

L'energia nucleare è una fonte energetica da valutare attentamente sia negli aspetti positivi che negativi. In primo luogo è necessario comprendere il suo funzionamento. Nelle centrali nucleari l'energia scaturisce dal bombardamento dell'uranio con neutroni. Il nucleo dell'uranio si divide in due nuclei più piccoli tramite un processo detto di **'fissione nucleare'** durante il quale si genera energia e altri neutroni che, a loro volta, continueranno a far dividere i nuclei di uranio dando luogo alla famosa **'reazione a catena nucleare'**. Durante questo processo viene emessa radioattività ad alta intensità. Gli oggetti e i metalli esposti alle radiazioni diventano essi stessi radioattivi, ossia scorie radioattive. Le scorie dovranno essere stoccate per migliaia di anni fin quando non decade il livello di radioattività. Il grado di radioattività non consente all'uomo di avvicinarsi alle scorie e, al momento, la scienza non è in grado di distruggere le scorie radioattive o di accelerare il periodo di decadimento della radioattività.

L'uranio è la materia prima delle centrali nucleari a fissione. Una minima quantità di uranio consente di produrre un'elevata quantità di energia e, a differenza del carbone o del petrolio, senza emissioni di anidride carbonica (principale causa dell'effetto serra). Non esistono stime ufficiali sull'estrazione annuale di uranio. Questi dati sono coperti dal segreto militare o dal segreto di Stato.

Fin qui i vantaggi che hanno determinato lo sviluppo dell'energia nucleare nella seconda metà del novecento.

Su altri aspetti il nucleare non trova ancora valide risposte:

- **Il principale svantaggio del nucleare sono le drammatiche conseguenze in caso di incidente.** L'epilogo di Chernobyl ha causato conseguenze globali e, ancora oggi, non si conosce il reale impatto sulla salute. Se da un lato le nuove centrali di ultima generazione garantiscono un livello di sicurezza elevato, dall'altro non si può fare a meno di pensare che anche la centrale di Chernobyl era stata considerata sicura a suo tempo.
- **Le scorie radioattive devono essere stoccate per migliaia di anni.** Nessun paese al mondo è giunto a una soluzione definitiva di stoccaggio. In Italia, nel 2003 si fermò in protesta un'intera regione italiana per impedire la realizzazione di un deposito geologico di scorie.
- **La produzione di armi nucleari resta l'ultimo grande handicap.** Non si può negare un legame tecnologico tra la produzione civile di energia nucleare e l'industria bellica. Nel 2004 gli USA e altri paesi occidentali fecero grande pressione sull'Iran per impedire la costruzione di una centrale nucleare civile proprio per il timore che questi impianti fossero utilizzati anche per finalità belliche. Pertanto il legame tra le due attività esiste.
- **Il costo reale del nucleare.** Il nucleare comporta costi elevati fin dalla realizzazione degli impianti. Vanno poi ad aggiungersi i costi militari per garantire la sicurezza dagli attentati terroristici e i costi per smantellare la centrale nucleare al termine della sua attività. Tutti questi costi non sono sostenibili da un'industria privata. Lo Stato deve necessariamente intervenire a copertura delle spese aumentando tasse e imposte ai contribuenti. In breve, il basso costo dell'energia in bolletta potrebbe essere più che compensato dall'aggravio fiscale in termini di imposte.
- **La localizzazione degli impianti nucleari.** Le comunità locali sono restie ad accettare un deposito di scorie o una centrale nucleare vicino casa.

Abbiamo considerato sia i pro sia i contro dell'energia nucleare. Volendo sintetizzare, il nucleare a fissione realizzato con reattori di ultima generazione è relativamente sicuro. Resta però il problema dei costi sociali e quello della localizzazione delle centrali e del deposito di scorie. Finora nessuna soluzione sembra essere stata condivisa con i cittadini del luogo destinato ad ospitare un deposito di scorie.

Chi produce l'energia nucleare? Sono circa 438 i reattori nucleari attivi nel mondo. I paesi con maggiore presenza di reattori nucleari sono i seguenti:

- 104 negli USA
- 59 in Francia
- 53 in Giappone

Complessivamente, le centrali nucleari nel mondo producono 352 gigawatt, pari al 16% della fornitura globale d'energia. Un dato consistente ma ben lontano dai 1000 gigawatt stimato negli anni '70 per i nostri anni. L'incidente di Chernobyl negli anni '80 frenò l'ottimismo verso l'energia nucleare per la consapevolezza delle gravi conseguenze in caso di incidente.

I paesi che soddisfano il proprio fabbisogno energetico interno tramite l'energia nucleare sono i seguenti:

- Francia: 76% fabbisogno energetico interno
- Paesi dell'Europa dell'Est: 40-50%
- USA: 20%

Il caso della Francia è unico al mondo. Il 76% dei consumi energetici francesi sono soddisfatti mediante reattori nucleari. Seguono i Paesi dell'Est, le cui centrali nucleari obsolete rappresentano un pericoloso fardello. Desti attenzione il caso degli USA, il paese dove il nucleare è nato, dove la produzione di energia dal nucleare non supera ancora il 20%.

L'Europa soddisfa mediamente il 35% del proprio fabbisogno energetico interno tramite l'uso di centrali nucleari. Sul dato pesano fortemente i reattori nucleari francesi.

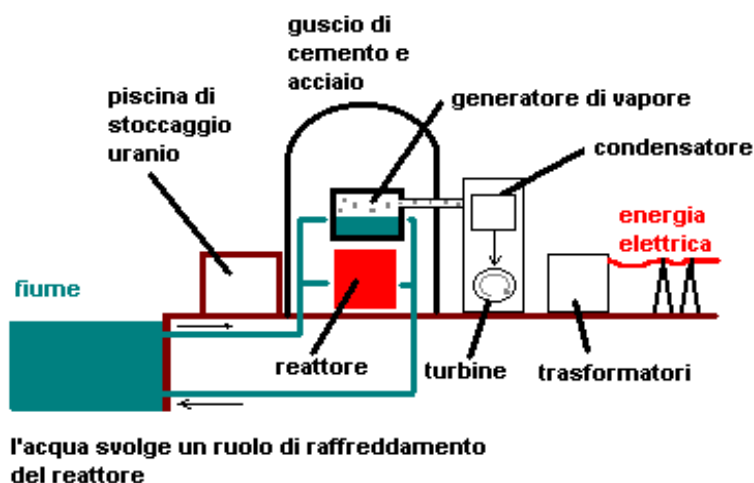
Secondo l'IAEA (International Atomic Energy Agency) il peso dell'energia nucleare rispetto alle altre fonti di energia è destinato a ridursi entro il 2020.

Questa previsione trova conferma osservando l'evidente assenza di investimenti nella costruzione di nuove centrali nucleari in Europa negli ultimi venti anni. Fa eccezione la Finlandia, unico paese europeo ad avere in cantiere la costruzione di una nuova centrale nucleare. Sarà attiva entro il 2010 a Olkiluoto. Nel resto del mondo occidentale, Europa e America, non sono previste nuove centrali atomiche. In Svezia, Germania, Olanda e Belgio le attuali centrali continueranno a funzionare fino alla fine del ciclo produttivo, al termine del quale non saranno sostituite con altre di nuova costruzione.

Diversa è la situazione in Asia, dove sono attualmente in cantiere almeno 15 nuove centrali nucleari (Cina, Corea del Sud, India e Taiwan).

Recentemente l'effetto serra e il caro petrolio stanno rifacendo avvicinare all'energia nucleare anche i paesi occidentali. Il dibattito politico sul nucleare è in corso sia negli USA sia nell'Unione Europea.

Ecco il funzionamento tipico di una centrale nucleare a fissione.



Una breve e semplice spiegazione sul funzionamento. La reazione a catena nucleare avviene all'interno del guscio di cemento e di acciaio, sempre in uno stato cosiddetto "critico" in cui ogni neutrone colpisce un solo nucleo di uranio. Il processo deve essere costantemente controllato poiché se venisse superata la soglia "critica" (ovvero se un neutrone colpisce più nuclei di uranio) la reazione a catena genererebbe un surriscaldamento esponenziale e la conseguente fusione del nucleo nel reattore con emissioni di radiazioni nocive, così come accadde alla centrale di Chernobyl.

Per controllare la reazione nucleare l'uranio viene immerso in una piscina d'acqua pesante in grado di rallentare l'attività dei neutroni e quindi di controllare la reazione nucleare. Nella piscina vengono poi poste barre di cadmio o di boro per assorbire parte dei neutroni che si liberano dalla **fissione nucleare**. La reazione a catena nel processo di fissione genera calore e riscalda i flussi di acqua presenti in uno scambiatore di calore generando vapore. La forza vapore muove le turbine meccaniche per produrre energia elettrica.

Le prime centrali nucleari degli anni '50 basavano il proprio sistema di raffreddamento sull'utilizzo del gas. Negli anni '60 venne preferito l'uso dell'acqua. Il ruolo dell'acqua è sempre stato fondamentale nelle centrali nucleari. Il processo di fissione richiede costantemente un flusso refrigerante per controllare il calore emesso e consente la trasformazione del calore in vapore acqueo (forza vapore). L'acqua è prelevata e scaricata in continuazione dai fiumi antistanti alle centrali nucleari. Ha fatto notizia nella torrida estate del 2003 l'emergenza scattata in molte centrali nucleari francesi a causa dell'abbassamento delle acque nei fiumi. Il fenomeno naturale stava mettendo a rischio il processo di refrigerazione e controllo della temperatura dei moderni reattori francesi.

Per affrontare correttamente l'argomento è necessario evidenziare la differenza tra le vecchie centrali nucleari e quelle basate sui reattori di ultima generazione.

A) I reattori tradizionali sono basati sul principio della generazione di calore dal nocciolo, il luogo dove avviene la reazione di fissione nucleare. Il calore a sua volta produce forza-vapore in grado di muovere turbine per generare elettricità. Il combustibile per ottenere la fissione dell'atomo è l'uranio arricchito. Le temperature medie di funzionamento oscillano intorno ai 330° C. Questa tecnologia produce scorie nucleari, la cui radioattività può durare migliaia di anni (anche 100.000). I reattori tradizionali sono stati anche teatro d'incidenti durante la loro storia, quello più grave accaduto a Chernobyl nel 1986.

B) I reattori di nuova generazione

I nuovi reattori nucleari a fissione prendono spunto dall'esperienza passata. Sono molto più sicuri dei reattori tradizionali, in caso di incidente le conseguenze sono minimizzate da doppi apparati di sicurezza basati sia su sistemi automatizzati e su principi fisici. Citiamo due reattori utilizzati nelle centrali nucleari di nuova generazione.

- Nel reattore "a spettro veloce" il nocciolo è immerso nel sodio liquido, capace di scongiurare la dispersione di calore in caso di incidente. Il combustibile è il medesimo (uranio liquido) delle centrali tradizionali. Il problema delle scorie radioattive non viene risolto. La temperatura media è superiore ai reattori tradizionali e raggiunge circa 500°.
- Nel reattore "a letto di sfere" il nocciolo è composto anche da grafite per garantire la resistenza fino a 1600°. Il Sud Africa realizzerà un prototipo di questo reattore. Questo reattore, pur non eliminando il problema delle scorie, ha il pregio di non produrre plutonio (materia prima dell'industria bellica di armi atomiche). Il reattore utilizza come combustibile l'ossido di uranio con elementi di grafite.

L'altra faccia del nucleare: le scorie radioattive. Qualsiasi centrale nucleare produce "scorie radioattive". Una minima parte delle scorie sono normalmente disperse nell'ambiente senza provocare danni per l'uomo. Ad esempio, i reflui del raffreddamento sono scaricati direttamente nelle acque dei fiumi poiché considerati non pericolosi per l'ambiente.

Per scorie nucleari si intendono soprattutto quei materiali che, trovandosi nel reattore o nei pressi, sono soggetti a una continua emissione di radiazioni. Dal semplice bullone alle componenti metalliche più grandi (pareti, contenitori ecc.). Al termine del ciclo di vita della centrale nucleare, questi oggetti devono essere trattati come rifiuti speciali da trattare con molta attenzione in quanto fortemente radioattivi, e quindi pericolosi. Sono definiti per semplicità "scorie nucleari" ma occorre fare delle distinzioni. Le scorie nucleari non sono tutte uguali. E' un tipico errore confondere le scorie ospedaliere con quelle delle centrali nucleari.

Le scorie nucleari si distinguono in base al **grado di radioattività** da cui dipende anche la durata del decadimento e la loro pericolosità:

- **Alta attività (scorie di 3° grado):** il grado di radioattività elevato in queste scorie implica un lungo periodo di decadimento, fino a 100.000 anni. Le scorie di terza categoria sono, in particolar modo, le ceneri prodotte dalla combustione dell'uranio e gli oggetti vicini al reattore (es. pareti metalliche). In tutto il mondo è stato identificato soltanto un sito "sicuro" per ospitare in profondità le scorie (deposito geologico) per migliaia di anni. Si trova in una zona desertica nel New Mexico (Usa) e ha richiesto oltre 25 anni di studio. Gli Usa hanno investito oltre 2,2 miliardi di dollari nello studio della sicurezza dei depositi geologici. Ciò nonostante ancora nulla sembra potersi affermare con certezza. Le scelte di localizzazione dei depositi di scorie sembrano più frutto della ragion di Stato che di processi condivisi con i cittadini del luogo.
- **Media attività (scorie di 2° grado)**
- **Bassa attività (scorie di 1° grado)**

Queste ultime due categorie hanno una vita radioattiva inferiore. Necessitano soltanto di poche centinaia di anni per decadere. Queste scorie provengono, in gran parte, dagli ospedali (es. residui della medicina nucleare).

Il grande problema sono le scorie di terza categoria provenienti dalle centrali nucleari.

In Europa le scorie sono generalmente depositate nei pressi delle centrali nucleari o in centri di stoccaggio ingegneristici di superficie.

I principali ed ufficiali centri di stoccaggio europei sono:

- **Le Hague (Francia)**
- **Sellafield (Gran Bretagna)**
- **Oskarshamn (Svezia)**
- **Olkiluoto (Finlandia)**

Tutti i centri di stoccaggio europei **hanno natura "temporanea"** per rispondere al criterio di reversibilità delle scelte. Non conoscendo con precisione le conseguenze dello stoccaggio delle scorie radioattive nel tempo, si rende così possibile un loro futuro trasferimento in altri luoghi. Nel caso dei siti geologici questo non sarebbe possibile, i materiali ospitati in cavità sotterranee dovranno restarci definitivamente anche nel caso in cui la scelta del sito si riveli sbagliata.

In alcuni casi, ad esempio in Francia, le scorie nucleari sono riprocessate all'interno delle stesse centrali nucleari per produrre nuovo combustibile rigenerato (cd Mox) da riutilizzare nel reattore.

I depositi geologici e la posizione dell'Unione Europea. La UE si è posta come obiettivo la costruzione e lo studio di depositi geologici comunitari per trovare una soluzione definitiva alle scorie europee. L'argomento è ancora aperto e controverso. Dopo i fatti di Scanzano Jonico, la UE ha sottolineato che tale esigenza non si estende ai paesi privi di piano energetico nucleare (come l'Italia). Questi paesi non hanno l'obbligo di costruire un deposito geologico e possono attendere "**soluzioni europee**". La UE auspica quindi la costruzione dei depositi geologici nei paesi dove siano presenti e attive molte centrali nucleari. Ad esempio in Francia (dove il 76% dell'energia elettrica è di origine nucleare).

Quante sono le scorie radioattive in Italia? L'Italia non conta grandi quantità di scorie nucleari. Il referendum del 1987 ha definitivamente bloccato la produzione di energia dal nucleare nel nostro paese. Nel nostro paese le scorie ad alta pericolosità sono circa 8.000 metri cubi. Una minima quantità che lascia aperta la porta alla soluzione europea.

Un articolo Ansa del 20 novembre 2003 basato su dati Apat descrive chiaramente la situazione internazionale in merito alla questione "scorie nucleari". A distanza di 5 anni dall'articolo, nel 2008, la situazione sullo stoccaggio delle scorie non sembra essere cambiata molto.

Esistono quattro tipologie di depositi per stoccare le scorie nucleari:

A) **depositi di superficie**

B) **depositi di superficie con opera ingegneristica**

C) **depositi in cavità o miniera**

D) **depositi geologici**

I depositi di scorie attualmente presenti al mondo sono circa ottanta, quasi tutti di tipo (A) (B) e (C), ossia depositi in grado di ospitare scorie a bassa o media attività radioattiva. I depositi di tipo geologico (D), costruiti in profonde cavità nel terreno, sono invece pochissimi. Soltanto gli Stati Uniti hanno iniziato la costruzione del primo deposito geologico nel deserto del New Mexico dopo oltre 25 anni di studio.

COSTI ENERGIA NUCLEARE

Il costo variabile del nucleare appare a prima vista tra i più bassi (es. in Francia 0,015 € per chilowattora). Riprendiamo una tabella comparativa del 2003 per rendere meglio l'idea:

- 0,02 € centrali idroelettriche esistenti
 - 0,02 € carbone
 - **0,03 € nucleare**
 - 0,04 € gas
 - 0,05 € biogas
 - 0,07 € geotermico
 - 0,07 € eolico
 - 0,07 € nuove centrali idroelettriche
 - 0,12 € celle a combustibile
 - 0,57 € fotovoltaico
- (dati costo medio KWh in euro)

Il costo variabile dell'energia nucleare può trarre in inganno poiché non include l'intera spesa che il pubblico deve sostenere per realizzare, gestire e infine smantellare una centrale nucleare. Analizzando complessivamente il sistema energetico, ovvero partendo dalla costruzione delle

centrali sino anche alla complessa gestione dei rifiuti, si riscontra un notevole incremento nei costi sociali e una scarsa convenienza economica sociale. Questi i principali handicap:

- **Una centrale nucleare necessita un lungo periodo di tempo per essere costruita** (in media 10 anni). In questo lungo periodo di tempo vanno poi aggiunti i costi opportunità, ossia le perdite "potenziali" pari al tasso di interesse perso se i fondi fossero stati depositati in banca o occupati in altre attività economiche.
- **Le centrali nucleari producono rifiuti radioattivi (scorie) la cui gestione è ancora un capitolo aperto** per l'intero Occidente. Soltanto gli Usa, dopo oltre 25 anni di studi, hanno realizzato una soluzione definitiva realizzando un deposito in profondità (geologico) in cui stoccare le scorie radioattive.

Al termine del ciclo di vita della centrale nucleare va considerato anche il costo del suo

- **smantellamento**, la bonifica del territorio e lo stoccaggio delle scorie radioattive.

Esempio. per costruire la centrale nucleare Usa di Maine Yankee negli anni '60 sono stati investiti 231 milioni di dollari correnti. Recentemente questa centrale ha terminato il suo ciclo produttivo e per smantellarla sono stati allocati 635 milioni di dollari correnti. Soltanto per smantellare le quattro centrali nucleari italiane l'International Energy Agency ha stimato un costo pari a 2 miliardi di dollari.

In conclusione il nucleare è stato presentato come una fonte indispensabile per generare energia elettrica a basso costo. In realtà i suoi costi "nascosti" (sostenuti dallo Stato tramite tasse e imposte) sono ancora troppo alti se paragonati alle normali centrali termoelettriche (gas o carbone). Per individuare un quadro completo dei costi è necessario allargare la visione all'intero ciclo di produzione e non soffermarsi sui singoli aspetti. Solo in questo modo si riesce a comprendere il reale costo sociale che la società dovrà pagare per avere l'energia nucleare.

Va comunque considerato che l'antieconomicità del nucleare è soltanto un aspetto dell'analisi politica. Il ritorno al nucleare può essere giustificabile per ridurre la dipendenza delle economie occidentali dall'import di petrolio, gas e carbone. La capacità di una nazione di far fronte al proprio fabbisogno energetico interno rappresenta un obiettivo politico e strategico per difendere la propria economia nazionale dagli shock esterni. Soltanto in questi casi, e in questi termini, il ritorno al nucleare può essere considerato come una scelta razionale da intraprendere.

La produzione di energia elettrica in Italia copre l'83% della domanda nazionale di energia (dato 2005). Il deficit energetico è coperto tramite l'importazione di energia elettrica dall'estero (in particolare dalla Francia). Una dipendenza funzionale che ha avuto la sua massima evidenza durante il black out energetico nella domenica del 28 settembre 2003.

La situazione in Europa. La dipendenza della UE dal petrolio rischia di aumentare nei prossimi 30 anni. Una dipendenza crescente che sembra essere causata dall'assenza di reali alternative energetiche. Secondo la Commissione europea nelle "Previsioni mondiali per l'energia, la tecnologia e la politica climatica" la domanda di energia in Europa crescerà dello 0,4% ogni anno nei prossimi 30 anni. **Nel 2030 i combustibili fossili (petrolio, gas e carbone) potrebbero rappresentare ancora l'88% dell'approvvigionamento mondiale di energia** di cui ben il 34% ancora dal petrolio.

Il crescente caro-petrolio potrebbe però modificare queste previsioni di lungo periodo. Il rincaro petrolifero favorisce l'economicità delle energie rinnovabili (solare, eolico, biomasse, idroelettrico) e il ritorno degli investimenti statali nell'energia nucleare.

VANTAGGI E SVANTAGGI DEL NUCLEARE

Spesso il nucleare viene presentato come un male da combattere o come miracolosa pozione per risollevare l'economia nazionale. Non ci riconosciamo in entrambe le visioni. Il nucleare rappresenta un'opzione energetica come le altre con i suoi "pro" ed i suoi "contro". Proveremo ad elencare i principali vantaggi e svantaggi.

Il nucleare presenta indubbiamente dei vantaggi:

- **Una centrale nucleare non emette CO2**
Le centrali nucleari non producono anidride carbonica ed ossidi di azoto e di zolfo, principali cause del buco nell'ozono e dell'effetto serra.
- **Vantaggio nella bilancia dei pagamenti**
La produzione di energia dal nucleare riduce l'importazione di petrolio e la dipendenza delle economie dal petrolio. La copertura del fabbisogno energetico interno tramite il nucleare riduce la possibilità degli shock esterni sull'economia e consente ai governi un minore carico di spesa sulla bilancia dei pagamenti con l'estero. Il tutto si traduce in una maggiore stabilità del sistema economico nazionale.

- **Maggiore stabilità politica**
Le principali riserve petrolifere sono concentrate in pochi paesi ad elevata instabilità politica (Medio Oriente) che rischia di trasmettersi anche nei paesi fortemente dipendenti dall'import del petrolio. L'uso del nucleare riduce la dipendenza occidentale dal petrolio mediorientale.

Vediamo ora quali svantaggi porta l'uso dell'energia nucleare:

- **Conseguenze in caso di incidente**
La storia ha già mostrato la gravità delle conseguenze degli incidenti alle centrali nucleari. Le radiazioni a cui la popolazione viene esposta causano un maggiore rischio di morte per leucemia e tumore. Dall'incidente di Chernobyl la sicurezza delle centrali nucleari è diventato uno dei principali aspetti critici dell'energia nucleare per uso civile.
- **Le scorie nucleari**
Le scorie nucleari sono un altro aspetto critico del nucleare. Non possono essere distrutte e l'unica soluzione, per il momento, sembra essere lo stoccaggio per migliaia di anni in depositi geologici o ingegneristici. La ricerca di un deposito sicuro è tra i principali obiettivi della UE e degli Usa. Sono necessari anni di studi e grandi investimenti per l'individuazione delle soluzioni di stoccaggio per centinaia di migliaia di anni.
- **Localizzazione centrali nucleari e proteste locali**
Anche il processo di localizzazione di una centrale nucleare o del deposito di scorie è molto difficoltoso. Nessuna comunità locale accetta di sacrificare il proprio territorio per ospitare i rifiuti nucleari. La Sardegna, la Puglia, la Basilicata sono i recenti casi italiani di forti proteste antinucleari. Nello stesso anno una comunità locale cinese si oppose con successo alla decisione del governo di costruire un deposito geologico di scorie attuando una dura e prolungata protesta. In entrambi i casi vinsero le popolazioni locali.
- **Il terrorismo**
Viviamo in un'epoca in cui poche persone possono compiere grandi danni all'umanità. Il ricordo della tragedia dell'11 settembre 2001 ai grattacieli del World Trade Center è stato un duro shock per l'intera società occidentale. Il rischio che le centrali nucleari siano prese come obiettivi per atti di terrorismo o come bombe sporche è quindi molto realistico. E' lecito e razionale preoccuparsi. Le nuove centrali nucleari dovranno includere questo aspetto fin dalla fase di progettazione.
- **Il trasporto di materiale nucleare**
Il trasporto di scorie e di materiale nucleare è uno degli aspetti più critici della questione "sicurezza". Durante il trasporto, oltre all'opposizione delle popolazioni che vedranno passare treni o navi con carichi radioattivi vicino alle proprie abitazioni, sussiste il rischio di incidenti e di attentati terroristici. In Francia, i treni speciali adibiti al trasporto di scorie nucleari sono scortati da "carri armati" e da poliziotti a cavallo. L'itinerario del treno cambia in continuazione all'insaputa delle popolazioni residenti nei pressi delle ferrovie. Per questi motivi i depositi di scorie dovrebbero risiedere nei pressi delle centrali nucleari evitando in questo modo la necessità del trasporto delle scorie. La ricerca tecnologica e scientifica non ha ancora trovato il modo per distruggere le scorie all'interno delle stesse centrali nucleari.

Gli incidenti nelle centrali nucleari sono classificati su una scala da 0 (semplice guasto) a 7 (incidente molto grave). Questa scala di misura è detta INES (International Nuclear Event Scale). La classificazione degli incidenti non è facile. Spesso gli incidenti minori sono stati coperti dal segreto militare o non comunicati al grande pubblico.

Elenchiamo i principali incidenti di cui si è avuta conferma ufficiale:

- **Kyshtym (Unione Sovietica 1957) - scala Ines 6.**
Un bidone di rifiuti radioattivi prese fuoco ed esplose contaminando migliaia di Km² di terreno. Furono esposte alle radiazioni circa 270.000 persone.
- **Sellafield (Gran Bretagna 1957) - scala Ines 5.**
Un incendio nel reattore dove si produceva plutonio per scopi militari generò una nube radioattiva imponente. La nube attraversò l'intera Europa. Sono stati ufficializzati soltanto 300 morti per cause ricondotte all'incidente (malattie, leucemie, tumori) ma il dato potrebbe essere sottostimato.
- **Three Mile Island (Harrisburgh, Usa 1969) - scala Ines 5.**
Il surriscaldamento del reattore provocò la parziale fusione del nucleo rilasciando nell'atmosfera gas radioattivi pari a 15000 terabequerel (TBq). In quella occasione vennero evacuate 3.500 persone.
- **Chernobyl (Unione Sovietica, 1986) - scala Ines 7.**
L'incidente nucleare in assoluto più grave di cui si abbia notizia. Il surriscaldamento provocò la fusione del nucleo del reattore e

l'esplosione del vapore radioattivo. Si levò al cielo una nube pari a 12.000.000 di TBq di materiale radioattivo disperso nell'aria (per avere un'entità del disastro confrontate questo valore con i 15.000 Tbj del precedente incidente nucleare registrato nel 1979 a Three Mile Island negli Usa). Circa 30 persone morirono immediatamente, altre 2.500 nel periodo successivo per malattie e cause tumorali. L'intera Europa fu esposta alla nube radioattiva e per milioni di cittadini europei aumentò il rischio di contrarre tumori e leucemia. Non esistono dati ufficiali sui decessi complessivi ricollegabili a Chernobyl dal 1986 ad oggi.

○ **Tokaimura (Giappone, 1999) - scala Ines 4**

Un incidente in una fabbrica di combustibile nucleare attivò la reazione a catena incontrollata. Tre persone morirono all'istante mentre altre 400 furono esposte alle radiazioni.

Quotidianamente si sente spesso parlare di "**sicurezza**" per sostenere scelte politiche difficili o poco gradite dal punto di vista sociale (es. nucleare, ogm). Chi obietta o dubita viene spesso tacciato di ignoranza, di atteggiamento poco aperto al progresso e alla scienza. In realtà la stessa sicurezza è già da tempo oggetto della ricerca scientifica. Senza voler entrare nel merito delle scelte cercheremo di approfondire la conoscenza della "sicurezza".

Si può parlare di "sicurezza" quando la soglia di rischio "percepita" dalla società (ossia dalle persone coinvolte) è considerata accettabile. E' quindi importante individuare un indice del rischio. In termini molto semplici questo indice può essere determinato dalla seguente "**formula-rischio**".

$$\text{Rischio} = \text{probabilità evento} \times \text{conseguenze dei danni}$$

Così un evento con probabilità minime di verificarsi e danni elevati può ottenere lo stesso indice di rischio di un evento con probabilità maggiore ma minori conseguenze. Si tratta di una visione oggettiva del rischio e si parla di "rischio obiettivo". E' quindi un rischio calcolato prendere l'aereo poiché il numero degli incidenti aerei in un anno rappresenta una minima parte delle ore di volo complessive di tutti gli aerei.

Attenzione però a confondere questa formula-rischio o il rischio calcolato anche per giustificare scelte pubbliche sgradite (es. deposito di scorie, centrale nucleare vicino casa ecc.). **Il rischio-obiettivo ha validità soltanto se la probabilità dell'evento è determinata dall'osservazione empirica.** In pratica soltanto se la probabilità è misurata in modo scientifico mediante test ripetuti o dall'osservazione diretta. **Soltanto in questi casi si può parlare di "rischio reale".**

Nel caso contrario saranno poste delle ipotesi restrittive che ridurranno enormemente la valutazione oggettiva delle probabilità. Ad esempio, un impianto nucleare può avere una probabilità di incidenti basata sull'esperienza passata ma di questi non esiste un vero archivio storico poiché, salvo pochi casi eclatanti, sono coperti dal segreto di Stato. Inoltre, poco può dirsi della probabilità degli atti esterni come il terrorismo o gli errori umani. Il disastro di Chernobyl fu causato da un errore umano non prevedibile in quanto al limite della follia (un esperimento incontrollato causò la fusione del nocciolo). Un altro triste esempio di eventi imprevedibili è l'attentato del 2001 alle Twin Towers, chi poteva mai prevederlo?

Pertanto si passa al concetto di "rischio ipotetico" la cui portata è sicuramente inferiore del "rischio reale". Molte ipotesi sono escluse dalle probabilità degli eventi possibili per semplificare l'analisi. Come ben sappiamo qualsiasi selezione implica un giudizio di valore da parte del ricercatore o del policy maker. Pertanto il rischio "ipotetico" perde la natura oggettiva per acquisire quella prettamente "soggettiva".

Altro aspetto fondamentale sono le conseguenze dei danni. Come stimare il danno di un incidente nucleare come quello di Chernobyl? Le conseguenze di un disastro nucleare si presentano dopo molti anni e impattano una vasta area geografica. I paesi hanno l'abitudine storica di non risarcire gli altri paesi confinanti per i danni da loro causati tramite l'inquinamento. Pertanto questi danni non sono mai visti come costi e non influenzano le scelte politiche. Il Protocollo di Kyoto è uno dei tentativi per far considerare queste esternalità negative (costi sociali) come costi privati dei singoli Stati. Non a caso gli Stati Uniti ancora oggi non hanno firmato il Protocollo.

Non è quindi possibile stimare le "reali" conseguenze dei danni causati da un particolare evento (es. incidente nucleare, effetti di lungo periodo degli OGM o sulle altre colture).

In conclusione, se il rischio di un evento infausto è ipotetico (non reale) ed i danni causati sottostimati ci troviamo dinnanzi ad un concetto di sicurezza molto fragile. Le scelte sono prese sulla base di ciò che è più utile e non in base alla reale sicurezza. Senza scendere nel merito su ciò che è giusto o sbagliato sarebbe il caso di utilizzare l'aggettivo "sicuro" solo in casi ben limitati.

Di sicuro non esiste nulla; ciò che l'uomo può cercare di gestire sono soltanto le conseguenze degli eventi. Su questo punto ci fermiamo lasciando a tutti il diritto di avere una propria personale "**opinione**" a favore o contro del nucleare senza scomodare il concetto di "sicurezza" o quello del "catastrofismo".

EVOLUZIONE DEL NUCLEARE

Negli ultimi 20 anni il nucleare ha registrato un rallentamento nella diffusione come conseguenza dell'incidente di Chernobyl e dei costi economici elevati d'investimento. Da vent'anni nessuna nuova centrale nucleare viene costruita in Europa (fatta eccezione per la Finlandia). La produzione di energia nucleare è sostanzialmente ferma a valori costanti dagli inizi degli anni '90. Attualmente le principali fonti energetiche restano ancora basate su petrolio, carbone e gas.

E nel futuro?

Difficile fare ipotesi. Entro il 2025 si prevede l'incremento dell'uso di gas e delle risorse rinnovabili per produrre energia, una sostanziale stabilità per il carbone e il petrolio. Nulla può essere affermato con certezza ma è evidente una generale prudenza mondiale nell'affrontare piani di investimenti energetici basati sul nucleare. Il mutato contesto economico nei paesi emergenti asiatici e il brusco rialzo del prezzo del petrolio potrebbe rimettere tutto in gioco. La competitività industriale e gli shock energetici esterni potrebbero riavvalorare l'utilizzo dell'energia nucleare per ragioni politiche.

Nel lungo periodo la sfida sarà la fusione nucleare. Il nucleare del futuro, privo di rischio e con bassa produzione di scorie radioattive. Sono stati portati avanti da Europa, Cina, USA, Canada i piani di ricerca sulla fusione nucleare. E' stata presa soltanto di recente la decisione di collocare la prima centrale a fusione nucleare della storia in Francia, cd ITER, dopo una lunga fase negoziale con il Giappone.

Il nucleare sicuro: la fusione

La fusione nucleare è la sfida del terzo millennio. E' una via pulita per produrre energia, senza rischio di esplosioni devastanti o irraggiamento da scorie radioattive ma semplicemente utilizzando il medesimo processo delle stelle e del Sole. Ogni attività umana produce inquinamento, tuttavia la fusione nucleare potrebbe consentire l'abbattimento di tutti i problemi emersi dall'esperienza della fissione nucleare (ovvero l'attuale processo mediante il quale si produce energia dal nucleare dal 1950).

International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

E' il progetto per realizzare la fusione promosso da Canada, UE, Giappone, Russia, Cina, Corea del Sud e USA. La costruzione durerà almeno dieci anni e produrrà energia a partire dal 2035. E' comunque prevedibile un certo ritardo, la fusione nucleare potrebbe diventare una realtà solo dalla metà di questo secolo. L'Iter è l'ultimo passo di una lunga serie di sperimentazioni scientifiche iniziata nei primi anni '90.

Vantaggi dei reattori a fusione:

- il 90% delle scorie hanno una bassa radioattività che si esaurisce in soli cento anni. Si elimina quindi anche il problema sociale e politico dello stoccaggio.
n.b.: l'attuale fissione nucleare produce scorie ad altissima radioattività che impiegano 100.000 anni e quindi un lungo periodo di tempo per esaurirsi.
- producono un gas di scarico non radioattivo (l'elio)
- non producono gas ad effetto serra che influiscono sul riscaldamento globale
- non producono plutonio
- il combustibile della fusione è estratto dall'acqua, una risorsa presente in qualsiasi paese del mondo.
- si riducono le conseguenze di eventuali incidenti. In caso di perdita di controllo, il reattore a fusione tenderà a raffreddarsi arrestando spontaneamente il processo di fusione.

Nota: nel caso dell'attuale fissione nucleare le conseguenze sono drammatiche poichè le grandi quantità del combustibile uranio tendono a produrre calore in una reazione a catena incontrollata, provocando la fusione del nocciolo del reattore e la conseguente emissione nell'atmosfera di enormi quantità di radiazioni (es. Chernobyl).

Come funziona la fusione nucleare?

Il combustibile dei reattori a fusione è dato dal **deuterio** e dal **litio**, entrambi estratti dall'acqua e dal terreno.

Es. 200 kg di litio e 100 kg di deuterio possono produrre 1000 MWh di energia elettrica. Gli isotopi dell'idrogeno (deuterio, trizio, ecc.) sono posti sotto vuoto e riscaldati ad alte temperature fino a formare il "plasma" (nuclei separati dagli elettroni). Quest'ultimo viene poi riscaldato a sua volta da corrente elettrica per far sì che gli atomi di idrogeno si fondano rilasciando energia e atomi di elio.

Nella fusione nucleare due nuclei leggeri si fondono per ottenere nuclei pesanti, generando energia per difetto di massa (dopo la fusione la massa è sempre minore alla somma dei due nuclei, la parte di materia mancante si è trasformata in energia).

Perchè la fusione nucleare richiede altissime temperature per compiersi?

Due nuclei posti ad una distanza minima (millimiliardesimo di millimetro) tendono a fondersi sotto spinta della forza di gravità nucleare rilasciando energia. Il processo di fusione è però ostacolato da un'altra forza, quella elettrostatica. Questa forza è provocata dalla carica positiva dei protoni che li porta a respingersi. Per superare la barriera elettrostatica i nuclei devono essere portati ad uno stato di eccitazione raggiungibile solo ad altissime temperature (100 milioni di gradi), tali da spingere al movimento i nuclei e quindi a scontrarsi (ovvero a fondersi).

Il problema delle temperature elevate.

Le alte temperature richieste dalla fusione pongono un problema concreto: nessun materiale può resistere a centinaia di milioni di gradi. Negli ultimi anni si è cercato di risolvere il problema creando dei campi magnetici tali da distanziare il plasma dalle pareti metalliche.

Il problema dell'energia per avviare la fusione.

L'energia necessaria per provocare la fusione nucleare è pertanto elevata. Nei primi esperimenti l'energia prodotta non ha compensato quella necessaria per produrla. Un problema di non poco conto che gli scienziati devono cercare di superare per consentire una concreta applicazione industriale della fusione nucleare.

Per queste ragioni, la fusione nucleare può considerarsi come la sfida del terzo millennio.