

1. Perché dobbiamo parlare di energia?

Perché l'energia, come l'acqua e l'aria, è **assolutamente essenziale** per la nostra vita. Per sottolineare quest'affermazione, riportiamo qui sotto uno studio effettuato dal World Energy Council. Come si può ben vedere, sia le statistiche disponibili (dal 1960 al 2000), che le proiezioni (dal 2000 al 2050), mostrano che il nostro bisogno d'energia è aumentato, aumenta e continuerà ad aumentare.

Anno	1960	1980	2000	2020	2050
Popolazione	3 miliardi	4,5 miliardi	6 miliardi	7,5 miliardi	~8 - 10 miliardi
Riferimento	x1	x1,5	x2	x2,5	~x2,7 - x3
Energia totale richiesta (riscaldamento, elettricità e trasporto)	100% ~3 Gigatep *	210%	320% ~10 Gigatep *	450%	oltre il 600% ~18 Gigatep *
Energia elettrica richiesta	100% ~2000 Twh**	400%	700% ~15.000 Twh**	1000%	2000% ~42.000 Twh**

* 1 Gigatep = l'equivalente di un miliardo di tonnellate di petrolio

** 1 Twh = 1 miliardo di Kwh

Secondo le più realistiche previsioni, probabilmente la richiesta di elettricità si triplicherà entro il 2050 per i seguenti motivi:

- Generale aumento della popolazione mondiale
- L'aumento della popolazione che vive nelle città (ci sono già 10 città con oltre 20 milioni di abitanti)
- Aumento generale del benessere: oggi circa 2 miliardi di persone non hanno accesso ad un rifornimento commerciale di energia
- L'aumento "esplosivo" della richiesta di energia nei paesi in via di sviluppo densamente popolati. Il consumo pro-capite di energia in Cina o in India è attualmente un decimo di quello statunitense ed un quarto di quello italiano. Oggi meno del 25 % della popolazione mondiale consuma oltre il 75 % dell'energia mondiale!
- L'energia elettrica è comoda e pulita rispetto ad altre sorgenti di energia. Nel 2000, l'elettricità ha rappresentato il 35% del bilancio energetico mondiale, nel 2050 rappresenterà il 50%.

Uso pro-capite di energia nel 1996 in TEP (Tonnellate Equivalenti di Petrolio)

U.S.A.	8
Germania	4,1*
Francia	4

OCSE	4
Regno Unito	3,8*
Giappone	3,7*
Italia	2,9*
Cina	0,9
India	0,5
Mondo	1,7

* Dato 1993

Da questi dati è chiaro che la richiesta di energia, particolarmente la richiesta di energia elettrica, aumenterà enormemente nei paesi in via di sviluppo; e che tutte le sorgenti di energia saranno utilizzate per rispondere a quest'esigenza: dalla combustione dei combustibili fossili all'energia idroelettrica, dall'energia nucleare alle sorgenti d'energia rinnovabili quali la biomassa, il vento, il sole, ecc...

Di fronte a tale richiesta, quali sono i mezzi per soddisfarla?

Le cosiddette energie "rinnovabili" vedranno un aumento della loro richiesta, particolarmente per le applicazioni decentralizzate o come sorgenti ausiliarie, considerando la loro intensità diffusa. Queste energie non dovrebbero in nessun caso essere opposte, come alcuni sono inclini fare, all'energia nucleare, ma sono piuttosto complementari: le energie rinnovabili non hanno bisogno di grandi turbine e alternatori e potrebbero effettivamente giocare un ruolo decisivo per quelle popolazioni che non hanno accesso a fonti commerciali di energia. Naturalmente, tutto ciò, presupponendo che i paesi tecnologicamente avanzati facciano gli sforzi tecnici e finanziari per fornire a quei paesi questi mezzi di energia, poiché anche se limitati, consentirebbero uno sviluppo pulito e robusto.

Ma al giorno d'oggi petrolio, carbone ed il gas forniscono insieme circa il 90% dell'energia, l'idroelettrica circa 3%, e nucleare circa 7%. Anche se continuiamo a scoprire i nuovi giacimenti di gas ed estrarre più petrolio dai pozzi, si prevede che queste risorse comincino a esaurirsi dal 2050, e che il loro posto sarà preso dalle energie rinnovabili, e in particolar modo dall'energia nucleare.

Anno	2000	2020	2050
Combustibili fossili	86%	87%	70%
Combustibili rinnovabili	7,5%	6,5%	8%
Combustibili nucleari	6,5%	6,5%	22%

Fonte: P.R. Bauquis (TOTAL-FINA-ELF), rivista de l'Energie, settembre 1999.

Conclusione: *l'energia nucleare diventerà inevitabile nei decenni a venire*

(questo è quello che presidente Putin ha dichiarato nella conferenza "UNO Millenium" del settembre scorso).

2. Quali sono le caratteristiche dell'energia nucleare?

Sapete che l'energia nucleare è di gran lunga il modo meno inquinante per produrre grandi quantitativi di elettricità?

2.1 Energia sprigionata da 1 chilogrammo dei seguenti materiali:

1 chilogrammo di legno produce	2 kWh
1 chilogrammo di carbone produce	4 kWh
1 chilogrammo di olio produce	6 kWh
1 metro cubico di gas produce	6 kWh

1 chilogrammo di uranio produce 50.000 kWh (centrale elettrica PWR *)
 2.500.000 kWh (centrale elettrica FBR**)

* PWR: Reattore ad acqua pressurizzata

** FBR: Reattore autofertilizzante a neutroni veloci

2.2 Una centrale nucleare è compatta :

Centrale nucleare	3.000MW	1,5 chilometri quadrati
Centrale a gas	3.000MW	1,5 chilometri quadrati
Centrale a carbone o ad olio combustibile con relativo magazzino stoccaggio del combustibile	3.000MW	3 chilometri quadrati
Centrale idroelettrica come la Grande Dixence Dam in Svizzera	1.000MW	parecchi chilometri quadrati
Centrale a pannelli solari in un luogo molto soleggiato	1.000MW	20 - 50 chilometri quadrati
Centrale eolica in un luogo ventoso	1.000MW	50 -100 chilometri quadrati
Centrale a biomassa con relativa piantagione	1.000MW	4.000 chilometri quadrati

2.3 L'energia nucleare necessita di piccoli quantitativi di combustibile

Quantità di combustibile utilizzato da una centrale elettrica di 1.000MW	
Tipo Centrale	Combustibile
Nucleare PWR	20 tonnellate (1 camion)
Nucleare FBR	2 tonnellate (meno di un metro cubico)
Petrolio	2.000.000 tonnellate (1 petroliera alla settimana)
Carbone	2.500.000 tonnellate (2 o 3 treni al giorno)

Gas	1 tubo dal diametro di 50 cm che trasporta gas ad alta pressione (80 atmosfere)
-----	---

Le centrali nucleari grandi sono adatte per le grandi aree urbane, mentre le piccole centrali sarebbero utili nelle regioni aride, per esempio. Oltre all'energia elettrica le centrali nucleari possono produrre calore per desalinizzare l'acqua di mare: tali piccole centrali possono funzionare per anni con una singola carica di combustibile nucleare.

2.4 Una centrale nucleare non produce irritazione o gas di inquinamento

Le centrali nucleari **non producono anidride solforosa** (che provoca le piogge acide), **neacute; gli ossidi di azoto** che irritano gli occhi e la gola, **neacute; i gas di effetto della serra** (anidride carbonica, metano, anidride solforosa, ecc...), **ne polveri**, con i loro effetti deleteri sulla salute e sul clima.

Una centrale elettrica a carbone di 1.000 MW produce ogni anno:

- 6.000.000 tonnellate di anidride carbonica (CO₂)
- 44.000 tonnellate di anidride solforosa (SO₂), parte di cui può essere bloccato
- 22.000 tonnellate di ossidi di azoto (NO_x)
- 320.000 tonnellate di cenere, di cui 400 tonnellate di metalli pesanti come torio e uranio.

Una centrale elettrica a petrolio o a gas produrrà un po' meno anidride carbonica, poca o nessuna cenere, ma comunque quantità significative d'anidride solforosa e di ossidi dell'azoto. (il petrolio deve essere raffinato soprattutto per rimuovere la contaminazione di zolfo)

La Francia produce il 90% di elettricità con centrali nucleari e dighe idroelettriche e, con la Svezia e la Norvegia, possiede l'emissione più bassa di anidride carbonica in Europa. L'anidride carbonica che è emessa viene principalmente dalle automobili e dai camion.

Emissioni pro-capite annue di anidride carbonica		
Paese	Totale	Per generazione elettrica
Francia	6,7	0,4
Regno Unito	10	3,0
Germania	12	6,0
Danimarca	12	6,0
U.S.A.	20	n.p.

Le nubi di vapore viste uscire dalle torri di raffreddamento delle centrali nucleari o dalle centrali elettriche a combustibile fossile, è solamente vapore acqueo, naturalmente non radioattivo. L'acqua è usata per raffreddare i condensatori delle turbine a vapore.

Attualmente, nel mondo, l'energia nucleare produce il 17% dell'elettricità (30 anni fa era il 0%) ed in questo modo si evitano l'emissione di oltre 3 miliardi di tonnellate di anidride carbonica all'anno. In totale l'energia nucleare dall'inizio della sua esistenza ha evitato l'emissione di ben 40 miliardi di tonnellate di anidride carbonica!

2.5 L'energia nucleare produce scorie radioattive, ma in quantità relativamente piccola.

Questa proprietà dell'energia nucleare è stata molto esagerata dai media e dobbiamo metterla nella relativa prospettiva adeguata. Prendiamo la Francia come esempio: produce il 75% di elettricità dall'energia nucleare in 58 reattori nucleari. Il combustibile esaurito è ritrattato nell'impianto COGEMA a La Hague ed il plutonio viene recuperato (circa 1% del peso dell'uranio), riciclato e consumato come MOX (misto ossidi di uranio e plutonio) per produrre più energia.

In media, la Francia produce ogni anno circa 3 tonnellate pro-capite di rifiuti, di cui circa 100 chilogrammi di materiali tossici (prodotti chimici, metalli pesanti, ecc.) alcuni dei quali non degradabili (mercurio, piombo, cadmio, residui chimici stabili, ecc.). *Di questi 100 chilogrammi, 1 chilogrammo è scoria radioattiva nucleare, e solamente 50 grammi sono scorie radioattive longevi.* Detto così il volume è relativamente piccolo. Le scorie radioattive vengono imprigionate in blocchi di cemento, o vetrificate se molto radioattive, ed il loro volume è molto più piccolo del volume delle scorie industriali tossiche, molte di cui hanno una vita ancora più lunga. Infatti, molte scorie chimiche sono stabili ed hanno una vita infinita.

Qui abbiamo considerato il riciclaggio del plutonio come MOX e la necessità di smantellare gli impianti alla conclusione della loro vita utile. Rileviamo egualmente che più è elevata la vita d'una sostanza radioattiva, più debole è la relativa radioattività. Così gli elementi molto longevi quali l'uranio non sono molto pericolosamente radioattivi, perché emettono pochissima radiazione. (d'altra parte, l'uranio, un metallo pesante, è chimicamente tossico, come il mercurio). Ancora, i prodotti molto longevi (più lunghi di 1000 anni) emettono particelle alfa; ma le particelle alfa possono essere interrotte da un foglio di carta o dalla pelle della vostra mano. D'altra parte, gli emettitori alfa, per essere pericolosi, devono essere ingeriti od inalati in quantità massicce, poiché irradierebbero l'interno del corpo umano, se non espulsi (tali sostanze possono essere espulse naturalmente o con appositi prodotti chimici).

Conclusione: *Vediamo che l'immagine delle scorie radioattive che si accumulano per le generazioni future e delle quali non sappiamo cosa fare è più un mito che un problema reale. Infatti, il modo migliore per eliminare i 50 grammi di scorie a persona all'anno, cioè 1500 metri cubici all'anno per tutta la Francia - un cubo di cui volume è come quello di una casa di 12 metri per lato - è l'essere seppellito ad una profondità di 600 o 800 metri in un luogo geologicamente stabile, in cui è e sarà molto improbabile una possibile fuoriuscita. Ma si potrebbero anche conservare i blocchi di cemento ed il vetro dentro magazzini isolati fino a che non conosciamo meglio che cosa desideriamo fare di loro. Non c'è fretta. Potremmo paragonare quei 1.500 metri cubici, al volume dei prodotti chimici tossici prodotti dalla stessa popolazione durante un anno, circa un milione di metri cubici, che è un cubo da 100 metri di lato.*

Materiale esausto in Francia

Scoria chimica altamente tossica: 2.000.000 di tonnellate all'anno stoccata in depositi, categoria A

Scoria radioattiva nucleare 60.000 tonnellate all'anno stoccate in depositi

- di cui, scorie radioattive longeve, 3.000 tonnellate all'anno stoccate in depositi sotterranei
- di cui, scorie radioattive molto longeve (1.000 o più anni) 300 tonnellate stoccate a La Hague

A Oklo nel Gabon sono stati scoperti 16 reattori nucleari che hanno funzionato per centinaia di migliaia di anni in epoca geologica molto distante, circa 2 miliardi di anni fa. Le scorie ed il plutonio che hanno creato non hanno minimamente intaccato l'argilla di Oklo, che peraltro è di ottima qualità. Ciò dimostra che non bisogna preoccuparsi per la degradazione di un deposito sotterraneo, è sufficiente scegliere bene il posto.

2.6 Il pericolo di irradiazione

La radioattività è misurata in becquerels (Bq). Il becquerel è un'unità della misura quasi infinitamente piccola. È come se uno abbia dovuto misurare una lunghezza macroscopica, i metri per esempio, in micron o persino in nanometri. Il corpo umano contiene alcuni elementi radioattivi, quali il Potassio 40 e il carbonio 14; questa radioattività naturale è di circa 8.000 becquerel. La stessa radioattività che si trova più o meno in un blocchetto di un chilogrammo di granito (il granito contiene un po' d'uranio e di torio)

Si è impressionati nel sentire che una sostanza abbia una radioattività di 1.000 o persino 10.000 Bq per il chilogrammo. I rilevatori di radioattività sono molto sensibili, come un microscopio in grado di vedere gli oggetti minuscoli.

L'effetto della radiazione ionizzante sul corpo umano è espresso in Sievert (Sv); ma il Sievert è un'unità grande, e quindi si parla solitamente di milliSievert (mSv) o persino di microSievert (μ Sv).

La radiazione ionizzante a cui il corpo umano è soggetto proviene principalmente dalle seguenti fonti: dal Radon atmosferico, dal sottosuolo, dai raggi cosmici, dagli esami medici, dall'industria nucleare e dai test delle armi nucleari. In Francia, normalmente si è esposti a 1,5 - 3 milliSievert all'anno, secondo la natura del terreno in cui si vive (calcareo o granitico) o dall'altitudine (più si va in alto, più si ricevono le radiazioni cosmiche). Ci sono punti su terra in cui la radiazione naturale che emerge dalla terra è molto più grande di 1,5 - 3 milliSievert all'anno. In determinati posti nelle Ande, nel Brasile, nella regione del Kerala in India e nell'Iran del Nord le dosi naturali possono essere alte 500-1000 milliSievert all'anno. Gli abitanti di queste regioni sono stati l'oggetto di molti studi e sembra che non subiscano alcun sintomo dovuto ai livelli di irradiazione quasi mille volte più alti del normale.

**Irradiazione media in
Europa: 2 - 10 mSv
all'anno**

**Per 2,5
millisievert/anno di
media:**

Radon 37%
atmosferico

Medica 29%

Radiazione
naturale del 12%
pianeta terra

Radiazione
cosmica(*) 10%

Radiazione
naturale del 9%
proprio corpo

Industria 2,2%

Test armi
nucleari 0,4%

Viaggi in
aereo 0,3%

**Industria
nucleare(**) 0,1%**

(*) Alzandosi dal livello del mare la radiazione cosmica aumenta. Già a 1.000 metri la radiazione cosmica aumenta di qualche punto percentuale.

(* *) Notare che il contributo degli impianti di energia nucleare industriale (0,1%) è virtualmente trascurabile se confrontato con le procedure mediche (raggi X, ACT-scans e la radioterapia) che

rappresentano il 29%. Accettiamo prontamente un alto grado di irradiazione medica perché l'intenzione è di migliorare la salute e prolungare la vita. Dovremmo quindi non avere paura di una irradiazione dovuta all'energia nucleare, peraltro 300 volte più piccola.

Ognuno di noi è colpito, ogni giorno, da circa un miliardo particelle ionizzanti. Fortunatamente il nostro corpo si è abituato a questo "bombardamento" e grazie al sistema immunitario recupera o elimina i geni danneggiati.

L'esperienza medica indica che nessun effetto nocivo è percepito in un soggetto esposto a meno di 100 milliSievert in una dose (30 - 50 volte la dose accumulata durante un anno tra radiazione artificiale e naturale). Sotto questo livello pratico non si sono mai osservati effetti nocivi.

D'altra parte, gli effetti più seri si sono osservati sopra il livello di 100 milliSievert. Una dose che colpisce l'intero corpo dall'intensità di 4.000-5.000 milliSievert provoca la morte nel 50% dei soggetti; nel recente incidente critico a Tokai-Mura nel Giappone tre operatori hanno ricevuto dosi di quest'ordine di grandezza. Due sono morti dopo aver ricevuto, rispettivamente, 17.000 milliSievert e 8.000 milliSievert, mentre il terzo che ha ricevuto circa 4.000 milliSievert è sopravvissuto.

La dose accumulata di radiazione naturale in tutta la vita è in media circa 150 milliSieverts, ma in determinate parti del mondo può raggiungere 500 milliSievert o più, senza effetto visibile sulla popolazione. (S. Jaworowski, Settembre '99, Physics Today). La radiazione causata dall'incidente di Chernobyl ha causato un aumento molto piccolo della radiazione sulla popolazione mondiale. Ma dosi relativamente grandi sono state ricevute dalle persone che vivevano vicino al luogo dell'incidente (in Ucraina) e particolarmente in Bielorussia. Se dello iodio, sottoforma di ioduro di potassio, fosse stato somministrato subito alla popolazione a rischio, e particolarmente ai bambini, allora il numero di casi di cancro della tiroide sarebbe stato considerevolmente più piccolo. Infatti, ci sono stati circa duemila casi di cancro alla tiroide fra i bambini ed i giovani ai tempi dell'incidente nel 1986 ed alcuni di loro sono morti (più o meno 10). Nessuna leucemia supplementare o casi di cancro sopra le statistiche sono stati segnalati e questo è stato riconosciuto nell'aprile 2000 da una relazione ufficiale dal UNSCEAR delle Nazioni Unite. Ciò è lontano dalle 15.000 morti di cancro segnalate tempo fa da alcuni media.

Irradiazione: effetti sulla salute di una persona

- Dose mortale: 8.000 milliSievert o più in una singola dose
- Sopravvivenza al 50% (LD 50): 4.000 - 5.000 milliSievert in una singola dose
- Probabilità di cancro o leucemie nei 20 anni seguenti: più di 100 milliSievert in una singola dose
- Nessun effetto sulla propria salute e per le generazioni successive: meno di 100 milliSievert ricevuti in una singola dose

Alcuni esempi di dose radioattiva

- radiazioni naturale 2 - milliSievert 3 all'anno, ma fino a **500 - 1000** milliSievert all'anno in alcune regioni
- radiazioni mediche 0,5 - 1 milliSievert all'anno, nei paesi sviluppati
- Effetto dell'industria nucleare: **0,02** milliSievert all'anno

Dose annuale massima suggerita

- Per gli operai nell'industria nucleare: 50 milliSievert all'anno
 - In conformità con le nuove, regole più rigorose ciò deve essere ridotta a: 20 milliSievert all'anno
- Limite superiore suggerito della dose annuale per il vasto pubblico: 5 milliSievert all'anno
 - In conformità con le nuove, regole più rigorose ciò deve essere ridotta a: 1 milliSievert all'anno

Conclusione: *La quantità di irradiazione aggiunta dall'industria nucleare è trascurabile.*

Anche se i nostri sensi non rilevano la radiazione (a proposito, solitamente non rilevano neanche le sostanze tossiche), la gamma di immunità per gli esseri viventi è larga, molto più ampia della nostra resistenza ai cambiamenti della temperatura.

D'altra parte, gli strumenti per rilevare la radiazione ionizzante sono estremamente sensibili. La nostra raccomandazione è che dovrebbero essere a disposizione del pubblico, in modo che la gente possa diventare esperta del concetto.

2.7 Una parola sul Plutonio

Il plutonio è un sottoprodotto della fissione presente in tutti i reattori. È una materia fissile eccellente (quindi utilizzato anche per scopi militari, come l'uranio altamente arricchito). In un reattore parte del plutonio generato brucia e contribuisce alla produzione di energia. In un reattore a neutroni veloci (come il Superphénix), l'uso del plutonio è ottimizzato: può essere bruciato ad un tasso migliore che nei reattori ad acqua leggera che funzionano con i neutroni lenti, è persino possibile, se si vuole, produrre più plutonio dall'uranio naturale o impoverito che alimentano il reattore, che il plutonio bruciato: ciò non è "il movimento perpetuo", tuttavia, è un punto fantastico verso la sostenibilità, perché è stato dimostrato che con un tale reattore, il rendimento di energia per chilogrammo di uranio naturale può essere moltiplicata per 100 in via teorica, almeno 50 o 60 volte in pratica con la tecnologia attuale.

È come se la vostra automobile, che normalmente può fare 500 chilometri con un pieno, possa fare il giro del mondo!

Il plutonio può essere ricavato dal combustibile spento dei reattori attuali, o dallo smantellamento delle armi nucleari.

Attualmente nel mondo sono disponibili 1.000 tonnellate di plutonio. Sapendo che 1 grammo di plutonio può generare tanta energia quanto 1 tonnellata di petrolio, si potrebbe generare energia come 1 miliardo di tonnellate di petrolio, circa 6 miliardi barili, cioè 10 anni di consumo francese di petrolio.

Alcuni dicono che sarebbe pericoloso bruciare il plutonio per il rischio di furti. A noi sembra il contrario: bruciare il plutonio è il modo migliore per eliminarlo.

D'altra parte, il plutonio è un materiale tossico sia chimicamente che radiologicamente e deve essere trattato come tale, cioè con precauzione. Ma non è di gran lunga il materiale più tossico sulla terra

come si dice: per esempio, le tossine botuliniche da alimenti avariati, o il metilmercurio, sono molte volte più tossici e pericolosi. Si dice inoltre che 1 microgrammo di plutonio è mortale. Ciò non è vero. 1 microgrammo genera 2000 becquerels in particelle radioattive alfa; i test atmosferici degli armamenti nucleari hanno sparso in aria, purtroppo, diverse tonnellate di plutonio (3 -10 tonnellate) abbastanza per ucciderci tutti se fosse vero che basta un microgrammo di plutonio per morire. Tutti i petali dei fiori contengono migliaia di atomi di plutonio prodotti dall'effetto dei raggi cosmici sulle tracce di uranio presenti in qualsiasi terreno.

L'ossido del plutonio, che è il residuo del plutonio più comune usato nell'industria, non è solubile in acqua e sarà rifiutato dall'organismo se ingerito per caso. Polvere fine di ossido, se inalato, può essere mortale: questo è il motivo per cui si prendono grandi precauzioni nel lavorare il plutonio. Normalmente il plutonio è lavorato in celle sotto depressione, con un sistema filtraggio aria molto efficiente, come fatto ordinariamente nella lavorazione dei microchips elettronici. L'esperienza di qualche persona che ha inalato piccoli importi di polvere d'ossido di plutonio sembra indicare che il rischio di cancro è piuttosto basso. Secondo voi, che cosa è a lungo termine più pericoloso all'umanità: 1 tonnellata di olio con i relativi problemi dell'estrazione, del trasporto, del CO₂, di NO_x, ecc.... o di 1 grammo di plutonio incapsulato all'interno d'un elemento combustibile? Pensate a questa domanda.

(riferimento: "Plutonium, resource or curse?", H. Henderickx, Le Hêtre Pourpre, Groupe Esperluète, 66 Rue Pierre du Diable, B-5100 Jambes)

Conclusioni: *Il plutonio è un materiale energetico importante che ha la proprietà immensa di moltiplicare il rendimento che può essere ottenuto dall'uranio naturale, per mezzo dei reattori a neutroni veloci. Le precauzioni per il maneggiamento del plutonio sono quelle di un certo numero di prodotti chimici usati su scala industriale.*

2.8 Incidenti nucleari

In considerazione all'energia enorme contenuta in un reattore nucleare, un incidente nucleare può avere conseguenze gravi se non è limitato dai sistemi di sicurezza e particolarmente se non è limitato da una struttura di contenimento. I progettisti del reattore sono ben informati di questo ed hanno imposto il concetto di "difesa in profondità", che consiste in sistemi ridondanti di sicurezza e in parecchi strati di contenimento, per impedire la diffusione di materiale radioattivo fuori dalla centrale nucleare, o per limitarne l'importo in grado di fuoriuscire in caso di incidente grave.

In primo luogo, un reattore nucleare non è una bomba atomica (la bomba A è fatta in modo da concentrare la reazione nucleare a catena in un volume molto piccolo in modo da poter produrre rapidamente importi enormi di energia, che conduce all'esplosione finale) in cui si ha "un'escursione incontrollata di potenza". In un reattore nucleare nella più catastrofica previsione d'incidente si ha un surriscaldamento del combustibile attorno a 1.000°C. A questa temperatura i componenti metallici del nucleo si fondono e parliamo di fusione. L'acqua di raffreddamento si surriscalda e può trasformarsi in vapore ad alta pressione. E, in un reattore raffreddato acqua, può essere prodotto idrogeno che a sua volta potrebbe esplodere in determinate circostanze. Questa è la descrizione giusta di che cosa è accaduto a Chernobyl nel mese di aprile del 1986; ma la centrale elettrica non ha aveva una struttura esterna di contenimento ed i prodotti radioattivi di fissione sono stati dispersi nell'esplosione nella tanto nominata nube radioattiva.

D'altra parte, nell'incidente di Three Miles Island (U.S.A.) nel 1979 il nucleo del reattore si è fuso, ma, grazie al design del reattore, si era relativamente meno surriscaldato e non si è creato nessun flash di vapore ad alta pressione, mentre la struttura di contenimento ha limitato quasi tutto e nessuna nube radioattiva è emersa. Anche se questo era un incidente molto grave, nessuno è morto, rimasto ferito o fortemente irradiato. Grazie al sistema di contenimento efficiente e al design del reattore non ci sono state conseguenze per la popolazione, a parte la perdita del reattore.

Chernobyl può essere chiamato un "incidente sovietico", piuttosto che un incidente nucleare, dovuto all'assenza di una cultura di sicurezza nell'industria sovietica, sia civile che militare, che ha prodotto anche altre gravi contaminazioni, come a Mayak ed a Cheliabinsk negli Urali. Nel funzionamento normale, se gli operatori non avessero ricevuto richiesta dai loro superiori di far funzionare

sperimentalmente il loro reattore in condizioni completamente instabili (circa 3% della potenza nominale) e se avessero saputo che questo era pericoloso e mortale, l'incidente di Chernobyl sarebbe stato evitato.

Gli incidenti naturalmente non si precludono completamente, ma il basso numero di incidenti che si sono presentati durante quarant'anni dimostrano l'elevato grado di sicurezza e di formazione professionale e comportamentale degli operatori. Ci sono oggi 428 reattori nucleari che producono 435.000.000 Kw, cioè il 17% dell'energia elettrica mondiale.

Gli incidenti di criticità sono accaduti. Sono evitabili ma possibili in qualsiasi impianto in cui si maneggia il combustibile nucleare. Se gli operatori non sono protetti, saranno irradiati. Potrebbero persino ricevere dosi mortali come accaduto recentemente a Tokai-Mura. Ma un tal incidente non è stata un'esplosione nel senso di un'arma atomica, perché l'energia liberata disperde immediatamente l'energia critica e la reazione si ferma. L'incidente molto divulgato di Tokai-Mura ha indicato l'incompetenza in quella centrale nucleare e la mancanza di sorveglianza; ma non è stato un disastro mondiale; i relativi effetti (due morti) sono analoghi di quelli d'un infortunio sul lavoro in cui due operai hanno pagato con le loro vite le installazioni insufficientemente sicure, le procedure mal definite e la mancanza di addestramento e di controllo.

Conclusione: *Tutta l'attività industriale è accompagnata dal rischio. L'industria nucleare moderna fa ogni sforzo per ridurre i rischi e le loro conseguenze. I rischi sono effettivamente molto più piccoli di quelli di altre industrie e particolarmente dell'industria di trasporto.*

Parlando **del trasporto**, deve essere detto che i trasporti del materiale nucleare, particolarmente quelli di scorie radioattive di alto livello o di plutonio, sono particolarmente sicure, dovuto l'uso dei contenitori estremamente resistenti ai colpi e di altre misure di sicurezza attive. L'indice di sicurezza parla per seacute;.

E' stata adottata una "International Nuclear Event Scale" (INES), in cui i livelli di pericolo vanno da 1 a 7. Un evento di livello 1 è un avvenimento semplice senza effetto sul posto o il fuori. All'estremo, al livello 7 c'è un incidente importante come quello di Chernobyl. Nei recenti reattori occidentali non si è mai andati oltre il livello 2. Ciò è uno strumento utile per i media e pure per il pubblico.

2.9 Rischi di proliferazione

Le armi nucleari potenti possono essere fatte con uranio fortemente arricchito oppure con il plutonio. Alcuni chilogrammi sono sufficienti, ma per fare una bomba "efficiente" ci devono essere sia un "know-how" speciale, sia le tecniche. Di massima, le bombe "inefficienti" potrebbero essere anche fatte, ma la materia fissile necessaria non è ottenibile subito: per l'alto arricchimento dell'uranio (per esempio il 97 % o più di Uranio 235) sono necessarie tecnologie specializzate nell'arricchimento; per il plutonio, invece, occorre uno speciale reattore e un sistema di ritrattamento del combustibile spento. Il ritrattamento è difficoltoso e occorre una tecnologia specializzata. Inoltre, l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) può scoprire tramite sistemi di rilevamento i paesi che preparano materia fissile per armi nucleari. Ad esempio, sono stati i casi dell'Iraq o della Corea del nord.

Il plutonio ottenuto dal combustibile civile spento ritrattato non è un materiale "sicuro" per farne un'arma, poiché può esplodere involontariamente durante il montaggio dell'arma dovuto all'emissione di neutroni spontanei emessi da isotopi più alti, come il Pu-239, e il Pu-240.

Il furto di materiale fissile in grado di produrre armi è teoricamente possibile, ma i cinque paesi che hanno tali armi hanno impegnato molte forze (nel loro interesse) per non avere perdite. Inoltre, le armi basate sul plutonio hanno bisogno d'una purificazione dei prodotti di deperimento, che dura diversi anni.

Qualcuno ha accennato agli atti di terrorismo possibili spargendo polvere di plutonio sopra una zona per uccidere o spaventare la gente. Tali "armi" non sarebbero affatto facili da prepararsi. Le polveri di plutonio, essendo pesanti, sarebbero assai difficili da disperdere. Inoltre queste polveri, a contatto

con l'aria, sarebbero subito ossidate, e non provocherebbero gravi danni. È più facile, e meno costoso, purtroppo, spargere gas tossici o virus piuttosto che materiali nucleari nocivi.

Conclusione:

i rischi di proliferazione non possono essere completamente eliminati, ma grazie ai mezzi di rilevazione della IAEA possono essere ridotti al minimo. Inoltre tutti i reattori nucleari civili usano materie fissili che non possono essere usati per fare armi nucleari senza una trasformazione anormale.*

* India e Israele non hanno firmato il Trattato di non proliferazione.

2.10 Energia nucleare e competitività.

Per i motivi citati sopra, sono richiesti enormi investimenti per lanciare una tecnologia potente e specializzata nelle migliori circostanze di sicurezza. Una volta costruito, però, un reattore nucleare può funzionare per 40 anni, (e perfino per 60 anni come riconosciuto per alcuni impianti negli Stati Uniti dalle autorità di sicurezza), a costo di esercizio minimo. Confrontato alle centrali elettriche rifornite con combustibile fossile il costo del combustibile nucleare è una parte molto piccola del prezzo per chilowattora di energia elettrica.

L'energia nucleare, essendo pulita ed economicamente competitiva, è stata e sarà molto richiesta in Europa e dalla potente industria dell'americana, come pure in Giappone, Corea, Cina e India. La Russia, per il futuro, conta moltissimo sull'energia nucleare, per poter risparmiare le riserve di combustibile fossile e fare fronte all'inquinamento atmosferico.

Per esempio, la centrale nucleare cinese alla baia di Daya ha prodotto abbastanza reddito durante i primi cinque anni di funzionamento da poter pagare la metà dei relativi prestiti di banca e può funzionare per altri 35 o possibilmente 50 anni con piccoli costi di esercizio confrontati ad una centrale elettrica a gas o a carbone, che inoltre sarebbe molto inquinante.

Oggi, tutti i responsabili delle centrali nucleari sono soddisfatti di avere scelto il nucleare, perché è competitivo rispetto a tutte le altre sorgenti di energia, senza eccezioni.

In più, il prezzo dell'energia nucleare è stabile ed indipendente dal mercato internazionale del combustibile fossile, che è instabile e perfino conforme a manipolazione per scopi politici. Il petrolio o il gas importato è costoso ed i prezzi oscillano sempre.

Conclusione: *L'energia nucleare è a lungo termine altamente vantaggiosa, ma richiede un grande investimento iniziale.*

Oggi, tuttavia, con la "deregulation", i costi di investimento iniziali dell'energia nucleare fungono da freno ai programmi nucleari occidentali. Oggi le società elettriche possono costruire centrali a gas a costi molto bassi e in più breve tempo. Ma, dato i prezzi più elevati del combustibile, ci potranno essere alcuni cambiamenti in queste politiche.

2.11 Considerazioni esterne

Ogni volta che si parla del costo dell'energia, si devono considerare i "costi esterni", cioè, i costi che la popolazione subisce che non sono calcolati nel prezzo giornaliero pagato dal consumatore. Questi includono gli effetti sulla salute, i fastidi di tutti i generi, le conseguenze degli incidenti nella catena di produzione e di distribuzione, l'inquinamento, l'effetto della serra ed altri.

Molti studi sono giunti alla conclusione che i costi esterni dell'energia nucleare sono più bassi di quelli di altre forme di energia, anche quando si include il costo del maneggiamento delle scorie radioattive, di smantellamento degli impianti alla conclusione della loro vita utile ed i rischi di incidenti gravi. Il più ampio rapporto di consulenza in questo settore è il recente studio di ExternE, patrocinato dalla Commissione Europea, in collaborazione con il Dipartimento per l'energia degli Stati Uniti, che non è particolarmente gentile sull'energia nucleare.

I risultati sono indicati nella seguente tabella. Per l'effetto della serra, lo studio ha stabilito un costo medio di 15 Euro per una tonnellata di carbonio scaricata in atmosfera (le valutazioni variano da 10 a 25 euro per la tonnellata).

Costo complessivo di produzione di energia elettrica in Eurocents per kWh			
Tecnologia	Funzionamento della tecnologia, ammortamento, e costi finanziari	Costi esterni	Totale
Carbone	5,0	2,0	7,0
Olio combustibile	4,5	1,6	6,0
Gas naturale	3,5	0,36	3,9
Vento	6,0	0,22	6,22
Idroelettrica	4,5	0,22	4,72
Nucleare	3,5	0,04	3,54

Fonte: ExternE Study of the European Commission, 1999, cit. Foratom Bull. n. 62, 1999

Conclusioni: *L'energia nucleare è competitiva anche non considerando i costi esterni. Lo è ancora di più considerando i grandi costi esterni dei combustibili fossili, costi che sono stati trascurati finora.*

2.12 Uno sviluppo sostenibile in lunghi termini

Quando bruciamo i combustibili fossili, stiamo consumando l'energia solare accumulata in milioni di anni dalle piante. I giacimenti di combustibile fossile sono facilmente accessibili, ma sono anche abbastanza limitati, e saranno consumati completamente fra circa 1 o 3 secoli. Coloro che si preoccupano per le generazioni future per l'accumulazione di scorie dovrebbero anche prendere in considerazione che: 1) bruciando combustibili fossili scarichiamo in aria tonnellate e tonnellate di anidride carbonica che causano il cambiamento climatico con tutte le sue conseguenze (più caldo, maggior rischio di alluvioni, aumento della desertificazione, innalzamento del livello del mare, ecc...) 2) Sarebbe corretto e prudente conservare il petrolio, il carbone e il gas per le generazioni future, visto il loro valore nella sintesi chimica dei cosiddetti prodotti "petrolchimici", quali l'utilissima plastica e i preziosissimi concimi

Nella stessa maniera, neppure l'uranio è una risorsa di lunga durata. Ma:

- I reattori moderni del tipo BWR o PWR utilizzano soltanto circa 1% dell'energia potenzialmente disponibile nell'uranio naturale. Il reattore autofertilizzante a neutroni veloci (FBR) potrebbe moltiplicare il rendimento per un fattore di 50 o più, che gli lo rendono molto interessante dal punto di vista di lunga durata. (Il FBR sperimentale francese, il Superphénix, ha funzionato per un anno intero nel 1996, ma si è interrotto nel 1997 per motivi politici)
- le grandi quantità di uranio devono essere ancora scoperte, dato che non le abbiamo cercate estesamente come abbiamo cercato il gas o il petrolio.
- le riserve minerali di torio, un altro potenziale combustibile nucleare, sono più grandi di quelle di uranio, che potrebbe sostituire.
- come abbiamo visto, il costo del combustibile nucleare è una piccola parte del prezzo del kWh nucleare, quindi potremmo sfruttare giacimenti minerali meno ricchi in cui ci sono riserve enormi.

Potremmo persino estrarre l'uranio dall'acqua di mare senza aumentare il prezzo del kWh nucleare di più del 10% (ogni chilometro cubo di acqua di mare contiene circa 3 tonnellate di uranio). Anche i minerali di fosfato sono una sorgente interessante di uranio.

Conclusione

L'energia di fissione nucleare può fornire una sorgente pulita e sicura di energia per centinaia di anni, forse persino per migliaia di anni.

L'effetto dell'energia nucleare sull'ambiente è minore rispetto all'impatto dei combustibili fossili che consumiamo oggi; ciò rende il nucleare la sorgente di energia migliore per i decenni e i secoli a venire.

L'energia nucleare è e sarà un fattore di stabilità politica in un mondo in cui l'acquisizione delle sorgenti d'energia può trasformarsi in un fattore di conflitti.

3 Un rapido sguardo ai reattori nucleari

Senza entrare nei particolari, che richiederebbero lunghe spiegazioni, accenniamo qui alcuni generi di reattori nucleari che potrebbero essere sviluppati nei prossimi decenni.

Reattori ad acqua leggera "convenzionali" avanzati. Il reattore pressurizzato europeo (EPR) è un esempio di costruzione fondata dall'ampia esperienza industriale e di sicurezza francese e tedesca. Questo tipo di reattore "evoluto", fornisce 1.500 MW e brucia il plutonio sotto forma di MOX (misto ossidi di plutonio e di uranio). Questo tipo di reattore è adatto per i paesi avanzati in cui c'è forte richiesta di energia elettrica. Il rendimento può essere migliorato tramite cogenerazione, usando il vapore a bassa pressione per riscaldare un quartiere, oppure per far funzionare un'industria. Oppure si potrebbe surriscaldare il vapore primario, per ottenere rendimenti termodinamici migliori. L'EPR è quasi immediatamente disponibile poiché è il successore dei reattori attuali e la tecnologia per la relativa costruzione è già attuale.

Reattori "asciutti", raffreddati da elio a temperatura elevata (HTR). Questi reattori sarebbero meno potenti, ad esempio da 100 a 300 megawatt. Il prototipo MGHR è allo studio della cooperazione fra la General Atomics (U.S.A.), Framatome (Francia e Germania), Fuji Electric (Giappone) e vari istituti russi. Un altro progetto è seguito in Sudafrica e da BNFL nel Regno Unito. Questo reattore è molto promettente ed in particolare è molto "perdonante" degli errori nel relativo funzionamento. È efficiente (funziona a 800°C), robusto e funziona diversi anni con una singola carica. Si presta male alla proliferazione di armi nucleari, anche se può essere alimentato con materia fissile recuperata dallo smantellamento delle armi nucleari. Questo disegno è adatto specialmente ai paesi in via di sviluppo, per la desalfinazione dell'acqua, per le posizioni isolate, forse per la produzione di idrogeno per veicoli elettrici con celle a combustibile. Potrebbe essere disponibile in 10 anni.

Reattori autofertilizzanti a neutroni veloci, come il Superphénix, che può creare plutonio fissile da uranio 238 non fissile. I reattori veloci possono contribuire a risolvere il problema delle scorie radioattive longeve (chiamate "actinidi secondari") incenerendoli con il plutonio. Sono efficienti e sicuri quanto i reattori attuali, se non di più. Questo è il reattore ideale per uno sviluppo sostenibile di lunga durata.

I reattori ibridi. In questi reattori "subcritici" un acceleratore di particelle fornisce un fascio di protoni che va a colpire un metallo pesante (ad esempio il piombo). Da questo scontro fuoriesce un fascio di neutroni che, a sua volta, va a colpire il materiale fissile, che potrebbe essere uranio o torio. Questi reattori vengono considerati più sicuri, poiché basterebbe "spegnere" l'acceleratore di particelle per fermare tutto in caso di guasto. Inoltre questi reattori potrebbero anche incenerire le scorie radioattive. Moltissimo lo sviluppo necessario prima che si possa dire se i reattori ibridi saranno pratici ed economici. Orizzonte di tempo: forse 30 anni.

Fusione. Le difficoltà tecniche per l'applicazione industriale sono enormi, anche se il fenomeno di fusione è stato dimostrato negli impianti di ricerca. Le temperature richieste sono dell'ordine di milioni di gradi e la maggior parte dei metalli fondono a circa mille gradi. Gli esperimenti attuali con relegazione magnetica dei nuclei di reazione sono promettenti, ma un reattore a fusione sarebbe

molto più grande di quelli attuali. La relegazione e l'accensione inerziali da fasci laser multipli è all'orizzonte. Forse un sistema della conversione diretta in elettricità potrà essere sviluppato per evitare turbine ingombranti. L'orizzonte di tempo sembra lungo, almeno 50 anni per le prime applicazioni industriali.

La cosiddetta "Fusione Fredda". Questo fenomeno non ha niente a che fare con la fusione nucleare suddetta, ma può piuttosto essere un certo genere di mediatore di energia fra energia chimica e l'energia nucleare come le conosciamo. Sembra che l'energia di "fusione fredda" è circa 1.000 volte più grande di quella chimica e 1.000 volte più piccola di quella nucleare. Ma attualmente studi ed esperimenti sono solo all'inizio. Orizzonte di tempo: impossibile dirlo...

4 CONCLUSIONE GENERALE

Malgrado ciò che dicono coloro che si oppongono all'energia nucleare, questa sarà l'energia del ventunesimo secolo *per eccellenza*. È pulita, più sicura, più economica e più rispettosa dell'ambiente che qualunque altro modo di produrre grandi importi di energia che la nostra civilizzazione richiede. È importante studiare il modo per continuare a migliorare la produzione, per capire le virtù ed informare meglio il pubblico, in modo completo ed onesto, di modo che la gente possa diventare esperta dell'energia che svolgerà un ruolo importante nei decenni e nei secoli a venire.

Dovremmo tenere presente che l'elettricità sarà il vettore principale per l'energia nei prossimi decenni: la penetrazione elettrica è attualmente del 30%, nel 2050 diverrà il 50%.

Ciò dove l'energia nucleare sarà più essenziale ed utile.

Autore: Michel Lung, membro di AAPN

e-mail: mlung@compuserve.com

fax: +33(0)1 39 58 69 56

Ultima revisione: 10 Novembre 2000 (Divisione 345c1)

Traduzione in Italiano effettuata nel Marzo 2001 da Marco Cattaneo (marco.cattaneo@inwind.it)