

URANIO

Indice

Introduzione >

L'elemento e le sue proprietà >

Risorse uranifere

Il ciclo del combustibile nucleare

Uno sguardo al futuro

La radioattività e l'uomo >

L'atomo e la materia

Come si misura la radioattività

L'esposizione dell'uomo

La radioprotezione

URANIO

Introduzione

L'uranio venne scoperto nel 1789 da M. H. Klaproth analizzando il minerale pechblenda (ritenuto un ossido misto di ferro, zinco e tungsteno) a cui diede il nome di Urano per celebrare la scoperta, fatta in quegli anni, del nuovo pianeta del sistema solare. Nel 1789 venne scoperto anche lo zirconio, elemento di fondamentale importanza per la tecnologia dei reattori nucleari.

L'elemento e le sue proprietà

L'uranio, in condizioni standard, è un metallo radioattivo, duro, dal colore bianco-argenteo, malleabile e duttile. In natura è piuttosto diffuso ma è difficile trovarlo in concentrazioni elevate e in media è presente nella crosta terrestre in una proporzione di circa 3 grammi di uranio per tonnellata di crosta terrestre (chiamata anche parte per milione, ppm): poiché la crosta terrestre è stimata in 3×10^{19} tonnellate si hanno a disposizione circa 10^{13} tonnellate di uranio (10000 miliardi di tonnellate) quantità maggiore rispetto a quella dell'argento, dell'oro o del molibdeno.

L'uranio è costituito da diversi **isotopi** (atomi dello stesso elemento chimico, con lo stesso numero atomico, ma con differente numero di massa) presenti in percentuale diversa nella crosta terrestre:

- ^{238}U 99.2745%
- ^{235}U 0.72%
- ^{234}U 0.0055%

Esistono in natura circa 200 minerali conosciuti che lo contengono, rari allo stato isolato e più comunemente presenti in rocce di vario tipo, fra cui in particolare i graniti (rocce acide) e le rocce silicee; concentrazioni minori si hanno nei basalti nonché nelle rocce sedimentarie.

Usi dell'uranio. L'uranio, prima della scoperta dell'energia nucleare, venne utilizzato principalmente per colorare i vetri. Oggi l'uranio viene principalmente utilizzato come combustibile nelle centrali nucleari in cui il materiale fissile è costituito dall'isotopo ^{235}U .

Un giacimento infinito? Dopo aver individuato la presenza di uranio nella crosta terrestre, è necessario valutare un giacimento, ovvero individuare quante tonnellate di uranio contiene. Il giacimento deve essere considerato sfruttabile, altrimenti si potrebbe affermare che la crosta terrestre è un "enorme giacimento" perché in essa troviamo 3 grammi/tonnellata di uranio, ma non abbiamo a disposizione una tecnologia in grado di permetterne l'estrazione a costi contenuti. Un giacimento di uranio viene detto **sfruttabile** una volta che è stato definito un limite economico, cioè una soglia che permetta una classificazione: la valutazione dei giacimenti è un problema di normativa internazionale.

Risorse uranifere

Quando si parla di uranio "recuperabile" significa che è possibile estrarre il minerale da un giacimento e renderlo disponibile per un elemento di combustibile, ad un determinato costo che viene espresso in dollari. Analizzando la mappa mondiale dei giacimenti e conoscendone la natura

è possibile stabilire la quantità di uranio estraibile formando delle fasce di costi: fino a 40 \$, tra 40 \$ e 80 \$ e fra 80 \$ e 130 \$. Ovviamente i più economici sono quelli sfruttati per primi. Tutte le zone dove c'è una comprovata presenza di uranio vengono denominate **Risorse Ragionevolmente Sicure** (Reasonably Assured Resources, RAR). Una volta noti i giacimenti ragionevolmente sicuri, attraverso analisi corredate da opportune misure di radioattività, si possono individuare luoghi simili da un punto di vista geomorfologico che possono dare indicazioni su giacimenti simili a quelli sfruttati. Tali giacimenti si considerano stimati e fanno parte delle **Risorse Aggiuntive Stimate** (Estimated Additional Resources, EAR, anche chiamate Inferred Resources, IR). Tali risorse aggiuntive sono classificate in due categorie: **EAR-I** ed **EAR-II**; le EAR II sono meno certe delle prime. Esiste poi un'altra categoria chiamata delle Risorse Speculative (SR), che sono il frutto di una ulteriore estrapolazione delle caratteristiche geomorfologiche di terreni che potrebbero contenere uranio.

Le risorse del tipo RAR sono quelle di sfruttamento più facile, e come tale meno costoso; sono disponibili in quantità che vanno da 507.400 t a 4.587.200 t a seconda di quanto si è disposti a spendere per l'estrazione. I dati relativi alle Risorse Aggiuntive Stimate del secondo gruppo (EAR-II) sono molto più precisi rispetto a quelli sulle Risorse Speculative e si stima un quantitativo di uranio di circa 2.200.000 di tonnellate ad un costo compreso fra 80 \$ e 130 \$. Le Risorse Speculative comprendono anche l'uranio presente nei fosfati e si possono stimare in circa 22.000.000 di tonnellate di uranio. Se aggiungiamo anche l'uranio presente nelle acque degli oceani si arriva ad un quantitativo di uranio di circa 4 miliardi di tonnellate!

La tecnologia di estrazione di uranio dai fosfati è sostanzialmente matura: la si utilizza già in Belgio e negli Stati Uniti. Tuttavia, ha diffusione limitata perché ha ancora costi non convenienti: si stima che un progetto di estrazione di 100 tU/anno avrebbe un costo nel range 60-100 \$/kgU (considerando inclusi i costi di investimento). Per quanto riguarda invece l'estrazione dell'uranio dall'acqua di mare, sono state effettuate ricerche in Giappone con esito incoraggiante: tuttavia, si tratta ancora di una tecnologia sperimentata solo su scala di laboratorio con costi estremamente alti, stimata intorno ai 300 \$/kgU.

Il ciclo del combustibile nucleare

Il combustibile nucleare è soggetto ad un vero e proprio ciclo durante la sua vita. Preliminari sono ovviamente tutte le operazioni di miniera a cui segue tutta una serie piuttosto lunga e complessa di vari processi di purificazione, aventi in primo luogo l'obiettivo di eliminare gli elementi che assorbono i neutroni. I neutroni sono particelle in grado di avviare il processo di fissione rompendo il nucleo di ^{235}U con successiva liberazione di energia: se sono presenti elementi che assorbono i neutroni, questi non possono produrre reazioni di fissione ("veleni neutronici"). Le operazioni effettuate in questa prima parte del ciclo del combustibile sono prevalentemente di tipo chimico e portano alla produzione di un composto gassoso dell'uranio (esafluoruro di uranio, UF_6) che permette il processo di arricchimento dell'isotopo ^{235}U . Questa fase è necessaria poiché la maggior parte dei reattori nucleari utilizza il combustibile composto da uranio arricchito: mediamente l'arricchimento è attorno al 3% di ^{235}U , contro lo 0.72% di ^{235}U nell'uranio che si trova in natura. Se mandiamo il composto gassoso di esafluoruro di uranio in una centrifuga è possibile discriminare la

diversa massa di dell'isotopo ^{235}U rispetto all'isotopo ^{238}U ed è possibile concentrare un isotopo rispetto all'altro. Le ultracentrifughe gassose costituiscono gli impianti di arricchimento: sono possibili anche altri procedimenti di arricchimento tramite gli impianti di diffusione gassosa oppure tramite la separazione isotopica selettiva a mezzo di laser.

L'esafluoruro arricchito viene successivamente convertito in polvere di biossido di uranio (UO_2), che viene assemblata in pastiglie che, opportunamente incamiciate, andranno a costituire l'elemento di combustibile vero e proprio. Il combustibile nucleare viene poi inserito nei reattori nucleari e produce energia fino al termine della sua vita. A questo punto l'elemento di combustibile è diventato radioattivo e viene messo in piscine, poste solitamente nei pressi del reattore, per ridurre il livello di radioattività.

A questo punto il combustibile esaurito ha due sorti differenti: il deposito definitivo in luoghi aventi opportune caratteristiche geologiche oppure il riprocessamento. Durante la permanenza in reattore non tutto ^{235}U viene bruciato (ne rimane circa 1%) e nel frattempo, a causa delle reazioni nucleari, sono nati altri nuclidi che possono dare un processo di fissione nucleare: i nuclei fissili come il plutonio, ^{239}Pu , nato dal ^{238}U tramite il processo chiamato di "fertilizzazione". Questi possono essere utilizzati a loro volta come combustibili nucleari, mentre la restante parte del combustibile deve essere stoccata in depositi definitivi.

La via del riprocessamento, seguita da alcuni paesi come la Francia e il Regno Unito, ha alcuni vantaggi: innanzitutto consente un più razionale sfruttamento del combustibile, permettendo non solo di recuperare l' ^{235}U rimasto ma anche il ^{239}Pu formatosi che rappresenta una risorsa importantissima perché discende per fertilizzazione dall' ^{238}U e rappresenta la quasi totalità dell'uranio presente in natura. In secondo luogo, il riprocessamento permette di ridurre considerevolmente il volume dei prodotti altamente radioattivi da stoccare a lungo termine. Infine, riutilizzare combustibile già irraggiato riduce sensibilmente il rischio di proliferazione rendendo il combustibile ritrattato non più adatto per la produzione di armi nucleari.

Uno sguardo al futuro

L'attuale ciclo del combustibile sfrutta, con i reattori attuali, solo una piccola parte dell'energia estraibile dall'uranio presente in miniera e lascia l'eredità di scorie che devono essere confinate per lunghi periodi di tempo. È evidente che, per chiudere davvero il ciclo e per sfruttare al massimo le potenzialità del combustibile nucleare disponibile in natura, sono necessari non solo reattori termici con elevati tassi di bruciamento ma anche reattori di tipo "veloce", dove i neutroni non subiscono un processo di rallentamento per avviare la reazione di fissione. Tali reattori sono in grado di sfruttare molto meglio il combustibile che si trova in natura con una produzione di scorie nettamente diversa e assai meno problematica rispetto ai reattori attuali.

Al ritmo attuale di produzione di energia da fonte nucleare le risorse di uranio si traducono in una disponibilità di energia per circa 65 anni con il consumo dei reattori attuali di circa 66.000 tonnellate/anno. Tuttavia, lo sfruttamento delle Risorse Aggiuntive Stimate del secondo gruppo (EAR-II) garantirebbero energia per altri 260 anni senza alcun processo di ritrattamento.

Considerando anche le Risorse Speculative e trascurando l'uranio contenuto negli oceani si avrebbero altri 360 anni di produzione di energia. Attualmente l'approvvigionamento di uranio si basa per il 50-60% sull'estrazione da miniera, il resto deriva da:

- stock di uranio naturale e/o arricchito di origine civile e militare. Negli anni precedenti è stato estratto più uranio di quanto effettivamente servisse: ciò ha portato negli anni ad un suo accumulo, dovuto in parte anche ad uno sviluppo della produzione di energia per via nucleare che è stato più limitato rispetto alle previsioni;
- riprocessamento del combustibile esaurito;
- utilizzo di ^{235}U di derivazione militare proveniente dallo smantellamento di testate nucleari.

La radioattività e l'uomo

La radioattività è il fenomeno per cui alcuni nuclei, non stabili, si trasformano in altri emettendo particelle. La radioattività è antica quanto l'Universo ed è presente ovunque: nelle Stelle, nella Terra e nei nostri stessi corpi. L'uomo, infatti, è esposto alla radioattività fin dal momento della sua apparizione sulla Terra. L'uomo ha scoperto la radioattività alla fine del 1800 grazie alle ricerche di Henry Becquerel e dei coniugi Pierre e Marie Curie, che nel 1903 ricevettero il Premio Nobel per la Fisica per l'importante contributo delle loro scoperte al mondo scientifico. Essi scoprirono che alcuni minerali avevano la proprietà di emettere spontaneamente radiazioni: questi minerali, come ad esempio l'uranio, il radio e il polonio, vennero denominati "attivi" e il fenomeno di emissione di radiazioni venne detto "radioattività".

L'atomo e la materia

La materia che ci circonda è costituita da atomi. Ogni atomo è formato da protoni e neutroni, che insieme costituiscono il nucleo dell'atomo, circondati da una nuvola di elettroni di carica negativa. All'interno dell'atomo, il nucleo è costituito da protoni carichi positivamente e da neutroni privi di carica e perciò neutri (come dice il loro stesso nome). Gli atomi sono elettricamente neutri poiché il numero di protoni è uguale al numero di elettroni. Il numero totale di protoni nel nucleo (e quindi di elettroni nella nuvola esterna) determina di quale elemento chimico si tratta: così, ad esempio, l'elemento chimico con 8 protoni è l'ossigeno, quello con 26 protoni è il ferro, quello con 79 protoni è l'oro, quello con 92 protoni è l'uranio.

Gli isotopi. Un elemento chimico, oltre al numero fisso di protoni che lo caratterizza, può avere un numero variabile di neutroni: in tal caso si identificano diversi isotopi di uno stesso elemento. Il ferro presente in natura, ad esempio, è costituito da 4 isotopi, tutti con 26 protoni ma con 28, 30, 31 e 32 neutroni rispettivamente. Gli isotopi sono identificati dal nome dell'elemento e dal numero di massa (neutroni + protoni): così esiste il ferro-54, il ferro-56, ecc.

In natura esistono circa 90 elementi (dall'idrogeno, il più leggero, all'uranio, il più pesante) e circa 270 isotopi. Tra questi, una ventina sono costituiti da un unico isotopo (come ad esempio il sodio, il cobalto, l'arsenico e l'oro), mentre gli altri hanno almeno due isotopi (ad esempio: il cloro ne ha due, lo zinco ne ha cinque, lo stagno ne ha dieci). Oltre agli isotopi presenti in natura (isotopi naturali),

esiste oggi un gran numero di isotopi artificiali, cioè prodotti dall'uomo, come ad esempio il cobalto-60 (27 protoni, 33 neutroni), usato in radioterapia o il plutonio-239 (94 protoni, 145 neutroni), usato come combustibile nelle centrali nucleari.

Una questione di stabilità. Gli isotopi naturali sono quasi tutti stabili, a differenza degli isotopi artificiali, che sono instabili, ossia tendono spontaneamente a disporsi in nuove strutture nucleari energeticamente più favorevoli. La trasformazione di un isotopo in un altro si chiama disintegrazione o decadimento mentre gli isotopi instabili vengono chiamati isotopi radioattivi (radioisotopi o radionuclidi). La radioattività consiste proprio in questo processo di disintegrazione spontanea dei nuclei, durante il quale vengono emesse radiazioni ionizzanti. Le radiazioni ionizzanti sono costituite da particelle e radiazioni elettromagnetiche in grado di modificare la struttura della materia con cui interagiscono. Nel caso dei tessuti biologici questa interazione può portare a un danneggiamento delle cellule. Nella maggior parte dei casi il danno viene riparato dai normali meccanismi di difesa dell'organismo ma, in funzione anche dell'entità e della durata dell'esposizione, a volte le cellule interessate possono risultare compromesse, con conseguenze sulla salute degli individui esposti.

Il decadimento di un isotopo può completarsi in tempi brevi o estremamente lunghi. L'emivita (o tempo di dimezzamento) di un isotopo radioattivo è definita come il tempo occorrente perché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo decadano in un altro elemento. L'emivita è una misura della stabilità di un isotopo: più breve è l'emivita, meno stabile è l'atomo. Ad esempio, l'uranio-238 (92 protoni e 146 neutroni), uno degli isotopi presenti da sempre nella crosta terrestre, si dimezza ogni 4,47 miliardi di anni. Attualmente l'uranio-238 residuo costituisce circa la metà della quantità originariamente presente sulla Terra, che ha un'età stimata proprio intorno ai 4,5 miliardi di anni.

Come si misura la radioattività

La radioattività si misura in decadimenti per secondo e la sua unità di misura è il Becquerel (Bq), in onore del fisico Henry Becquerel che nel 1896 scoprì l'emissione spontanea di radiazioni da parte dell'uranio. Le radiazioni prodotte dal decadimento dei radioisotopi, come detto prima, interagiscono con la materia con cui vengono a contatto, trasferendovi energia. La rilevanza e la gravità degli effetti dipendono dalla dose e dal tipo di radiazione ricevuta. Le radiazioni ultraviolette dei raggi solari, ad esempio, a piccole dosi sono innocue per l'uomo, ma esposizioni eccessive possono provocare bruciature alla pelle. L'unità di misura della dose assorbita è il Gray (1 Gy = 1 joule assorbito da un kg di materia).

Per avere una misura degli effetti biologici dovuti alle radiazioni, è stato introdotto il concetto di equivalente di dose, che, a parità di dose, permette di valutare il danno dei diversi tipi di radiazioni ionizzanti. In questo caso, l'unità di misura è il sievert (Sv). Con una radiografia al torace vengono somministrati 0,14 mSv (mSv= millisievert, ovvero un millesimo di Sv), con una mammografia 1 mSv.

L'esposizione dell'uomo

L'uomo, sin dalla sua comparsa sulla Terra, è esposto alle radiazioni naturali, a cui si è perfettamente adattato. La dose di radioattività naturale a cui ogni organismo è esposto ogni anno è pari a 2,4 mSv.

Alla radioattività naturale contribuiscono una componente terrestre, dovuta ai radionuclidi presenti nella crosta terrestre, come ad esempio il potassio-40, l'uranio, il torio, il radon (elemento gassoso che dà il maggior contributo alla radioattività naturale), e una componente extraterrestre, costituita dai raggi cosmici derivanti dallo spazio.

Alla radioattività naturale si aggiunge quella artificiale, che può essere originata in diversi modi. La più importante è l'irradiazione medica a fini diagnostici e la radioterapia. Elementi radioattivi possono entrare in atmosfera in seguito a esperimenti atomici o a incidenti alle centrali nucleari (es. Chernobyl).

L'uomo può essere esposto alla radioattività in due modi:

- per **esposizione esterna**, o irradiazione, che avviene quando la sorgente delle radiazioni è esterna all'organismo;
- per **esposizione interna**, o contaminazione interna, che avviene attraverso l'ingestione o l'inalazione di radioisotopi da parte dell'individuo.

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere immediati o a lungo termine. I primi si manifestano poco tempo dopo l'esposizione alla radiazione, possono essere lievi, come in caso di nausea e vomito, o più gravi, in caso ad esempio di danni al tessuto emopoietico, a seconda dell'entità della dose. I danni a lungo termine possono includere cancro e leucemia.

La radioprotezione

Una volta conosciute le conseguenze dannose che l'esposizione alle radiazioni ionizzanti può provocare, è stato necessario provvedere alla predisposizione di adeguate misure di protezione. È nata così la radioprotezione, ossia un insieme di misure destinate a garantire la protezione dalle radiazioni ionizzanti dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente.

Le regole più elementari della radioprotezione sono le seguenti:

- allontanarsi dalla sorgente di radiazioni, in quanto l'intensità delle radiazioni diminuisce;
- la distanza (ad esempio: le installazioni nucleari sono circondate da una "zona di rispetto" che impedisce l'insediamento di attività umane nelle immediate vicinanze);
- interporre uno o più dispositivi di schermatura tra la sorgente e le persone (ad esempio, nelle installazioni nucleari, la protezione dei lavoratori e dell'ambiente circostante è assicurata da una serie di schermi costituiti da spessori o muri di piombo, di acciaio, di cemento, di materiali speciali);
- ridurre al minimo la durata di esposizione alle radiazioni.

Testo aggiornato ad agosto 2022