

Carlo Di Leo

ABSTRACT

Nel numero 126 di Power Technology relativo al mese di novembre 2022 è uscito un articolo, da me stilato, intitolato *L'uranio e le sue applicazioni nell'industria nucleare* in cui si è parlato dell'uranio in senso generico e delle sue applicazioni. Nell'articolo che segue si parlerà invece di quelle che sono le risorse mondiali di uranio e di come esse sono distribuite sul pianeta Terra. Dopo una breve disamina dello stato dell'energia nucleare in Italia e nel mondo, si vedrà in che modo l'uranio viene cercato, estratto e preparato, per divenire quel combustibile che viene effettivamente usato nel nocciolo di una centrale nucleare.

L'energia nucleare in Europa e nel mondo.

In Europa, un terzo dell'energia disponibile è di provenienza nucleare. Carbone, petrolio, gas, energia solare ed eolica sono



L'energia nucleare e le risorse mondiali di uranio

spesso argomenti centrali nei dibattiti televisivi (non sempre tenuti da persone competenti in materia), in parlamento, in scuole ed università o nei luoghi di ritrovo come circoli, ristoranti e bar. Raramente invece si parla o si sente parlare di energia nucleare. Molti di noi pensano di essersi liberati del problema anni fa. Ma forse non tutti sanno che oggi, le centrali nucleari producono una considerevole fetta (1/3 appunto) dell'intera energia consumata nell'Unione Europea. L'energia nucleare rappresenta una valida alternativa agli altri combustibili fossili ed è un componente critico dei mix energetici di tutti gli stati

europei, Italia compresa. Per far fronte alla carenza di combustibili e all'esplosiva industrializzazione dell'intero continente, al termine della Seconda Guerra Mondiale, i primi sei stati fondatori della Comunità del Carbone e dell'Acciaio (la CECA da cui nacque la stessa Unione Europea) decisero di puntare sul nucleare per raggiungere uno stato di indipendenza energetico. Per tale ragione gli stessi sei Paesi fondatori, tra cui l'Italia, diedero vita alla Comunità Europea dell'Energia Atomica (Euratom) con l'obiettivo di contribuire alla ricerca e allo sviluppo di impianti per la produzione di energia da fiss one per usi pacifici.

La prima battuta di arresto si ebbe con l'incidente di Chernobyl del 1986. In Italia il dibattito sul nucleare portò al referendum del 1987 ed alla chiusura definitiva delle centrali di Latina, del Garigliano, di Trino Vercellese e di Caorso, che nei primi anni Sessanta avevano portato l'Italia ad essere uno dei paesi più avanzati nell'ambito della produzione di energia nucleare. La seconda frenata si verificò nel 2011 dopo l'incidente di Fukushima, che passò alla storia per essere stato il disastro industriale più costoso dell'era nucleare. Solo tre mesi dopo in Italia, un secondo referendum portò alla totale cancellazione di ogni ambizione nucleare. I governanti di numerosi stati si sono trovati costretti ad abbandonare il nucleare per far fronte al panico causato da quelle due catastrofi. Ma ben pochi si sono fermati a riflettere sulla sicurezza relativa delle diverse fonti di energia. Uno studio dell'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica, ha calcolato il numero di morti per miliardo di KWh di energia prodotta. Risulta che il carbone è di gran lunga il più letale, seguito da petrolio, biomasse, gas naturale, idroelettrico, solare, eolico ed, infine dal nucleare, che risulta (incredibile ma vero!) la fonte di energia più sicura.

Chi ritiene l'energia idroelettrica un'energia pulita e sicura, farebbe bene a ricordare il disastro del Vajont, che tuttavia non è stato l'unico. Infatti, per fare un confronto basterà ricordare che nel 1975 il collasso di una serie di dighe in Cina, provocò da 171 000 a 320 000 morti, mentre, le vittime accertate del più grave incidente della storia dell'energia nucleare a Chernobyl, secondo stime dell'ONU non furono più di 4 000.

È chiaro quindi che chi vorrà riprendere il cammino dell'energia nucleare, dovrà investire soprattutto sulla sicurezza delle centrali in modo da garantire più elevati margini di sicurezza per gli operatori, per le popolazioni e per l'ambiente circostante. Maggiori problemi per la salute vengono invece dall'estrazione dell'uranio necessario per alimentare i noccioli dei reattori.

Un quarto tra le attuali riserve di uranio si trova in Australia, un altro quarto è distribuito fra Kazakhstan e Canada, mentre l'altra metà è sparso nel resto del pianeta. In Europa, se ne trovano quantità significative quasi dappertutto, inclusa l'Italia, che possiede 6100 tonnellate di riserve, distribuite tra l'alto Lazio e due giacimenti posti a soli 15 chilometri di distanza fra loro sulle alpi Orobiche Lombarde: in Val Vedello (SO) e Novazza (BG). L'Australia dunque possiede ampi giacimenti (formati soprattutto da carnotite) che rappresentano circa il 28% delle riserve del pianeta. La sua produzione è aumentata di quasi il 40% negli ultimi anni (nel 2009 per esempio, furono estratte 7982 tonnellate di uranio metallico) raggiungendo quasi la produzione del Canada. Il più grande singolo deposito di uranio del mondo si trova presso la Olympic Dam Mine, nello stato dell'Australia Meridionale, che tuttavia non è classificata come *miniera uranifera*, essendo in questo caso l'uranio un sottoprodotto dei minerali che vengono ivi estratti. In Australia si trovano la seconda e la quinta miniera per l'estrazione di uranio, (rispettivamente la miniera Ranger, che è la maggiore miniera di uranio a cielo aperto nel mondo, e la già citata Olympic Dam). Le autorità australiane prevedono di triplicare l'estrazione di uranio dalla Olympic Dam nei prossimi anni.

La produzione di uranio australiano e di circa 8000-9000 tonnellate all'anno. Solo nel 2010 vi fu una diminuzione a meno di 6000 tonnellate dovuta a diversi fattori fra cui delle elevate precipitazioni nelle regioni minerarie, anche se l'Australia si è sempre mantenuta al terzo posto come produttore mondiale. L'Australia possiede il 27% delle risorse uranifere mondiali: la maggior parte di queste risorse è localizzata nell'Australia meridionale, mentre altri depositi importanti sono localizzati nel Queensland, nell'Australia occidentale e nel Territorio del Nord.



**La prima
battuta di
arresto si ebbe
con l'incidente
di Chernobyl
del 1986**

La miniera di Olympic Dam, gestita dalla BHP Billiton nell'Australia Meridionale è una miniera di uranio, rame, oro e argento di notevole importanza globale. Sono operative cinque miniere mentre altre sono state proposte. L'espansione delle operazioni minerarie australiane è supportata dal Federal Australian Labor Party. Una delle proposte più controverse è stata quella di costruire una miniera nel Parco Nazionale Kakadu dove esiste già la miniera Ranger di cui possiamo vedere una foto in *figura 1*. Come si è già detto, altri due paesi molto ricchi di uranio sono il Kazakistan ed il Canada. Il Kazakistan ha aumentato di molto l'estrazione di uranio negli ultimi anni, passando dal quinto al primo posto tra i produttori mondiali. Attualmente è in progetto l'apertura di sette nuove miniere, nel sud del paese. Si stima che il territorio del Kazakistan contenga riserve note di ossido di uranio per 750 000 tonnellate, e che altrettante siano ancora da scoprire nel sottosuolo di questo pianeta.

Il Canada possiede ricchi giacimenti presso Saskatchewan (formati soprattutto da pechblenda e costituenti il 12% delle riserve mondiali), dove, dalle tre miniere del McArthur River, del Rabbit Lake si estrae circa il 28% della produzione mondiale (si estraggono mediamente 9 000 tonnellate l'anno). La miniera del McArthur river è anche la più grande miniera di uranio del mondo. Le altre due miniere sono relativamente recenti e si ritiene che la loro produzione dovrebbe aumentare significativamente nei prossimi anni. Inoltre il Canada ha più di recente aperto altre due nuove miniere (Cigar Lake e Midwest). Questa sovrapproduzione, unita al controllo governativo sulla produzione ha un forte peso nel determinare il prezzo dell'uranio sui mercati internazionali.

Gli altri principali estrattori sono la Russia (10% delle riserve mondiali), la Namibia (5% delle riserve con la miniera a cielo aperto di Rossing che è la quarta al mon-

do), il Niger con il 5%, l'Uzbekistan, con il 2% e gli Stati Uniti con una produzione del 6% proveniente esclusivamente dal Wyoming e dal Nebraska.

Giacimenti importanti ma poco sfruttati si trovano in Sudafrica (che gode dell'8% delle riserve mondiali ed ha appena iniziato a sfruttarle con un sistema del reattore a letto di ciottoli), in Brasile (5% delle riserve) ed in Mongolia (1% delle riserve), in India centrale, nello Zimbabwe e in qualche altro paese come appunto l'Italia. Esplorazioni e prospezioni per l'individuazione di nuovi giacimenti sono in corso in vari paesi come Canada, Sudafrica, Kazakistan, Mongolia e nella Repubblica Democratica del Congo.

A seguito di un'indagine geochimica, condotta negli anni Ottanta, nello Sri Lanka, l'AIEA ha accertato l'esistenza di nove aree di notevole interesse geologico per l'anomala mineralizzazione dell'uranio, sei delle quali si trovano al confine e tra il complesso montuoso degli Highland e l'altopiano del Vijayn, principalmente formate da migmatiti, gneiss granitico e biotite, con una composizione di anfiboliti e pirosseni nelle rocce di Maha Cya, comparabile con quello delle Mary Kathleen, a nord-est delle Queensland australiane.



Una delle proposte più controverse è stata quella di costruire una miniera nel Parco Nazionale Kakadu dove esiste già la miniera Ranger

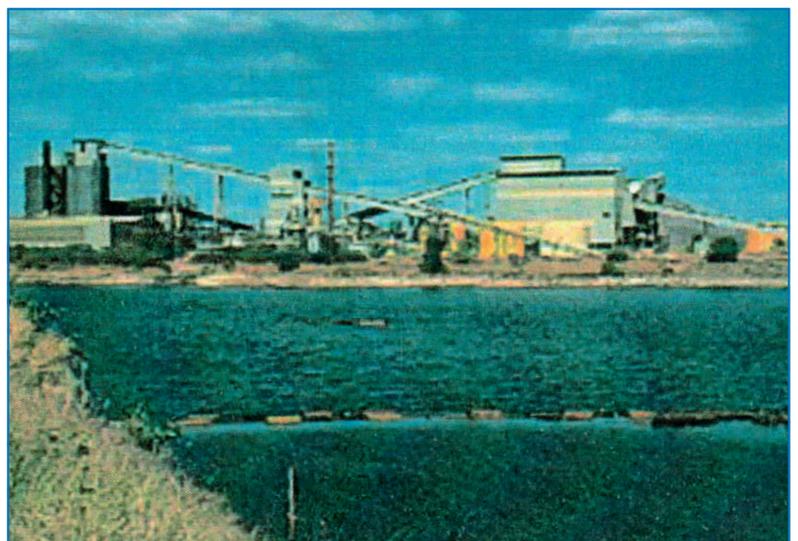


Figura 1 - Foto della miniera Ranger in Australia.



Figura 2 - Campione di uranio arricchito.

In figura 2 è riportata la foto di un campione uranifero molto arricchito, dal colore bianco-argenteo.

L'uranio viene trasportato come elemento in tracce dal mantello terrestre fino alla parte superiore della crosta continentale in massi di granito spinti verso l'alto come quelli visibili in questa immagine (Figura 3) ripresa dal satellite ERST-1 a falsi colori, in una regione arida dell'Australia occidentale, fotografata da 910 chilometri di altezza. Le grandi zone in colore chiaro sono duomi di granito, vestigia di corpi fusi di roccia formati dal calore generato come sottoprodotto della radioattività naturale di certi elementi,



Il principale meccanismo alternativo di trasporto dell'uranio in superficie è il vulcanismo

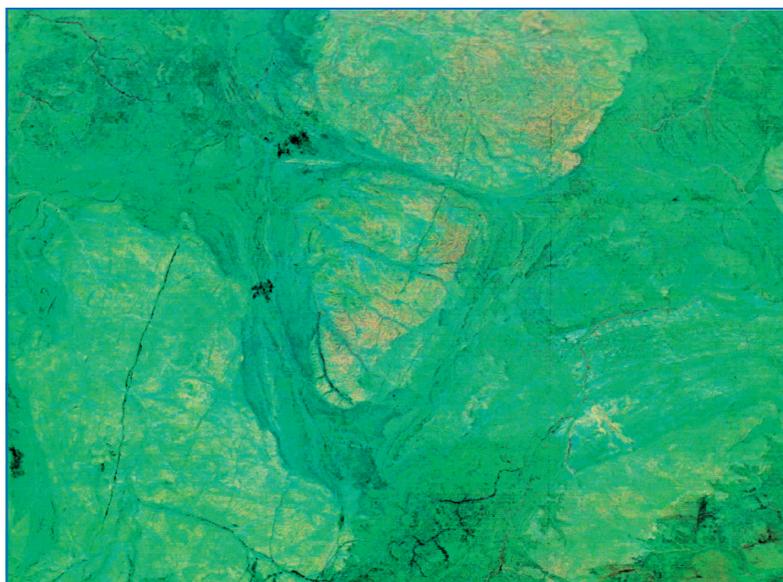


Figura 3 - Immagine di ERTS-1 a falsi colori.

tra cui l'uranio. Le formazioni rocciose sono state portate in superficie in un momento imprecisato dell'era precambriana (risalente ad oltre 600 milioni di anni fa). La successiva alterazione del granito esposto ha liberato l'uranio nelle rocce sedimentarie circostanti, dove, in condizioni opportune, può concentrarsi, grazie ad acque sotterranee in scorrimento e formare giacimenti economicamente sfruttabili. Il principale meccanismo alternativo di trasporto dell'uranio in superficie è il vulcanismo.

In figura 4 è riportato un diagramma ove nell'asse delle ascisse vi è il prezzo dell'uranio (in dollari per libbra) e in ordinate la quantità di uranio disponibile (in libbre). Ricordiamo che una libbra equivale a 0,454 chilogrammi.

Queste curve ipotetiche dell'offerta di uranio mettono in relazione il prezzo previsto dell'uranio (scala orizzontale logaritmica) con la quantità globale di uranio recuperabile a quel prezzo (scala verticale aritmetica). Una possibilità è che la curva dell'offerta segua semplicemente una traiettoria uniformemente ascendente (curva in nero). In altri termini, più alto è il prezzo, maggiore è la quantità di uranio disponibile. L'altra possibilità è che anche un modesto aumento del prezzo porti a scoprire ed a sfruttare praticamente tutti i giacimenti uraniferi, in una data categoria geologica; in tal caso, perché diventi sfruttabile un'altra categoria, si renderebbe necessario un aumento dei prezzi molto sostanzioso. In questo secondo caso, la curva dell'offerta salirebbe e poi si stabilizzerebbe prima di riprendere di nuovo a salire (curva rossa). Si può arrivare a supporre che, quella che ha maggiori probabilità di risultare esatta sia la curva in nero.

Nel granito, l'uranio non è distribuito uniformemente in tutti i minerali più importanti, ma è concentrato in alcuni minerali tra i meno abbondanti. La microfotografia riportata in figura 5 mostra una sezione del granito dello spessore di soli 0,03 millimetri.

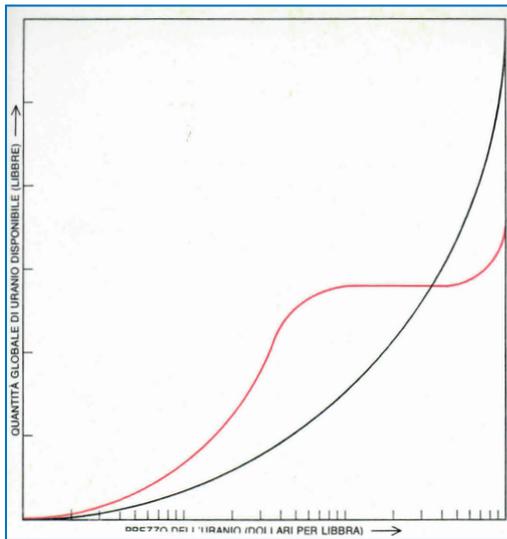


Figura 4 - Curve ipotetiche dell'offerta di uranio.

I colori sono dovuti all'interferenza delle onde luminose trasmesse, le quali vengono scomposte in due componenti che viaggiano a velocità diverse, attraversando i materiali cristallini del campione ed una lastra di quarzo monocristallino. La maggior parte dell'uranio nel campo visivo è contenuto in un cristallo di zircone o silicato di zircone ($ZrSiO_4$) che coincide col granello scuro posto al centro.

Metodi valutazione delle risorse di uranio.

Attualmente, tutti gli impianti nucleari a fissione, siano essi in esercizio o in costruzione, prevedono l'uso dell'uranio come combustibile di base. Il torio, materiale fertile dal quale, per assorbimento neutronico si ottiene l'U-233 fissile, non è stato ancora utilizzato su base commerciale. Pertanto, lo sviluppo dell'energia nucleare è attualmente basato sul ciclo dell'uranio.

Quest'ultimo è un elemento relativamente abbondante sulla crosta terrestre e nel mare: circa 4 ppm nella litosfera e $3,3 \times 10^{-3}$ ppm nel mare. Tuttavia l'uranio è abbastanza uniformemente distribuito, per cui la presenza di depositi con contenuti superiori allo 0,5% è molto rara.

I depositi attualmente coltivati hanno generalmente un contenuto d'uranio oscillante tra lo 0,1 e lo 0,5%.

Le miniere sono sia in superficie che sottoterra, a profondità che vanno da alcune decine di metri a più di mille metri. I metodi di estrazione variano da caso a caso, ma comunque sono sostanzialmente simili a quelli di altri minerali. Lo sfruttamento industriale di un giacimento individuato richiede un periodo di tempo di parecchi anni. Un problema di sicurezza esiste nelle miniere sotterranee, a causa della presenza del radon, un gas radioattivo che si ottiene dal decadimento del radio, che a sua volta deriva dal decadimento dell'uranio 238. Per questo è necessario prevedere degli specifici accorgimenti tra cui una ventilazione molto efficace. Stimare le risorse di uranio oggi disponibili, è un problema assai difficile e controverso. A differenza dei combustibili fossili, non si tratta in questo caso di definire le quantità disponibili in assoluto, che per l'ura-



Un problema di sicurezza esiste nelle miniere sotterranee, a causa della presenza del radon



Figura 5 - Distribuzione dell'uranio nel granito.



Nel 1959 si ebbe una produzione di 34 000 tonnellate di uranio

nio sono praticamente illimitate, bensì di stimare le quantità ottenibili a costi compresi entro valori prefissati. Partendo da minerali a più alta concentrazione di uranio, e quindi a più basso costo di estrazione e passando via via a minerali sempre più poveri, si otterrà così, in linea di principio, una curva riserve-costi unitari crescente in modo monotono. Tale curva dovrebbe avere una pendenza abbastanza ripida se ci si basa sulla estrapolazione dei costi attuali. Tuttavia, qualche esperto ipotizza, in analogia con quanto è avvenuto per altri elementi (rame, zinco, piombo), che, per l'effetto o combinato dei miglioramenti tecnologici, (i giacimenti più poveri saranno sfruttati più tardi) e dei risparmi unitari, associati al fatto di dover trattare una maggiore quantità di minerale, si abbia una crescita dei costi inferiore a quella prevista. Bisogna però non trascurare il fatto che i consumi energetici potrebbero aumentare sostanzialmente, così da condizionare il rendimento energetico complessivo del sistema nucleare.

Volendo ora fare una valutazione dell'ammontare delle riserve dei giacimenti esistenti nel mondo, bisogna anche tener presente che il mercato dell'uranio è stato poco regolare. Inizialmente la sua richiesta è stata molto elevata, in quanto richiesto per usi militari. Successivamente, riducendosi questa esigenza, si è avuto un lungo periodo di stasi, terminato intorno al 1966. Da quell'anno in poi per le crescenti necessità per usi civili, è iniziata

una lenta risalita, non sempre regolare e solo da pochi anni sono stati raggiunti e superati i valori massimi della produzione degli anni Cinquanta. Ad esempio, nel 1959 si ebbe una produzione di 34 000 tonnellate, che progressivamente scese a 14 700 nel 1966. Da qui si risalì con regolarità, fino a riottenere nel 1978 la stessa produzione del 1959. Nel 1980 la produzione raggiunse le 44 000 tonnellate, per poi ridiscendere fino alle 35 000 tonnellate del 1985, rimanendo all'incirca costante fino al 1989 per poi ridiscendere ancora a 25 000 tonnellate nel 1991 e per poi ritornare, infine, a 35 000 tonnellate nel 2000 (pari al 54% del consumo nello stesso anno che fu pari a 65 000 tonnellate). Dal 2000 ad oggi i valori sono grosso modo rimasti costanti. La carenza di produzione è stata sempre coperta dall'utilizzo delle scorte, dal riutilizzo dell'uranio estratto per ritrattamento del combustibile bruciato e, recentemente, dalla diluizione dell'uranio altamente arricchito, derivante dallo smantellamento delle bombe nucleari. Una stima della produzione e del consumo di uranio tra il 1945 ed il 2000 è riportata nella *Tabella 1*. Si tenga ben presente che ciascun numero di questa tabella va moltiplicato per 10^6 tonnellate.

Le prospezioni geologiche per la ricerca dei giacimenti di uranio hanno seguito un andamento analogo, anche se anticipato nel tempo. Pertanto le attuali previsioni sulle riserve di uranio non si basano su un'attività di ricerca regolare e continua

	Ovest	Est	Totale
Produzione	+1,245	+0,754	+1,999
Reattori	-1,008	-0,130	-1,138
Usi militari	-0,264	-0,457	-0,721
Import-Export	+0,144	-0,144	-
Accumulo residuo	+0,117	+0,023	+0,140

Tabella 1 - Stima della produzione e del consumo mondiale di uranio tra il 1945 ed il 2000 in 10^6 tonn.

(come ad esempio avviene per il petrolio) e non possono così ritenersi del tutto rappresentative della situazione reale.

Ad esempio, l'intensa ripresa delle prospezioni effettuate e nella prima parte degli anni Settanta ha consentito di localizzare tanti nuovi giacimenti economicamente sfruttabili e di conseguenza le stime sull'ammontare delle riserve di uranio hanno subito dei continui e sostanziali aumenti. Successivamente, invece, a causa di un eccesso di produzione vi è stata un'ulteriore stasi nelle prospezioni, con conseguente livellamento nelle previsioni. In figura 6 è mostrato un tecnico mentre esaminava un elemento di combustibile presso l'azienda Fabbricazioni Nucleari di Bosco Marengo. Un elemento del genere, contenente 190 chilogrammi di uranio arricchito, poteva produrre un'energia pari a 10 milioni di chilogrammi di petrolio.

La stima delle risorse di uranio viene effettuata congiuntamente dall'OECD-NEA (Organization for Economic Cooperation and Development-Nuclear Energy Agency) e dall'IAEA (International Atomic Energy Agency) che periodicamente pubblicano un rapporto (detto familiarmente *libretto rosso* per il colore della sua copertina), dal titolo: *Uranium: Resources, Production and Demand*. Secondo l'edizione del 2009 le risorse recuperabili a costi inferiori a 130 dollari (statunitensi) su chilogrammo, sono poco meno di cinque milioni e mezzo di tonnellate.

Bisogna tener presente che tale valore è puramente nominale, e non riflette quello del mercato: valori intorno a 80 dollari su chilogrammo furono ottenuti tra il 1975 ed il 1980, durante la cosiddetta crisi petrolifera ma poi scesero sensibilmente per attestarsi nell'intervallo 20-30 dollari su chilogrammo fino al 2003. Successivamente si ebbe una rapida salita fino a circa 100 dollari su chilogrammo nel 2008, a parte alcuni picchi transitori a più del doppio (in valuta corrente). Molti esperti

sostengono che aumentando ulteriormente il costo di estrazione o ampliando le prospezioni, le riserve potrebbero aumentare sensibilmente.

Attuale situazione delle risorse uranifere nel mondo.

Nella crosta terrestre, l'uranio è il più pesante degli elementi naturali, ed è presente in oltre 200 minerali, con un contenuto medio di 3 grammi su tonnellata (3g/t) e con concentrazioni interessanti nei fosfati. Il suo numero atomico è 92, il numero di massa è 238,03 e sua densità 18.8 g/cm³. L'uranio naturale è costituito oggi da una miscela di isotopi che in peso sono: 99,274 kg% per l'U-238, 0,720% per l'U-235 e 0,006% per l'U-234. Esso è 1 000 volte più abbondante del torio, è presente all'incirca nella stessa concentrazione di piombo zinco e stagno ed è 3,5 volte meno abbondante del torio, altro elemento di interesse nucleare. Attualmente si conoscono oltre 100 minerali di uranio.

In assenza di sottoprodotti interessanti, il tenore di uranio, espresso in U₃O₈ nei minerali economicamente sfruttabili, è compreso tra



Nella crosta terrestre, l'uranio è il più pesante degli elementi naturali

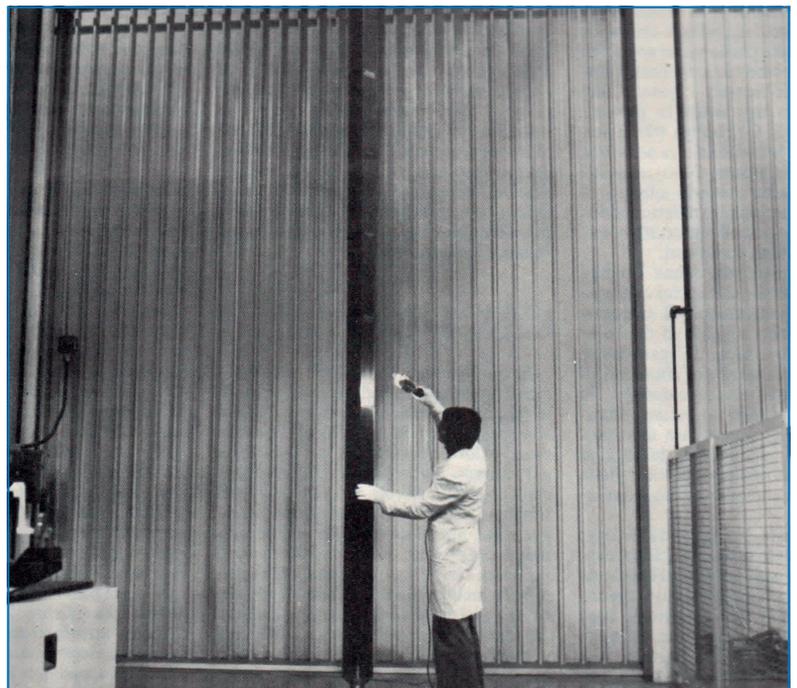


Figura 6 - Esame di un elemento di combustibile.



La classificazione dei giacimenti di uranio viene fatta in base al costo di produzione dei concentrati

0,07% e 0,4%; se invece nei minerali uraniferi sono presenti altri prodotti pregiati, come l'oro, tale percentuale può scendere fino a circa 0,02%. Tra i minerali primari contenenti uranio, ricordiamo la pechblenda o uraninite, depositata da soluzioni magmatiche, costituita da ossido di uranio amorfo a composizione variabile, presenti soprattutto in Congo, Repubblica Ceca, Stati Uniti, Francia, Spagna, Canada e Australia. La pechblenda può avere un alto tenore di uranio, fino a parecchie unità per cento. Si può passare da minerali con il 20% di uranio fino a piccoli valori come 5 ppm nelle rocce granitiche. Tra i minerali secondari a medio tenore di uranio (0,1 - 0,4%), che derivano da alterazioni chimiche dei primari, vi sono i fosfati e i vanadati. Fra essi ricordiamo la carnotite (Colorado, Turkmenistan, Siberia), l'autunite (Colorado, Francia), la davidite australiana, e la tyuyamunite siberiana.

L'uranio può essere ottenuto anche come prodotto di recupero da altre lavorazioni, così da giustificare la convenienza econo-

mica anche con percentuali molto basse, come è nel caso di minerali auriferi sudafricani (con una percentuale di 0,02% di uranio) e delle fosforiti della Florida (con un tasso di uranio variabile tra 0,005 e 0,01%). In *figura 7* possiamo vedere due tecnici intenti ad estrarre dei campioni da un reattore del Laboratorio Nazionale di Brookhaven.

La classificazione dei giacimenti di uranio viene fatta in base al costo di produzione dei concentrati. Il costo della coltivazione dei giacimenti uraniferi dipende essenzialmente dalla concentrazione dell'uranio e dall'estensione del giacimento stesso.

La *tabella 2* fornisce un'indicazione del contenuto di uranio di una serie di materiali.

I prezzi del minerale si riferiscono all' U_3O_8 contenuto nello *yellow cake*, cioè una miscela di uranati di Ca ed Na contenenti dal 60 al 95% di U_3O_8 . Altro prodotto commerciale è il *green salt* o tetrafluoruro di uranio, con tenori di uranio del 75%. Il cubaggio di un giacimento viene espresso in



Figura 7 - Estrazione di elementi di combustibile dal nocciolo di un reattore.

Materiale	Contenuto di uranio (g/t)
Acque marine	$3,3 \times 10^{-3}$
Acqua di lisciviazione Cu	10 – 12
Rocce basaltiche	0,6 – 1,2
Rocce sedimentarie	2
Crosta terrestre	3
Graniti normali	5
Graniti uraniferi	15 – 100
Scisti marini	10 – 200
Fosforiti	100 – 200
Scisti alunifici	200 – 300
Idrocarburi	10 – 1000
Giacimenti secondari	500 – 4000
Pegmatiti con mineralizzazione ad uranio.	500 – 10000
Giacimenti primari	2000 – 10000
Vene concentrate	100000 – 700000

Tabella 2 - Contenuto di uranio in vari materiali.

tonnellate metriche di uranio metallo o in tonnellate *corte* di U_3O_8 : il fattore di conversione è 1,31. Il tenore medio può essere espresso in U o in U_3O_8 .

La ricerca dei giacimenti inizia di solito con misure radiometriche su grandi aree, effettuata e con rivelatori di radiazioni gamma ad alta sensibilità a bordo di aerei od elicotteri, che rivelano e registrano anomalie nella radioattività naturale del terreno, fornendo una mappa delle aree che dovranno essere esplorate più dettagliatamente.

L'esame di queste aree utilizza tecniche di radiometria superficiale con scintillometri portatili e tecniche geochimiche di prospezione mediante analisi di acque sotterranee e superficiali e di sedimenti fluviali. Una tipica miniera di uranio ha un suo tenore intorno all'1%. Generalmente le risorse di uranio si dividono in tre categorie:

- *Risorse ragionevolmente sicure*, con una elevata probabilità di esistere in depositi minerali noti per dimensione, abbondanza e configurazione, e con un costo specifico inferiore ad una prefissata soglia.
- *Risorse supplementari stimate*, in zone non ancora esplorate di giacimenti già conosciuti.
- *Risorse speculative*, che si riferiscono a depositi di uranio deducibili sulla base di evidenze indirette ed estrapolazioni di caratteristiche geologiche.

Il totale delle risorse mondiali convenientemente coltivabili di uranio è oggi stimato essere dell'ordine di 5 milioni di tonnellate. I giacimenti vengono anche suddivisi in base a criteri petrografici e giacimentologici: mineralizzazioni in pegmatiti, in conglomerati quarzosi, in sedimenti cementati, in filoni ecc.



Una tipica miniera di uranio ha un suo tenore intorno all'1%



Fra le risorse sfruttabili a lungo termine, le più grandi e diffuse sono rappresentate dall'acqua di mare e dai giacimenti uraniferi

La previsione dei costi di produzione richiede l'esame di almeno una decina variabili principali, dipendenti a loro volta da numerosi parametri, che saranno elencati via via che capiteranno.

Lo sfruttamento di un giacimento di uranio può avvenire con due tecniche fondamentali: a cielo aperto e nel sottosuolo (in miniera). La coltivazione a cielo aperto avviene per profondità fino ad un centinaio di metri e consente un recupero pressoché totale del minerale. Per la coltivazione in miniera a costi commerciali, non si superano un migliaio di metri di profondità anche in presenza di vene concentrate. Molti studi confermano che il costo in termini di sicurezza o di salute dell'estrazione dell'uranio, anche se è di appena un decimo di quello dell'estrazione del carbone necessario a produrre la stessa quantità di energia, non deve essere trascurato sia per quanto riguarda gli incidenti che le malattie croniche indotte. Come contaminante ambientale va particolarmente considerato il Rn-222, che richiede efficaci sistemi di ventilazione delle gallerie. Il livello di radioattività delle miniere è espresso nell'unità di misura WL (Working Level) definita come *qualsiasi combinazione di figli radioattivi a corta vita del Rn-222*

presenti in un litro di aria che comporta l'emissione di radioattività alfa per un equivalente energetico di $1,3 \times 10^5$ MeV. L'esposizione a cui è soggetto un minatore viene correntemente espressa in WLM (working level month) che rappresenta l'esposizione subita in un ambiente in cui è presente 1 WL per una durata di 170 ore. È stato valutato che 1 WLM corrisponde a 2 rad (0,02 Gy) ai polmoni, e cioè a valori compresi fra 2 e 6 rem. L'attuale normativa si sta assestando a livelli di esposizione pari a 0,5 WLM/a. L'impatto sanitario sui lavoratori in miniera richiede di valutare attentamente l'opzione del ciclo chiuso rispetto al ciclo aperto, con il conseguente utilizzo di uranio e plutonio ed un minor fabbisogno del materiale primo delle miniere. In generale, si può dire che i rischi provenienti dall'estrazione del minerale uranifero costituiscono una quota apprezzabile del rischio totale associabile all'impiego di energia nucleare. In *figura 8* sono mostrati dei contenitori di uranio esafluoruro, da 1,5 tonnellate ciascuno.

Il contenuto di questi tre cilindri di modesta grandezza produce un'energia corrispondente a 250 000 tonnellate di petrolio, pari al carico di una super-petroliera lunga 350 metri.

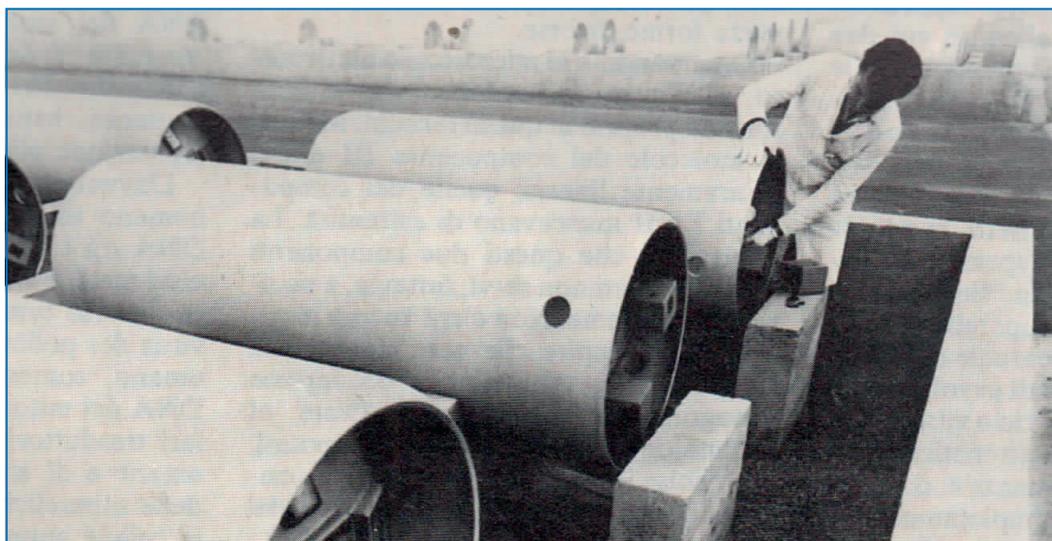


Figura 8 - Tre contenitori di esafluoruro di uranio.

Con la differenza che l'energia derivante dal petrolio è altamente inquinante, quella nucleare lo è molto meno.

Fra le risorse sfruttabili a lungo termine, le più grandi e diffuse sono rappresentate dall'acqua di mare e dai giacimenti uraniferi. L'acqua di mare rappresenta la più grande riserva di materie prime accessibili con le attuali tecnologie: il solo uranio vi è presente nella misura di 5 miliardi di tonnellate, con una concentrazione media di 0,0032 mg/l ed un costo di estrazione valutato intorno a 400 dollari americani al chilogrammo.

Ovviamente, l'ostacolo principale alla estrazione industriale di uranio dall'acqua marina è la sua bassissima concentrazione. Il contenuto di uranio dei graniti è da 2 a 5 g/t anche se si trovano graniti uraniferi con 10 e più g/t di uranio.

I giacimenti di minerali uraniferi più diffusi di uranio ne contengono dallo 0,05 allo 0,2%. Una tecnica mineraria oggi spesso impiegata è chiamata *in situ leaching* (ISL) ed impiega dell'acqua sotterranea, opportunamente ossigenata, che viene fatta circolare attraverso un deposito minerale poroso per dissolvere l'uranio e portarlo in superficie, recuperandolo dalla soluzione con tecniche di estrazione industrialmente note anche per altri metalli. In definitiva, quindi dall'esame dei processi industriali necessari per arrivare dal minerale all'uranio per uso nucleare, appare come ogni Nazione o gruppo di Nazioni, a seconda delle sue condizioni può scegliere fra una serie di strategie di approvvigionamento, dipendenti ad esempio dalle sue ricchezze naturali, dalle sue condizioni economiche, nonché dal livello tecnologico maturato. In *figura 9* è riportata una foto della centrale nucleare di Caorso presso Piacenza, prima che venisse smantellata. L'impianto era stato realizzato sulle rive di un fiume, in considerazione della necessità di prelievo di acque per il raffreddamento del nocciolo. Questo reattore, considerato il più moderno tra quelli

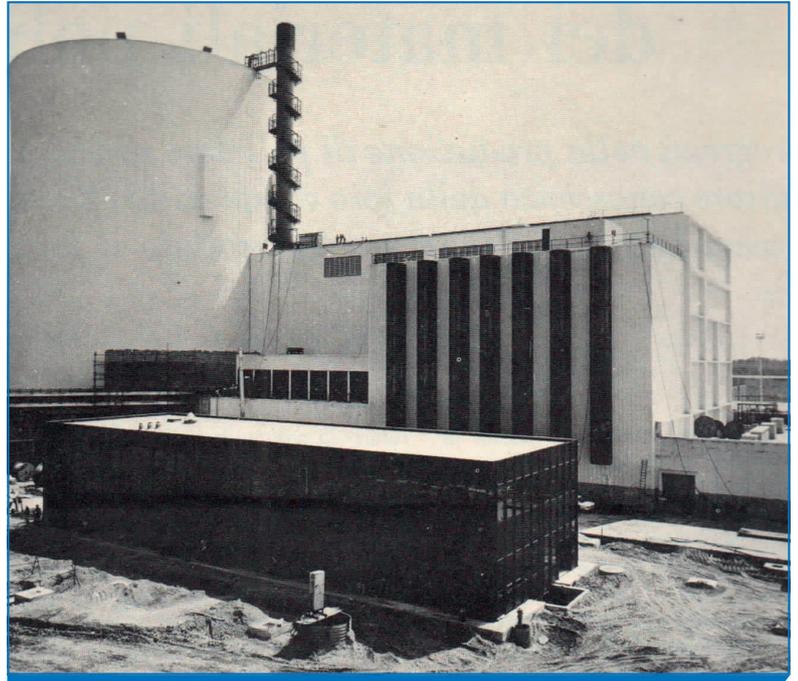


Figura 9 - La centrale nucleare di Caorso (Piacenza)

costruiti in Italia, fu un vero e proprio gioiello tecnologico e non creò mai problemi dal punto di vista ambientale.

Nel 2009 i principali Paesi produttori di uranio furono l'Australia, con il 31%, il Kazakistan con il 12%, il Canada con il 9%, la Russia, anch'essa con il 9%, Sudafrica, Brasile, Namibia e Niger (ciascuno con il 5%), gli Stati Uniti, con il 4%, la Cina con il 3% e l'India con l'1,5%. Dell'Italia si è già sommariamente parlato indicando anche i pochi siti a disposizione. Vi è da dire che l'Italia dispone di risorse uranifere molto modeste. La nostra Nazione, infatti, per la sua collocazione ai bordi di una piastra continentale e quindi per il relativamente rapido mutare, nel passato, delle condizioni geologiche, non ha un territorio che possa ospitare ingenti giacimenti di uranio, dato che la genesi di tali giacimenti è molto lenta. Il mercato dell'uranio è stato negli ultimi anni influenzato dai risultati conseguiti a seguito dei trattati sullo smantellamento delle testate nucleari.

Si è infatti reso disponibile un quantitativo di uranio con arricchimenti del 90-95%,



Il mercato dell'uranio è stato negli ultimi anni influenzato dai risultati conseguiti a seguito dei trattati sullo smantellamento delle testate nucleari

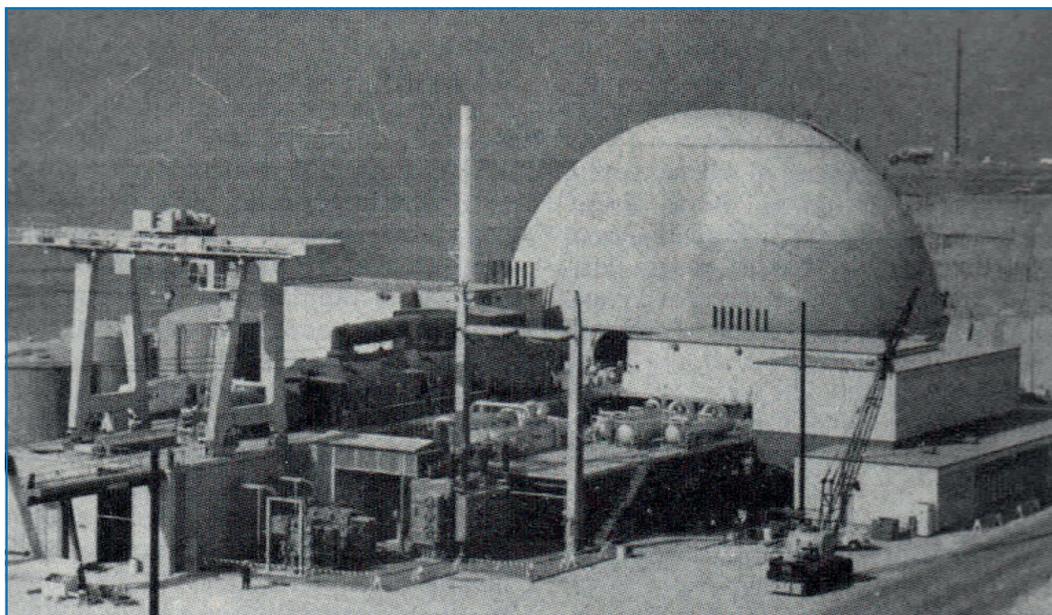


Figura 10 - Reattore ad acqua in pressione di San Onofre.



Abbiamo visto che la quantità media di uranio nella crosta terrestre è di 3 o 4 grammi per tonnellata di roccia, quindi molto grande

ed in parte minore fino al 20 %, ammontante a 2 000 tonnellate, equivalente a 12 volte la produzione mineraria annuale, ed un quantitativo di plutonio-239 pari a 260 tonnellate. In *figura 10* è riportata una fotografia del reattore ad acqua in pressione di San Onofre, in California da 429 MW che può rimanere parzialmente all'aperto, grazie ad un clima molto mite.

Riflessioni finali, cenni sulla fabbricazione del combustibile e conclusioni.

Abbiamo visto che la quantità media di uranio nella crosta terrestre è di 3 o 4 grammi per tonnellata di roccia, quindi molto grande. I primi cercatori di uranio lavoravano semplicemente con contatori Geiger-Müller per cercare di scoprirlo attraverso la sua radioattività. Il rilevamento della radioattività è ancor oggi alla base della prospezione dell'uranio ma come già accennato, questa ricerca attualmente viene fatta a bordo di aerei o elicotteri muniti di contatori di vario tipo (Geiger, scintillatori, registratori ecc.) ai quali spetta una prima individuazione della zona richiesta. Successivamente la zona in questione viene esplorata a piedi da tec-

nici muniti di contatori in grado di rilevare le radiazioni. Ulteriori ricerche possono richiedere la perforazione, il carotaggio e scavi minerari. Bisogna concentrare il minerale estratto prima di inviarlo alle raffinerie per il basso tasso di uranio. Il minerale viene quindi concentrato in impianti vicini alle miniere. Poiché i minerali sono di vario tipo anche i metodi differiscono. Dapprima il materiale viene macinato, poi l'uranio è sciolto con un solvente adatto, spesso acido solforico. Si usa talvolta anche il carbonato di sodio con un po' di bicarbonato. L'uranio viene quindi recuperato mediante l'estrazione dal solvente (una separazione chimica basata sulla solubilità differenziale in due liquidi immiscibili) o mediante lo scambio ionico, che dipende dall'assorbimento preferenziale di ioni nel soluto in resine insolubili. Il minerale viene poi calcinato, cioè arrostito, per rimuovere l'acqua in eccesso, e diventa quindi un concentrato di minerale grezzo di uranio ed in questa forma viene successivamente spedito alle raffinerie.

L'uranio che viene usato nei reattori deve essere estremamente puro, poiché tutte le impurità presenti potrebbero assorbire i neutroni, interferendo con la reazione.

Il processo di raffinazione varia da Paese a Paese, ma è fondamentalmente simile a quello usato nelle Officine di Springfield dell'UKAEA, la più grande fabbrica di elementi di combustibile al mondo. Al ciclo del combustibile ed in particolare al processo di arricchimento per diffusione gassosa sarà dedicato un articolo ad hoc.

Si può concludere, ricordando che anche il torio, come l'uranio, è molto considerato come combustibile per reattori. A livello sperimentale questo elemento è impiegato come combustibile nucleare già ora. Il suo numero atomico è 90, il numero di massa 232,04 e la sua densità è 11,72 g/cm³. Inoltre è costituito in natura dal solo isotopo Th-232, anche se altri isotopi di Th sono formati nel decadimento radioattivo di elementi pesanti. I principali minerali dai quali questo elemento può essere estratto industrialmente sono la monazite (miscela isomorfa di fosfati di terre rare, in cui fosfati e silicati sono presenti in una percentuale variabile tra l'1% ed il 30% e di cui sono state accertate le più vaste riserve in India, Australia, Stati Uniti, Malesia e Thailandia) e la torite, che consiste in un silicato di torio. L'ossido di torio presente in questi minerali è compreso tra il 5% ed il 10%. Le prospezioni delle riserve di torio sono per ora meno accurate rispetto a quelle dell'uranio. Ciononostante è opinione diffusa che esse siano tre volte maggiori rispetto a quelle di uranio. Non è il caso di approfondire ulteriormente il problema dell'utilizzo del torio come combustibile per reattori nucleari, per evitare di ripetere concetti già espressi, poiché ai reattori al torio è dedicato proprio un articolo uscito nel numero precedente di *Power Technology*, al quale si rimanda il lettore desideroso di approfondire questo argomento.

È stato calcolato, pur con approssimazione, che le risorse energetiche dell'uranio, come quelle dei combustibili fossili sarebbero abbastanza limitate e tali da non assicurare un duraturo utilizzo dell'energia nucleare. Questa considerazione viene so-

vente portata avanti dai rappresentanti dei movimenti antiatomici, che sostengono che non vale la pena ricorrere all'energia nucleare da fissione. Fortunatamente, non è questa la realtà, in quanto esistono delle possibilità concrete per ovviare a questi limiti che sono:

- Aumentare le prospezioni geologiche per localizzare nuovi giacimenti, visti gli ottimi risultati già ottenuti in proposito negli ultimi anni.
- Sfruttare via via i giacimenti più poveri tenendo conto che il maggior costo del combustibile che ne consegue incide proporzionalmente assai meno sul costo complessivo del kWh prodotto, di quanto avverrebbe per un analogo e peraltro prevedibile aumento dei costi dei combustibili fossili.
- Utilizzare in maggiore misura i materiali fertili come l'uranio-238 ed il torio 232.

Referenze bibliografiche

Di molto specifico sull'andamento delle risorse mondiali di uranio, in lingua italiana si segnalano i seguenti due articoli:

- Deffeyes S. Kenneth, MacGregor D. Ian, Le risorse mondiali di uranio, in "Le Scienze" (edizione italiana di Scientific American), n.40, dicembre 1971.
- Hubbert King M, Le risorse energetiche della Terra in "Le Scienze" (edizione italiana di Scientific American), n.40, dicembre 1971.

Sempre in tema di risorse di uranio, ma questa volta in lingua inglese si può proficuamente consultare quanto segue:

- Deffeyes S. Kenneth, MacGregor D. Ian., Uranium Distribution in Mined Deposits in the Earth's Crust, US Junction, Colo., agosto, 1978.
- Kimberley M. M. (a cura), Short Course in Uranium Deposits: Their Mineralogy and Origin, Mineralogical Association of Canada, University of Toronto Press, 1978.
- Skinner Brian J, A second Iron Age Ahead? in "American Scientist" 64, n.3, maggio-giugno 1976.

Per quanto concerne i materiali per reattori nucleari si consigliano i seguenti tre libri:

- Baccaredda-Boy M., Materiali per la costruzione dei reattori nucleari, Nistri-Lischi, Pisa, 1960.
- Fratini Nicola, Materiali per reattori nucleari, Edizioni Scientifiche Siderea, Roma.



Anche il torio, come l'uranio, è molto considerato come combustibile per reattori

- Rinaldi Gilberto, Materiali e combustibili nucleari, Edizioni Scientifiche Siderea, Roma.

Per quanto concerne invece una bibliografia generale sull'energia nucleare, si segnalano i seguenti testi:

- 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 Enrico, 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, Lucarelli Giorgio, La fusione nucleare controllata: confinamento magnetico, confinamento inerziale, fusione fredda, seconda edizione, Editoriale Delfino, Milano, 2023.
- Errico Giovanni, Pensiero atomico, SUSIL Edizioni.
- Forgiione Nicola, Oriolo Francesco, Principi di ingegneria nucleare, generazione e trasporto del calore, Tipografia Editrice Pisana (TEP), Pisa, 2014.
- Leonardini Renzo, L'ABC dell'energia nucleare, Lantana editore, Pavona (Roma), 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.
- Sani Luciano, Centrali elettronucleari, Edizioni Sistema, Roma, 1984.
- Velimirovic Mihajlo, Atlante atomico, Atlante Atomico, Edizioni Capitol, Bologna.
- Zanobetti Dino, Energia nucleare, un dossier completo, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2008.
- Zorzoli G.B., Fisica sperimentale dei reattori nucleari, Feltrinelli, Milano, 1971.