



Carlo Di Leo

ABSTRACT

Un pugno di uranio fornisce tanta energia elettrica, quanta ne danno 70 tonnellate di carbone e 390 barili di petrolio. Una centrale nucleare in grado di rifornire di elettricità una città di un milione di abitanti consuma solo 3 chilogrammi di uranio al giorno, per cui possiamo concludere che la sorgente nucleare è la sorgente energetica più efficiente che sia stata mai sperimentata. L'uranio è uno degli elementi più densi che esistano in natura e ciascuno dei suoi atomi è al limite dell'instabilità: il nucleo ha bisogno solo di un proiettile non molto energetico per rompersi e quando si divide libera grandi quantità di energia in un processo di fissione nucleare. Il proiettile di cui ha bisogno il nucleo è costituito da neutroni che alimentano la reazione a catena. L'energia di fissione può essere liberata lentamente, un po' per volta, ed usata per produrre vapore che aziona le turbine. In questo articolo, dopo aver visto come



Situazione presente e prospettive future del nuovo nucleare

si produce energia, verrà data un'idea dello stato dell'arte dei vecchi e nuovi impianti nucleari a fissione (terza e quarta generazione), evidenziando i pregi ed i difetti che questi presentano non solo rispetto ad altri tipi di reattori non nucleari, ma anche rispetto agli impianti nucleari di prima e seconda generazione, che costituiscono la maggioranza dei reattori oggi in servizio.

Introduzione

Da un punto di vista ambientale, se non si considerano le possibili catastrofi ecologiche, l'energia nucleare è decisamente interessante, poiché non contribuisce all'au-

mento dell'effetto serra, ha un altissimo rendimento, e utilizza come combustibile l'uranio che è disponibile in grandi quantità. Un altro vantaggio sta nella stabilità dei costi: il 70-80% delle spese è costituito dai cosiddetti costi fissi, mentre l'eventuale variazione di prezzo del combustibile influisce in minima parte sul costo dell'energia, prodotta: esattamente l'opposto di quanto avviene per i combustibili fossili. Nel mondo è oggi attiva la terza generazione di reattori nucleari.

La prima si riferisce agli impianti costruiti negli anni Cinquanta e Sessanta, con pochi esemplari ancora in funzione, la



Negli anni Novanta è cominciata a comparire la terza generazione di reattori, sviluppati dalle industrie americane e giapponesi

seconda (come ad esempio Caorso) cui appartengono la maggior parte delle centrali attuali, ha sistemi di sicurezza che in buona parte si appoggiano a tecnologie idrauliche ed elettriche (come per esempio l'inserimento delle barre di controllo) per spegnere la reazione (operazione che in gergo tecnico viene chiamata SCRAM). Negli anni Novanta è cominciata a comparire la terza generazione di reattori, sviluppati dalle industrie americane e giapponesi. Si tratta di impianti più efficienti dei precedenti poiché riescono a bruciare meglio il combustibile; dotati di una vita più lunga (fino a 60 anni) e caratterizzati da sistemi di sicurezza che non richiedono in genere energia, ma sono basati in parte su leggi fisiche, come la gravità e la convezione del calore.

In particolare, le barre di controllo vengono azionate da sistemi idraulici ed elettrici indipendenti e separati, anche per quanto riguarda l'ubicazione dell'impianto e la loro alimentazione. In questo modo se un incidente mette fuori uso uno dei sistemi, l'altro subentra automaticamente. Nel 2000 un gruppo di Paesi ha dato vita al IV Generation Forum, un comitato di esperti incaricati di individuare le tecnologie per i reattori di quarta generazione, la cui costruzione è prevista per il 2030. I nuovi impianti saranno caratterizzati da semplicità ed economia di gestione, massima sicurezza produzione di una quantità minima di scorie e possibilità di essere impiegati non solo per generare energia elettrica ma anche per produrre acqua dolce (dissalazione) dall'acqua di mare e per estrarre idrogeno dall'acqua, processi questi che richiedono temperature più elevate rispetto a quelle degli attuali reattori.

Fornire energia ad una popolazione mondiale che già oggi conta 8 miliardi di persone, e che continua ad espandersi, è già in sé una sfida senza precedenti. Se poi si aggiunge l'esigenza di ridurre drasticamente le espansioni di gas serra, le diffi-

coltà diventano proibitive. Il nucleare non va considerato in sé; esso è infatti parte di un quadro complessivo che negli ultimi due o tre anni è cambiato soprattutto a causa dei conflitti in corso. Al Nuclear Energy Summit dell'Agenzia internazionale dell'energia atomica, (IAEA) che si è svolto il 21 marzo 2024 Bruxelles tutti o quasi hanno citato come priorità la "security" ossia la sicurezza di approvvigionamento energetico. Prima si parlava di sostenibilità ma gli attuali conflitti hanno fatto cambiare tante cose. In realtà gli Stati Uniti che sono il primo Paese al mondo per potenza nucleare installata (un centinaio di gigawatt (GWe), corrispondenti al triplo del fabbisogno italiano e al 18% di quello statunitense) avevano questa priorità già da tempo.

E così si sono resi indipendenti dal punto di vista energetico soprattutto facendo ricorso ai combustibili fossili. Ci sono riusciti per mezzo del cosiddetto "fracking", una tecnica dal forte impatto ambientale che prevede l'uso di un fluido sotto pressione per stimolare il rilascio di gas e petrolio nel sottosuolo. Di fatto, al momento, gli Stati Uniti non hanno bisogno di nuovi impianti nucleari. Dal 2000 ad oggi gli americani ne hanno costruito solo due e pochissimi altri sono in programma per i prossimi anni.

Da occidente ad oriente e prime strategie europee.

Il baricentro delle nazioni che prevedono un futuro nucleare si sta sempre più spostando da Occidente ad Oriente e la nazione che sta costruendo più reattori è la Cina che ne ha in costruzione ben 24, alla quale seguono India, Turchia e resto del mondo. La Cina è anche leader nello sviluppo di rinnovabili anche se al momento sta ancora usando il carbone. Il suo obiettivo è quello di eliminare le emissioni di anidride carbonica entro il 2060. Un caso particolare è la Russia, che sta costruendo

do solo quattro nuovi reattori sul suo territorio. Tuttavia l'ex Unione Sovietica, è il principale fornitore di tecnologia nucleare all'estero; infatti, sta realizzando quattro reattori in Turchia, quattro in Egitto, quattro in India e due in Bangladesh. La Russia è una delle poche nazioni al mondo ad offrire il cosiddetto BOO, acronimo di Build (costruisci) own (possiedi), operate (opera). Quindi propone alle altre nazioni di costruire un reattore, gestirlo e persino finanziarlo. In *figura 1* si può vedere uno spaccato di un reattore nucleare, ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*) in funzione dal 1996 in Giappone. Oltre ai sistemi di sicurezza strutturale come i vessel e le pareti di contenimento, adotta una serie di apparati passivi, basati su leggi fisiche e quindi inattaccabili in caso di incidente. Fra questi, un sistema di raffreddamento di emergenza, basato su una piscina posta al di sotto del reattore che, con lo svuotamento crea una depressione nel vessel ed una piscina superiore immette per gravità e per differenza di pressione acqua nel vessel. In *figura 1*, uno schema dell'energia termica prodotta dalla fissione dei nuclei atomici utilizzata per azionare turbine che facendo funzionare opportuni alternatori, generano energia elettrica.

La totalità delle centrali nucleari tuttora in esercizio, produce energia solo ed esclusivamente sfruttando il processo di fissione (i reattori a fusione non sono ancora pronti). Il processo di fissione, fu realizzato per la prima volta artificialmente dall'equipe di Enrico Fermi (che la realizzò ma non si accorse di averla realizzata). Tutti i reattori nucleari oggi in esercizio si basano su questa reazione. Un nucleo di Uranio 235 viene colpito da un neutrone e si scinde in due nuclei più piccoli generando energia cinetica dei due prodotti di fissione e di raggi gamma. I sottoprodotti della reazione sono un atomo di kripton-89 ed uno di bario-144 e tre neutroni che a loro volta possono colpire altrettanti nuclei di uranio,

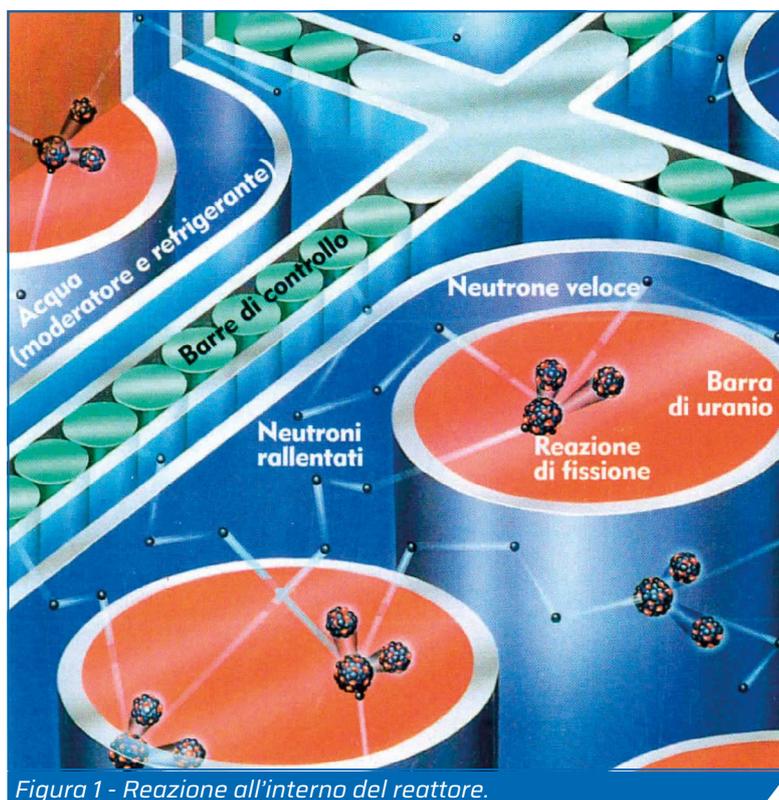


Figura 1 - Reazione all'interno del reattore.

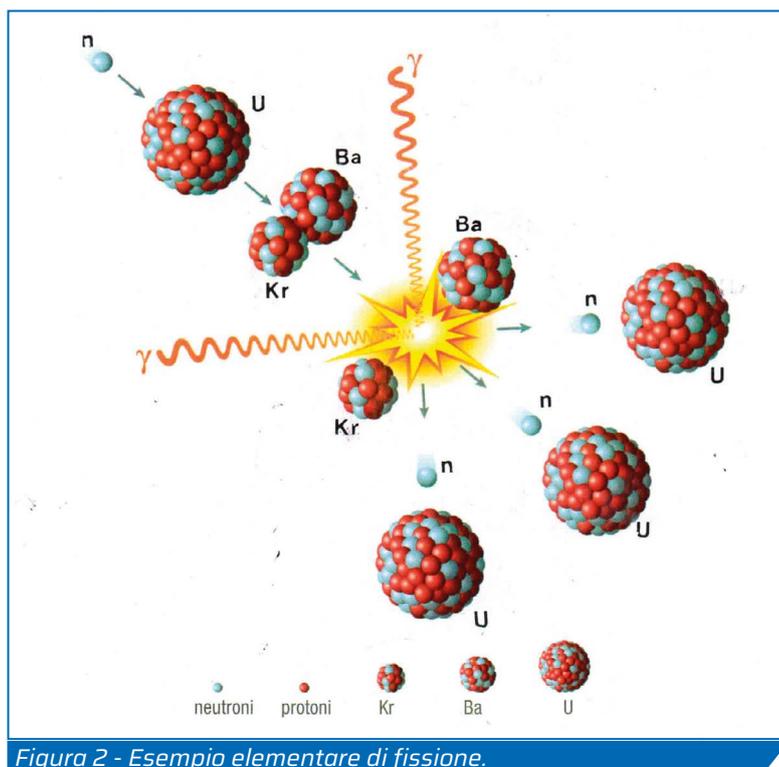


Figura 2 - Esempio elementare di fissione.

generando una reazione a catena. Quanto ora detto a parole è illustrato in *figura 2*.

In Europa la situazione è molto variegata. Vi è la Francia, in cui la percentuale di energia nucleare utilizzata arriva al 70% del totale, la più alta del mondo e c'è l'Italia che ha bandito il nucleare ormai da decenni. Fra queste due situazioni "estreme" vi sono numerose vie di mezzo. Tuttavia l'industria italiana non è seconda a nessuno nella produzione di grandi componenti per impianti nucleari, tanto che recentemente due società di Piacenza sono state le uniche in Europa in grado di fabbricare alcune componenti per l'ammodernamento di impianti francesi. Negli ultimi due anni, comunque, alcune novità hanno contribuito a muovere il quadro europeo. La prima è la tassonomia (green taxonomy), che di fatto riconosce il nucleare come tecnologia verde in vista degli obiettivi di Net Zero (emissioni nette di anidride carbonica pari a zero) entro il 2050. Poi vi è il Net Zero Industry Act, una serie di iniziative di sviluppo industriale che l'Europa vorrebbe supportare per implementare la tassonomia. Infine vi è il Critical Raw Material Act.

Per effettuare la transizione energetica, infatti, ma anche per quella digitale, c'è bisogno di materie prime. Per questo l'Europa vorrebbe favorire lo sfruttamento di miniere di estrazione nel suo territorio. In tutte e tre queste iniziative, il nucleare può offrire un valido contributo, in quanto non emette anidride carbonica, si basa su un'industria tutta europea, e richiede una quantità molto inferiore di metalli critici e di terre rare rispetto alle rinnovabili. In Europa vi è anzitutto la necessità di estendere la vita dei reattori attuali che sono per lo più di seconda generazione (in Europa sono un centinaio) e raggiungerebbero entro i prossimi 10 anni i 40 anni di vita. Terminato il loro ciclo di produzione dovrebbero essere spenti e smantellati. Invece, come è già successo negli Stati Uniti, dopo una verifica di sicurezza e di validità economica degli impianti, si può decidere di estenderne la

vita di altri 10-20 anni, se non di più. Ciò consentirebbe di avere energia per ancora molti anni a prezzi bassissimi. Ed in molti casi, con un investimento ridotto, si può effettuare un upgrade ed aumentare la potenza fino al 20%.

Quasi tutte le centrali nucleari oggi funzionanti nel mondo sono di seconda generazione. Discendenti dirette dei primi reattori sperimentali (detti di prima generazione) sviluppati negli anni Sessanta e Settanta. Nel corso dei decenni sono stati migliorati molti aspetti, ma in generale, queste centrali sono tutte raffreddate ad acqua che può essere pressurizzata (PWR) o bollente (BWR). Erano quindi di seconda generazione Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima. I sei reattori di quest'ultima centrale, per esempio, erano ad acqua bollente (BWR), con potenze comprese fra 460 e 1100 MWe (megawatt elettrici). Il problema dell'impianto giapponese è sui generis, in quanto non ha riguardato il funzionamento in sé dei reattori, ma le strutture di contenimento di eventuali onde da tsunami, vista la collocazione sulla costa dell'impianto in un'area altamente sismica.

L'11 marzo 2011, un'ondata di maremoto provocata da un terremoto di magnitudo 9,0 della scala Richter superò le protezioni della centrale, danneggiando i generatori diesel di emergenza e disattivando così le pompe del sistema di raffreddamento del reattore ed i sistemi di raccolta dati necessari al personale della centrale per capire come affrontare l'emergenza.

L'attenta analisi dell'incidente si è tradotta in uno studio di 154 pagine pubblicato dall'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA) nel 2016 in cui si è raccolta una lunga serie di raccomandazioni per la progettazioni di nuove centrali. In figura 3 è riportata una foto della centrale nucleare di Budey nei pressi di Lione, in Francia. Trattasi di un impianto di seconda generazione.



In Europa la situazione è molto variegata. Vi è la Francia, in cui la percentuale di energia nucleare utilizzata arriva al 70% del totale, la più alta del mondo e c'è l'Italia che ha bandito il nucleare ormai da decenni

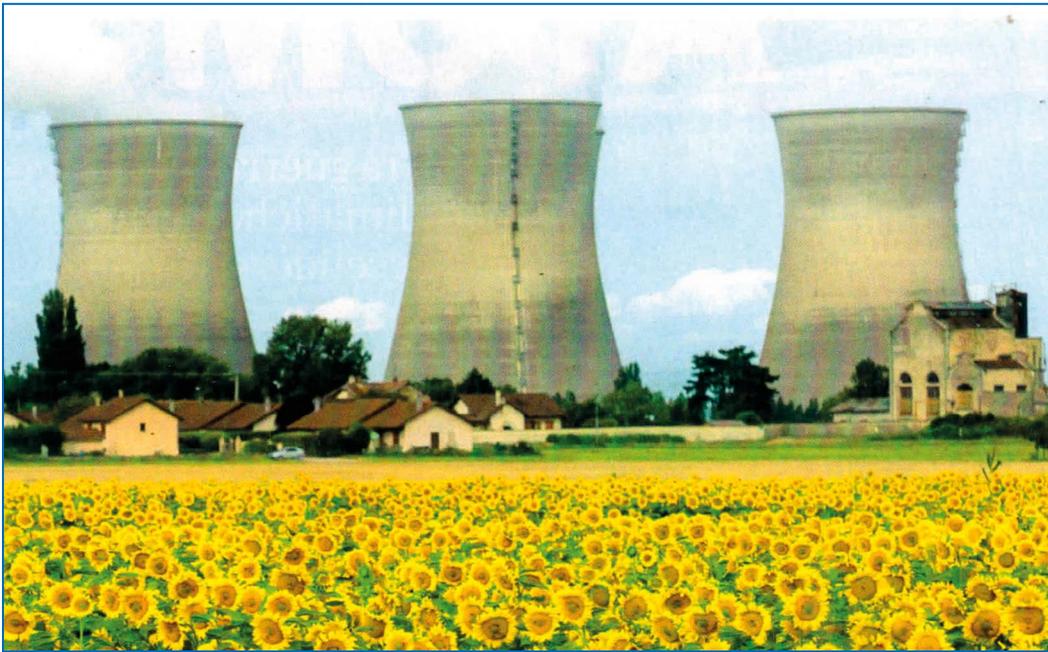


Figura 3 - Centrale nucleare di Budej.



i reattori di piccola potenza che stanno avendo negli ultimissimi tempi un grande sviluppo, sono stati concepiti addirittura dagli anni Sessanta

Panoramica generale sui reattori di terza e quarta generazione

Gradualmente, ai vecchi reattori se ne affiancarono di nuovi: quelli di terza generazione con sistemi di sicurezza più avanzati. La Francia ha già deciso che ne costruirà sei a breve termine ai quali se ne potrebbero aggiungere altri otto, ma anche Ungheria, Polonia, Svezia, Finlandia, Romania, Slovenia e Slovacchia hanno in programma di costruire nuovi reattori nucleari di grande taglia, cioè capaci di generare una potenza di circa 1 GWe. La vera novità che promette di rivoluzionare lo scenario, sono però i reattori di piccola taglia, detti Small Modular Reactor (SMR). Essi generano potenze di circa 100 MWe (pari a 0,1 GWe) ed hanno il vantaggio di richiedere investimenti inferiori, essere costruiti in condizioni controllate (non in un grande cantiere) e con una logica più vicina alla produzione in serie, abbattendo anche i costi di realizzazione. In Russia ce ne sono già due montati sulla nave Akademik Lomonosov per portare energia alle miniere oltre Circolo Polare Artico (si veda la *figura 10*). Ed in Cina ve ne sono altri due sulla

terraferma, mentre in Europa arriveranno nei prossimi anni. Ve ne sono numerosi in programma, e la Francia sta sviluppando Nuward mentre altri puntano su prodotti stranieri. La Romania punta su NuScale (di tecnologia statunitense), la Polonia su BwrX di General Electric (pure statunitense) e i Paesi Bassi sull'SMR di Rolls Royce (Regno Unito). E poi vi sono i microreattori, ancora più piccoli, che possono stare anche in un camion ed hanno applicazioni di nicchia come rifornire una base militare ed in futuro persino sulla Luna. In *figura 4* uno Small Module Reactor, cinese in costruzione.

In realtà i reattori di piccola potenza che stanno avendo negli ultimissimi tempi un grande sviluppo, sono stati concepiti addirittura dagli anni Sessanta. Infatti già in quegli anni nei paesi in via di sviluppo la maggior parte delle centrali elettriche aveva una potenza unitaria minore di 100 MWe. I piccoli reattori perciò dovrebbero essere costruiti in gran numero. Ciò è difficile specialmente nei paesi in via di sviluppo, che tendono ad avere ottime risorse naturali, in particolare idroelettriche.

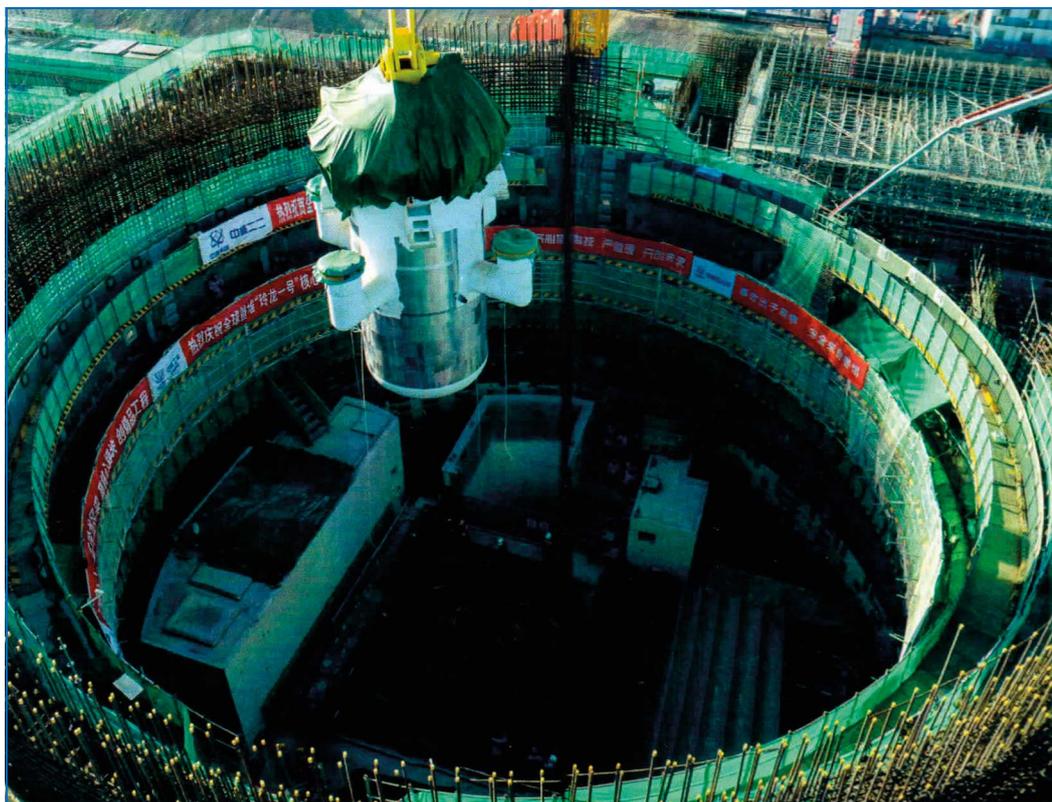


Figura 4 - Small Module Reactor cinese in costruzione.



I reattori di piccole dimensioni sono stati perciò finora sfruttati soprattutto in zone lontane e di difficile accesso come l'Artide e l'Antartide

I reattori di piccole dimensioni sono stati perciò finora sfruttati soprattutto in zone lontane e di difficile accesso come l'Artide e l'Antartide. Vi sono però due esempi interessanti di piccoli reattori in funzione presso zone urbane. Il reattore Ågesta ha fornito calore al sobborgo Farsta di Stoccolma. Esso era un tipo di reattore ad acqua pesante pressurizzata, che produceva 125 MW di calore, una parte del quale era convertita in 35 MW di elettricità, mentre i restanti 70 MW di calore erano disponibili come acqua calda dello scarico delle turbine.

La centrale nucleare di Ågesta, conosciuta anche con la sigla R3, era una centrale elettronucleare svedese situata nei pressi di Huddinge, comune facente parte della contea di Stoccolma in Svezia. Si trattava della prima centrale nucleare svedese a produzione commerciale. I lavori di costruzione iniziarono nel dicembre 1957, mentre l'entrata in funzione effettiva risale al maggio 1964. Dieci anni più tardi cessò

ufficialmente la propria attività. La centrale forniva sia elettricità che calore per teleriscaldamento per una parte della città di Stoccolma. L'impianto era composto da un singolo reattore PHWR da 10 MW di potenza netta.

Il secondo importante reattore da prendere in considerazione è quello norvegese di Halden che produceva vapore per una fabbrica di carta. Esso era del tipo ad acqua pesante bollente ed impiegava uranio naturale come combustibile. Il reattore era posto in una caverna scavata nel fianco di una montagna e produceva vapore di acqua bollente che cedeva calore ad acqua comune in uno scambiatore di calore e la trasformava in vapore utilizzabile per il processo di produzione della carta. La sua capacità era di 10 MW di calore.

Gli SMR puntano su modularità e piccola taglia per ridurre i costi di costruzione e rimpiazzare idealmente le inquinanti centrali termiche, a carbone o a gas.

Secondo la IAEA sono un'ottantina le tipologie attualmente in fase di sviluppo e progettazione nel mondo, alcune già operative come in Russia o in Cina, altre in costruzione avanzata come in Argentina. Tra gli SMR più vicini alla realizzazione in Europa, il progetto Nuward, sviluppato in Francia dalla società Edf ha da poco ultimato la fase progettuale, e dovrebbe vedere il primo impianto dimostrativo in costruzione entro il 2030. Le centrali Nuward hanno una configurazione composta da due reattori da 170 MWe ciascuno, contenuti in un unico edificio per una capacità produttiva di 340 MWe complessivi. La tecnologia usata per il raffreddamento è l'acqua in pressione, (PWR), che produce anche grandi quantitativi di vapore ed

energia termica (circa 540 MW per reattore nel progetto Nuward). EDF pensa di usare queste centrali per rifornire centri urbani di medie dimensioni e siti industriali ad alto consumo di energia.

Per quanto riguarda la sicurezza, tutti i sistemi adottati sono di tipo passivo, cioè si basano su soluzioni automatizzate per ridurre il rischio di errori umani. Reattori, deposito di combustibile e sistemi di sicurezza sono tutti alloggiati in una sorta di "isola nucleare" autonoma, in grado, per almeno tre giorni di provvedere a tutte le operazioni di primo intervento, in caso di necessità, senza apporti dall'esterno. In *figura 5* si può vedere il primo dei due moduli raffreddati ad elio della centrale di Shidao Bay.



Le centrali Nuward hanno una configurazione composta da due reattori da 170 MWe ciascuno, contenuti in un unico edificio per una capacità produttiva di 340 MWe complessivi



Figura 5 - Modulo della centrale di Shidao Bay.



Se le ipotesi prudenziali sono corrette, per soddisfare la capacità generativa del Ventunesimo secolo, dovrebbero servire sei-sette milioni di tonnellate di uranio che è l'equivalente di tutte le risorse mondiali attualmente stimate

Il nucleare dal presente al futuro

Sebbene molti cittadini europei e statunitensi credano che l'energia nucleare stia vivendo un momento di stasi, sono in fase di costruzione numerosi reattori. Proviamo a considerare che cosa succederebbe se il livello di elettricità generato dalla fissione nucleare fosse mantenuto costante a 400 GWe per 100 anni, come se le centrali nucleari ora in esercizio o in costruzione rappresentassero il totale mondiale definitivo. Occorrono circa 30 tonnellate di uranio arricchito al 3% (con uranio 235) per produrre un gigawatt nel corso di un anno in un reattore ad acqua naturale (LWR) attuale, così chiamato perché impiega come refrigerante (fluido termovettore) l'acqua comune, che viene anche trasformata in vapore dal calore generato durante la fissione.

Circa l'80% dei reattori oggi in esercizio è del tipo LWR. L'uranio 235, presente nell'uranio naturale (che è quasi totalmente uranio 238) viene arricchito cosicché nel reattore si ottenga la massa critica che avvia la reazione di fissione a catena. Nell'eventualità, molto probabile, che si arrivi ad un miglioramento del 15% delle prestazioni del nocciolo in un reattore (vale a dire che gli elementi di combustibile abbiano una vita utile più lunga) sarebbero necessarie soltanto 20 tonnellate di uranio arricchito all'anno (corrispondenti a 160 tonnellate di uranio naturale) per produrre un gigawatt in un anno. Se le ipotesi prudenziali sono corrette, per soddisfare la capacità generativa del Ventunesimo secolo, dovrebbero servire sei-sette milioni di tonnellate di uranio che è l'equivalente di tutte le risorse mondiali attualmente stimate. Questo modello si basa però su un ciclo a passaggio unico (o unipassante), ciclo nel quale un combustibile non viene ritrattato per essere usato di nuovo e quindi si avrebbe un accumulo di elementi di combustibile irradiato. Siccome la quantità di combustibile fresco che viene utilizzata in un reattore è uguale alla quantità di com-

bustibile esaurito che viene scaricata, 400 GWe produrrebbero 20 tonnellate di elementi di combustibile irradiati (dei quali il 94% è uranio, 1% è il plutonio che è il suo sottoprodotto ed un 5% è costituito da prodotti di fissione) per un totale annuo di 8000 tonnellate.

E siccome i siti per il confinamento delle scorie radioattive potrebbero immagazzinare ciascuno 70000 tonnellate stimate in metalli pesanti (principalmente uranio e plutonio) bisognerebbe allestire un sito di queste dimensioni ogni nove anni (11 siti in cento anni).

Allestire un sito per il confinamento delle scorie non è complesso dal punto di vista tecnico, ma solleva problemi giuridici e sociali rilevanti se si considera l'opposizione dell'opinione pubblica alla manipolazione, al trasporto e all'immagazzinamento di materiali radioattivi. Già adesso l'allestimento di solo pochi siti di questo genere compresi quelli di Yucca Mountain negli Stati Uniti e di Gorleben in Germania è stato posticipato a causa delle forti proteste degli ecologisti. Oltre ad esaurire le riserve mondiali di uranio e a produrre una enorme quantità di elementi di combustibile irradiati dell'arco del Ventunesimo secolo, la tecnologia LWR produrrà comparativamente poca energia.

Tuttavia l'effetto serra ed il riscaldamento globale offrono un poderoso argomento a favore dell'incentivazione dell'uso dell'energia nucleare, se si riescono a superare i problemi relativi alla sicurezza e allo smaltimento delle scorie. Svitati scenari per la riduzione dell'anidride carbonica (CO₂) sono stati proposti allo scopo di scongiurare le possibili conseguenze del riscaldamento del globo, e ciascuno di essi attribuisce un ruolo diverso all'energia nucleare. Alla XIV Conferenza mondiale sull'energia tenutasi a Montreal nel 1989 si propose una riduzione delle emissioni di CO₂ dipendenti dalla produzione di energia a quattro miliardi di tonnellate all'anno en-

tro il 2030. Il cosiddetto scenario Jülich per la riduzione della CO₂ raccomandava un incremento nella conservazione dell'energia, un passaggio dall'impiego del carbone a quello del gas naturale (metano) ed una maggiore dipendenza dalla energia solare e dalle biomasse.

Il nucleare avrebbe fornito il resto dell'energia. Diversamente da altri scenari, la proposta Jülich tiene in considerazione i costi crescenti della conservazione dell'energia. La conservazione non è che una soluzione controversa alla carenza di energia finché si rispettano certi limiti. Infatti, elevati risparmi energetici, richiedono investimenti di capitale sproporzionatamente grandi oltre che mutamenti dell'infrastruttura esistente. Questi investimenti rendono i costi finanziari e sociali della produzione di energia più convenienti dei costi associati al suo risparmio. Dati i vincoli finanziari e sociali imposti dalla conservazione dell'energia, sarebbe bene che l'energia nucleare aumentasse dal livello attuale di 400 GWe a 2 TWe (2000 GWe) entro il 2030-2035, accompagnata da un'evoluzione dei tipi attuali di reattori oltre che dallo sviluppo di tecnologie più efficienti.

La maggiore capacità energetica verrebbe usata sia per generare elettricità che per la trasformazione del gas naturale in idrogeno, un combustibile potenzialmente importante. Uno scenario di questo genere non è in contrasto con la raccomandazione di riesaminare l'energia nucleare dopo gli incidenti di Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima. Anche senza considerare la minaccia di un riscaldamento del pianeta, sarebbe sensato aumentare i livelli di generazione dell'energia nucleare.

La prudenza sia economica che ambientale, spinge verso una maggiore dipendenza dal nucleare se non altro per far fronte alle vicissitudini delle forniture mondiali di energia. Nella TAVOLA n. 3 sono disegnate le principali fasi del ciclo del combustibile. Il ciclo del combustibile nucleare segue la

storia dell'uranio che è l'elemento principale usato come combustibile nella fissione nucleare. L'uranio, come ben sappiamo si trova in natura, ma nella maggior parte dei casi ha bisogno di essere arricchito (processo nel quale viene aumentata la percentuale dell'isotopo fissile) prima di poter essere usato come combustibile. In un ciclo unipassante gli elementi di combustibile esauriti possono essere collocati in depositi temporanei o definitivi. Altrimenti si provvede al ritrattamento del combustibile e alla sua riutilizzazione.

Anche il plutonio generato dalla fissione viene o confinato o ritrattato per renderlo utilizzabile come combustibile. Per generare due terawatt sono necessari all'incirca 2500 reattori nucleari, ma anche garanzie di sicurezza, adeguati sistemi per confinare le scorie, rigorose salvaguardie contro la proliferazione di armi nucleari e, soprattutto, il consenso dell'opinione pubblica. Sebbene un simile grande sviluppo possa a volte apparire impossibile, i risultati in campo costruttivo raggiunti nel passato suggeriscono diversamente. Per giungere alla capacità di generare due terawatt si dovrebbero aggiungere circa 40 GWe alla rete elettrica mondiale ogni anno. Nel 1984 e nel 1985 si aggiunsero più di 30 GWe; 40 GWe, sono dunque palesemente raggiungibili. In figura 6 è riportata la foto del reattore nucleare di Leibstadt, in Svizzera che entrò in esercizio nel 1984. È un reattore BWR (cioè ad acqua bollente). In esso, l'acqua naturale funziona da fluido termovettore. Essa, una volta riscaldata dal calore prodotto dalla fissione è trasformata in vapore, che va ad alimentare le turbine.

Evoluzione dei criteri di sicurezza ed analisi dei rischi

Dai suoi inizi, negli anni Cinquanta l'industria nucleare ha studiato meticolosamente le misure di sicurezza, anche se con gli anni, il concetto prevalente di analisi della sicurezza è cambiato.



Per generare due terawatt sono necessari all'incirca 2.500 reattori nucleari, ma anche garanzie di sicurezza, adeguati sistemi per confinare le scorie, rigorose salvaguardie contro la proliferazione di armi nucleari e, soprattutto, il consenso dell'opinione pubblica



Figura 6 - Centrale nucleare di Libstadt in Svizzera.



Nello scenario dei due terawatt, una fuga del genere dovrebbe avvenire una volta ogni 40 anni, in quanto vi sarebbero cinque volte più reattori e cinque volte più occasioni di incidenti

Il metodo oggi più accreditato per affrontare i problemi legati alla sicurezza, è l'analisi probabilistica del rischio, la quale usa come definizione di rischio la probabilità che un evento accada moltiplicata per le sue conseguenze. La definizione è stata mutata dal settore assicurativo, che tratta il rischio come la probabilità di un evento moltiplicata per il suo costo monetario. L'applicazione dell'analisi probabilistica del rischio alla sicurezza nucleare, però, non è davvero priva di limitazioni. L'incapacità di questo tipo di analisi di descrivere appieno tutte le implicazioni dei grandi incidenti nucleari è in parte responsabile della diffidenza dell'opinione pubblica nei confronti dell'energia nucleare. Inoltre si considera la probabilità di un evento catastrofico come improbabilità e non esistono statistiche disponibili in mancanza di

eventi del genere. Una molteplicità di statistiche sintetizza invece un grande evento che derivi da molti guasti a componenti diversi e, così facendo crea ulteriore incertezza. Inoltre, queste improbabilità implicano periodi talvolta molto lunghi per il verificarsi di una catastrofe. La logica della probabilità, tuttavia, non include il concetto di eternità e quindi i danni di grandi catastrofi sfuggono ad una valutazione razionale. L'analisi probabilistica del rischio prende in considerazione il prodotto di eventi catastrofici e di basse probabilità, quando in realtà (e come si può ben comprendere) l'opinione pubblica considera soltanto le conseguenze (non la probabilità) di simili eventi. Per essere significativa, l'analisi probabilistica del rischio deve essere comparativa. Per esempio, confrontando i progetti di svariati reattori nucleari si è arrivati a scoprire e a correggere errori. Un'analisi del genere è molto sensibile e sofisticata per quanto riguarda l'identificazione di possibili carenze relative alla sicurezza. Applicando l'analisi probabilistica del rischio alla progettazione, dei reattori nucleari, i tecnici stimano che la completa fusione del nocciolo di un LWR abbia la probabilità di accadere una volta su 20 000 anni. Nel caso poi che si verifici, si può ridurre ulteriormente la probabilità di una fuga di radioattività connessa all'incidente con un sistema di contenimento ben progettato. Una fuga rilevante di radioattività sarebbe quindi da attendersi soltanto una volta ogni 100 000 anni. Nello scenario dei due terawatt, una fuga del genere dovrebbe avvenire una volta ogni 40 anni, in quanto vi sarebbero cinque volte più reattori e cinque volte più occasioni di incidenti. È chiaro che una frequenza di questo genere non può considerarsi accettabile, quindi è imperativo che la sicurezza dei reattori progredisca più velocemente del loro numero. Sarebbe auspicabile che la probabilità di fusione

del nocciolo di un reattore che si trovi in un edificio di contenimento sia inferiore ad una volta su 4000 anni. Tuttavia, anche quando questa bassa frequenza è paragonata con la probabilità di incidenti associati ad altre fonti di energia, (per esempio un'esplosione in una raffineria di petrolio) la paura di un disastro nucleare persiste soprattutto dopo gli incidenti di Windscale, Chernobyl, Fukushima e Three Mile Island. In quest'ultima centrale, il sistema di contenimento funzionò molto bene, ed il 28 marzo 1979 non vi furono fughe apprezzabili di radioattività, né morti né contaminati, mentre a Chernobyl il 26 aprile 1986 la funzione di contenimento fu pressoché inesistente (il reattore nucleare era coperto da una semplice tettoia di un capannone industriale) e la contaminazione fu molto estesa.

Gli ingegneri devono quindi puntare a costruire edifici di contenimento che prevengano il danno associato alla fusione del nocciolo o ad altri incidenti. Per realizzare sistemi di contenimento efficaci sarebbe bene non guardare al rischio dell'evento, ma esaminare separatamente frequenza e conseguenze. Dobbiamo quindi limitare, con una corretta progettazione gli effetti di un incidente grave, indipendentemente da quanto bassa sia la sua probabilità. Un edificio di contenimento ben progettato e costruito (si veda la *TAVOLA n.4*), limitando la fuoriuscita di materiali radioattivi, potrebbe proteggere la popolazione e l'ambiente all'esterno del reattore. Un edificio di contenimento molto efficace (si vedano le *TAVOLE 1, 2 e 4*) è un elemento indispensabile per tutte le applicazioni su larga scala dell'energia nucleare. I nuovi progetti assicurano un'esclusione "deterministica" di conseguenze catastrofiche quali una fusione (si ricordi sempre che per fusione, si intende la fusione termica e non nucleare del nocciolo, poiché quest'ultima avverrebbe solo nei reattori a fusione) del nocciolo o l'esplo-

sione di vapore. Hans Henning Hennies, Günter Kessler e Josef Ebil dell'Università e del Centro di ricerche nucleari di Karlsruhe, in Germania, hanno per esempio analizzato la realizzabilità di un progetto di contenimento potenziato per i reattori ad acqua naturale. A prima vista, le strutture di contenimento oggi esistenti hanno molto in comune con questo progetto, ma la differenza fondamentale risiede nel fatto che il progetto di Karlsruhe si spinge più a fondo in ciascun aspetto.

Il progetto garantisce il raffreddamento di emergenza mediante la circolazione naturale del refrigerante tra l'involucro conglomerato cementizio (o calcestruzzo) ed il rivestimento interno di acciaio, anche in presenza di elevate pressioni. Qualsiasi emissione che entrasse nel refrigerante e sfuggisse da esso viene filtrata alla sommità della cupola. È previsto un dispositivo per ingabbiare il nocciolo in caso di fusione; lunghi cavi di acciaio assorbirebbero, dissipandola, l'eventuale energia proveniente dall'esplosione di un frammento del nocciolo (si rivedano le *TAVOLE 1, 2, e 4*).

Un altro miglioramento in fatto di sicurezza sta nell'introduzione di caratteristiche di sicurezza intrinseca o passiva. Nei reattori nucleari a sicurezza passiva, potrebbero trascorrere molti giorni prima che si rendesse necessario un intervento umano per contenere la radioattività. Tra queste caratteristiche vi sono una grande capacità di assorbimento del calore proveniente dal nocciolo del reattore e la rete di tubazioni che pompano refrigerante verso il reattore. I reattori a sicurezza passiva dovrebbero avere anche un grande rapporto fra superficie di raffreddamento e volume del nocciolo, tale da consentire al nocciolo stesso di raffreddarsi per diffusione termica e convezione naturale. Altri progetti puntano sulla semplicità migliorando così la sicurezza anche per altre vie.

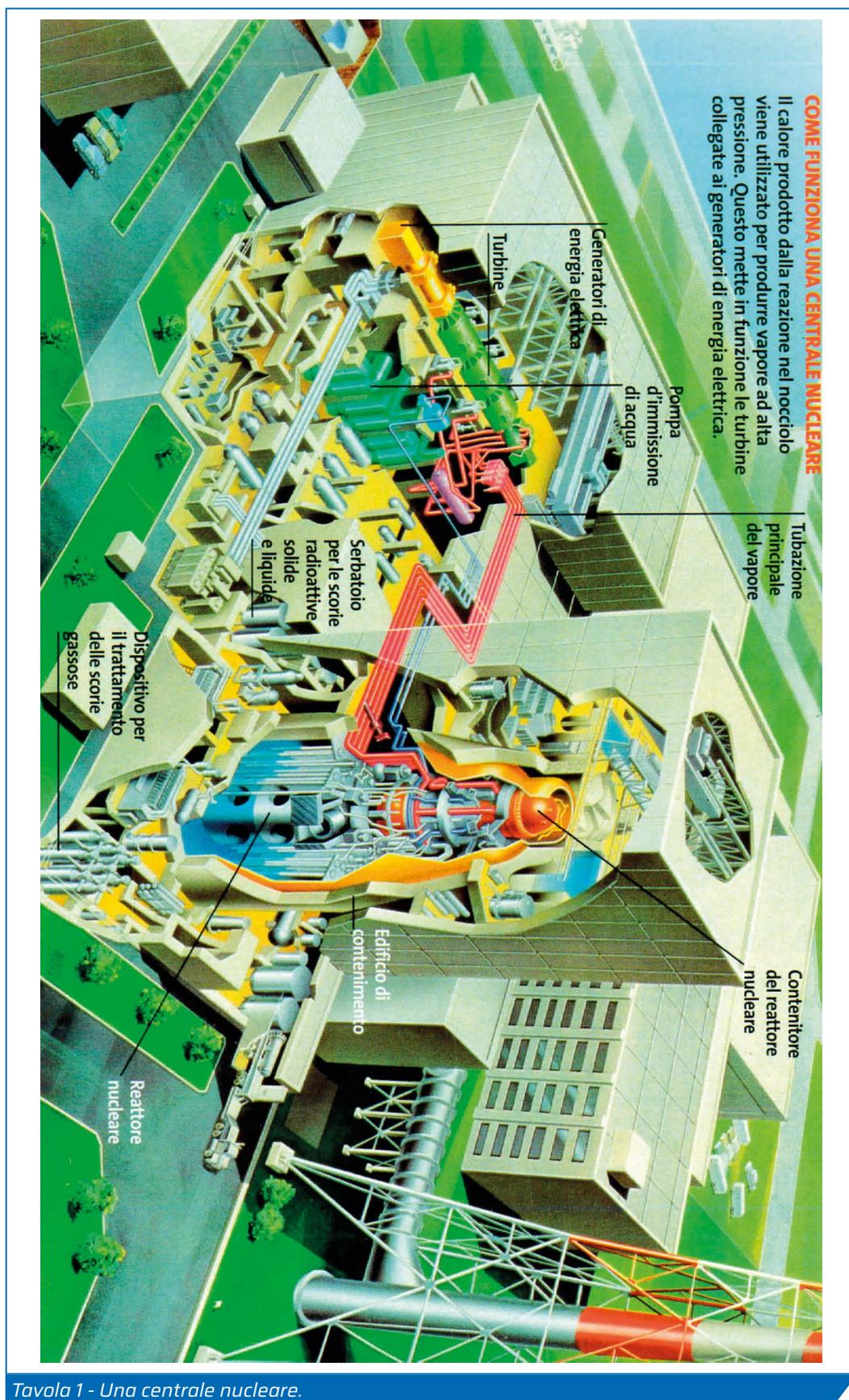
Precisiamo che la *TAVOLA n.1* descrive una moderna centrale nucleare con le relative



Gli ingegneri devono quindi puntare a costruire edifici di contenimento che prevengano il danno associato alla fusione del nocciolo o ad altri incidenti



Per realizzare sistemi di contenimento efficaci sarebbe bene non guardare al rischio dell'evento, ma esaminare separatamente frequenza e conseguenze



COME FUNZIONA UNA CENTRALE NUCLEARE
 Il calore prodotto dalla reazione nel nocciolo viene utilizzato per produrre vapore ad alta pressione. Questo mette in funzione le turbine collegate ai generatori di energia elettrica.

Tavola 1 - Una centrale nucleare.



Dobbiamo quindi limitare, con una corretta progettazione gli effetti di un incidente grave, indipendentemente da quanto bassa sia la sua probabilità

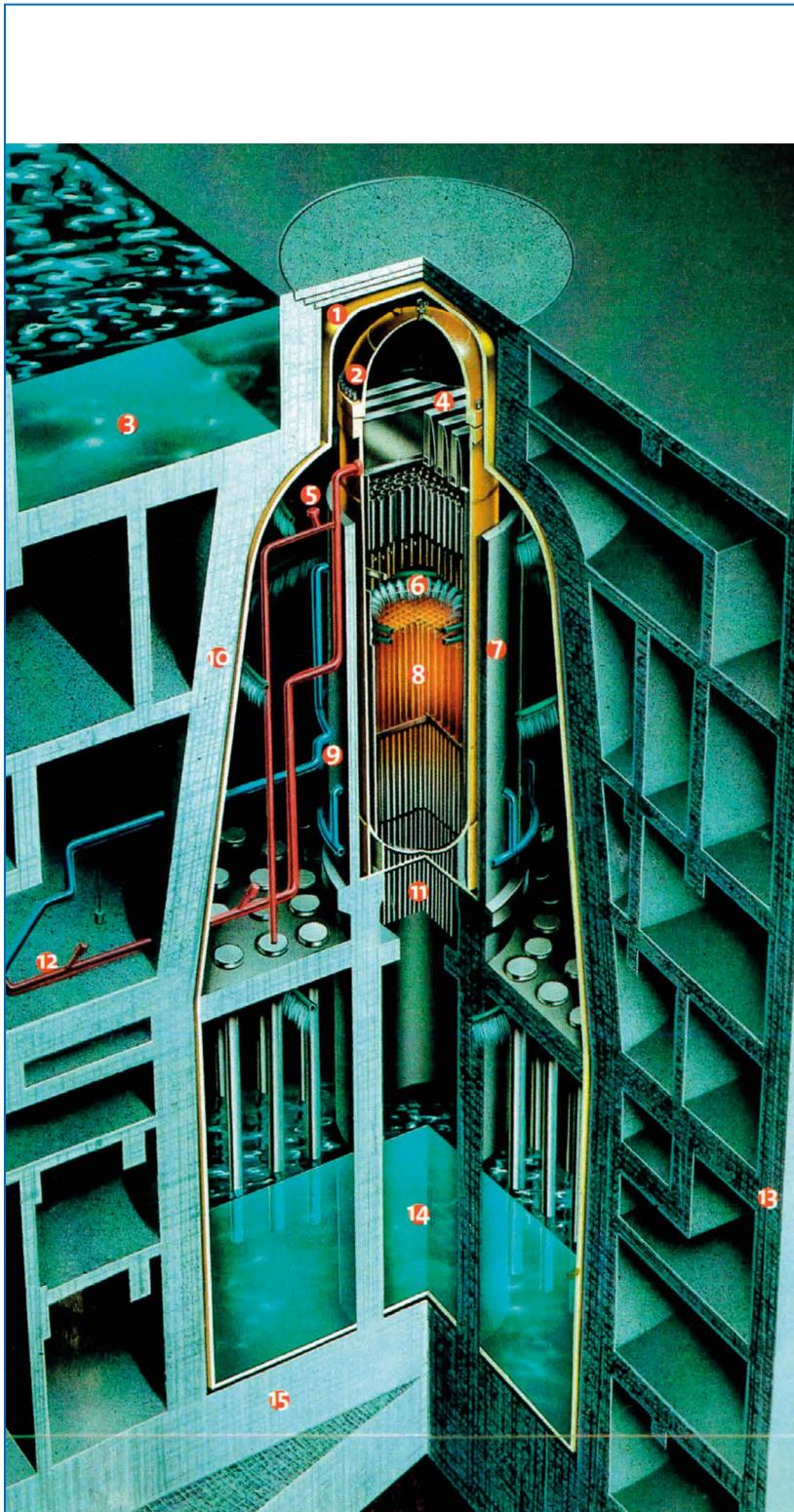


Tavola 2 - Spaccato del reattore.

Legenda relativa alla TAVOLA n.2

1. Schermatura delle radiazioni di 3 centimetri di spessore.
2. Contenitore o vessel del reattore di 16 centimetri di spessore.
3. Piscina superiore di emergenza;
4. Circuiti di vapore;
5. Valvola principale di sicurezza per lo sfogo del vapore;
6. Spruzzatori di acqua di emergenza;
7. Parete di contenimento del vessel di 60 centimetri di spessore;
8. Reattore nucleare;
9. Circuito di immissione dell'acqua;
10. Parete schermante antiradiazioni dello spessore di 2 metri;
11. Barre di controllo;
12. Circuito di estrazione del vapore;
13. Edificio del reattore di 1,60 metri di spessore a prova di impatto con un aereo;
14. Piscina inferiore di controllo della pressione;
15. Zoccolo di cemento armato del diametro di 390 metri e dello spessore di 6,5 metri.

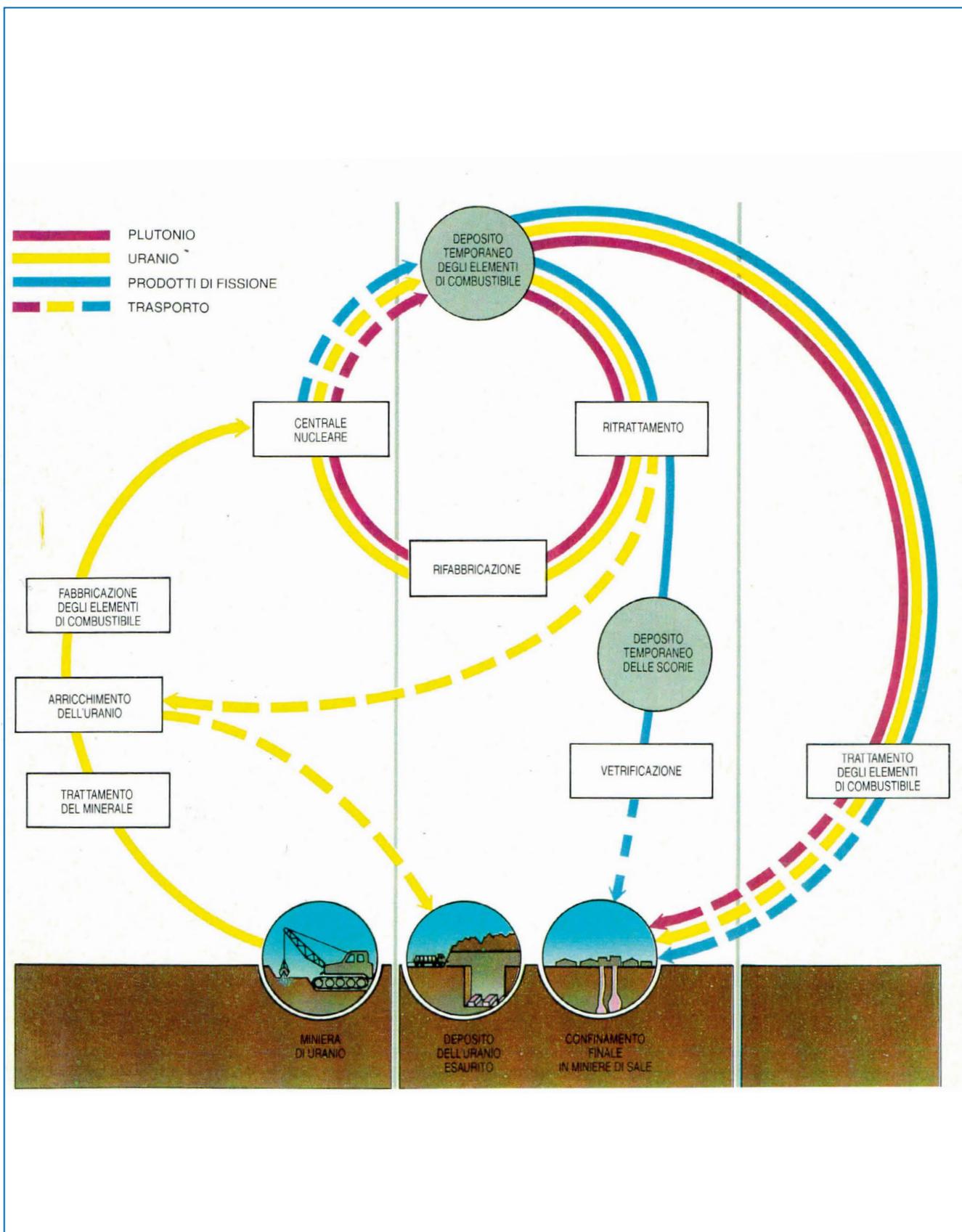


Tavola 3 - Ciclo del combustibile nucleare.

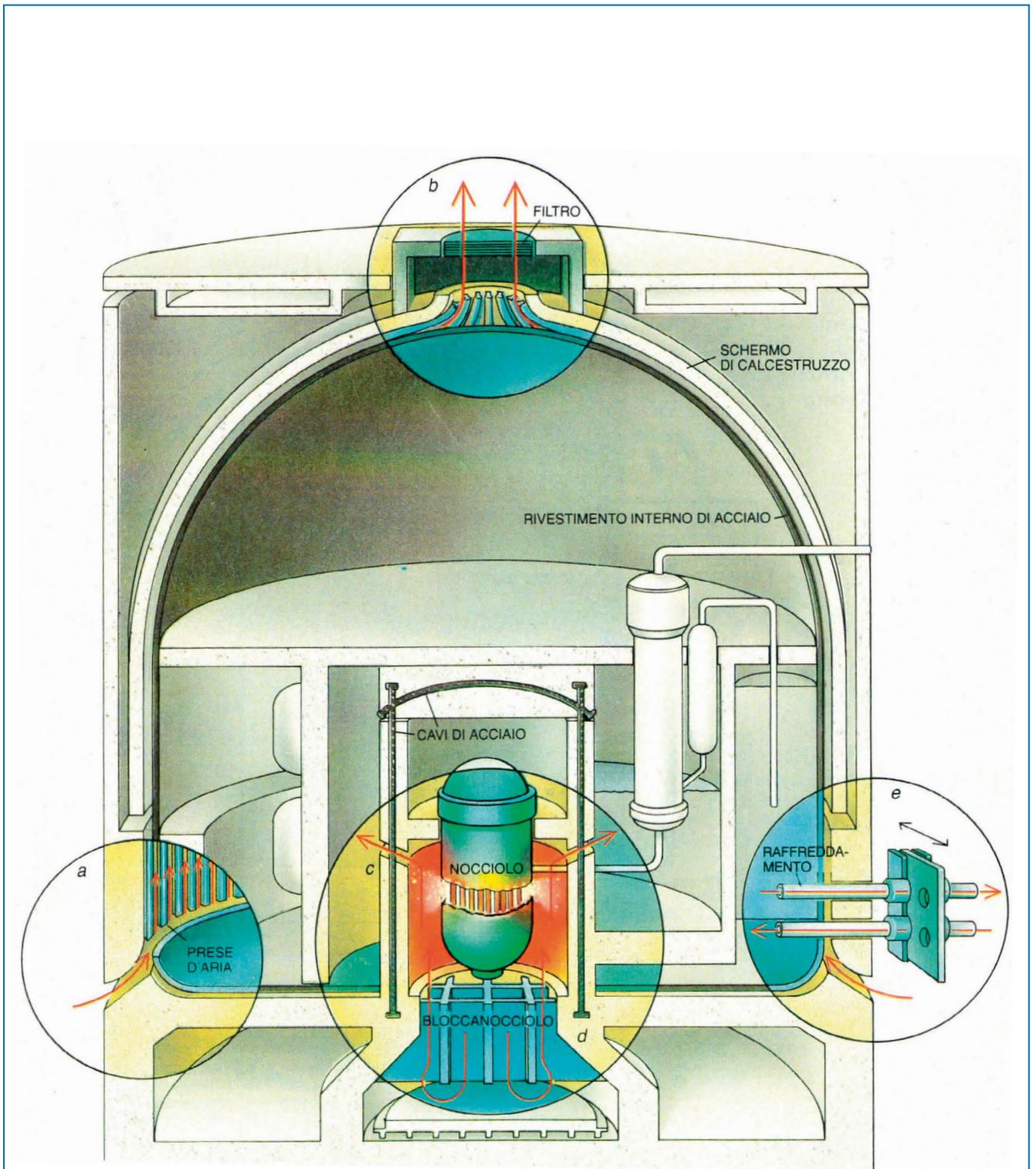


Tavola 4 - Struttura di contenimento.

infrastrutture. Nella *TAVOLA n.2* vi è invece lo “*spaccato*” del reattore (o di uno dei reattori se la centrale ne contiene più d'uno). Oltre alla sicurezza, lo scenario dei due terawatt deve considerare anche la fornitura del combustibile. Diventa tassativo passare ad un ciclo efficiente, nel quale venga fissionato il 60% invece che lo 0,6% dell'uranio. Come è stato accennato, il ciclo del combustibile “*usa e getta*” per i 400 GWe esaurirebbe le riserve mondiali di uranio in 100 anni. Ad una capacità generativa di due terawatt l'uranio si esaurirebbe in 20 anni. La tecnologia ad alta efficienza del combustibile oggi disponibile è quella del reattore autofertilizzante a neutroni veloci, così chiamato in quanto crea più combustibile di quanto non ne consumi, convertendo l'uranio non fissile in plutonio fissile. I reattori veloci autofertilizzanti hanno superato la prova della fattibilità tecnica e sono avviati a diventare realizzabili anche su scala commerciale.

Potendo estrarre dalla stessa quantità di uranio cento volte più energia degli LWR, essi rappresentano un importante progresso tecnologico. Se nei reattori veloci autofertilizzanti venisse fissionato tutto l'uranio, gli impianti nucleari potrebbero generare almeno 35 000 TWt, contro i 70 TWt generati oggi (in parte perché il maggior costo dell'uranio addizionale a basso tenore, che è molto più difficile da estrarre, potrebbe essere compensato dai risparmi dovuti all'efficienza dei reattori convertitori veloci o autofertilizzanti). Per i reattori autofertilizzanti si rende necessario il ritrattamento del combustibile. Se i reattori autofertilizzanti veloci e quelli ad acqua naturale generassero due terawatt, essi produrrebbero 35 000 tonnellate di elementi di combustibile irradiati. In questo scenario, bisognerebbe installare un nuovo sito per il confinamento delle scorie un anno sì e uno no. Ciò costituirebbe una prospettiva piuttosto ardua. Nel processo di ritrattamento, il plutonio gene-

rato durante la fissione, dell'uranio, viene estratto chimicamente dal combustibile esaurito, insieme con l'uranio non utilizzato (il combustibile esaurito viene sciolto in acido nitrico che forma una soluzione dalla quale si possono rimuovere con mezzi chimici uranio, plutonio e prodotti di fissione, le ceneri nucleari). I quattro impianti di ritrattamento oggi in esercizio (Sellafield nel Regno Unito, La Hague in Francia, Tarapur in India e Tokai in Giappone) trattano un totale di 2 040 tonnellate all'anno. Complessivamente si potrà disporre di una capacità di ritrattamento di 4 540 tonnellate all'anno (non vi sono dati disponibili sulle capacità di ritrattamento cinesi e/o sovietiche). Gli impianti esistenti e quelli in programma possono ritrattare soltanto la metà delle 10 000 tonnellate di combustibili esauriti prodotti ogni anno. In tal caso siamo ben lontani dalle 35 000 tonnellate che indicavamo prima.

Al di là delle caratteristiche di sicurezza e dei cicli di combustibile efficienti, si attendono altri sviluppi tecnologici, primo fra tutti quello della fusione nucleare controllata (si veda il libro su tale argomento scritto da Carlo Di Leo e Giorgio Lucarelli, edito dall'Editoriale Delfino e ormai giunto alla sua terza edizione). Sebbene questo processo non abbia ancora superato la soglia della fattibilità scientifica e non possa essere inclusa negli scenari del prossimo futuro, le aspettative sono notevoli. Il previsto reattore a fusione ITER lascia pensare che nella prima metà del nostro secolo la fusione raggiungerà molto probabilmente la fattibilità commerciale. Contrariamente all'immagine prevalente, la tecnologia attuale della fusione pur essendo molto più pulita della fissione, non è tale in senso assoluto. Infatti nel processo di fusione vengono emessi neutroni che rendono radioattivi i materiali circostanti ed il reattore stesso. Altre tecnologie di fusione però, prevedono cicli di combustibile avanzati, che forse sarebbero poveri, o addirittura



Diventa tassativo passare ad un ciclo efficiente, nel quale venga fissionato il 60% invece che lo 0,6% dell'uranio

privi di neutroni, trasformando così la fusione in una fonte di energia pulita. I reattori "ibridi" potrebbero un giorno combinare fissione e fusione. In quest'ipotesi, i neutroni provenienti dalla fusione verrebbero assorbiti da un involucro di materiale fissionabile, che a sua volta convertirebbe l'uranio naturale o altri elementi in materiali fissili.

Da ultimo, un trattamento chimico di seconda generazione potrebbe non soltanto separare plutonio e uranio, dai prodotti di fissione, ma anche rimuovere certi ingombranti isotopi a lunga vita. Questa tecnologia di ritrattamento potrebbe portare a tecniche di seconda generazione per il confinamento definitivo delle scorie che, una volta rimossi questi isotopi, richiederebbe meno spazio. In tal modo non sarebbe più necessario allestire un nuovo sito di confinamento ogni due anni. Nella *TA-VOLA n.4* vi è un disegno che illustra cosa possa accadere ad un reattore a fissione di ultimo tipo in caso di rottura.

Il progetto di una struttura di contenimento per un reattore del tipo LWR (cioè,

lo ripetiamo, ad acqua leggera) deve assicurare che, in caso di incidente, i frammenti e la radioattività del nocciolo restino all'interno dell'impianto. La struttura in calcestruzzo è rivestita all'interno di 40 millimetri di acciaio con fori di passaggio per la circolazione naturale dell'aria (a).

L'aria fluisce alla sommità della cupola dove un filtro impedisce la fuga di radiazioni (b). Se il nocciolo del reattore esplosione, lunghi cavi di acciaio assorbono e dissipano l'energia liberata dai frammenti che salgono (c); una speciale ingabbiatura "bloccanocciolo" impedisce che gli effetti della fusione si estendano al sottosuolo (d). Nel caso di brusca salita della pressione, apposite serrande scorrevoli bloccano tutte le tubazioni, impedendo la liberazione di radioattività (e). Il "piano" si basa su un progetto dell'Università e del Centro di ricerche nucleari di Karlsruhe, in Germania. In *figura 7* si può vedere la centrale di Tarapur, in India, che comprende complessivamente quattro reattori, di cui due ad acqua bollente e due ad acqua pesante pressurizzata.



n trattamento chimico di seconda generazione potrebbe non soltanto separare plutonio e uranio, dai prodotti di fissione, ma anche rimuovere certi ingombranti isotopi a lunga vita

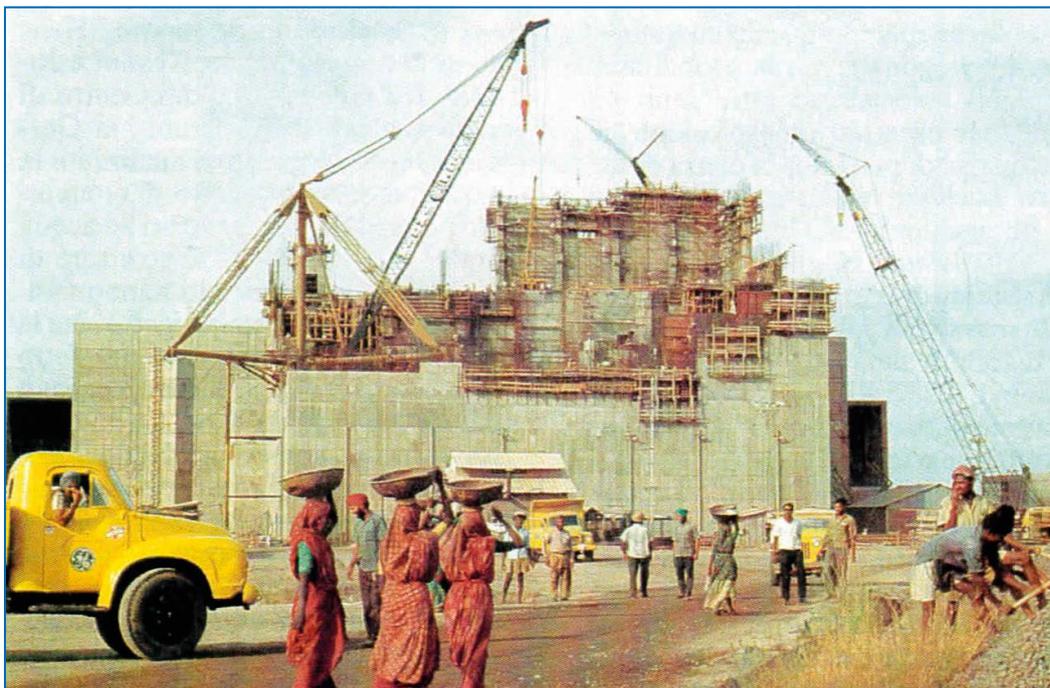


Figura 7 - Foto della centrale di Tarapur.



A Tarapur si trova anche uno dei quattro impianti di ritrattamento chimico in funzione nel mondo

Questa centrale che è la più antica tra quelle funzionanti in tutto il mondo, venne collegata alla rete elettrica mondiale nel 1969 e ancora oggi fornisce 300 megawatt di potenza elettrica. A Tarapur si trova anche uno dei quattro impianti di ritrattamento chimico in funzione nel mondo.

Sebbene la costruzione di altri 2000 reattori, sparsi in tutto il mondo sia tecnologicamente possibile, vi è un grande divario fra questa fattibilità ed i vincoli politici e sociali. La World Commission on Environment and Development ha pubblicato un rapporto intitolato *“Il futuro di noi tutti”* (Bompiani, Milano, 1988), che riconosceva il potenziale dell’energia nucleare ma esitava a far suo lo scenario dei 2500 reattori, senza alcune precisazioni vincolanti. Il Rapporto Brundtland, così chiamato dal nome di Gro Harlem Brundtland che aveva presieduto la commissione, stabiliva che ci dovessero essere procedure di allarme precoce nei casi di incidenti nucleari o di liberazione eccessiva di radioattività: tali procedure riguardavano l’addestramento a reagire alle emergenze, le normative per il trasporto dei materiali radioattivi, la standardizzazione dell’addestramento degli operatori e delle procedure di concessione delle licenze di costruzione, la formalizzazione delle norme di sicurezza e di gestione dei reattori, la denuncia delle emissioni normali e accidentali, i criteri di scelta dei siti, delle specifiche per i depositi di scorie e, delle procedure per la decontaminazione e smantellamento degli impianti. È significativo il fatto che questi problemi non siano tecnologici, bensì istituzionali.

Molti di questi punti sono stati affrontati da organizzazioni internazionali fra cui la AIEA, l’Euratom e la World Association of Nuclear Operators, ma i paesi che non vogliono farlo, non possono essere costretti ad aderire alle indicazioni di questi enti, mentre controllo della qualità, gestione rigorosa dell’impianto e direzione assennata sono difficili da garantire senza un potere

impositivo. Come scrisse Peter W. Beck, già nella Shell London: *“A molti di noi è probabile che sia sfuggita la lezione più importante di Chernobyl: la natura internazionale della sicurezza nucleare. In altre parole, l’esigenza primaria di avere ovunque progettazione ed esercizio sicuri è un problema di tutti, indipendentemente dalle frontiere o dalle distanze.”* Purtroppo il consenso internazionale richiesto dall’energia nucleare è, per sua stessa natura, oscurato da discussioni a livello nazionale, incentrate sul ritrattamento e sul confinamento delle scorie. Questi problemi potrebbero rivelarsi l’ostacolo principale per l’energia nucleare. Le iniziative avviate negli ultimi 20 anni, per sviluppare impianti di ritrattamento privati (ossia non gestiti dallo stato) hanno avuto scarso successo. La Hague e Sellafield sono due esempi di questo tipo di impianti gestiti da privati, sebbene in entrambi i casi il Governo mantenga una sua presenza. Iniziative analoghe non hanno avuto successo negli Stati Uniti e in Germania. Negli anni Settanta l’Amministrazione Carter varò il Nuclear Non-Proliferation Act, che richiedeva la chiusura di tutte le attività private di ritrattamento, mirando all’abbandono di quel tipo di processo anche in altri paesi. In Germania la Wackersdorf nel 1989 fermò la costruzione di impianti del genere, costringendo le aziende elettriche a rivolgersi a Francia e Gran Bretagna per il trattamento. In *figura 8* è riportato il data center recentemente acquisito da Amazon Web Services negli Stati Uniti, che è alimentato con 960 MW dalla vicina centrale di Susquehanna.

L’eterno dilemma sul confinamento delle scorie ed il regime di non proliferazione.

Le controversie continuano ad infuriare sul tema del confinamento delle scorie, poiché tutti i reattori ne generano una certa quantità. Per fortuna, vi sono delle so-

luzioni. Karl Cohen, della General Electric Company ha suggerito che gli Stati Uniti adottino una soluzione intermedia immagazzinando sul luogo i combustibili esauriti per almeno 100 anni. Ma i depositi di scorie sono destinati a divenire un problema mondiale. Ci dovrebbe essere un'istituzione internazionale (preferibilmente la IAEA, oppure un'altra agenzia sotto la sua supervisione e guida) che si incarichi di costruire e gestire una o più strutture di deposito temporaneo. La capacità di questi impianti situati preferibilmente su isole o penisole dovrebbe essere inizialmente di circa 400 000 tonnellate di metalli pesanti. Una variante di questa idea fu proposta all'inizio degli anni Settanta dai ricercatori Cesare Marchetti e Wolf Häfele. Strutture di confinamento internazionali presentano numerosi vantaggi. Incoraggiano lo sviluppo di istituzioni a carattere mondiale, immuni da politiche naziona-

li. Impianti di questo genere fornirebbero all'industria nucleare il tempo di cui ha bisogno per mettere a punto metodi scientifici, tecnologici ed istituzionali per il confinamento definitivo delle scorie. L'accesso a questi depositi darebbe ai paesi che si sono tenuti lontani dal nucleare a causa dei problemi delle scorie un'occasione di ripensamento. I siti potrebbero anche svolgere un ruolo determinante nello smantellamento delle armi nucleari e nell'assicurare la non proliferazione nucleare. Se il loro allestimento e la loro gestione avessero successo questi siti temporanei potrebbero anche essere il punto di partenza per il confinamento definitivo delle scorie. E se i siti venissero scelti in base ad accordi mondiali, gli impianti di ritrattamento dei combustibili ed eventualmente di altri processi di carattere nucleare, potrebbero essere costruiti e gestiti negli stessi posti.



Ma i depositi di scorie sono destinati a divenire un problema mondiale



Figura 8 - Fig.8 Data center alimentato da una centrale.

L'idea di una regolamentazione internazionale dell'energia nucleare venne espressa per la prima volta nel 1946 nel piano Acheson-Lilienthal-Baruch. Questi "padri fondatori" del nucleare avevano capito con chiarezza il suo potenziale ed erano spinti dalla preoccupazione che le armi nucleari avrebbero potuto proliferare con la diffusione di materiale fissile. Il piano Acheson-Lilienthal-Baruch non venne però mai portato a compimento. L'Atomic Energy Act del 1954 avviò invece il suo programma "Atomi per la pace". A questo seguì nel 1970 il "Trattato di non proliferazione nucleare" che, sottoscritto da 140 nazioni costituisce il sistema di salvaguardia internazionale tuttora amministrato con successo dall'IAEA.

Il sistema di salvaguardia dell'IAEA è costituito da tre elementi: contabilità, sorveglianza e contenimento dei materiali entro un quadro di obiettività, razionalità ed efficienza. Esiste un vasto consenso sul fatto che il controllo quantitativo è quello che più si avvicina a soddisfare questi criteri. Di conseguenza, fra i tre la maggiore importanza è rivestita dalla contabilità dei materiali. Per la maggior parte dei reattori nucleari, la contabilità dei materiali permette di identificare e marcare voci specifiche con relativa facilità. Ma questo genere di controllo è più difficile negli impianti di ritrattamento, arricchimento e fabbricazione del combustibile; in questi casi, le misure di sorveglianza e la presenza costante di ispettori diventano sempre

più determinanti. È giusto ricordare che la proliferazione delle armi nucleari non è necessariamente correlata agli usi civili del nucleare. Di fatto anche una grossolana apparecchiatura per l'arricchimento centrifugo può costituire un mezzo di accesso alle armi. E va fatta una grande distinzione fra un unico, rozzo dispositivo nucleare ed un arsenale nucleare operativo. Garantire la non proliferazione non è affatto un compito facile.

Il regime di non proliferazione di oggi (cioè la rete di misure tecniche, istituzionali e politiche già in atto) funziona abbastanza bene. Di conseguenza, un'espansione della capacità nucleare da 400 GWe a 2 TWe non contribuirebbe alla proliferazione, posto che vengano mantenute certe norme. Non dovrebbe essere troppo difficile applicare analogamente la contabilità ai nuovi reattori. E poiché i pochi impianti di arricchimento che attualmente sono in funzione sono controllati in modo rigoroso, aumentare di un fattore cinque il numero di impianti di arricchimento e di fabbricazione del combustibile non dovrebbe porre problemi troppo onerosi. A questo punto possiamo concludere che i reattori di terza generazione saranno più sicuri di quelli attuali. E quelli di quarta permetteranno di risolvere in gran parte i problemi delle scorie.

Nella *Tabella n.1* è riassunta l'attuale situazione dei rifiuti radioattivi (somma dei rifiuti immagazzinati e rifiuti smaltiti) segnalati all'International Atomic Energy



Il sistema di salvaguardia dell'IAEA è costituito da tre elementi: contabilità, sorveglianza e contenimento dei materiali entro un quadro di obiettività, razionalità ed efficienza

Tipologie di radioattività	Totale in metri cubi	Smaltiti	Immagazzinati
Rifiuti ad attività molto bassa	1 072 684	758 802	313 882
Rifiuti a bassa attività	2 030 416	1 825 558	204 858
Rifiuti ad attività intermedia	872 990	671 097	201 893
Rifiuti ad alta attività	9 283	3 960	5 323

Tabella 1 - I rifiuti radioattivi.

Agency (IAEA) ai sensi della convenzione congiunta sulla sicurezza della gestione del combustibile esaurito e sulla sicurezza della gestione dei rifiuti radioattivi. I dati riguardano l'ultimo anno di riferimento che varia in base al paese dichiarante 2019-2023. Non sono presenti i dati degli Stati Uniti

Cenni sui reattori di quarta generazione

Nella classificazione dei reattori nucleari, sono considerati di quarta generazione quelli a neutroni veloci (fast) raffreddati a metallo liquido (a sodio o a piombo, chiamati SFR ed LFR rispettivamente), oppure ad elio o a sali fusi. Molti di questi reattori sono ancora ad una fase embrionale del loro sviluppo e sono soprattutto Russia, Cina ed India ad essere attive in questo campo. I più promettenti, dal punto di vista dei tempi di realizzazione, sono i reattori raffreddati al sodio, con tre grandi progetti in corso: il reattore russo BN-1200 da 1200 MWe, CFR-1000 da 1GWe, in fase di pianificazione in Cina ed il reattore Natrium della società statunitense Terrapower, che tra i suoi investitori annoverava anche Bill Gates. Questo reattore è abbinato ad un sistema di accumulo di energia che gli consente di raggiungere una potenza di picco da 5900 MWe. Lo scorso 29 marzo 2024 il progetto Terrapower ha compiuto un importante passo in avanti sottoponendo alla Commissione Regolatoria per il Nucleare degli Stati Uniti la richiesta del permesso di costruzione del suo prototipo a Kemmerer, nello stato del Wyoming, in un sito occupato da una centrale a carbone dismessa. Il reattore Natrium di Terrapower avrà una potenza di 345 MWe e si basa su una tecnologia messa a punto dal gruppo GE Hitachi Nuclear Energy. L'abbinamento al sistema di accumulo a sali fusi rende possibile una tecnologia prima ritenuta ardua per una centrale nucleare e cioè modulare l'ero-

gazione di energia elettrica, in base alla domanda ed alla capacità di assorbimento istantanea della rete. Il combustibile usato in questo reattore è un tipo di uranio a basso arricchimento denominato Haleu (High Assay Low Enriched Uranium) con un contenuto di uranio-235 compreso tra il 5 ed il 20%, concepito per ridurre la quantità di scorie da gestire.

Anche l'impiego del sodio liquido come refrigerante presenta i suoi vantaggi, perché il punto di ebollizione di questo elemento, è a 882°C, molto più elevato di quello dell'acqua e con meno criticità di gestione. I costi previsti per lo sviluppo del progetto sono di 2 miliardi di dollari, finanziati da una partnership pubblica e privata al 50% con il Dipartimento dell'energia (Doe) statunitense, ed in particolare, con il suo programma ARDP (Advanced Reactor Demonstration Program) per lo sviluppo di reattori dimostrativi avanzati.

Altri progetti sono in corso in tutto il mondo per sviluppare reattori nucleari a neutroni veloci, refrigerati al piombo. Tra questi uno sforzo congiunto tra Regno Unito e Stati Uniti, condotto dalla Westinghouse per un reattore da 450 MWe, l'iniziativa Sealer-55 avviata in Svezia ed altre due che vedono impegnate aziende italiane. Trattasi del progetto europeo Alfred guidato da Ansaldo Nucleare, per un reattore da 120 MWe, e di Newcleo startup italo-britannica, che ha in programma la messa punto di due reattori a piombo fuso di piccole dimensioni (uno da 200 MWe e l'altro da 30 MWe). La prima ondata di reattori SMR dovrebbe arrivare tra il 2030 ed il 2035 ed alcuni reattori impiegheranno nuove soluzioni per il combustibile. L'opzione più interessante è il triso che è costituito da microsferi di uranio o composti dell'uranio anche fortemente arricchiti.

L'arricchimento medio che si usa oggi non supera il 5% di uranio-235. Invece in questo caso si arriverebbe al 19% che è il limite per il materiale non proliferante, per



Sono in corso il tutto il mondo per sviluppare reattori nucleari a neutroni veloci, refrigerati al piombo



L'energia nucleare grazie alle nuove filiere che la rendono più affidabile, stia riprendendo piede in tutto il mondo

cui, se non si vogliono avere problemi di geopolitica è bene rimanere entro questo limite. Le microsferi di uranio vengono poi ricoperte da strati multipli di materiali isolanti e raccolte in sferette o cilindri di grafite a loro volta inserite in un volume di qualche metro cubo. I dettagli della progettazione possono cambiare, ma l'idea è che i vari blocchi si possano combinare fino ad ottenere la potenza richiesta. E la polverizzazione del combustibile in microsferi impedisce il raggiungimento di temperature troppo elevate, rendendo il reattore intrinsecamente più sicuro. In *figura 9* un blocco di triso, ottenuto racchiudendo l'uranio all'interno di piccole sfere.

Con il triso e con tutti i reattori di terza generazione resta invariato il problema delle scorie, per risolvere il quale, si stan-

no studiando reattori AMR (Advanced Modular Reactor) di quarta generazione che consentono di riprocessare i rifiuti e produrre solo scorie con un tempo di decadimento molto più breve (300 anni invece di 100 000) e quindi molto più facili da gestire. Il loro arrivo è previsto intorno al 2040. Nella *Tabella n.2* si può vedere in quali percentuali le principali nazioni europee sfruttino il nucleare e le altre fonti.

L'unica nazione europea tra quelle sopraelencate che ricava uno 0% dall'atomo è proprio l'Italia. In realtà vi sarebbe anche la Turchia, con la differenza, però, che in quest'ultima nazione è prevista l'entrata in servizio di quattro centrali entro il 2035, mentre per l'Italia non è previsto nulla.

Nuovi impianti nucleari stanno nascendo in tutto il mondo. Una centrale è prevista in Marocco, una in Algeria, quattro in Egitto, altre quattro in Iran, quattro negli Emirati Arabi, quattro in Nigeria, due in Sudafrica, due in Kenya altre otto in India, altre due in Giappone, altre tre nella Corea del Sud, per non parlare della Cina che ne ha già in funzione 54 e ne sta costruendo altre 25 per ridurre entro qualche decennio le emissioni di gas serra pari a zero.

Nell'America Latina il Messico ne ha due, il Brasile ne ha due e ne sta costruendo una terza, mentre l'Argentina ne ha tre e sta costruendo la quarta. Questi sono solo degli esempi di come l'energia nucleare grazie alle nuove filiere che la rendono più affidabile, stia riprendendo piede in tutto il mondo. In *figura 10* si può vedere la nave russa Akademik Lomonosov alimentata da due Small Nuclear Reactor.

Tutti i nuovi impianti, quando saranno realizzati potranno avere diverse applicazioni. Anzitutto saranno collegati alla rete elettrica, ma potranno anche produrre acqua calda per il teleriscaldamento oppure idrogeno, biocombustibili, acqua dissalata ed altro ancora. Un SMR può fornire energia ad un distretto industriale e, a tal proposito vi è interesse da parte di indu-

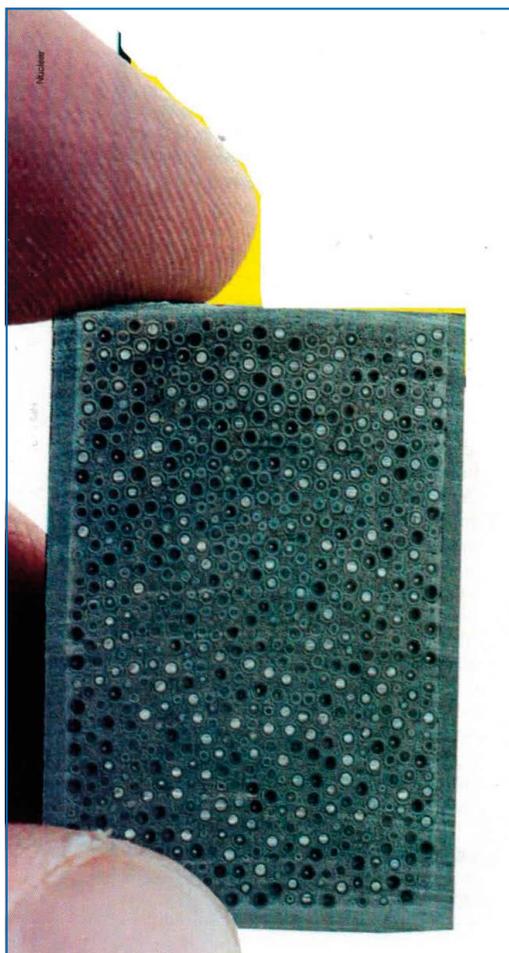


Figura 9 - Blocco di triso.

Nazione	Nucleare	Carbone	Petrolio	Gas naturale	Biofuel	Solare, eolico, idroelettrico
Inghilterra	8,1%	3,2%	34,8%	39,4%	8,9%	5,6%
Spagna	12,9%	3,2%	43,5%	24%	7,8%	8,6%
Francia	36,5%	3,7%	30,8%	15,7%	8,7%	4,6%
Italia	0%	5,4%	35,3%	40,5%	10,2%	8,6%
Svizzera	28,3%	0,4%	33,9%	11,4%	12,6%	13,4%
Slovenia	22,8%	12%	38%	10,6%	11,2%	5,4%
Ungheria	16,7%	5%	32,2%	32%	11,2%	2,9%
Bulgaria	21,9%	26,7%	22,3%	14,4%	10,8%	3,9%
Romania	8,6%	12%	30,7%	29%	13,2%	6,5%
Ucraina	25,6%	23,6%	17%	27,1%	4,8%	1,9%
Slovacchia	25%	14,2%	23,9%	22,7%	12,1%	2,1%
Repubblica Ceca	18,9%	31,3%	22,2%	14,8%	11,7%	1,1%
Germania	3,3%	20,5%	33,4%	24,15	11,8%	6,9%
Paesi Bassi	1,8%	8,6%	38,4%	36,6%	9,1%	5,5%
Belgio	22,5%	5,4%	36%	25,3%	7,5%	3,3%
Svezia	28%	3,3%	18,6%	1,3%	28,9%	19,9%
Finlandia	21,7%	10%	23,7%	3,5%	33,8%	7,3%
Turchia	0%	25,1%	28,8%	27,4%	3,1%	15,6%
Russia	7%	15,3%	19,3%	54,8%	1,6%	2%
Bielorussia	5,8%	3,1%	28%	56,5%	6,6%	0%

Tabella 2 - Percentuali di energia sfruttate dalle varie nazioni europee.

strie dell'acciaio, del vetro, della ceramica e del cemento. Negli Stati Uniti molti vedono nel nucleare anche per alimentare i grandi data center, per le criptovalute e per l'intelligenza artificiale. In un mondo che cambia rapidamente è importante fare delle scelte decisive.

In Europa vi sono tre tipi di iniziative: estensione della vita dei reattori attuali, costruzione di grandi reattori e progettazione e costruzione di diversi SMR. Sarebbe auspicabile che anche l'Italia prendesse parte a queste iniziative anche se per ora non si intravedono spiragli.



Figura 10 - La nave Akademik Lomonosov.



**Negli Stati Uniti
molti vedono
nel nucleare
anche per
alimentare i
grandi data
center, per le
criptovalute
e per
l'intelligenza
artificiale**

Bibliografia

Per quanto riguarda l'energia nucleare in senso lato, un'ottima trattazione si può trovare nelle seguenti opere di carattere generale:

- Ameglio Paolo, *Introduzione ai principi di ingegneria nucleare ed all'analisi dei reattori nucleari*, E.C.I.G. editore, 1981, Genova.
- Bandini Buti Alberto, *Teoria e funzionamento dei reattori nucleari*, Sandit, Albino (BG), 2007.
- Boffi Vinicio, *Fisica del reattore nucleare*, voll.1 e 2, Patron, Bologna, 1974.
- Casarelli Giancarlo, *Fisica ed ingegneria del reattore nucleare*, Edizioni Riata
- Cumo Maurizio, *Impianti nucleari*, Casa editrice Università La Sapienza, Roma, 2012.
- Di Leo Carlo e Lucarelli Giorgio, *La fusione nucleare controllata, confinamento magnetico, confinamento inerziale e fusione fredda*. Terza edizione, Editoriale Delfino, Milano, 2024.

- Errico Giovanni, *Pensiero Atomico*, SUSIL Edizioni.
- Forgione Nicola, Oriolo Francesco, *Principi di ingegneria nucleare: generazione e trasporto del calore*, Tipografia Editrice Pisana (TEP), Pisa, 2014.
- Leonardi Renzo, *L'ABC dell'energia nucleare*, Lantana editore, aprile 2011.
- Loizzo Paolo, *Le centrali nucleari, ovvero il diavolo che non c'è*, Monteleone, Vibo Valentia, 1994.
- Lombardi Carlo, *Impianti nucleari*, Polipress, Milano, 2012.
- Mainardi Enrico, *Impieghi dell'energia nucleare*, Editoriale Delfino, Milano, 2008.
- Maizza Vito, *Centrali elettronucleari, macchine ed impianti*, Laterza, Bari, 1984.
- Mazzoleni Francesco, *Introduzione all'ingegneria nucleare*, Liguori, Napoli, 1988.
- Milano Guido, *Energia nucleare, fissione, fusione, sicurezza e ambiente*, Aracne, Roma 2011

Novelli Antonio, *Elementi di controllo dei reattori nucleari*, Clup, Milano 1988.
 Paci Sandro, *Introduzione ai sistemi nucleari*, Edizioni Università di Pisa, dicembre 2002.
 Quartieri Giuseppe, *Introduzione alla sicurezza dei sistemi nucleari*, Istituto Bibliografico Napoleone, Roma 2010.
 Sani Luciano, *Centrali elettronucleari*, Edizioni Sistema, Roma, 1984.
 Zanobetti Dino, *Energia nucleare, un dossier completo*, Società editrice Esculapio, Bologna, 2008.
 Zorzoli Giovanni Battista, *Fisica sperimentale dei reattori nucleari*, Feltrinelli, Milano 1971

Per quanto concerne in modo più specifico i temi trattati in questo articolo, segnaliamo i seguenti sette lavori (i primi due in lingua italiana):

Häfele Wolf, *Energia dal nucleare*, *Rivista Le Scienze*, n.267, novembre 1990;
 Parlangei Andrea, *Atomo o non atomo?* *Rivista Focus*, n.380, Giugno 2024;
 Marchetti Cesare, *Geoengineering and Energy Island in Secnd Status Report of the IIASA Project on Energy Systems*, a cura di Wolf Häfele et altri, *International Institute for Applied Systems Analysis RR - 76 - 1*, 1975.

Energy in a Finite World, Volumi 1 e 2, *International Institute for Applied Systems Analysis*, Ballinger Publishing Co, 1981;
 Weinberg Alvin M, *Nuclear Energy and Proliferation: A Longer Perspective in The Nuclear Connection: A Reassessment of Nuclear Power and Nuclear Proliferation*, a cura di Alvin Weinberg et altri, Washington Institute Press, 1985.
 Holdren John et altri, *Exploring the Competitive Potential of Magnetic Fusion Energy: The Interaction of Economics with Safety and Environmental Characteristics in "Fusion Technology" 13*, n.1, gennaio 1988.
 Häfele Wolf, *Technical Safety Measures and Rules in the Nuclear Field in "Atomwirtschaft, Atomtechnik"*, Novembre 1989.



Sarebbe auspicabile che anche l'Italia prendesse parte a queste iniziative anche se per ora non si intravedono spiragli