



Rendiconti  
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL  
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,  
Matematica e Scienze Naturali*  
141° (2023), Vol. IV, fasc. 1, pp. 123-126  
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-55-3

## Il possibile contributo dell'energia nucleare alla transizione energetica e alla decarbonizzazione

STEFANO ARGIRÒ

Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare; CERN  
E.mail: stefano.argiro@unito.it

**Abstract** – Starting from the '60 of the last century nuclear energy seemed to be a viable option, especially cost-wise, toward the production of electrical energy in large quantities, while reducing the dependency from fossil fuels. This energy source is effectively “alternative” and “carbon free”, and as such it deserves great attention in the current socio-economical context, where de-carbonizing has become a planetary emergency. In contrast, this “nuclear renaissance” is not acquiring momentum, at least in Europe. Paradoxically, France has brought online 56 power reactors in 15 years starting from 1970, while the first and only generation 3 reactor in the country required nearly the same amount of time.

In this contribution we will recall the key elements in the field, refreshing the physics case, touching the history of this way to energy production, and discussing some controversial aspects. Finally, we will attempt a brief outlook at the possible developments that future research can turn into commercial realities.

**Keywords:** Nuclear reactor, carbon-neutral power generation, nuclear fission.

**Riassunto** – A partire dagli ultimi anni '60 del secolo scorso il nucleare offriva prospettive interessanti, soprattutto dal punto di vista economico, verso la produzione di grandi quantità di energia elettrica, diminuendo la dipendenza dai combustibili fossili. Questa fonte è a tutti gli effetti “alternativa” e “carbon free” e, dunque, merita grande attenzione nell'attuale contesto ecologico e socioeconomico, dove la de-carbonizzazione è diventata una emergenza planetaria. Tuttavia, almeno in Europa, questa “nuclear renaissance” tarda ad acquisire momento. Pensiamo, ad esempio, che la Francia ha messo in operazione 56 reattori in 15 anni a partire dalla metà degli anni '70 del secolo scorso, mentre lo stesso lasso temporale sfiora l'ammontare del ritardo accumulato dal primo reattore di terza generazione.

Nel presente contributo cercheremo di fornire gli elementi di lettura di questa tematica, ricordando brevemente le basi di Fisica, ripercorrendo la storia di questa modalità di produzione di energia, toccandone gli aspetti controversi. Infine, daremo una breve panoramica sulle possibili prospettive future che la ricerca può far divenire realtà commerciali.

**Parole chiave:** Reattore nucleare, de-carbonizzazione, generazione di energia, fissione nucleare.

## Principi Fisici

La somma delle masse di due nuclei di Palladio 119 è minore della massa di un nucleo di Uranio 238, il quale idealmente si può scindere nei due nuclei di Palladio. Nel processo di fissione, la differenza di massa tra nucleo fissile e prodotti di fissione, dell'ordine di 200 MeV, si trasforma in energia che viene rilasciata principalmente sotto forma di energia cinetica dei frammenti di fissione. Il processo di fissione dell'Uranio 235 viene innescato dall'assorbimento di un neutrone, e risulta, oltre che nella produzione dei *prodotti di fissione*, ovvero i due frammenti nucleari, nella emissione di due o tre neutroni. Fu subito chiaro (ad esempio a Leo Szilard) che questi neutroni in eccesso avrebbero potuto sostenere una reazione a catena, con applicazioni alla produzione di energia e di ordigni bellici.

La fissione nucleare fu scoperta a Berlino da Otto Hahn e Fritz Strassmann alla fine del 1938. Alla comprensione del fenomeno contribuirono in maniera fondamentale Lise Meitner e Otto Frisch, che dovettero rifugiarsi in Svezia in seguito alla promulgazione delle leggi razziali. Purtroppo, Enrico Fermi, con i suoi "ragazzi" di via Panisperna, aveva osservato il fenomeno, ma ne aveva data una interpretazione errata.

In natura esistono due isotopi dell'Uranio: il 235 e il 238, con abbondanze del 0.7% e 99.3% rispettivamente. L'Uranio 235 ha una sezione d'urto per neutroni termici di circa 580 barn e di alcuni barn per neutroni veloci. L'Uranio 238 non fissiona per neutroni termici, ma solo per neutroni veloci, con sezione d'urto di alcuni barn. I neutroni emessi nel processo di fissione hanno energie attorno al MeV, ovvero sono neutroni veloci: Fermi si rese conto che, per sostenere una reazione a catena, bisognava rallentare i neutroni (da cui i famosi aneddoti sulle differenze misteriose tra esperimenti condotti su tavolo di marmo piuttosto che di legno e sulla vasca della fontana dell'istituto con i suoi pesci rossi). Come *moderatore* di neutroni scelse la grafite, che riuscì ad ottenere in forma sufficientemente priva di contaminanti.

## Reattori moderni

Ad oggi la grande maggioranza dei reattori nucleari di potenza sono di tipo BWR, Boiling Water Reactor, o PWR, Pressurized Water Reactor. In entrambi i casi si usa combustibile costituito da Uranio arricchito al 5% circa, ovvero la percentuale di Uranio 235 è stata artificialmente aumentata rispetto all'Uranio naturale. L'Uranio è contenuto in cilindretti di ceramica, i quali vengono a loro volta impilati in barre di zirconio e le barre rag-

gruppate in elementi di combustibile. Un cilindro di acciaio, il *vessel*, racchiude le barre di combustibile, contiene acqua e, inoltre, le barre di controllo, costituite di materiale fortemente assorbente per neutroni, come ad esempio il cadmio, che possono essere inserite più o meno a fondo nel nocciolo modulando il potere assorbente. L'acqua funge sia da moderatore di neutroni sia da refrigerante. Nel BWR, l'acqua diventa vapore nel nocciolo e il vapore viene estratto per alimentare le turbine. Nel PWR la pressione elevata impedisce l'ebollizione dell'acqua del circuito primario, che viene portato a scambiare calore con un circuito secondario dove, invece, l'acqua vaporizza e alimenta le turbine. Nei due casi, il vapore, dopo le turbine, viene fatto condensare usando acqua da lago, mare o fiume, oppure utilizzando torri di raffreddamento e, così, il circuito si chiude.

## Nucleare in Italia

In Italia abbiamo avuto, limitandoci agli impianti di potenza, due reattori BWR (Caorso, Garigliano), un reattore PWR (Trino Vercellese) e un reattore raffreddato a CO<sub>2</sub> (MAGNOX). Notare che tutti questi impianti erano estremamente all'avanguardia per l'epoca, collocando l'Italia tra le nazioni pioniere nell'utilizzo dell'energia nucleare per scopi civili. Trino, un impianto da 260 MW elettrici, fu costruita in tre anni ed entrò in funzione nel 1965, consumò 4,6 tonnellate di uranio e fu fermata nel 1987 in seguito a referendum. Caorso poteva raggiungere 860 MW. Entrambi gli impianti funzionarono molto bene e non registrarono particolari incidenti, venendo fermati per ragioni politiche ben prima della data programmata di fermo macchine.

## Caratteristiche dell'energia nucleare

La produzione di energia elettrica dall'Uranio presenta alcune caratteristiche interessanti. La potenza erogabile rispetto allo spazio occupato è molto alta: ad oggi si costruiscono reattori della potenza di 1.6 GW, occupando una superficie totale di poco superiore al km<sup>2</sup>. L'efficienza di utilizzo del combustibile è altissima, attorno a 50 TWh per tonnellata di combustibile (dove il carbone ne richiederebbe oltre 20000). Siccome è richiesto relativamente poco combustibile e il ciclo del combustibile dura 18 o 24 mesi, il prezzo del minerale grezzo ha poco impatto sul costo finale dell'energia elettrica prodotta tramite nucleare (diversamente da gas naturale, carbone, etc.). La disponibilità di energia è 24/7, salvo i periodi di ricarica del combustibile, con alta stabilità e affidabilità e con un *carbon footprint* estremamente basso.

Il tema della sostenibilità è un po' più complesso. Le riserve di Uranio oggi conosciute ammontano a circa 20 Mt, che al tasso di consumo attuale sarebbero sufficienti per appena un centinaio di anni. C'è però da rilevare che la ricerca di nuovi giacimenti, che non è stata particolarmente intensa negli ultimi anni, potrebbe portarne alla luce di nuovi. Inoltre, nuove fonti uranifere (es. fosfati), che non sono al momento sfruttate per il costo poco competitivo rispetto a fonti convenzionali, possono diventare vantaggiose. Infine, l'acqua di mare contiene 3 mg di Uranio per m<sup>3</sup>: l'Uranio contenuto negli oceani potrebbe bastare all'umanità per miliardi di anni, ma il processo di estrazione attualmente non è competitivo economicamente, anche se potrebbe diventarlo in futuro.

Nuovi sviluppi nei reattori, come diremo meglio in seguito, possono far diventare più efficiente il ciclo del combustibile. I reattori a neutroni veloci diminuiscono di un fattore 60 la quantità di combustibile richiesto per produrre una data quantità di energia.

È inoltre in studio la possibilità di utilizzare come combustibile il Torio che è almeno tre volte più abbondante dell'Uranio sulla crosta terrestre.

Utilizzando tutte o alcune delle soluzioni prospettate nell'ultimo paragrafo, l'energia nucleare da fissione può essere considerata sostenibile: le risorse di minerale si esaurirebbero in vari miliardi di anni al tasso di consumo attuale.

### Il combustibile esausto

Il problema delle cosiddette "scorie" radioattive costituisce accesa materia di dibattito. Un impianto nucleare produce un notevole volume di materiale che le legislazioni vigenti considerano classificato, in ottemperanza a un sano principio di precauzione. La componente che va trattata con maggior cautela è, però, senza dubbio costituita dal combustibile esausto. Alla fine del ciclo il combustibile, inizialmente debolmente radioattivo per il decadimento alfa dell'uranio, diventa estremamente caldo a causa dei prodotti di fissione, quasi tutti instabili, alcuni, in primis il Cesio 137, emettitori gamma. Quando il combustibile esausto viene scaricato, viene lasciato raffreddare in piscine per un periodo di tempo che varia a seconda delle scelte operate per il ciclo del combustibile. In seguito, si può decidere di procedere al riciclo: delle 20 tonnellate all'anno di combustibile usato da un reattore di potenza, 19.2 sono ancora Uranio, 0.2 tonnellate sono costituite di elementi transuranici e 0.6 tonnellate sono prodotti di fissione. La maggior parte dei prodotti di fissione decade entro poco più di un centinaio d'anni, mentre gli attinidi minori, pur presentan-

do livelli di attività più modeste, rimangono radiotossici (per ingestione) per centinaia di migliaia di anni.

L'Uranio ed il Plutonio possono essere utilizzati (come fa la Francia) per produrre nuovo combustibile. Se si pensa di separare l'Uranio dagli altri componenti che abbiamo citato, il volume di "scorie" diventa relativamente modesto: dell'ordine di una tonnellata all'anno per reattore. Questo materiale può essere messo in sicurezza attraverso il processo di vetrificazione in borosilicati, che lo rende insolubile, e immagazzinato in depositi geologici. Ad oggi, pochissimi paesi hanno individuato siti dove costruire tali depositi e sono riusciti a metterli in funzione, a causa della forte opposizione dell'opinione pubblica.

Da quando è possibile produrre energia elettrica tramite il nucleare, sono stati prodotte 390000 tonnellate di combustibile esausto (prima del processamento), ovvero 20500 m<sup>3</sup>. Questi numeri vanno confrontati, ad esempio, con 35 Mt di "hazardous waste" prodotto annualmente dagli USA, o con i 37 Gt (miliardi di tonnellate!) di CO<sub>2</sub> immessi in atmosfera solo nel 2021.

### La quarta generazione e sviluppi futuri

Il Generation IV forum ha individuato sei concetti di impianto nucleare che rispondono a criteri di sostenibilità, non-proliferazione di armi, sicurezza, gestione ottimale del ciclo del combustibile. Tre di questi disegni sono reattori a neutroni termici, tre con spettro veloce. Sono principi piuttosto generali che possono essere implementati in vari modi, ad esempio con impianti molto potenti o con reattori di piccole dimensioni. I disegni a spettro veloce, in particolare, permetterebbero un uso estremamente efficiente del combustibile (circa 60 volte rispetto a un PWR standard) e il combustibile esausto avrebbe ridotto contenuto di attinidi minori, che costituiscono il residuo radioattivo a più lunga emivita. Una certa enfasi è emersa recentemente per gli Small Modular Reactors (SMR), che potrebbero operare per circa 30 anni senza ricarica ed essere costruiti in serie, in modo da renderli più economici, veloci da costruire e da licenziare.

### Un esercizio: possibile scenario energetico italiano carbon-free con l'aiuto del nucleare

In Italia, nel 2020, sono stati consumati 300 TWh di energia elettrica, di cui il 40% tramite fonti rinnovabili e carbon-free. Per rendere carbon-free i restanti 180 TWh, utilizzando centrali nucleari, occorrerebbero circa 12 reattori EPR da 1.6 GW (la Francia ne ha 56, USA 92, Cina 53).

Dobbiamo però tenere conto che per elettrificare

completamente il parco auto avremmo bisogno di altri 64 TWh, considerando una percorrenza media di 6700 km a persona all'anno. Rimane inoltre da considerare il problema del trattamento aria (riscaldamento/raffrescamento) che ad oggi impiega circa 40 KWh al giorno per persona. Ipotizzando ottimisticamente che, con l'utilizzo di pompe di calore elettriche e migliorando l'isolamento degli edifici, questo numero diventi 10 KWh al giorno per persona, restiamo con circa 220 TWh da aggiungere al nostro conto. Il fabbisogno da coprire con il nucleare ammonterebbe a circa 450 TWh all'anno, ovvero una trentina di reattori.

Naturalmente auspichiamo un aumento della potenza installata sfruttando fonti rinnovabili che ridurrebbe questo numero.

### **Conclusioni**

L'energia nucleare ha vantaggi e svantaggi, come tutte le altre fonti energetiche. Gli incidenti di Chernobyl e

poi Fukushima hanno certamente lasciato una forte impressione nell'opinione pubblica, che a lungo la ha considerata con diffidenza. La politica ha spesso agito secondo logiche elettorali piuttosto che scientifiche. Tuttavia, ad oggi ci troviamo nella situazione di dover ridurre drasticamente e in poco tempo le emissioni di CO<sub>2</sub>, pena l'aumento insostenibile della temperatura del pianeta. L'opzione nucleare va considerata con attenzione, alla luce di quanto abbiamo riportato in questo contributo.

### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] David Bodansky, "Nuclear Energy Principles, Practices, and Prospects", Springer-Verlag New York 2005, Doi: 10.1007/b138326.
- [2] David JC MacKay, "Sustainable Energy Without Hot Air"; <https://www.withouthotair.com/>
- [3] IAEA, Annual Report 2022; <https://www.iaea.org/publications/reports/annual-report-2022>