

REATTORI A FISSIONE E SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

gianni.comini@cism.it

20 febbraio 2023

1 La decarbonizzazione

Tutte le strategie di decarbonizzazione prevedono di espandere la produzione di energia elettrica ben oltre gli usi tradizionali, in modo da impiegare l'energia in eccesso per il riscaldamento degli edifici (con pompe di calore), per i trasporti (con veicoli terrestri, navi ed aerei a propulsione elettrica), per la produzione di calore industriale ad alta temperatura (ad esempio, con i forni ad arco in metallurgia) e per la produzione di idrogeno verde (ad esempio, attraverso l'elettrolisi dell'acqua).

Ovviamente tutta la produzione di energia elettrica dovrà essere “a zero emissioni” e, a questo fine, le strategie prevedono l'abbandono, a breve termine, dell'olio combustibile (peraltro già ora troppo costoso nei Paesi che non producono petrolio) e del carbone, e la riduzione drastica, a medio termine, del gas naturale (probabilmente accelerata dalla guerra in Ucraina). Per quanto riguarda invece l'energia nucleare, l'ottica “ufficiale” consente che le centrali nucleari a fissione possano venir ancora installate nei Paesi che accettano questa tecnologia. Ultimo ma non meno importante esempio di questo approccio: il 13 febbraio 2023 la Commissione Europea ha pubblicato la proposta di criteri tecnici per definire “verde” l'idrogeno se prodotto non solo con elettricità rinnovabile, ma anche con elettricità a bassissima intensità di emissioni come quella generata dalle centrali termonucleari a fissione. (Infatti, queste ultime possono essere considerate responsabili di emissioni di anidride carbonica soltanto durante le fasi di costruzione e di disattivazione).

D'altra parte, la Commissione Europea ha impiegato oltre sette mesi per scegliere tra le richieste opposte di Paesi come la Francia favorevoli a considerare “verde” l'idrogeno da fissione nucleare, e di Paesi come la Germania, contrari. Molti, infatti, continuano a pensare che l'energia nucleare da fissione non sia una tecnologia sostenibile (mentre, evidentemente, non discuterebbero la scelta di produrre energia elettrica con le centrali a fusione nucleare illustrate nel post “La corsa alla fusione nucleare”, qualora i progressi scientifici nel settore portassero alla loro realizzazione in tempi ragionevoli).

Nel seguito, ci si propone illustrare lo “stato dell'arte” nella realizzazione delle centrali termonucleari a fissione, seguendo il percorso storico che ha segnato lo sviluppo di

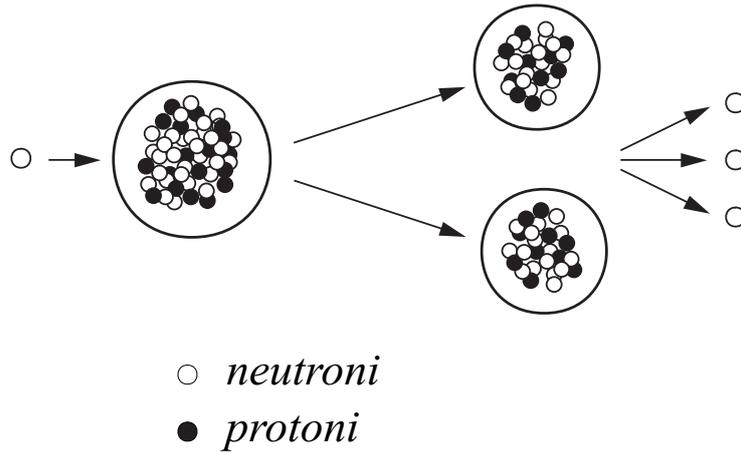


Figura 1: Illustrazione schematica di un processo di fissione che libera tre neutroni.

questa tecnologia per la produzione di energia elettrica. In questo modo si forniranno gli strumenti per formulare giudizi informati di sostenibilità senza, peraltro, condannare come “guerrafondai” i sostenitori del nucleare da fissione, e senza etichettare come “nemici del progresso” tutti quelli che, pur nell’ottica condivisa della decarbonizzazione, ritengono più sensato puntare esclusivamente sulle energie rinnovabili per sostituire le fonti fossili.

2 La fissione nucleare

L’energia nucleare trae origine da alcune reazioni nelle quali le perdite di massa Δm subite dagli elementi partecipanti vengono trasformate in quantità di energia ΔE , equivalenti alle masse perdute. In questi casi, infatti, si applica la ben nota relazione di Einstein

$$\Delta E = C^2 \Delta m \quad (1)$$

nella quale C indica la velocità della luce nel vuoto.

Le apparecchiature in cui si sviluppano le reazioni di trasformazione della massa in energia vengono dette reattori nucleari. I reattori nucleari possono essere a “fissione” od a “fusione”, a seconda che in essi si verifichi una reazione con rottura di nuclei pesanti ed emissione di neutroni (fissione), ovvero una reazione in cui si uniscono nuclei leggeri (fusione).

Nei reattori a fissione, oggetto di questo post, hanno luogo singole reazioni del tipo di quella schematizzata nella Figura 1 ma, per generare energia nucleare in quantità utile ai fini pratici, vengono sfruttate le “reazioni a catena” che si hanno quando i neutroni emessi durante i processi di fissione vengono catturati in numero adeguato dai nuclei degli elementi vicini. Questi, a seguito della cattura si destabilizzano e si fissionano a loro volta, dando origine mediamente a due nuclei leggeri e a più di un neutrone, oltre a liberare anche una notevole quantità di energia corrispondente alla perdita di massa nel processo (secondo la relazione di Einstein).

Per concretizzare, si può far riferimento all'isotopo U-235 dell'uranio (in simboli U_{92}^{235} per indicare che il suo nucleo è formato da 92 protoni e $235-92=143$ neutroni) e, tenendo conto delle probabilità di ciascuna delle sue possibili reazioni di fissione (che, come osservato liberano da zero a tre neutroni), si arriva alla relazione statistica generale:



dove, evidentemente 2,5 rappresenta il numero medio di neutroni liberati nelle diverse possibili reazioni, e $3,2 \cdot 10^{-11}$ joule per fissione è l'energia mediamente generata.

L'autosostentamento di una reazione a catena dipende dalla probabilità che un numero sufficiente di neutroni liberati venga catturato e, una volta catturato, dia origine a processi di fissione. Nella pratica, si fa in modo che il reattore nucleare contenga materiale in grado di fissionarsi in concentrazione maggiore di quella necessaria per l'autosostentamento, calcolata tenendo conto sia della frazione di neutroni che si autoelimina attraverso l'assorbimento nei materiali strutturali sia di quella che viene catturata senza dare origine a fissioni. Il margine rimasto serve a consentire il controllo del reattore mediante barre composte da materiali caratterizzati da grandi sezioni di cattura (come, ad esempio, boro e cadmio). Le barre vengono introdotte tra gli elementi "combustibili" del reattore, in misura maggiore o minore a seconda delle esigenze del processo, in modo da far "divergere" la reazione all'inizio per poi stabilizzarla una volta raggiunto il livello di potenza nominale.

È noto che la probabilità di cattura dei neutroni aumenta con il diminuire della velocità dei neutroni stessi poiché i neutroni "lenti" rimangono più a lungo nelle vicinanze dei nuclei che li devono catturare. Di conseguenza è conveniente operare con neutroni lenti (spesso definiti termici) e, a tal fine, i neutroni generati dalla fissione sono "moderati", ovvero rallentati attraverso urti successivi con nuclei capaci di ridurre la velocità senza catturarli. I moderatori usati nei reattori nucleari a neutroni lenti sono, essenzialmente, tre: il carbonio, sotto forma di grafite, l'acqua "pesante" D_2O prodotta utilizzando nuclei di deuterio (l'isotopo pesante dell'idrogeno $D = H_1^2$ formato da 1 protone e $2-1=1$ neutroni) al posto dei nuclei di idrogeno normale H_1^1 (che è formato da un solo protone), e l'acqua "leggera" H_2O , cioè l'acqua normale.

I moderatori più efficaci sono l'acqua pesante e la grafite, in quanto entrambi sono caratterizzati da probabilità di cattura neutronica più basse di quelle dell'acqua normale. D'altra parte l'acqua pesante è molto costosa e difficile da produrre, mentre la grafite si infiamma facilmente ad alta temperatura (se entra a contatto con l'aria). I vantaggi tecnici ed economici offerti dall'uso di acqua leggera come moderatore sono ritenuti superiori agli svantaggi funzionali e, infatti, la maggior parte dei reattori nucleari a neutroni lenti in esercizio è moderata con acqua normale.

A questo punto, però, è opportuno introdurre una distinzione operativa in quanto tutti i nuclei degli elementi pesanti possono fissionarsi se colpiti da un neutrone dotato di energia cinetica sufficientemente alta, ma solo alcuni materiali "fissili" sono in grado di fissionarsi anche se colpiti da un neutrone lento. In natura, esiste un solo elemento fissile: l'isotopo U-235 dell'uranio (in simboli U_{92}^{235} nel quale il nucleo è formato da 92 protoni e $235 - 92 = 143$ neutroni) ma esistono diversi materiali "fertili", ovvero materiali che possono essere trasformati in fissili attraverso opportune reazioni nucleari. L'elemento fertile più importante è l'isotopo U-238 dell'uranio (in simboli U_{92}^{238}) che, in seguito alla

cattura di un neutrone e alla perdita di due elettroni (per emissione di due radiazioni beta costituite, appunto, da un elettrone ciascuna) può trasformarsi nell'isotopo fissile Pu-239 del plutonio (in simboli Pu_{94}^{239}).

In linea di principio i reattori che operano con neutroni lenti possono utilizzare, in alternativa, l'elemento fissile naturale U-235 o l'elemento fissile artificiale Pu-239. In realtà, data la pericolosità del plutonio, la quasi totalità dei reattori con neutroni lenti operano con U-235 e, per i già ricordati motivi di praticità, usano l'acqua normale come moderatore. In quest'ultimo caso però, si devono compensare le più numerose catture neutroniche che hanno luogo nell'acqua normale, alimentando i reattori non con semplice uranio naturale (che è una miscela composta per lo 0,71% in massa di U_{92}^{235} e per il restante 99,29% in massa di U_{92}^{238}) ma con uranio arricchito artificialmente, fino ad avere il 3% di U-235 e il 97% di U-238.

(Evidentemente, il processo di arricchimento dell'U-235 è una tecnologia molto critica dal punto di vista militare perché con U-238 arricchito oltre l'80% con U-235, cioè con una miscela formata per l'80% da U-235 e per il 20% da U-238, è possibile realizzare una bomba atomica: di qui la preoccupazione dell'AIEA-Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica per la realizzazione dall'impianto di arricchimento dell'uranio nel sito di Fordo in Iran).

Tornando all'impiego dell'uranio arricchito al 3% nei reattori a neutroni lenti per la produzione di energia, si può osservare che è abbastanza logico che venga usata la stessa acqua normale sia come moderatore sia come fluido refrigerante. Per contro, nei reattori moderati con acqua pesante, o grafite, non vi sono problemi dovuti a catture neutroniche indesiderate e, quindi, il "combustibile" è uranio naturale non arricchito. La stessa acqua pesante viene poi usata anche come fluido refrigerante nei reattori moderati con essa mentre, nei reattori moderati a grafite, come fluido refrigerante viene usata anidride carbonica o, in alternativa, un altro gas (ad esempio, elio che è chimicamente inerte rispetto alla grafite).

2.1 Reattori a neutroni lenti

Nelle due filiere più diffuse in occidente, schematizzate nella Figura 2, vengono utilizzati neutroni lenti ed uranio arricchito nell'isotopo U-235. I noccioli dei reattori, ovvero le sedi delle reazioni di fissione nucleare, sono raffreddati con acqua pressurizzata (PWR - Pressurized Water Reactors) o con acqua in ebollizione (BWR - Boiling Water Reactors). Inoltre, come si vede dalla Figura 2, oltre che raffreddati i reattori di entrambe le filiere sono anche "pilotati" attraverso l'inserimento progressivo di barre di controllo, costituite da materiali capaci di rallentare le reazioni catturando i neutroni prodotti dalle fissioni.

Nei reattori PWR, illustrati nella Figura 2 a sinistra, l'acqua viene mantenuta in pressione proprio per evitare l'instaurarsi dell'ebollizione nel nocciolo, in quanto l'acqua liquida ha una conduttività termica maggiore di quella del vapore (e, quindi, garantisce coefficienti di scambio termico superiori). Infatti, l'acqua che attraversa il nocciolo ha una temperatura di uscita pari a 308°C in quanto deve mantenersi, con un buon margine, al disotto dei 374°C (che è la temperatura critica, ovvero la massima temperatura in cui l'acqua può esistere sotto forma di liquido). Successivamente l'acqua proveniente dal nocciolo e, quindi, radioattiva produce vapore saturo non radioattivo da mandare alla turbina

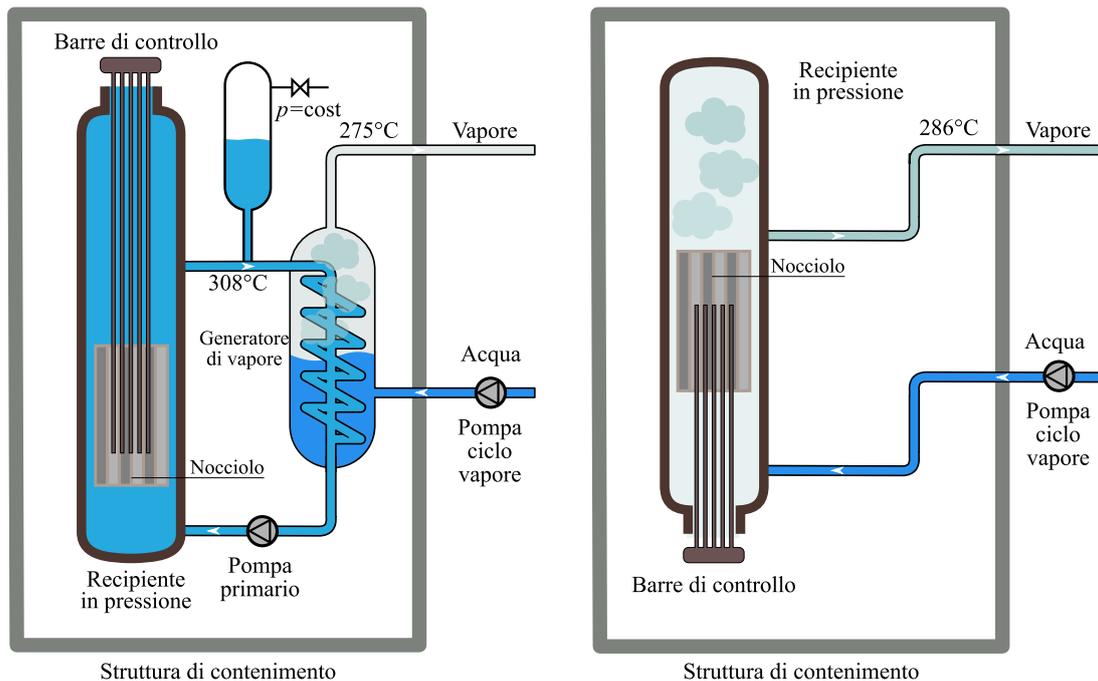


Figura 2: Reattori nucleari PWR (a sinistra) e BWR (a destra). Si notino la presenza del recipiente in pressione (vessel) e della struttura esterna di contenimento [US Department of Energy, Public Domain (modify)].

in uno scambiatore rigenerativo con temperatura di uscita pari a 275°C (necessariamente inferiore ai 308°C a cui entra il fluido caldo). In questo modo si rinuncia a massimizzare il rendimento termodinamico del ciclo a vapore ma si opera a favore della sicurezza.

Nei reattori BWR, illustrati nella Figura 2 a destra, invece, il nocciolo è raffreddato con acqua in ebollizione e il vapore (radioattivo) è prodotto alla temperatura di 286°C. In questo caso il vantaggio è dato dal fatto (ben noto dalla trasmissione del calore) che i fluidi in cambiamento di fase garantiscono i coefficienti di scambio termico più elevati in assoluto. Per contro, gli svantaggi sono due: il primo svantaggio è il rischio che, per un qualche malfunzionamento, l'intensità di ebollizione diventi così elevata da far evaporare completamente il liquido privando il reattore del raffreddamento, e il secondo svantaggio è la certezza che il fluido nel ciclo a vapore è radioattivo e quindi pericoloso in caso di perdite.

In entrambe le filiere PWR e BWR, la struttura di contenimento ha il compito di limitare i danni in caso di fusione del nocciolo e, dal punto di vista termotecnico, delimita la zona che sostituisce il generatore di vapore tradizionale. La differenza termodinamica più importante rispetto ai generatori tradizionali è data dalle temperature del vapore che nei generatori di vapore tradizionali sono dell'ordine dei 550°C mentre, come si è detto, nei reattori a neutroni lenti sono molto inferiori. Infatti i rendimenti di conversione sono pari del 31% circa nella filiera PWR e del 32% nella filiera BWR (nella quale si evita l'impiego dello scambiatore rigenerativo) contro il 40% almeno assicurato dalle centrali

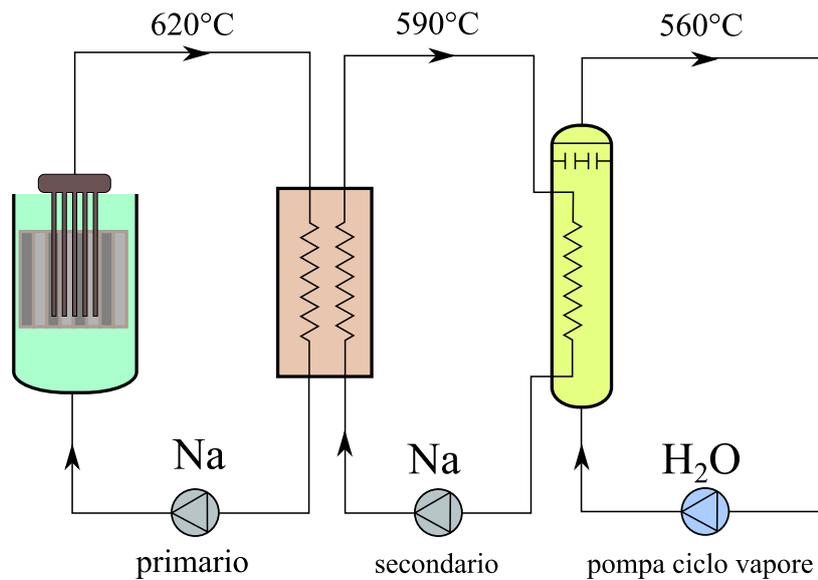


Figura 3: Schema funzionale semplificato di una centrale nucleare con reattore raffreddato a sodio liquido.

termoelettriche a vapore tradizionali.

2.2 Reattori a neutroni veloci

I neutroni veloci, cioè non moderati, sono più difficili da catturare, ma se catturati innescano reazioni di fissione più efficienti di quelle innescate dai neutroni lenti. (Ad esempio l'isotopo Pu-239 emette in media 2,9 neutroni se stimolato con neutroni lenti ed oltre 4 neutroni se stimolato con neutroni veloci). Questa constatazione ha suggerito la strategia operativa adottata nei reattori autofertilizzanti che operano con neutroni veloci.

Dal punto di vista costruttivo si ha che, assenza di moderatore, la gestione della reazione nucleare deve essere affidata interamente alle barre di controllo. Inoltre non si può impiegare acqua per il raffreddamento in quanto l'acqua agirebbe anche da moderatore ed, infatti, la scelta alternativa più utilizzata è il raffreddamento con metalli liquidi o sali fusi. Infine va tenuto presente che con i neutroni veloci la cattura risulta più difficile e, di conseguenza, i reattori vanno alimentati con miscele nelle quali la percentuale di materiale fissile deve essere molto maggiore della percentuale utilizzata nei reattori con neutroni lenti. Ad esempio, se viene utilizzata una miscela di Pu-239 (fissile) ed U-238 (fertile) la percentuale di Pu-239 è compresa tra il 30% all'inizio e il 40% alla fine e, di conseguenza, la percentuale di U-238 è compresa tra il 70% all'inizio ed il 60% alla fine. (Nei reattori che operano con neutroni lenti il rapporto di conversione tra combustibile generato Pu-239 e combustibile bruciato U-235 non supera 0,6).

Lo schema funzionale semplificato di un reattore autofertilizzante raffreddato con sodio liquido è rappresentato nella Figura 3. L'impiego dei sali liquidi e dei metalli fusi, in generale, è giustificato dal fatto che, grazie alla loro elevatissima conduttività termica, riescono ad asportare enormi quantità di calore. Tuttavia, la necessità di isolare il circuito

primario con il sodio liquido radioattivo dal vapore che evolve in turbina impone il ricorso ad un circuito intermedio ancora a sodio liquido, come si vede nello schema funzionale della Figura 3.

L'impiego di un sale liquido o di un metallo fuso potrebbero sembrare, a prima vista, molto azzardati. Tuttavia, va tenuto presente che sali liquidi e metalli fusi sono caratterizzati da bassissime pressioni di vapore e, quindi, non inducono forti sollecitazioni meccaniche nei contenitori. Inoltre, si può notare che, grazie alle elevate temperature raggiungibili con sali liquidi e metalli fusi, il vapore d'acqua immesso in turbina può essere surriscaldato e portato alle stesse condizioni termodinamiche del vapore nei normali cicli delle centrali termoelettriche. Pertanto i rendimenti complessivi degli impianti con reattori a neutroni veloci autofertilizzanti possono raggiungere valori del 42-43%, maggiori o uguali di quelli dei generatori di vapore tradizionali e notevolmente più elevati di quelli ottenuti nei reattori PWR e BWR.

2.3 Quattro generazioni di reattori nucleari

La tecnologia dei reattori nucleari viene continuamente migliorata in termini di prestazioni, costi e sicurezza anche se, convenzionalmente, si è deciso di rappresentarne lo sviluppo suddividendo i reattori nucleari in sole quattro generazioni che si sono succedute nel tempo. In questo modo ogni generazione si può considerare significativamente migliorata rispetto alla generazione precedente.

La **Prima Generazione** comprende i reattori costruiti dal 1954 al 1970 e va dai prototipi ai primi generatori commerciali.

La **Seconda Generazione** comprende i reattori costruiti tra il 1970 e il 2000 e ad essa appartengono le due filiere BWR e PWR, descritte nel Paragrafo 2.1 che, tuttora, sono le più diffuse in Occidente. I reattori di questa generazione sono stati progettati per una vita media utile di 40 anni ma, successivamente, si è data la possibilità di estendere la vita utile a 60 anni con l'effettuazione di alcuni interventi volti a migliorare la sicurezza. (Va ricordato che appartengono alla seconda generazione, in quanto costruiti nel 1970, anche i reattori BWR progettati dalla General Electric e installati nella centrale di Fukushima che, all'epoca dell'incidente nel 2011, avevano accumulato circa 40 anni di servizio).

Dopo Cernobil, nel 1986, e ancor più dopo Fukushima, le preoccupazioni per la sicurezza dei reattori nucleari sono aumentate considerevolmente e, di conseguenza, si è cercato di porre rimedio migliorando la sicurezza passiva, ovvero quella basata sulle leggi fisiche e non sull'intervento attivo di dispositivi elettromeccanici. Ciò ha portato alla progettazione, per gli anni successivi al 2000, dei reattori di **Terza Generazione** che incorporano tutta una serie di miglioramenti costruttivi suggeriti dall'esperienza operativa maturata con i reattori di Seconda Generazione. I principali miglioramenti riguardano:

- l'introduzione dell'assorbimento neutronico nei materiali per garantire lo spegnimento del reattore in condizioni diverse da quelle di normale esercizio;
- l'intensificazione di convezione naturale ed irraggiamento per assicurare lo smaltimento del calore residuo anche in caso di guasto alle pompe;

- l'introduzione di ricombinatori idrogeno/ossigeno di capacità sufficiente ad evitare che, in caso di incidente, l'idrogeno prodotto dalla scissione termica dell'acqua raggiunga concentrazioni pericolose;
- una maggior velocità di adeguamento ai carichi variabili, con possibilità di passare dal 25 al 100% del carico in circa 30 minuti;
- lo sfruttamento più spinto del combustibile nucleare;
- lo sfruttamento dell'effetto scala per ridurre i costi, grazie all'utilizzo di unità altamente modulari, spesso costruite in collaborazione da più Stati, con potenza elettrica per reattore non inferiore a 1.000 MW.

Dopo il 2010, inoltre, si è deliberato di rendere possibile la certificazione, da parte degli organismi di controllo, dei miglioramenti tecnici, economici e di sicurezza rispetto agli standard in vigore per la Terza Generazione, al fine di ottenere la classificazione nella categoria “**Terza Generazione +**”.

In questo modo, lo sfruttamento più spinto del combustibile ha portato ad una notevole riduzione della quantità di scorie generate per unità di energia prodotta, mentre l'introduzione di nuovi sistemi di sicurezza attiva e passiva ha consentito di aumentare la vita media utile a 60 anni fin dalla progettazione. Dal punto di vista della sicurezza, la frequenza obiettivo di incidenti gravi con fusione del nocciolo è stata ridotta ad 1 evento ogni 15 - 20 milioni di anni-reattore di funzionamento (contro la frequenza probabile di 1 guasto grave ogni centomila anni-reattore di funzionamento, tipica della Seconda Generazione). Per contro, l'adozione di miglioramenti tecnologici ha comportato costi di costruzione più elevati ai quali la modularità e la standardizzazione dei progetti e dei componenti hanno rimediato solo in parte, come dimostrato dall'esperienza francese recente.

Infatti, alla “Terza Generazione +” appartengono i reattori EPR2 del “rilancio nucleare” della Francia, proclamato dal Presidente Emmanuel Macron nel febbraio 2022. Si tratta dei reattori europei ad acqua pressurizzata, inizialmente definiti di Terza Generazione ed identificati con l'acronimo EPR - European Pressurized Reactors, e poi “promossi” alla “Terza Generazione +” con l'acronimo EPR2 - Evolutionary Power Reactors (EPR2). Sulla carta questi reattori dovevano essere più semplici, di maggiore capacità e meno costosi degli EPR ma, invece, i prototipi hanno avuto percorsi di sviluppo molto travagliati. I siti di prova a Flamanville in Francia ed a Taishan nel Guangdong cinese, sono stati penalizzati da numerosi incidenti, mentre nel sito di Olkiluoto in Finlandia il reattore EPR da 1600 MW elettrici la cui costruzione era iniziata nel 2005 è stato avviato solo nel 2021 (con un ritardo di diversi anni ed una lievitazione dei costi saliti dal preventivo di 3,3 al consuntivo di 12,4 miliardi di euro).

I reattori nucleari a fissione di **Quarta Generazione** sono ancora in fase di studio, e le loro versioni commerciali definitive non sono previste prima del 2035. Come schematizzato nella Figura 4, essi comprendono tre filiere di reattori a neutroni lenti:

- Very-High Temperature Reactors (VHTR), ovvero Reattori ad elevatissima temperatura raffreddati con elio;

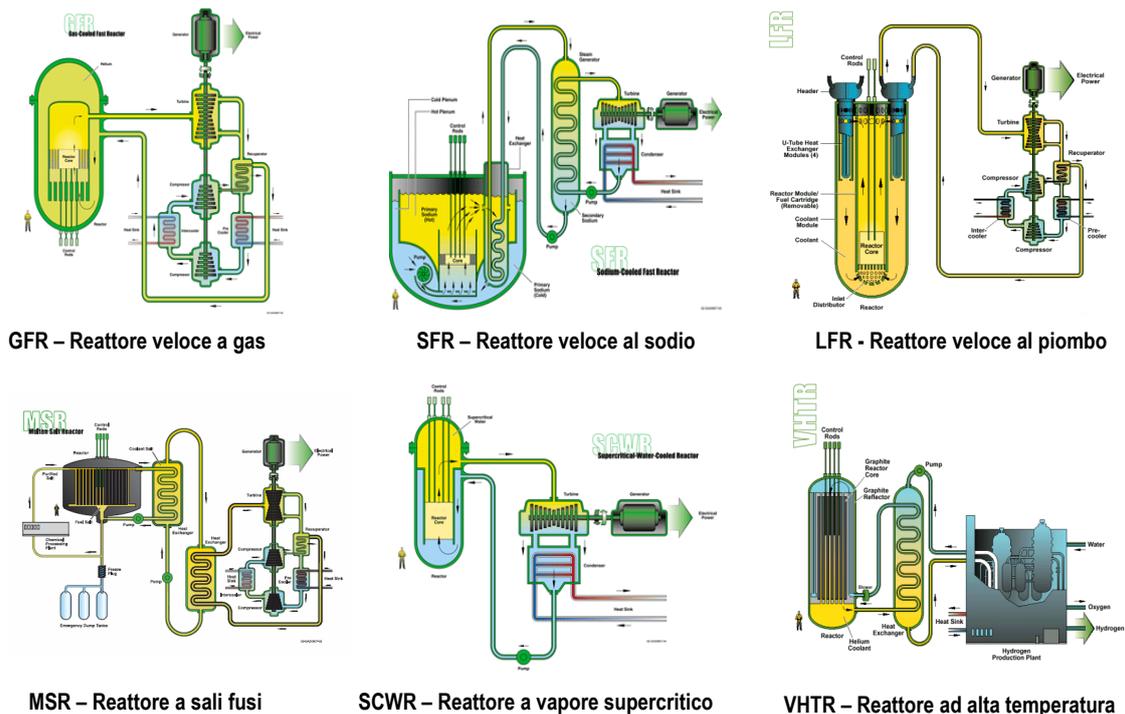


Figura 4: La Quarta Generazione di reattori nucleari [A. Zuliani, “Evoluzione della tecnologia nucleare”].

- Super-Critical Water Reactors (SCWR), ovvero Reattori raffreddati e moderati con acqua a pressione superiore alla pressione critica nei quali il passaggio di stato liquido-gas avviene senza passare per la fase intermedia di vapore saturo;
 - Molten Salt Reactors (MSR), ovvero Reattori raffreddati con sali fusi;
- e tre filiere di reattori autofertilizzanti a neutroni veloci:
- Gas-cooled Fast Reactors (GFR), ovvero Reattori autofertilizzanti raffreddati con elio;
 - Sodium-cooled Fast Reactors (SFR), ovvero Reattori autofertilizzanti raffreddati con sodio liquido;
 - Lead-cooled Fast Reactors (LFR), ovvero Reattori autofertilizzanti raffreddati con piombo fuso.

Tutti i reattori di quarta generazione, sia pure per vie diverse, perseguono gli stessi obiettivi: miglioramento ulteriore della sicurezza, maggior sfruttamento del combustibile nucleare, utilizzo di combustibile nucleare incompatibile con l’uso militare e, nei limiti del possibile, riduzione dei costi di costruzione. Nel dibattito italiano il vantaggio più citato è quello della elevata sostenibilità ambientale, tanto che alcuni “paladini” sono arrivati a dichiarare che il nucleare di quarta generazione non produce scorie ed è completamente



Figura 5: Centrali nucleari Italiane. Sopra: Latina (1962) a sinistra e Garigliano (1963) a destra. Sotto: Trino Vercellese a sinistra (1968) e Caorso (1978) a destra. Tutte queste centrali sono ora (2023) in fase avanzata di smantellamento da parte della SOGIN - Società [pubblica di] Gestione Impianti Nucleari. [Sogin (modificate)]

“pulito”. Naturalmente non è così, anche se va detto che i reattori di quarta generazione autofertilizzanti ottimizzano l’uso del combustibile “riducendo la quantità e la tossicità delle scorie”.

Un altro punto del dibattito è quello dei tempi necessari per la realizzazione degli impianti che, secondo le previsioni più ottimistiche, non supererebbero i dieci anni, mentre, su basi tecniche, si pensa che tra una decina d’anni avremo gli elementi per giudicare la fattibilità e la convenienza degli impianti. Pertanto, solo intorno al 2030 si potrà partire con l’installazione di reattori commerciali che, come si è detto, usciranno dalla fase di collaudo intorno al 2035.

Infine, per quanto riguarda i piccoli reattori modulari SMR - Small Modular Reactors, impropriamente tirati in ballo nel dibattito, va detto che reattori di questo tipo, economici e semplici al punto da poter essere assemblati sul posto, non costituiscono una novità in quanto sono stati già realizzati per le precedenti generazioni. Va osservato, comunque, che la tecnologia SMR è stata ottimizzata e rilanciata di recente negli Stati Uniti dalla NuScale e, nel 2020, ha ricevuto la piena approvazione della NRC (Nuclear Regulatory Commission) per una generazione di piccoli reattori che dovrebbero essere messi in rete entro il 2030.

3 L'Italia e la “sicurezza” dei reattori nucleari

Il problema della sicurezza dei reattori nucleari si pose sin da quando, nel 1942, Enrico Fermi realizzò la prima reazione a catena all'Università di Chicago, ma la scala del problema divenne planetaria solo con le applicazioni della fissione nucleare alla produzione di energia elettrica. Tali applicazioni furono possibili a partire dal 1953, dopo che il presidente americano Eisenhower, con il discorso “Atomi per la Pace” alle Nazioni Unite, tolse il segreto militare sullo sfruttamento a scopi pacifici dell'energia nucleare. Subito dopo cominciarono ad arrivare i reattori industriali di Prima Generazione (ovvero quelli costruiti dal 1954 al 1970) ed i primi reattori di questo tipo furono installati in una centrale sovietica nel 1954, in una centrale britannica nel 1956 e in una centrale statunitense nel 1958.

In Italia, Paese giunto alla utilizzazione quasi integrale delle risorse idroelettriche e povero di fonti fossili, l'energia nucleare fu, inizialmente, accolta con grande entusiasmo, come si può dedurre anche dalla Figura 5. Infatti, si decise di installare tre reattori commerciali della prima generazione realizzati con tecnologie differenti in modo da acquisire più “know how” possibile. Nel 1962 venne messa in funzione dall'AGIP Nucleare la centrale di Latina, di tecnologia britannica (ovvero con reattore raffreddato ad anidride carbonica). Nel 1963 venne messa in servizio dalla Società Meridionale di Elettricità (gruppo IRI) la centrale del Garigliano di tecnologia statunitense - General Electric (ovvero con reattore raffreddato ad acqua bollente - BWR). Nel 1964 venne attivata dalla Società Edisonvolta la centrale di Trino Vercellese di tecnologia statunitense - Westinghouse (ovvero con reattore raffreddato ad acqua in pressione - PWR).

Tuttavia, l'entusiasmo durò poco: nello stesso 1964 venne processato e condannato ad undici anni per irregolarità amministrative Felice Ippolito, presidente del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (allora CNEN ora ENEA). Dopo due anni trascorsi in carcere, Ippolito fu graziato dal Presidente della Repubblica Giuseppe Saragat ma la condanna aveva ormai segnato un rallentamento e una svolta nella politica nucleare italiana che Ippolito, contrario alle ordinazioni “chiavi in mano all'estero”, voleva autonoma a partire dalla Seconda Generazione di reattori prevista per dopo il 1970.

(La vicenda giudiziaria di Ippolito, lasciò uno strascico di sospetti in quanto le “lobbies” petrolifere avrebbero avuto tutto l'interesse a vedere stroncata sul nascere l'industria nucleare italiana. Dal punto di vista giuridico, sulla condanna di Ippolito così si esprime sull'Astrolabio del 1 giugno 1965 il magistrato e storico Alessandro Galante Garrone: “Ma intanto un uomo è stato condannato a undici anni di carcere: un uomo che era alla testa di un organismo importantissimo come il CNEN e aveva dato impulso - né importa qui considerare se bene o male, se con criteri approvabili o meno - alla politica nucleare in Italia. . . Ma per dir le cose chiare egli mi pare vittima di una colossale ingiustizia, certamente perpetrata in perfettissima buona fede e per scopi, vogliamo credere, di pubblica moralità: ma pur sempre ingiustizia”.)

Nonostante l'evidente mutamento di rotta sul nucleare, tra il 1970 e il 1978 venne costruita una centrale di seconda generazione a Caorso, in Provincia di Piacenza, con tecnologia italo-statunitense (Ansaldo - General Electric) raffreddata ad acqua bollente. Nel 1982, a Montalto di Castro, in Provincia di Viterbo, iniziò la costruzione di un'altra centrale ad acqua bollente basata sulla stessa tecnologia di quella di Caorso ma, come ve-



Figura 6: Incidente di Cernobil. A sinistra: incendio del 26 aprile 1986 nell’unità numero 4 della centrale. Al centro: il nuovo “sarcofago” di protezione che il consorzio francese Novarka ha posizionato nel 2016 sopra il primo sarcofago rovinato dalle radiazioni. A destra: raggio di 30 km della “zona di rispetto” (peraltro non rispettata durante l’invasione russa del 2022) [Wikipedia (modify)].

dremo, dopo il primo referendum antinucleare questa centrale fu convertita a gas naturale pur essendo stata completata all’80%.

3.1 Incidenti e referendum

I guai per l’industria nucleare mondiale iniziarono nel 1979 quando un incidente alla centrale statunitense di Three Miles Island in Pennsylvania provocò la fusione del nocciolo (che, come si è visto, è la sede della reazione nucleare). Le conseguenze furono modeste grazie alla presenza del recipiente in pressione (vessel) e della struttura esterna di contenimento che impedirono la fuoriuscita di materiale radioattivo. L’impatto psicologico, però, fu enorme a causa anche della contemporanea uscita del film “La Sindrome Cinese”, con Jane Fonda e Michael Douglas, sui pericoli dell’energia nucleare. (Il titolo fa riferimento ad una “fake news”, si direbbe oggi, secondo la quale, in caso di incidente con fusione del nocciolo in una centrale nucleare, niente fermerebbe la massa fusa che, perforando la crosta terrestre “potrebbe arrivare fino alla Cina”).

3.1.1 Cernobil e Primo Referendum Antinucleare

La prima vera catastrofe nucleare, ricordata nella Figura 6, arrivò qualche anno dopo. Il 26 aprile 1986, nell’unità numero 4 della centrale di Cernobil in Ucraina (allora Unione Sovietica), i circuiti di raffreddamento normali e di emergenza del reattore furono messi fuori servizio da una manovra sbagliata. Nelle successive ricostruzioni si accertò che alcuni operatori incoscienti volevano verificare se, mancando l’energia elettrica esterna, l’energia cinetica di rotazione (immagazzinata nel turboalternatore) fosse sufficiente a fornire potenza elettrica ai circuiti di raffreddamento fino all’entrata in funzione dei gruppi elettrogeni di soccorso. In questo modo, invece, il reattore fu portato nel campo del funzionamento instabile, provocando la fusione del nocciolo, la vaporizzazione dell’acqua di raffreddamento e la parziale scissione termica del vapore d’acqua nei suoi componenti idrogeno ed ossigeno.

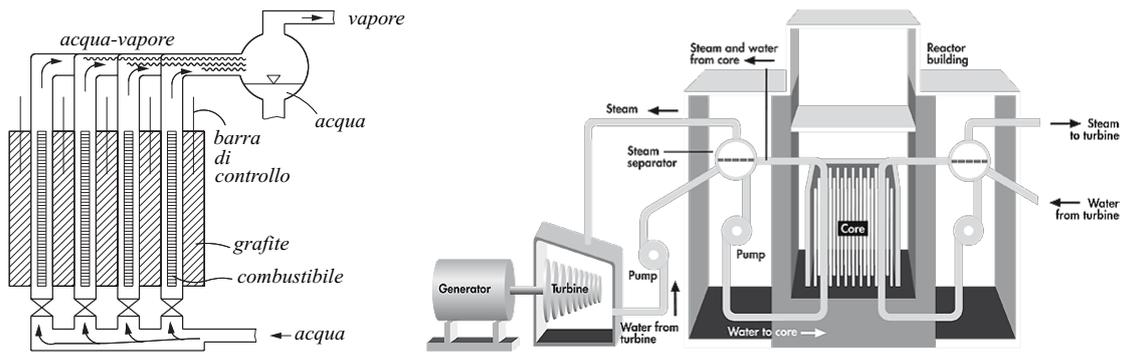


Figura 7: Reattore sovietico LWGR installato a Cernobil. A sinistra: schema del nocciolo con i tubi di raffreddamento contenenti il combustibile e le barre di controllo immerse nella grafite. A destra: schema della centrale, nel quale si nota l'assenza del vessel e la copertura relativamente fragile della parte di edificio contenente il nocciolo [Nuclear Energy Institute (modificata)].

L'enorme quantità di gas così prodotta fece aumentare la pressione all'interno dell'edificio contenente il nocciolo, fino a quando la copertura cedette improvvisamente con notevole fragore. L'idrogeno e la polvere di grafite ad altissima temperatura emessi dal nocciolo entrarono così in contatto con l'aria esterna dando luogo ad una nuova e potentissima esplosione che distrusse l'intera centrale. A questo punto la grafite residua del nocciolo, caldissima ed ormai esposta all'atmosfera, prese fuoco e l'incendio durò per diversi giorni.

Ovviamente, le conseguenze economiche furono pesantissime ma, ancora peggiori, furono le conseguenze sanitarie dal momento che l'AIEA (Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica) stima che, in Europa, almeno 4.000 persone morirono per gli effetti immediati ed a lungo termine delle emissioni radioattive attribuibili all'incidente. (Il pennacchio di fumi carichi di radionuclidi levatosi dalla centrale fu disperso dai venti dominanti in un'area molto vasta comprendente, oltre alle zone limitrofe di Ucraina, Bielorussia e Russia, anche molti Paesi europei tra i quali l'Italia, con in prima linea il Friuli-Venezia Giulia dove, in quei giorni, piovve acqua radioattiva).

Il reattore della centrale di Cernobil apparteneneva alla filiera sovietica nota, in inglese, con l'acronimo LWGR (Light Water-cooled Graphite-moderated Reactors), in quanto i reattori erano raffreddati ad acqua normale e moderati con grafite. Come si vede nella Figura 7 a sinistra, l'acqua viene fatta circolare entro tubi di raffreddamento, di diametro relativamente piccolo, nei quali è conglobato il combustibile. A loro volta, i tubi di raffreddamento sono immersi in un blocco di grafite nel quale sono ricavati i passaggi per le barre di controllo. Il nocciolo è contenuto nella parte centrale dell'edificio schematizzato nella Figura 7 a destra, nel quale la copertura è fragile in quanto asportabile per agevolare le operazioni di manutenzione. Pertanto, a differenza di quel che succede nei reattori occidentali BWR e PWR, il nocciolo dei reattori sovietici LWGR non è contenuto in un recipiente di acciaio di grosso spessore (vessel) e, in aggiunta, è privo di una robusta struttura esterna di contenimento.

Nei reattori LWGR, il compito di moderare i neutroni è svolto quasi completamente

dalla grafite poiché, a causa delle scelte costruttive, la quantità d'acqua è molto ridotta. La funzione di assorbitore neutronico esercitata dall'acqua non è, però, trascurabile anche se è più modesta rispetto a quella assicurata nei reattori BWR e PWR (dove i vessels contengono grandi quantità di liquido). Pertanto, in caso di mancanza d'acqua a seguito, ad esempio, di una vaporizzazione completa, si riduce poco l'attività moderatrice mentre si riduce abbastanza l'attività di assorbimento (che resta affidata alle sole barre di controllo). In tali condizioni, la popolazione neutronica può aumentare rapidamente nel tempo rendendo instabile il reattore come accadde a Cernobil il 26 aprile 1986.

Dopo l'incidente di Cernobil, in Italia non si operarono sottili distinzioni tra tecnologie sovietica e occidentale ma, con insolita velocità, si arrivò al Referendum Antinucleare dell'8 e 9 novembre 1987, che portò all'abrogazione delle leggi:

- sulla localizzazione dei siti delle centrali nucleari,
- sulla rifusione dei danni indiretti portati alla popolazione dalle centrali nucleari, e
- sulla partecipazione dell'allora monopolista ENEL ad iniziative internazionali in campo nucleare.

Dopo il Referendum, il governo (uno dei tanti presieduti da Giulio Andreotti) prese ulteriori drastiche decisioni che andavano oltre il mandato popolare. Il Referendum, infatti, bloccava la costruzione di "nuove" centrali nucleari, mentre il 26 luglio 1990 il CIPE (Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica) deliberò di chiudere definitivamente la centrale di Latina e di non far ripartire, dopo le manutenzioni, le centrali del Garigliano, di Trino Vercellese e di Caorso. Per la centrale di Montalto di Castro si deliberò, come si è detto, la conversione a gas naturale nonostante fosse completata all'80%.

3.1.2 Secondo Referendum Antinucleare e Fukushima

Trascorsero oltre vent'anni prima del tentativo di rilancio del nucleare in Italia, culminato nella "Delega al Governo in materia nucleare" contenuta nell'Art. 25 della Legge 99/09. Nell'intendimento del legislatore ciò avrebbe dovuto portare, entro il 2014, all'avvio della costruzione di nuove centrali con l'obiettivo, molto ambizioso, di giungere entro il 2030 alla produzione del 25% del fabbisogno totale di energia elettrica utilizzando la fonte nucleare. Le opposizioni ambientaliste si fecero sentire in una maniera molto efficace, e ottennero l'inserimento del famoso "terzo quesito" nel Referendum tenutosi il 12 e 13 giugno 2011 (nel quale, per la prima volta dopo il 1995, fu superato il "quorum" anche grazie ai primi due quesiti su "Modalità di affidamento e gestione dei servizi pubblici locali" e "Determinazione della tariffa del servizio idrico").

Con la "abrogazione delle nuove norme che consentono la produzione nel territorio di energia elettrica nucleare", approvata dalla stragrande maggioranza dei votanti, nelle intenzioni dei promotori del referendum fu messa la parola fine ad ogni prospettiva di ritorno al nucleare in Italia. (Evidentemente, "non si doveva mai dire mai" come insegna il recente dibattito sulle centrali nucleari di quarta generazione).

Naturalmente, nel giugno 2011 lo "schieramento" del SI all'abrogazione fu "aiutato" non poco dall'incidente catastrofico occorso alla centrale nucleare di Fukushima, ben



Figura 8: Incidente di Fukushima. A sinistra l'incendio del 2011, al centro la città abbandonata come appariva dieci anni dopo l'incidente nel 2021, e a destra l'area di rispetto dalla quale 150.000 abitanti furono evacuati [Wikipedia a destra e sinistra, New York Times al centro].

descritto nell'infografica di Figura 8. Come è noto, l'incidente si verificò in seguito al terremoto che colpì il Giappone l'11 marzo 2011 e, soprattutto, alla successiva onda di tsunami. Il terremoto, di intensità 9 sulla scala Richter (contro i 6,4 del terremoto in Friuli nel 1976, ed i 6 dei terremoti dell'Aquila nel 2009 e di Amatrice nel 2014), non distrusse la centrale ma causò l'interruzione della rete elettrica ed il conseguente intervento dei gruppi elettrogeni di soccorso (azionati da motori Diesel). Furono così inserite le barre di controllo, che spensero immediatamente le reazioni nucleari, e furono anche messi in azione i sistemi di refrigerazione d'emergenza.

Un'ora dopo il terremoto, però, un'onda di tsunami dell'altezza di oltre 10 metri (14 secondo alcune testimonianze) sommerse i gruppi elettrogeni posti all'altezza, considerata sicura, di circa 6 metri, causando l'arresto dei sistemi di refrigerazione d'emergenza (RHR - Residual Heat Removal e PLR - Primary Loop Recirculation). Poiché le barre di combustibile restano termicamente attive per un lungo "periodo di decadimento", si ebbero fusioni parziali dei noccioli e generazione di idrogeno nelle vasche di raffreddamento del combustibile spento (per scissione termica dell'acqua, catalizzata dagli involucri in zirconio del combustibile nucleare).

I reattori BWR delle centrali, schematizzati nella Figura 9, erano di seconda generazione e le strutture di contenimento del nocciolo (di livello primo RPV - Reactor Pressure Vessel e secondo D/W - Dry Wall) resistettero evitando così il contatto con l'aria del materiale più fortemente radioattivo. Per contro, l'idrogeno liberato nelle vasche di raffreddamento del combustibile si accumulò nelle parti degli edifici di contenimento di terzo livello provocando, al primo innesco, devastanti esplosioni che in due delle quattro centrali (la 1 e la 3) distrussero completamente le coperture degli edifici.

Non ci furono morti ma le conseguenze per i residenti della zona furono ugualmente molto pesanti. Nell'immediato, 165.000 persone furono evacuate dall'area di rispetto, lasciando la città di Fukushima deserta e, intorno ad essa, un territorio fertile nel quale non erano più possibili le tradizionali attività agricole, anche perché nessuno avrebbe più comprato i raccolti della zona. A tutt'oggi (2022) ben 43.000 persone non sono rientrate nelle loro abitazioni e in vaste zone di Fukushima, ancora interdette, case e giardini sono in uno stato di totale abbandono.

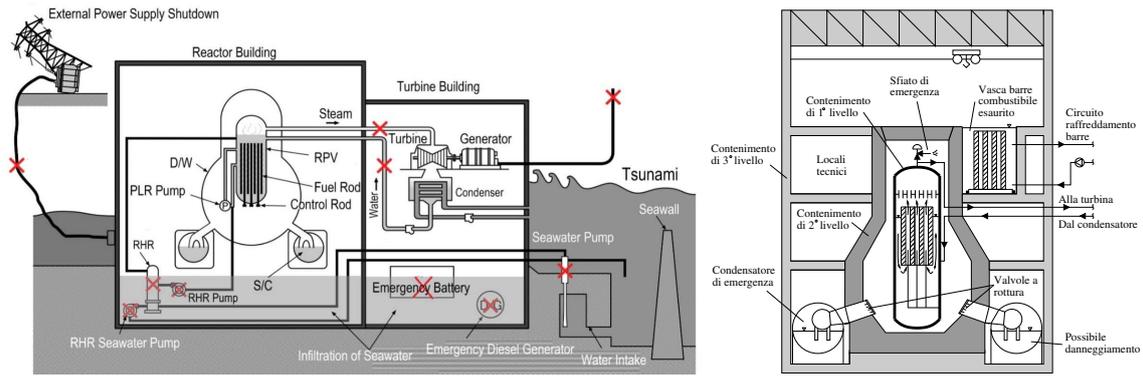


Figura 9: Centrale di Fukushima. A sinistra i sistemi di sicurezza messi fuori uso dallo tsunami [S. Maruyama (2021)] e a destra i riflessi sugli edifici che alloggiavano i reattori. (LEGENDA: RPV - vessel, D/W - contenitore di secondo livello, RHR - pompe per il raffreddamento di emergenza, PLR - pompe per il ricircolo di emergenza)

3.1.3 L'impensabile, ovvero Zaporizhzhia

In Ucraina il 24 febbraio 2022, giorno dell'invasione russa, erano operativi quindici reattori nucleari (sei a Zaporizhzhia) dei quali sei erano fermi per manutenzione, mentre nove (tre a Zaporizhzhia) erano in funzione. Come hanno riferito le cronache, nel corso della guerra diverse operazioni militari hanno interessato la zona di Zaporizhzhia sede, come spesso sottolineato, della centrale nucleare più grande d'Europa (fotografata nella Figura 10). Ovviamente un conflitto armato nelle vicinanze, e magari anche all'interno, di una centrale nucleare, non può lasciare tranquilli per gli evidenti rischi di incidenti con emissioni di grandi quantità di radionuclidi che i venti potrebbero disperder in aree molto vaste (Cernobil insegna).

Ciascuno dei sei reattori operativi a Zaporizhzhia ha una capacità di 950 MW elettrici ed è dotato di una vasca di accumulo in grado di contenere fino a 200 tonnellate di combustibile esausto. Ciò significa che, nel caso di interruzioni dei sistemi di raffreddamento, la centrale può diventare sede di incidenti importanti anche senza essere direttamente bersagliata dall'artiglieria o colpita da missili. Infatti, come si è visto nel caso dell'incidente di Fukushima, le vasche di raccolta del combustibile esausto devono essere raffreddate continuamente anche se le centrali sono spente. Ciò richiede una connessione continua alla rete elettrica in tempi normali o, in caso di emergenza, l'intervento di gruppi elettrogeni di soccorso affidabili e gestiti da operatori qualificati (la cui presenza non può essere facilmente garantita se vi sono di operazioni militari nelle vicinanze).

Secondo le analisi più accreditate, un grosso rischio per la sicurezza della centrale di Zaporizhzhia deriva dai frequentissimi distacchi dalla rete elettrica e dalla scarsa affidabilità dei vecchi generatori di emergenza di fabbricazione sovietica per i quali potrebbero, ad esempio, mancare i pezzi di ricambio. Come a Fukushima, un arresto delle pompe di circolazione potrebbe poi causare l'evaporazione dell'acqua residua dalle vasche di raffreddamento del combustibile provocando innalzamenti della temperatura nelle barre, emissione di idrogeno ed esplosioni. Infine, un evento improbabile, ma non impossibile



Figura 10: Centrale di Zaporizhzhia con il canale che fornisce l'acqua per i sistemi di raffreddamento.

durante una guerra potrebbe essere l'allagamento dell'intero sito della centrale in seguito alla distruzione delle dighe a monte nel bacino del fiume Dniro (che alimenta il canale da cui la centrale preleva l'acqua di raffreddamento).

4 Conclusioni

Il vantaggio rappresentato dalle basse emissioni di anidride carbonica associate alla produzione di energia elettronucleare è, in gran parte, offuscato nell'opinione pubblica dai rischi di incidenti catastrofici insiti nella tecnologia nucleare ed accentuati, di recente, dalla possibilità di azioni militari dissennate nella vicinanza delle impianti.

Non sono poi trascurabili nemmeno i rischi economici dal momento che, ad esempio, il Centro Giapponese per la Ricerca Economica ha stimato che i costi per la sola decontaminazione dell'area di Fukushima saranno compresi tra i 470 e i 660 miliardi di dollari. Pertanto ai costi di costruzione, manutenzione e smantellamento di una centrale nucleare si dovrebbero aggiungere i costi di una assicurazione virtuale contro i danni di un possibile incidente. Poiché nessuna compagnia di assicurazione potrebbe farsi carico dei danni provocati da una catastrofe nucleare è evidente che gli Stati che vogliono costruire centrali nucleari dovrebbero essere disposti a rischiare somme enormi per far fronte a errori umani (Cernobil), fenomeni naturali (Fukushima) o azioni militari (Zaporizhzhia).

Procedendo in questo modo, emergerebbe che ben pochi Stati sono economicamente in grado di dar vita ad un programma nucleare che, oltre tutto, costringe a sottoporsi ai controlli pesanti da parte dell'AIEA per essere autorizzati ad acquistare e gestire un "combustibile" che è anche un materiale fissile. Infatti, l'AIEA non può comportarsi come un normale fornitore e, già così, India e Pakistan (e con tutta probabilità anche Israele) sono diventate potenze nucleari utilizzando materiale fissile ufficialmente destinato alla ricerca e allo sviluppo dell'energia nucleare a scopi pacifici. (Secondo Nature, comunque, un "Paese Normale" dovrebbe sempre chiedersi se è proprio necessario utilizzare tecnologie di interesse militare per accendere le luci e caricare i cellulari).

In ogni caso, secondo molti analisti, l'industria nucleare non ha saputo comunicare efficacemente le sue ragioni all'opinione pubblica, accontentandosi di illustrare i vantaggi tecnici e, dal suo punto di vista, economici di soluzioni energetiche basate sulla fissione. In aggiunta, quando si è trattato di scendere nel concreto, le proposte sono rimaste sempre molto vaghe. Una situazione emblematica è la gestione delle scorie radioattive per le quali l'industria si è sempre limitata ad affermare che il problema “aveva soluzioni tecniche” senza mai individuare con precisione depositi e procedure di smaltimento accettate dalle popolazioni interessate.

Un'ultima ragione di conflitto è legata alla natura stessa della fonte nucleare che a differenza, ad esempio, delle fonti solare ed eolica non si presta ad una gestione a livello delle comunità che ospitano gli impianti di produzione e, di conseguenza, chi ha i vantaggi maggiori si trova a vivere lontano dalle centrali e da chi deve accollarsi servitù e rischi. Forse sarebbe il caso di ripensare in maniera più creativa ai problemi della sicurezza e del rischio percepito e coinvolgere le popolazioni nella scelta dei siti ove costruire nuovi reattori fino ad arrivare, se necessario, alla scelta estrema di non costruirne affatto.

Bibliografia

V. Barbina, G. Contento, M.R. Malisan e R. Padovani, *Vivere un'emergenza nucleare*, Lorenzini, Udine, 1986.

M. Burbi, *Un giorno a Fukushima*, nucleareeragione.org, visto il 18 dicembre 2019.

G. Comini, G. Croce e S. Savino, *Energetica Generale*, SGEEditoriali, Padova, 2011.

G. Comini e M. Libralato, *Verso una Nuova Energetica - Dalle Fonti Esauribili alla Decarbonizzazione*, libreriauniversitaria edizioni, Padova, 2022.

Editoriale, *Nuclear power will have a limited role in the world's energy*, Nature, Vol 591, 177-178, 2021.

Focus, *Chernobyl, Ucraina: che cosa è successo nel 1986*, Focus.it, 26 aprile 2021.

K. Hasegawa, *On the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant from the Inherent Safety Points of View*, Chemical Engineering Transactions, Vol 48, 511-516, 2016.

H. Hida e M. Ives, *There's No Town Left: Fukushima's Eerie Landscapes*, NewYorkTimes, March 10, 2021.

S. Maruyama, *Validation of Unit 1 of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant During its Accident*, Global Journal of Researches in Engineering: Electrical and Electronic Engineering, Vol 21 (1), 2021.

Prefettura di Lodi, *Centrale Nucleare di Caorso (PC) - Piano Interprovinciale di Emergenza Esterna*, 2017.

J. V. Putte e S. Burnie, *The vulnerability of nuclear plants during military conflict*, Briefing - Greenpeace International, 2 marzo 2022.

S. Romani, *Il Progetto di Disattivazione della Centrale di Caorso e lo stato di avanzamento delle attività*, SOGIN, Caorso, 20 aprile 2016.

A. Verma, A. Ahmad e F. Giovannini, *Nuclear Energy, ten years after Fukushima*, Nature, Vol 591, 199-201, 2021.

S. Yeo, *Analysis: The legacy of the Fukushima nuclear disaster*, CarbonBrief, 10 marzo 2016.

A. Zuliani, *Evoluzione della Tecnologia Nucleare*, Safety Forum, Università Campus Bio-medico, Roma, 9 maggio 2009.