

L'atomo verde



Stefano Meneghello

Classe V B

Anno scolastico 2013 - 2014

Liceo Scientifico Statale A. Volta

Esame di stato

Indice	1
Introduzione	2
Premesse storiche di un recente passato	3
Il primato del petrolio e la nascita delle energie "alternative"	3
La crescita della popolazione e l'aumento di gas serra: due elementi strettamente collegati	4
Le energie rinnovabili oggi	6
L'energia dell'atomo	7
Storia (militare e civile)	7
Fissione e fusione	9
Centrali a fissione	10
Il dibattito sul nucleare	11
La percezione pubblica	11
Il rischio di incidenti nucleari e il pericolo delle radiazioni	11
Chernobyl e Fukushima: due incidenti che potevano non capitare	14
I rifiuti: il problema delle scorie radioattive	15
Uno sviluppo sostenibile	17
Bibliografia	17
Sitografia	17

Tesina presentata il 26 Giugno 2014 per l'Esame di Stato da Stefano Meneghello del Liceo Scientifico A. Volta.

Introduzione

La comparsa del petrolio come risorsa energetica nella seconda rivoluzione industriale ha accompagnato l'uomo in uno sviluppo senza precedenti nella storia. Gli effetti di questa fonte energetica che ha portato così tanti benefici all'umanità non sono soltanto positivi.

Difatti se si continueranno a utilizzare i combustibili fossili, le emissioni di gas serra saranno maggiori di quelle presenti perché la domanda energetica mondiale aumenterà nei prossimi vent'anni del 200% a causa dell'aumento demografico.

Uno studio pubblicato dalla IEA (International Energy Agency) nell'annuale *Tacking clean energy progress* mostra che l'indice che calcola l'emissione di tonnellate di CO₂ per l'energia prodotta dal settore del carbone dal 1990 a oggi è calato solo dell'1% nonostante gli impegni presi dalle nazioni dopo la Conferenza di Rio nel 1992 e i Protocolli di Kyoto nel 1997. Questo dato riflette il dominio dei carboni fossili e un lato della sfida di "decarbonizzazione": il mondo deve diminuire la richiesta di energia e rendere questa energia pulita.

Data l'inefficienza attuale delle energie rinnovabili, a causa di problemi tecnici ed economici, una fonte di energia che in futuro potrebbe sostituire in modo consistente i combustibili fossili e affiancarsi alle rinnovabili è il nucleare, poiché non emette gas dannosi all'ambiente. Una tecnologia che nacque per uccidere sul colpo quasi 240.000 persone e vincere una guerra, che terrorizzò il mondo intero durante la Guerra Fredda, potrebbe essere rilanciata in chiave ecologica.

La parola "nucleare" però genera sempre molte controversie nell'opinione pubblica perché associata ai disastri nucleari, recente quello della centrale di Fukushima del 2011, e allo stoccaggio delle scorie radioattive.

Si dovrà però decidere se sarà meno pericoloso continuare sulla strada attuale dei combustibili fossili, oppure se sarà meglio utilizzare, quando possibile, l'energia nucleare.

In attesa di quel "mondo senza armi nucleari" promesso da Barack Obama e di fonti rinnovabili competitive che ci permetteranno di lasciare alle spalle la dipendenza energetica dai combustibili fossili, l'energia nucleare resterà al centro del dibattito ancora a lungo.

Premesse storiche di un recente passato

Il primato del petrolio e la nascita delle energie "alternative"

La ricerca e l'utilizzo delle energie disponibili sono dei concetti che assumono fondamentale importanza nella storia dell'umanità a partire dalla rivoluzione industriale, da quando cioè il consumo di energia nel mondo ha cominciato a crescere a ritmi sostenuti. Prima di allora, infatti, il consumo di carburanti naturali (legna, carbone, biomasse) era limitato alle quantità liberamente disponibili dalla libera raccolta per la maggior parte della popolazione mondiale (legna) e a quelle acquistabili da chi poteva permetterselo (carbone).

Come è facile intuire dal grafico a latere, tutte le scoperte tecnologiche degli ultimi 150 anni hanno richiesto l'impiego di una sempre maggior quantità di energia per poter rendere accessibili ad un sempre maggior numero di persone i nuovi prodotti, frutto del Progresso.

La facilità di estrazione, di trasporto, di raffinazione e di distribuzione sono fattori che hanno motivato il pressoché totale ricorso ai carburanti fossili (petrolio e suoi derivati) quali combustibili ideali per alimentare la produzione e sostenere il benessere di buona parte del secolo scorso, ampio ricorso

motivato anche da prezzi al consumo molto bassi. Le poche voci che, a cavallo degli anni '60 e '70, ammonivano riguardo alla limitatezza e il progressivo esaurimento dei giacimenti e gli effetti negativi sull'ambiente e sulla salute causati dallo smog, erano pressoché inascoltate.

Improvvisamente, ragioni di carattere geo-politico sconvolgono le capacità di approvvigionamento del greggio a partire dal 1973 e per oltre i dieci successivi anni. Il Medio Oriente è martoriato dapprima dalla guerra del Kippur tra Paesi arabi ed Israele, che avrà come terreno di battaglia l'area del Canale di Suez, luogo di transito delle petroliere dirette via Mediterraneo anche all'Oceano Atlantico. In seguito alla Rivoluzione Iraniana del 1979 sarà la guerra tra Iran e Iraq (combattuta tra il 1980 ed il 1988) a rendere inaccessibile il greggio estratto dai loro giacimenti.

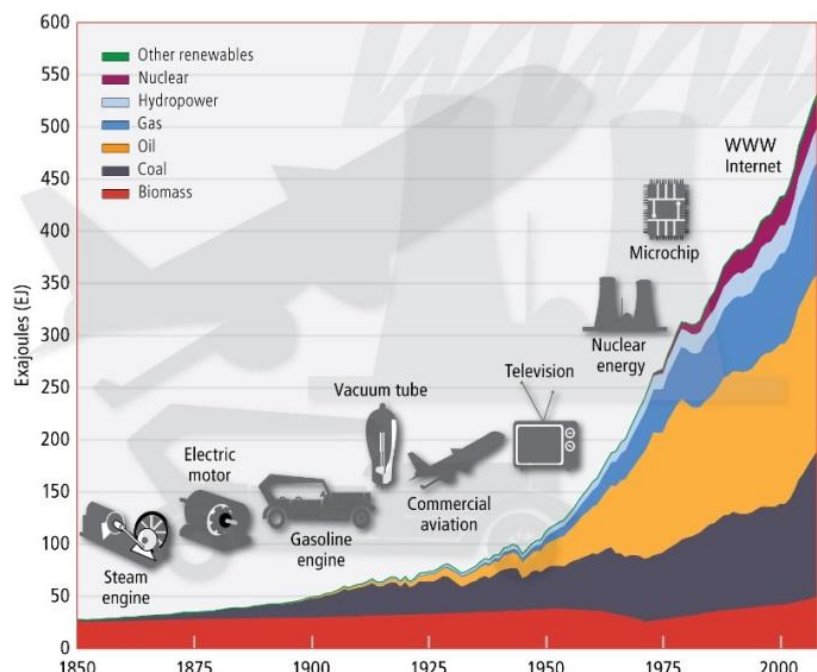


Figura 1. Il grafico mostra l'utilizzo delle fonti energetiche in relazione alle scoperte tecnologiche più importanti dell'era moderna.

Furono questi fatti che causarono l'impennata dei prezzi del petrolio, più che triplicati in pochissimi anni (dai 20\$ al barile del 1972 agli oltre 70\$ del 1979, ora si aggira sui 110 \$¹), ma ancor di più crebbe la consapevolezza del mondo occidentale della totale dipendenza di rifornimento da un'area politicamente instabile, con le inevitabili ricadute in termini produttivi. Queste ragioni, resero necessario un ripensamento ed un diverso approccio al problema, cominciando finalmente anche a superare l'ostruzionismo delle lobby del petrolio, capaci per anni di rallentare o ostacolare progetti di studio o fattibilità di quelle che da questi anni verranno definite le fonti di energia alternative: idroelettrica termica e termodinamica, biomasse, solare, eolica, nucleare.

La crescita della popolazione e l'aumento di gas serra: due elementi strettamente collegati

La possibilità che il nostro pianeta stia entrando in una nuova fase di una vera e propria estinzione di massa è un tema dibattuto nel mondo scientifico. La continua deforestazione dei polmoni della terra e l'emissione sempre crescente di gas serra (anidride carbonica CO₂, metano CH₄, protossido di azoto SF₆; gas prodotti principalmente dai combustibili fossili) da parte di una società del consumo ormai fuori controllo hanno creato il cosiddetto "effetto serra" (cioè la capacità del pianeta di trattenere nella propria atmosfera parte dell'energia solare) che fin dagli albori della rivoluzione industriale ha aumentato la temperatura del nostro pianeta. L'uomo ha quindi rotto l'equilibrio tra i gas serra prodotti naturalmente e quelli che la natura è in grado di eliminare. L'emissione dei gas serra da parte dell'uomo è strettamente collegata all'aumento demografico. E' facile pensare infatti come una popolazione maggiore consumi una quantità sempre maggiore di energia che, fino ad ora, è sempre stata prodotta principalmente da combustibili fossili.

La popolazione mondiale cresce in modo esponenziale: si è passati da 1 miliardo di abitanti del 1800 ai 6.5 miliardi di abitanti nel 2006. Le previsioni dicono che si raggiungeranno i 9 miliardi di abitanti entro il 2050. Con la crescita della popolazione e lo sviluppo dei Paesi poveri crescerà anche la quantità di gas serra che s'introdurrà nell'atmosfera. Infatti migliori condizioni di vita per i Paesi ora sottosviluppati significano un maggior consumo energetico: consumare più energia significa avere buoni ospedali,

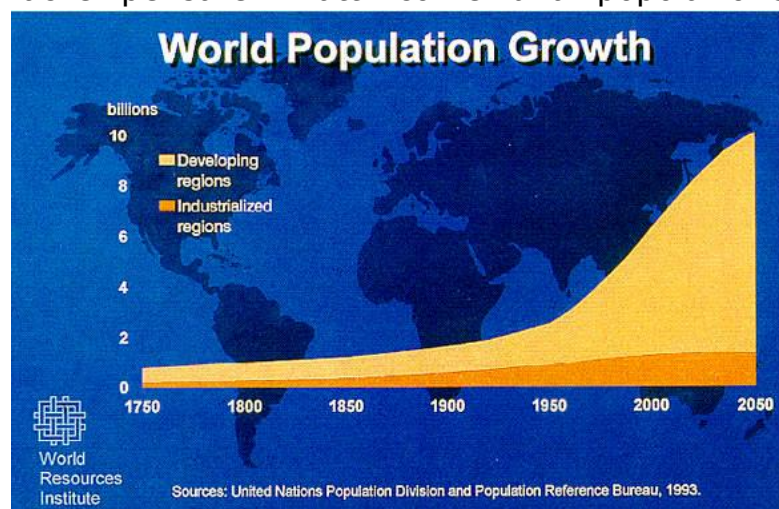


Figura 2. . Confronto tra le stime di crescita delle popolazioni industrializzate e di quelle in via di sviluppo.

¹ (Nota di aggiornamento: da luglio a oggi (14 gennaio 2015) il prezzo del petrolio è precipitato fino ai 46 \$)

buone scuole, buon cibo, riscaldamento nelle case. Non si può quindi ridurre il consumo energetico senza ridurre la qualità e l'aspettativa di vita.

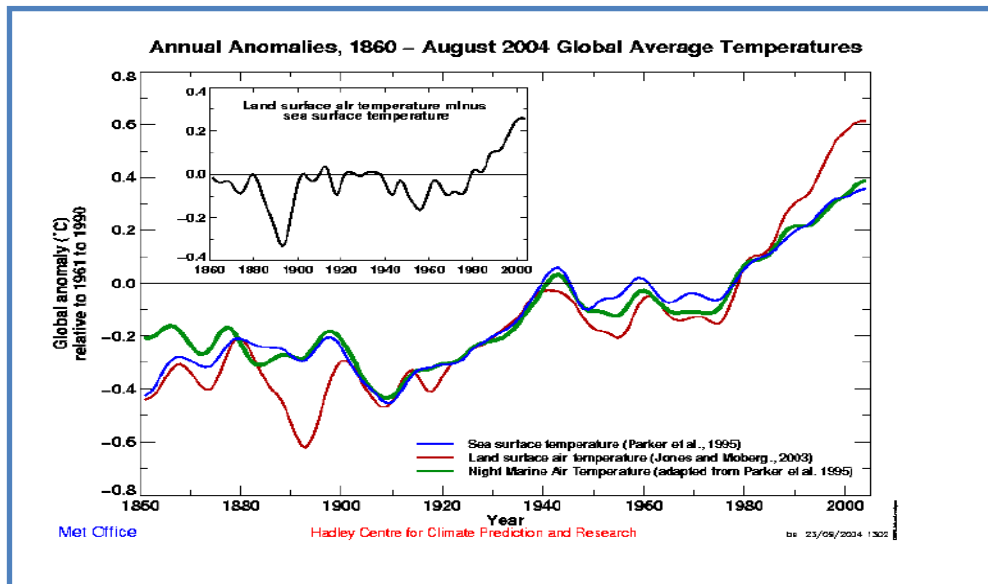


Figura 3 . Andamento della temperatura media del mare in azzurro, e del suolo in rosso. Nel periodo 1900- 2004 si è registrata una crescita della temperatura del suolo di 0.8 °C. Nello stesso periodo, , il livello medio degli oceani è cresciuto di 20 cm.

Il problema del riscaldamento globale non potrà che peggiorare e potrebbe portare all'estinzione della razza umana a causa dell'eccessivo aumento della temperatura. Nell'epoca recente, l'aumento è molto evidente: 0.8°C dal 1980 (oppure 1°C dal 1850) potrebbero sembrare pochi, ma non lo sono in quanto solo il risultato di una media.

A differenza delle estinzioni già avvenute negli scorsi milioni di anni, l'uomo è un essere in grado di studiare quel che sta succedendo per gestire il cambiamento. Non si è davanti a un evento naturale e ingestibile, ma a un evento causato dall'uomo stesso che per la sua sopravvivenza deve cercare di controllare.

A meno di una drastica riduzione della popolazione mondiale, non c'è alternativa all'aumento dei consumi energetici, quindi la sola possibilità di ridurre le emissioni dei gas serra è quella di ricorrere massicciamente alle "fonti alternative", quelle cioè che non li producono. Il problema ambientale non può non essere affrontato con decisioni riguardo alla politica energetica diverse da quelle odierne.

Le decisioni non potranno contare sull'esaurimento delle riserve di combustibili fossili, sufficienti ancora a soddisfare la domanda di energia per parecchi secoli, ma dovranno essere prese per scelta. Anche se poi il petrolio dovesse finire, come alcuni prevedono, oppure dovesse diventare troppo costoso, lo si

potrà sostituire con il carbone le cui riserve sono immense. Una fonte di energia a buon mercato, facilmente utilizzabile e terribilmente inquinante.

L'unica soluzione per ridurre i gas serra, dopo aver massimizzato ogni forma possibile di risparmio energetico, è quella di decidere di non usare i combustibili fossili e di ricorrere a fonti d'energia che non li producono, ossia alle energie rinnovabili (idroelettrico, solare, eolico, onde e maree), al geotermico e al nucleare. Di queste energie solo il nucleare è in condizione di sostituire in modo consistente i combustibili fossili, soprattutto per la produzione di energia elettrica.

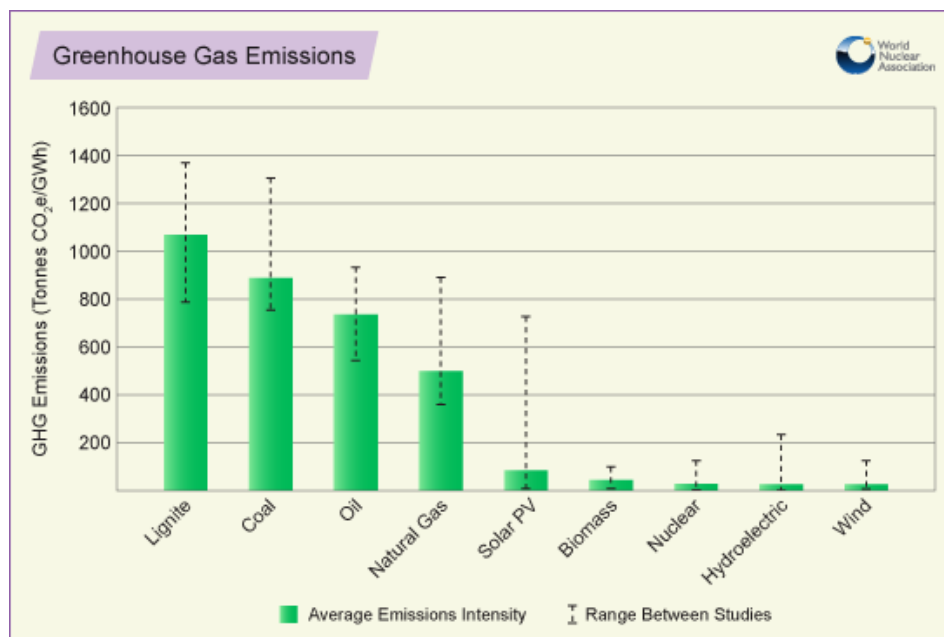


Figura 4 . Emissioni di Gas Serra per ciascuna fonte di energia.

Le energie rinnovabili oggi

Le altre rinnovabili infatti potenzialmente potrebbero soddisfare la domanda di energia al mondo. Per sostituire i combustibili fossili però si dovrebbero usare aree della Terra così grandi (sono energie distribuite) e affrontare costi talmente elevati, da renderne di fatto impossibile un uso massiccio.

Il successo dei combustibili fossili è dovuto proprio al fatto che soddisfano tre requisiti essenziali quando si parla di energia: la concentrazione, l'immagazzinamento e il trasporto. L'energia deve essere infatti in forma concentrata per riuscire a soddisfare grandi richieste di energia, deve essere immagazzinabile per poterla accumulare e trasportabile per poter soddisfare la domanda di energia in luoghi diversi da quelli in cui viene prodotta.

Le energie rinnovabili presentano ancora delle lacune in questi tre aspetti e ciò impedisce la loro diffusione su ampia scala.

L'energia dell'atomo

Storia (militare e civile)

L'umanità ha preso coscienza di questa nuova forma di energia il 6 agosto 1945 quando si diffuse nel mondo la drammatica notizia dell'esplosione di una bomba nucleare sulla città giapponese di Hiroshima (80.000 morti immediate). La creazione della bomba nucleare è frutto di numerose scoperte scientifiche.

Nel corso del XX secolo sono state infatti compiute le ricerche fondamentali che hanno portato alla fissione dell'atomo. Innanzi tutto, quelle dei coniugi Curie che, nel 1934, hanno rilevato il primo caso di radioattività artificiale.

In realtà le scoperte scientifiche che portarono alla possibilità di utilizzare l'energia nel nucleo atomico risalgono al 1895 con la scoperta della radioattività naturale in alcuni elementi da parte di Henry Becquerel. Il 1932 fu l'anno in cui J. Chadwick ottenne la conferma sperimentale dell'esistenza del neutrone, di fondamentale importanza per indurre il processo di fissione con successiva liberazione di energia che venne intuata solo nel 1938 da Lise Meitner, leggendo assieme al nipote Otto Frish una comunicazione inviata da Otto Hahn.

Queste scoperte permisero a Fermi di avviare, alle 15.50 del 2 dicembre 1942 il primo "reattore nucleare", con una potenza di circa mezzo watt e dimostrare che la reazione di fissione era attuabile e controllabile. Nel novembre del 1943, a meno di un anno dalla prima macchina di Fermi, entrò in funzione a Clinton, nello stato del Tennessee, il primo reattore al mondo, con una potenza di 3.5 megawatt termici; nel settembre de 1944 fu la volta del reattore di Hanford, nello stato di Washington, di potenza pari a 250 megawatt termici. Tra il 1940 e il 1945 venne compiuto negli Stati Uniti un balzo senza precedenti. Anche se l'obiettivo fu la costruzione della bomba atomica, questo immenso sforzo scientifico, tecnologico e industriale ebbe grandi ricadute sulle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare.

Dopo il conflitto mondiale, nel 1954, in Unione Sovietica, entrò in funzione la prima centrale elettronucleare, anche se di modesta potenza (5 megawatt elettrici). La prima centrale nucleare finalizzata alla produzione di energia elettrica da immettere sul mercato risale, invece, al 1956 ed è stata realizzata presso Calder Hill, in Inghilterra.

Per quasi tutta la seconda metà del secolo scorso, la produzione di energia elettrica da combustibile nucleare è cresciuta, fino a coprire oltre l'11% della produzione di energia elettrica mondiale. In particolare, al 2013, nel mondo vi erano 435 centrali nucleari attive e 71 in costruzione. In termini di contributo in percentuale dell'energia nucleare alla produzione di energia elettrica domestica vi è in testa la Francia (79,4%), Ucraina (46,3%), Corea (29,8%) e Regno Unito (23%).

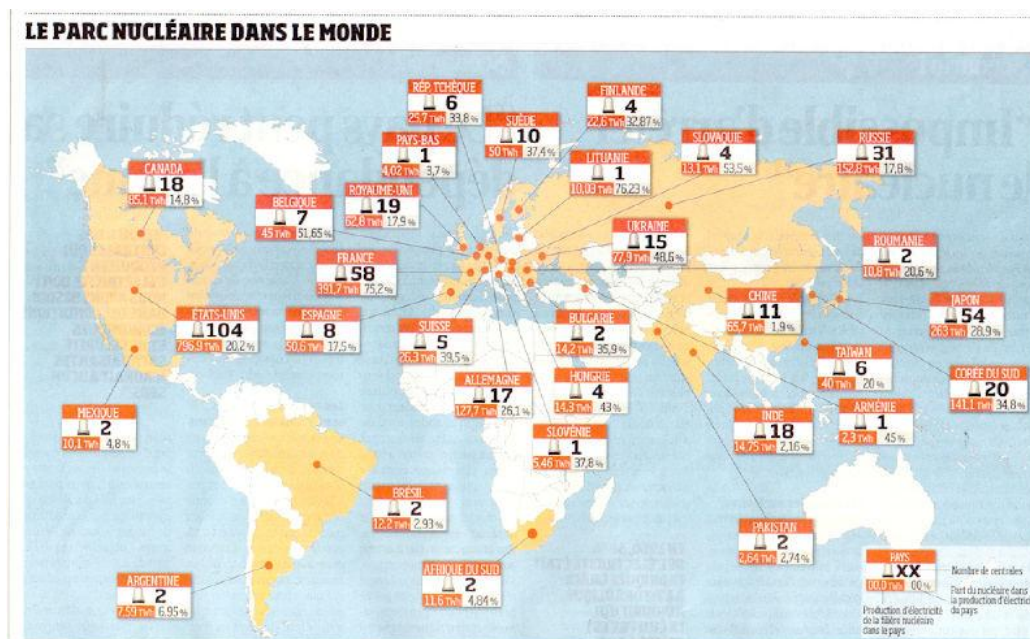


Figura 5. Centrali nucleari nel mondo: il Paese con più centrali sono gli USA con 104, seguono Francia e Giappone con 58 e 54.

La nascita dell'energia nucleare come fonte concreta di energia si può far risalire verso la metà degli anni sessanta, quando se ne dimostrò la competitività economica. Lo sviluppo fu inizialmente assai accelerato ma successivamente ebbe un rallentamento legato a forti contestazioni sugli aspetti di sicurezza che determinarono crescenti difficoltà di ordine finanziario a causa dei ritardi nel concedere le autorizzazioni per il funzionamento degli impianti da parte degli organi nazionali per la sicurezza. In alcuni casi, gli stessi organi, imposero delle sostanziali modifiche agli impianti in servizio o addirittura delle chiusure definitive. Gli incidenti di Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) della centrale di Fukushima in Giappone (marzo 2011) hanno rinfocolato le polemiche nei confronti dell'opzione nucleare. Quest'ultimo incidente ha avuto un notevole impatto sull'opinione pubblica; in Italia, a seguito di un nuovo referendum popolare (dopo quello del 1987, a seguito dell'incidente di Chernobyl, le centrali nucleari presenti sul territorio italiano erano state chiuse), nel giugno del 2011, l'impiego dell'energia nucleare per la produzione di energia elettrica è stato nuovamente abbandonato.

Fissione e fusione

Per fissione s'intende la rottura del nucleo in due o più frammenti più piccoli mediante l'azione di neutroni opportunamente rallentati su nuclei molto pesanti detti fissionabili, quali l'uranio 235, torio 232, plutonio 239 ecc. I principali effetti di questo fenomeno sono la liberazione di una grande quantità di energia e l'emissione contemporanea di 2-3 neutroni che possono fungere da veicolo di reazione, provocando nuove fissioni e innescando così una reazione a catena.

Quando un neutrone urta contro un nucleo di uranio che lo assorbe, provoca in esso vibrazioni e deformazioni. Le vibrazioni continuano fino a quando la deformazione è tale da impedire che le forze nucleari attrattive bilancino le forze elettrostatiche di repulsione tra i protoni. A questo punto il nucleo si scinde in frammenti, che trasportano una grande quantità di energia principalmente sotto forma di energia cinetica. In origine tale energia era immagazzinata nel nucleo iniziale sotto forma di energia potenziale elettrostatica.

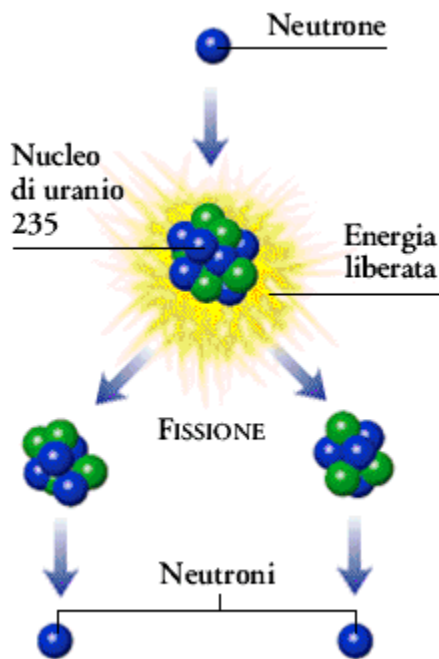


Figura 6 Fissione dell'atomo di uranio 235: il neutrone sparato contro l'atomo di uranio provoca la sua divisione e libera energia.

Per ogni fissione vengono rilasciati in media 200 MeV di energia, una quantità di circa cento milioni di volte più elevata delle energie prodotte in una comune reazione chimica come per esempio la combustione della benzina o del carbone.

Se tenuta rigorosamente sotto controllo, questa energia può essere sfruttata per produrre elettricità. Alcuni di questi elementi pesanti, come l'uranio 235 (92 protoni e 143 neutroni), si trovano in giacimenti e quindi per ottenerli è necessario estrarli dal sottosuolo. Altri, come il plutonio 239 o l'uranio 233, vengono prodotti artificialmente dall'uomo.

Nelle reazioni di fusione nucleare, al contrario di quanto avviene nella fissione, i nuclei di atomi leggeri si fondono insieme generando nuclei di massa maggiore. Anche in questo caso, nel processo si libera una grande quantità di energia. La fusione nucleare alimenta le stelle come il Sole e per sostenersi necessita di temperature molto elevate, dell'ordine di milioni di gradi. Al centro delle stelle, infatti, pressioni e

temperature elevatissime permettono ai nuclei degli elementi più leggeri di vincere la forza di repulsione elettrostatica tra i protoni e di avvicinarsi gli uni agli altri fino al punto di fondersi tra di loro, generando nuclei di elementi più pesanti. La massa del nuovo nucleo è tuttavia leggermente minore della somma dei nuclei originari, questo "difetto di massa" produce secondo la formula $E=mc^2$ un'enorme quantità di energia.

Produrre energia per fusione nucleare sulla Terra in modo controllato potrebbe risolvere i problemi energetici dell'umanità: si avrebbe a disposizione infatti una forma di energia praticamente inesauribile - il deuterio è presente in grandi quantità nell'oceano e si può separare con facilità dell'isotopo più comune dell'idrogeno -, senza emissioni inquinanti o di gas serra. Tuttavia per il momento è stato impossibile riprodurre in modo controllato il processo di fusione a causa dell'impossibilità di ricreare le stesse condizioni di pressione e temperatura all'interno delle stelle. E' stato invece possibile liberare in modo incontrollato l'energia della fusione dei nuclei atomici: su questo processo si basa infatti la bomba a idrogeno sperimentata per la prima volta negli USA nel 1952.

La fusione fredda è il nome dato a un insieme eterogeneo di reazioni chimiche che, secondo i suoi sostenitori, coinvolgerebbero anche i nuclei atomici inducendone la fusione a pressioni e temperature molto inferiori a quelle necessarie per attivare la fusione termonucleare. Si tratterebbe quindi di un modo per risolvere il problema dell'approvvigionamento energetico aggirando tutte le difficoltà tecniche di riprodurre in laboratorio le condizioni che si trovano all'interno delle stelle. L'idea, semplificata, è di utilizzare delle "ipotizzate" proprietà dei reticoli metallici per ridurre la repulsione colombiana tra i nuclei e quindi riuscire a farli fondere a temperature più basse, al limite a quella ambiente. Purtroppo non esistono oggi evidenze chiare dell'esistenza di materiali in cui questo processo potrebbe avvenire.

Centrali a fissione

Il principio di funzionamento di una centrale nucleare è analogo a quello di un qualsiasi impianto termoelettrico tradizionale alimentato a carbone o idrocarburi; l'unica fondamentale differenza è costituita dal tipo di reazione che produce il calore necessario ad alimentare le turbine: la fissione dei nuclei atomici nel caso di una centrale nucleare, la combustione chimica nel caso di una centrale tradizionale.

Gli elementi essenziali che costituiscono una centrale nucleare sono: il reattore in cui avviene la fissione, il circuito di raffreddamento, nelle cui tubature scorre il fluido refrigerante che permette di trasportare il calore prodotto nella fissione; un sistema di turbine e alternatori, in cui l'energia termica viene trasformata prima in energia meccanica e infine in energia elettrica, un condensatore permette infine di chiudere il ciclo del vapore, restituendo al circuito il fluido raffreddato in forma liquida.

Il cuore di una centrale nucleare è il nocciolo del reattore, in cui avviene la fissione dei nuclei e si genera energia sotto forma di calore. Il nocciolo è costituito da tre elementi essenziali: il combustibile, che contiene gli elementi fissili che danno luogo alla reazione a catena; il moderatore, che consente di rallentare i neutroni prodotti nella fissione; l'assorbitore, che permette di regolare la reazione a catena assorbendo i neutroni liberi in eccesso. Il nocciolo è racchiuso in uno speciale schermo di protezione, progettato per

ridurre il rischio che, in caso di incidente, materiali radioattivi possano fuoriuscire e contaminare l'ambiente.

Il dibattito sul nucleare

Il grande pregio delle centrali nucleari è quello di non emettere CO₂. Una caratteristica che, come si è visto, potrebbe rivelarsi essenziale nel futuro umano e nella produzione dell'energia. Il nucleare però continua a essere visto con diffidenza dai governi e dalla popolazione per i rischi che esso comporta che saranno discussi in seguito.

La percezione pubblica

Fino agli anni Sessanta la produzione di energia nucleare era stata considerata soprattutto come una fonte di benefici, una soluzione al problema energetico, guadagnandosi sostegno dell'opinione pubblica. Dagli anni Settanta però la situazione mutò radicalmente: gli spettri di una sempre più imminente guerra nucleare tra USA e URSS, dell'incidente di Three Mile Island nel 1978 e di Chernobyl nel 1986 fecero capire che scherzare con il fuoco dell'atomo può rivelarsi molto pericoloso. L'incidente di Fukushima non ha fatto altro che confermare un'idea che era già nell'aria: il gioco non vale la candela, il nucleare non è ancora abbastanza sicuro da essere sfruttato. Ma una maggiore sensibilizzazione dei cittadini sul problema ambientale potrebbe portare alla rivalutazione di questa energia.

Il rischio di incidenti nucleari e il pericolo delle radiazioni

Un incidente nucleare è un evento in cui si produce un'emissione di materiale radioattivo o un livello di radioattività suscettibile di apportare pregiudizio alla salute pubblica.

Può prodursi a vari livelli di gravità in una centrale elettronucleare o in un impianto nucleare militare o civile, oppure anche in stabilimenti dove vi sia una qualsiasi attività legata alla manipolazione di elementi radioattivi come impianti di produzione del combustibile nucleare o di manipolazione delle scorie radioattive, laboratori di ricerca e reparti radiologici degli ospedali.

Allo scopo di misurare la gravità di un incidente nucleare è stata stabilita una scala internazionale, la scala INES, che classifica tutti gli eventi nucleari. Gli incidenti nucleari corrispondono ai livelli più alti della scala INES, dal 4 al 7. I livelli più bassi, da 0 a 3, sono riservati ai guasti che presentano un impatto lieve all'esterno dell'impianto e con esposizione radiologica della popolazione circostante entro i limiti prescritti.

Gli unici incidenti di livello 7 (*"Rilascio all'esterno di un impianto di grandi dimensioni di ingenti quantità di materiale radioattivo su un'area molto vasta con conseguenti effetti acuti sulla salute della popolazione esposta e*

conseguenze gravi sull'ambiente.") mai avvenuti nella storia sono quelli che più hanno terrorizzato il mondo, i disastri di Chernobyl e Fukushima.

La gravità di questi incidenti consiste nello spargimento di radiazioni nell'ambiente. Le radiazioni sono l'emissione di particelle che accompagnano il decadimento radioattivo dei nuclei atomici instabili verso uno stato di maggiore stabilità. L'effetto biologico delle radiazioni è dovuto alle proprietà ionizzanti: distruggendo i legami fra molecole, le radiazioni danneggiano le cellule generando radicali liberi. Ma soprattutto alterano le grandi macromolecole del DNA e del RNA, causando danni somatici e genetici; tale effetto è prodotto principalmente dalle radiazioni gamma, più energiche e penetranti delle particelle alfa e beta. Inoltre alterano le funzioni e gli apporti degli oligoelementi nel metabolismo organico. Il momento in cui le cellule sono più vulnerabili in rapporto alle radiazioni, è quello della riproduzione (mitosi o meiosi), in cui il DNA è in fase di duplicazione, le strutture del nucleo sono dissolte e gli enzimi che assicurano l'integrità del materiale genetico non possono operare. L'effetto macroscopico più vistoso della radioattività sulle cellule, quindi, è il rallentamento della velocità di riproduzione: le popolazioni di cellule che si riproducono molto rapidamente sono più vulnerabili di quelle che lo fanno lentamente. In virtù di questo fatto, gli organi più sensibili alle radiazioni sono il midollo osseo emopoietico e il sistema linfatico.

Spiegando in questo modo gli effetti delle radiazioni sembra che il pericolo sia molto grave e che una persona colpita da una di queste particelle subatomiche ionizzanti rischia parecchio. Ogni persona è però normalmente colpita da tali particelle circa 15000 volte per ogni secondo della sua vita: è stato così per tutti gli uomini che ci hanno preceduto e sarà così anche in futuro. Queste particelle, da cui siamo colpiti 40 mila miliardi di volte durante la vita provengono da fonti naturali. Lo sviluppo della tecnologia ha quindi aggiunto altre fonti come quelle dei raggi X per le diagnosi e le cure mediche, come le TAC. Una tipica schermografia con i raggi X ci colpisce con le particelle che ci colpirebbero naturalmente in un anno di vita, una TAC addirittura con le particelle che ci colpirebbero in 10 anni.

L'unità di misura del Sistema Internazionale (SI) per la radiazione è il Siviert (Sv), è però ancora in uso il rem, $100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv}$. Un mrem (un millesimo di rem, un centomillesimo di Sv) di esposizione equivale, per un corpo medio, ad essere colpiti da 7 miliardi di particelle standard, il Sv tiene conto anche del tipo di particella e della massa della persona. Per esempio un adulto e un piccolo bambino che stanno vicini in un campo di radiazioni ricevono lo stesso rischio e quindi la stessa dose in mSv anche se l'adulto riceve molte più particelle del bambino a causa della sua maggiore massa. In genere si parla di basse dosi di radiazioni fino $10 \text{ rem} = 0,1 \text{ Sv}$.

La radiazione naturale di fondo ci colpisce dall'alto (raggi cosmici), dalla Terra con i materiali radioattivi sempre presenti nel nostro pianeta: Uranio, Potassio, Torio; dall'interno del nostro stesso corpo, Potassio-40 e Carbonio-14. Il totale da 85 a 100 millirem all'anno. Inoltre possiamo aggiungere 80 mrem, in media, per analisi e terapie mediche e 180 mrem, in media, dalle radiazioni del

gas radon presente nelle case. [Stime di G. Filipponi *L'opzione nucleare, l'alternativa alla green economy.*]

Il totale per ogni abitante può arrivare facilmente a più di 360 mrem all'anno in aree di montagna dove la concentrazione di Uranio e di Torio è alta e l'altezza comporta una maggiore esposizione a radiazioni cosmiche. In alcune località, la radiazione di fondo raggiunge valori molto alti come nelle zone ricche di sorgenti termali e minerali. Nella città inglese di Bath le acque termali hanno un contenuto 1730 pCi di Radon per litro e sono considerate altamente benefiche per molti disturbi. Tuttavia, l'EPA (US Environmental Protection Agency) decretò che occorre prendere provvedimenti quando il contenuto di Radon nell'acqua potabile supera 4 pCi / litro. Gli antichi Romani, che non conoscevano l'EPA, costruirono a Bath un tempio nell'anno 42 DC dedicato alla dea della sapienza e della salute e nel 1742 gli inglesi vi costruirono il Royal National Hospital per le malattie reumatiche. Anche oggi è alto il numero di persone che vanno a Bath e in altri centri termali, malgrado le acque abbiano una radioattività molto elevata, per beneficiare dei loro effetti terapeutici.

Bisogna tener quindi conto che il fenomeno della radioattività è assolutamente naturale e che il pericolo persiste solamente se esposti ad alte dosi in poco tempo.

La storia degli incidenti nucleari, nel bene e nel male, ha comunque portato con sé il miglioramento dei sistemi di sicurezza nelle varie tipologie di impianto: ad ogni incidente nucleare avvenuto i livelli di sicurezza dei reattori di nuova concezione sono stati portati ad un livello superiore in virtù dell'evidenza e del superamento dei fattori di criticità o debolezza intrinseci emersi nella realizzazione e funzionamento dei reattori precedenti. Ciascun reattore al mondo possiede quindi i propri standard di sicurezza in base alla sua progettazione e realizzazione nonché altrettanto specifiche procedure standard in caso di emergenza.

Infatti, al fine di ridurre il rischio di gravi danni ambientali in caso d'incidente, oggi le nuove centrali di terza generazione puntano sulla ridondanza, cioè di duplicare i sistemi di sicurezza più importanti come il sistema di raffreddamento o la schermatura del nocciolo, e sulla sicurezza passiva, che punta su dispositivi automatici in grado di attivarsi autonomamente e che sfruttano principi fisici basilari come la gravità o la meccanica dei fluidi e non l'elettricità.

Se si compara con la produzione di altre forme di energia, il nucleare si rivela sicuro. Prendendo in esame l'intero ciclo di ogni fonte energetica (ciclo del combustibile, fabbricazione dei componenti e del sistema, esercizio, decommissioning) autorevoli studi internazionali hanno dimostrato che l'energia nucleare si posiziona tra quelle meno pericolose, anche nei confronti delle rinnovabili, sempre a parità di energia prodotta. Un indice significativo della sicurezza è il rischio di incidente e le conseguenti fatalità.

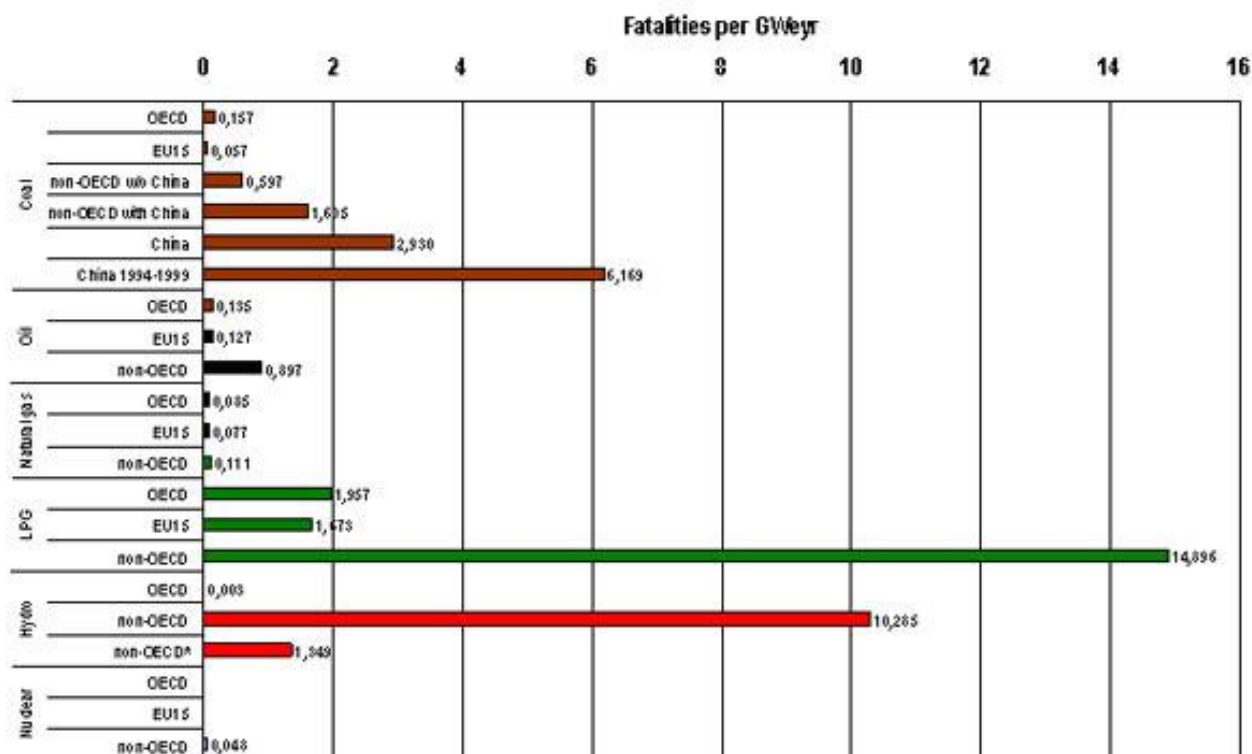


Figura 7. La figura seguente, elaborata dalla Nuclear Energy Agency sulla base di dati dell'ENSAD (Energy-related Severe Accident Database) del Paul Scherrer Institute svizzero, fornisce le fatalità, espresse in morti per GWe per anno, in vari tipi di impianti per la produzione di energia, installati in paesi OECD e non-OECD, nel periodo 1969-2000. Come si può vedere, le fatalità dovute ad incidenti in impianti nucleari (ultima voce in basso nella figura) sono di gran lunga inferiori a quelle dovute alla produzione di energia da qualsiasi altro tipo di impianto

Chernobyl e Fukushima: due incidenti che potevano non capitare

Due sono gli incidenti più gravi della storia dell'industria energetica nucleare: quello di Chernobyl nel 1986 e quello di Fukushima nel 2011, e hanno rivelato a tutto il mondo i devastanti effetti di una centrale nucleare fuori controllo. Sono però considerati due incidenti che potevano non capitare.

Il disastro di Chernobyl fu causato proprio da un test di sicurezza: dei tecnici erano al lavoro per verificare il funzionamento del sistema di raffreddamento di emergenza. La temperatura di uno dei reattori però sfuggì al controllo degli operatori e i sistemi automatici di spegnimento erano stati disattivati ai fini del test: il reattore era ormai fuori controllo. Il rapporto ufficiale, redatto da

agenzie dell'ONU (OMS, UNSCEAR, IAEA e altre), conta 65 morti accertati e stima altri 4 000 decessi dovuti a tumori e leucemie lungo un arco di 80 anni che non sarà possibile associare direttamente al disastro. In più bisogna contare la dispersione della nube radioattiva che terrorizzò il mondo intero.

A Fukushima le cose andarono diversamente: il 14 marzo 2011 il Giappone fu colpito da un sisma di magnitudo 9.0 che provocò enormi onde anomale sulle coste. L'impianto nucleare di Fukushima si salvò dai danni del sisma poiché dotato di sistemi antisismici, ma le misure di sicurezza della centrale non erano adeguate a fronteggiare il rischio tsunami. Così le onde anomale superarono le barriere e si abbattono sulla centrale e sulla rete elettrica. I sistemi di raffreddamento si trovarono senza energia se non quella delle batterie di emergenza con una durata di poche ore. La mancanza del raffreddamento del reattore ha portato al surriscaldamento del rivestimento delle barre di combustibile fatto con una lega di Zirconio (Zircaloy) che a 1200 °C libera idrogeno. E' stata l'esplosione dell'idrogeno a causare il danno e la fuoriuscita di materiale radioattivo (lo stesso è avvenuto per Chernobyl anche se l'idrogeno aveva un'origine diversa). La situazione fu gestita nel peggiore dei modi dalle autorità: il colosso energetico proprietario della centrale fu accusato di non averla dotata delle dovute misure di sicurezza, il governo invece di non aver prestato un immediato e adeguato soccorso. Il presidente della commissione chiamata a indagare sull'incidente ha affermato: *"Si è trattato a tutti gli effetti di un disastro creato dall'uomo, che si poteva e si doveva prevedere e prevenire. E le cui conseguenze si potevano mitigare con un intervento più efficace"*.

Le due crisi sembrano quindi essere state causate dall'inefficienza e dalla sbadataggine umana. La domanda sorge quindi spontanea: si sarebbero potuti evitare questi disastri?

I rifiuti: il problema delle scorie radioattive

Una grande questione riguardo all'utilizzo dell'energia nucleare è connessa allo smaltimento delle cosiddette scorie radioattive, cioè quei materiali di scarto non più utilizzabili ma in cui sono presenti sostanze che emettono radioattività a livelli potenzialmente dannosi per l'ambiente e la salute umana.

Circa il 90% dei rifiuti radioattivi è prodotto dalle centrali nucleari mentre il restante 10% deriva da attività mediche e scientifiche. Le scorie si dividono in base alla loro concentrazione d'isotopi radioattivi: i rifiuti a bassa attività costituiscono il 95% del totale e perdono la propria radioattività in tre secoli, i rifiuti ad alta attività che richiedono per 'spegnersi' migliaia di anni.

Tuttavia è proprio questa piccola frazione di rifiuti radioattivi ad alta attività a porre i maggiori problemi di smaltimento. I rifiuti ad alta attività costituiscono il combustibile irraggiato (detto anche esausto o spento), che dopo un certo periodo di utilizzo deve essere sostituito perché i prodotti della fissione (atomi leggeri come cesio e stronzio) e gli attinoidi pesanti (atomi pesanti che hanno

catturato uno o più neutroni senza subire la fissione) si accumulano e finiscono per ostacolare la reazione a catena.

Sono state individuate due possibili soluzioni: lo smaltimento e il riprocessamento.

Lo smaltimento dei rifiuti rappresenta una sfida tecnologica complessa e ancora irrisolta. Il criterio che guida lo smaltimento è impedire, attraverso l'interposizione di barriere fisiche naturali e artificiali, che i rifiuti vengano a contatto con la biosfera per l'intero periodo in cui la loro radioattività costituisce una minaccia per l'ambiente e la salute umana.

Le scorie a bassa attività vengono smaltite in bunker costituiti da barriere di calcestruzzo e materiali impermeabilizzanti.

Si è pensato di confinare le scorie ad alta attività, che necessitano di periodi di smaltimento di oltre 10 000 anni, in un luogo abbastanza remoto e inaccessibile da impedire che esse vengano in contatto anche accidentalmente con l'ambiente umano. I migliori candidati sembrano essere alcuni giacimenti di rocce sedimentarie, al riparo da fenomeni di erosione, scosse telluriche ed eruzioni vulcaniche.

Molti scienziati sono convinti che il problema dello smaltimento delle scorie sia meno drammatico di quanto sembri. I residui dei combustibili fossili sono un problema perché diffusi nell'ambiente, i residui delle centrali nucleari sono invece concentrati in scorie certamente pericolose ma che, a differenza di quelle dei combustibili fossili, possono essere immagazzinate e controllate.

Il riprocessamento è un procedimento che consente di separare scorie a bassa e ad alta attività ed è attualmente praticato in Francia, Cina, India, Giappone e Russia. E' un'operazione costosa ma ha il vantaggio di ridurre il volume finale delle scorie da smaltire e di permettere il recupero di una parte del materiale fissile riutilizzabile per scopi civili e militari (uranio o plutonio).

Il riprocessamento è considerato molto pericoloso proprio perché parte del plutonio recuperato può essere usato per costruire bombe atomiche anche in Paesi ritenuti inaffidabili, questo è però il rischio da contrapporre a un possibile drammatico aumento della temperatura della terra.

Uno sviluppo sostenibile

Dalle considerazioni precedenti sembra che il nucleare possa entrare a far parte di quelle energie che contribuiscono al cosiddetto "sviluppo sostenibile".

"lo sviluppo sostenibile è tale se capace di far fronte alle necessità del presente, senza compromettere la capacità delle generazioni future di far fronte alle loro necessità".

Rapporto Brundtland (Our common future, 1987)

L'elemento centrale di tale definizione è la necessità di cercare un'equità di tipo inter-generazionale: l'uomo di domani ha gli stessi diritti di quello di oggi.

In attesa che il progresso ci porti migliori tecnologie, non praticare anche la strada del nucleare vorrebbe dire consegnare alle generazioni future un equilibrio ambientale già compromesso.

Bibliografia

Paolo Saraceno, *Il caso Terra*, Mursia Editore, Milano, 2007

Giancarlo Sturloni, *L'atomo diviso*, Sironi Editore, Milano, 2012

J.D. Cutnell, K. W. Johnson, Traduzione di Claudio Romeni, *Fisica 3, Elettromagnetismo e Fisica Moderna*, Zanichelli, Bologna, 2012

Sitografia

www.eniscuola.net