imprese italiane e operatori internazionali per la progettazione, la produzione di componenti e la gestione operativa;
- **accedere ai fondi europei** dedicati alle tecnologie nucleari innovative – in particolare quelli previsti dal *Net-Zero Industry Act* e dai programmi *Horizon Europe* – per sostenere la fase di ricerca, sviluppo e industrializzazione.

» Rafforzare la capacità istituzionale e regolatoria

Il ritorno al nucleare richiede una struttura di governo forte e indipendente. Si propone l'istituzione di un'**Autorità Nazionale per la Sicurezza Nucleare**, autonoma dal potere politico e con competenze specifiche in materia di:

- autorizzazione e licensing dei nuovi impianti;
- vigilanza su sicurezza, radioprotezione e gestione dei rifiuti;
- coordinamento delle procedure di emergenza e protezione civile;
- adozione di **meccanismi di peer review internazionale** per garantire il continuo allineamento agli standard dell'IAEA e dell'ENSREG.

Un'istituzione di questo tipo consentirebbe di assicurare trasparenza decisionale, uniformità regolatoria e credibilità verso partner e investitori.

» **Potenziare la filiera formativa e la ricerca tecnico-scientifica**

L'Italia dispone di competenze storiche nel nucleare, ma oggi frammentate e in declino. È necessario riattivare una **filiera formativa e di ricerca integrata**, capace di generare le professionalità richieste da un settore in espansione.

Le principali linee d'azione comprendono:

- la creazione di **nuovi corsi di laurea e laurea magistrale** in fisica dei reattori, sicurezza e radioprotezione, nonché in tecnologie emergenti (SMR, reattori di IV generazione, fusione);
- la promozione di **percorsi ITS biennali** per tecnici specializzati in sistemi energetici e nucleari, sviluppati in collaborazione con imprese e laboratori di ricerca;
- la definizione di **nuovi profili professionali riconosciuti a livello nazionale**, come il "Tecnico Superiore in Sistemi e Sicurezza Nucleare", con attività pratiche in laboratori e progetti applicativi;
- la creazione di **programmi interuniversitari e partenariati internazionali**, favorendo lo scambio di ricercatori e studenti con i principali centri di eccellenza europei.

» **Favorire il rientro e la mobilità dei talenti italiani**

Per invertire la perdita di capitale umano e scientifico, l'Italia deve tornare ad attrarre i propri professionisti del nucleare. Si propongono misure mirate a stimolare la mobilità e il rientro dei ricercatori italiani dall'estero:

- l'istituzione di **bandi di rientro e fellowship tematiche** per progetti su SMR, fusione e waste management, con contratti pluriennali e dotazioni dedicate;
- l'adozione di **incentivi fiscali e contributivi** per imprese e istituti che assumono ricercatori rientrati o provenienti da esperienze internazionali;
- la semplificazione del **riconoscimento dei titoli e delle esperienze professionali** acquisite all'estero;
- la promozione di **reti di cooperazione scientifica** tra università italiane e centri europei per garantire continuità alle collaborazioni e progetti congiunti.

Indice delle figure e delle tavelle

Figura 1: Stadi della filiera in cui è presente il contributo italiano

Figura 2: Stadi in cui risulta significativo il ruolo delle aziende italiane

Figura 3: Ciclo del combustibile nucleare dall'estrazione allo smaltimento, passando per il recupero. Fonte: Pennsylvania State University Radiation Science and Engineering Center (public domain)

Figura 4: Pubblicazioni scientifiche in ingenieria nucleare per volume di ricerca sul tema tra il 2021 e il 2023 (pubblicazioni per 100.00 abitanti), Fonte: TEHA Group, 2024

Figura 5: Materie prime critiche necessarie in kg per unità di veicolo o per MW installato

Tabella 1: Differenti tipi di tecnologie per la generazione di energia nucleare a confronto

Tabella 2: Numero di aziende per servizio o prodotto funzionale alla costruzione e mantenimento di una centrale nucleare, Fonte: elaborazione TEHA Group su dati Istat, Aida e fonti varie, 2024

Tabella 3: Sintesi delle principali aziende italiane coinvolte per progetti e componenti afferenti al nucleare

Tabella 4: Sintesi dei principali stadi di trattamento ed esportazione del combustibile nucleare

Tabella 5: differenze tra diversi combustibili nucleari a seconda dell'arricchimento di uranio

Tabella 6: Principali sondaggi sull'opinione pubblica nei confronti del nucleare

Bibliografia

- [1] T. E. H. Ambrosetti, «Il nuovo nucleare in italia per i cittadini e le imprese: Il ruolo per la decarbonizzazione, la sicurezza energetica e la competitività,» Studio sponsorizzato da Edison ed Ansaldo Nucleare, Settembre 2024.
- [2] «Breaking new ground in the EPC supply chain,» *World Nuclear News (WNN)*, 6 Settembre 2024.
- [3] S. C. A. C. A. D. P. e. M. M. Andrea Montanino, «Il dibattito sul nucleare in Italia: stato dell'arte e prospettive,» Cassa Depositi e Prestiti (CPD), 10 Marzo 2025.
- [4] [SIMIC, «Pagina Aziendale – product category» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [5] [Arvedi AST – Terni, «Pagina Aziendale – Prodotti e Servizi» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [6] [Tecnotubi raccordi, «Sito Aziendale – Prodotti speciali» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [7] [Walter Tosto, «Sito Aziendale – Prodotti» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [8] [Ansaldo Energia, «Sito Aziendale» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [9] [Officine Meccaniche Zanetti, «Sito Aziendale» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [10] [ATB Group, «Sito Aziendale» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].
- [11] [Mangiarotti – Westinghouse Italia, «Sito Aziendale – Prodotti» \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 2025 Luglio 09].
- [12] [C. s. e. p. MASE – Gruppo di Lavoro 1, «PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE» 2023. \[Online\]](#),
[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[13] Sole 24ore, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[14] A. Superconductors, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[15] Divertor Tokamak Test facilities [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[16] ISPI – Istituto per gli Studi di Politica Internazionale, 03 Agosto 2023, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[17] Aspenia Online, 13 Novembre 2013, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[18] Cameco, «Sito Aziendale – Businesses» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[19] A. N. Laboratory, «RECYCLING USED NUCLEAR FUEL FOR A SUSTAINABLE ENERGY FUTURE,» U.S. Department of Energy.

[20] L. Lavecchia e A. Pasquini, «L'atomo fuggente: analisi di un possibile ritorno al nucleare in Italia,» Banca d'Italia, Roma, 2025.

[21] Politecnico di Milano, PoliMi, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[22] Consiglio Nazionale degli Ingegneri (CNI) – Dipartimento Centro Studi, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[23] Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[24] SIET spa, «SIET, una realtà nazionale nella qualifica dei componenti nucleari» 2023, [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[25] C. E. Wire, «Germany's energy consumption and power mix in charts» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[26] C. E. Wire, 13 Dicembre 2024. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[27] F. S. Daniela Palma, « Evoluzione e tendenze della spesa pubblica in ricerca energetica nello scenario mondiale ed europeo» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[28] Forbes, «Energia nucleare in Italia: un mercato da 46 miliardi e 117.000 nuovi posti di lavoro,» 04 Marzo 2025. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[29] E. Y. (EY), «Nucleare Italia: Il punto della situazione» 2025. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[30] La Repubblica, "Ilva, perdite e guai," 4 Novembre 2019. [Online].

[Consultato il giorno 06 Giugno 2025].

[31] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), "La situazione energetica nazionale 2023," 2024. [Online].

[Consultato il giorno 10 Giugno 2025]

[32] E. Y. (EY), «Energia nucleare in Italia: un mercato da 46 miliardi entro il 2050,» 03 Marzo 2025. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[33] C. D. e. P. (CDP), «Il dibattito sul nucleare in Italia: stato dell'arte e prospettive,» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[34] E. - E. D. Explorer, «The latest electricity demand, generation, capacity and CO2 data by country, available freely and easily to help others speed up the electricity transition.» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[35] C. Europea, «La Commissione valuta il fabbisogno di investimenti nucleari entro il 2050,» 13 Giugno 2025. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[36] «Top Nuclear Power Production Worldwide, 2000–2023» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[37] [Financial Times](#), [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[38] T. e. L. p. e. X. C. (. p. c. e. T. C. d. d. VIII Commissione (Ambiente, «Indagine conoscitiva sul ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica e nel processo di decarbonizzazione» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[39] [UNECE – UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE](#), «[Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources](#),» 2022. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[40] [Aspenia](#), «[si fa presto a dire nucleare](#)» 2025. [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[41] [Q. Energia](#), «[Blackout in Spagna, il report del governo assolve le rinnovabili](#)» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[42] [Q. Energia](#), «[Tutte le fragilità del nucleare francese](#)» [Online].

[Consultato il giorno 09 Luglio 2025].

[43] <https://www.asgsuperconductors.com/progetto/iter-tfc>

[44] <https://www.media.enea.it/comunicati-e-news/archivio-anni/anno-2025/energia-fusione-completati-gli-alimentatori-delle-bobine-del-dtt.html>

[45] [Commissione Europea](#), «[A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050](#)» Bruxelles, 2011. [Online].

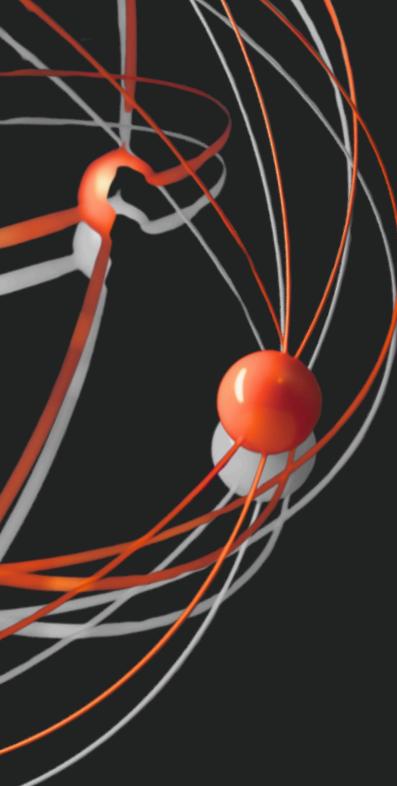
[Consultato il giorno 26 Ottobre 2025].

[46] [Commissione Europea](#), «[Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy](#)» Bruxelles, 2010. [Online].

[Consultato il giorno 26 Ottobre 2025].

[47] [Commissione Europea](#), «[A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy](#)» Bruxelles, 2015. [Online].

[Consultato il giorno 26 Ottobre 2025].



ΔWARE

www.awarethinktank.it

info@awarethinktank.it

