



INFN/TC-10/04  
23 Giugno 2010

**PRESENTE E FUTURO NELL'UTILIZZO DELLE RISORSE  
ENERGETICHE NUCLEARI CON UNA VALUTAZIONE DI RISCHI  
E BENEFICII: L'ANOMALIA DEL CASO *ITALIANO***

Mauro Bonardi<sup>1,2,3</sup> e Flavia Groppi<sup>1,4</sup>

<sup>1)</sup>INFN-Sezione di Milano, Dipartimento di Scienze Fisiche, Università di Milano,  
LASA, Radiochemistry Laboratori, Via F.lli Cervi 201, 20090 Segrate, Milano, Italy

<sup>2)</sup>International Committee of the American Nuclear Society, at <http://www.ANS.org>

<sup>3)</sup>Scientific Secretary of Interdivisional Group of Radiochemistry and Radiation Chemistry  
applied to environment, health and industry (GIR),

Italian Society of Chemistry (SCI), at <http://www.GIR.mi.infn.it>

<sup>4)</sup>A.N.P.E.Q., Associazione Nazionale Professionale Esperti Qualificati, Italy

**Abstract**

Nonostante una opposizione irrazionale e talvolta puramente ideologica, l'energia del nucleo è l'unica soluzione possibile altamente pulita, sicura ed inesauribile per risolvere il problema energetico globale in maniera sostenibile. La quantità di scorie nucleari è minima e può essere ulteriormente trasmutata mediante tecnologie dedicate. I reattori nucleari della nuova generazione possono produrre efficacemente sia *elettricità* sia *idricità* risolvendo anche il problema dei trasporti attualmente fortemente dipendente dai combustibili fossili. Purtroppo la sensazione del rischio porta l'umanità a sopravvalutare i rischi di tale fonte energetica ed a sottovalutare ampiamente altri rischi in conseguenza oltre che dell'irrazionalità, anche della disinformazione e talora dell'abitudine consolidata da molti secoli di storia.

*"Opposition to Nuclear Energy is based on irrational fear"*, James Ephraim Lovelock 2004, ambientalista, ideatore della *Theory of GAIA*

*"Nuclear Chemistry is the more effective Science for using the other Sciences"*,  
Glen(n) Theodor Seaborg, scopritore di 100 nuovi radionuclidi, Nobel per la Chimica 1951

PACS.: 89.30.Gg nuclear fission power in energy resources

Published by **SIS-Pubblicazioni**  
Laboratori Nazionali di Frascati

## 1 PREMESSA

E' stato ampiamente dimostrato come la qualità della vita ed il benessere (well-being) dell'umanità siano più che proporzionali alla disponibilità energetica. Secondo il rapporto IEO (International Energy Outlook) dell'OCSE, la domanda mondiale di potenza energetica ha raggiunto i 13 300 GW di petrolio equivalente (13 TW) nel 2009 ed il 30% di questa energia è utilizzato per produrre elettricità (2 390 GWe). In Italia si è raggiunto il massimo dei consumi elettrici nel 2004-06 (55 GWe, pari al 2,25% del totale mondiale), con un incremento variabile dal 2 al 6% su base annua dopo la *moratoria antinucleare* del 1987.

Il consumo mondiale d'energia raddoppierà entro il 2050, mentre il consumo d'elettricità raddoppierà già entro il 2025. Una cospicua percentuale d'energia elettrica (ben 17% dell'intera energia elettrica planetaria e 33% nei 22 Paesi dell'OCSE) è attualmente prodotta con 440 impianti nucleari di potenza in 31 Paesi, mentre ~ 40 nuovi impianti sono in costruzione in 12 Paesi, l'ultimo in ordine di tempo è entrato in funzione in Cina nel giugno 2010. Dopo numerosi anni di stagnazione, in Finlandia è in fase avanzata costruzione il primo reattore di concezione completamente Europea, l'**EPR** del consorzio AREVA-Framatome-Siemens, mentre dal 2007 è in costruzione un secondo EPR a Flamanville, Penisola di Cotentin, Normandia, altri EPR sono stati commissionati da Finlandia, Svezia ed USA. Il Parlamento Tedesco ha recentemente preso la decisione di protrarre a 60 anni la vita dei 17 impianti nucleare che producono ~ il 30% dell'elettricità del Paese, e che in base alla moratoria precedente erano destinati a concludere il loro ciclo di vita dopo 24 anni.

La peculiarità dell'energia nucleare consiste nel fatto che è la sola opzione ampiamente sperimentata e con elevato grado d'ingegnerizzazione, caratterizzata da elevata potenza installata rispetto alle dimensioni dell'impianto (*densità di potenza*) e con la capacità di produrre vasti quantitativi d'energia (calore, elettricità, idricità) in maniera *estremamente sicura e pulita* su scala planetaria. Gli unici 2 incidenti di una certa rilevanza in 50 anni di Storia dell'Industria Nucleare sono stati quelli di Three Mile Island (TMI) nel 1979 senza vittime (livello 5 *accident with off-site risk*, nella International Nuclear Incident Scale (INIS) scale) e di Chernobyl nel 1986 (livello 7 *major accident*, valore massimo nella stessa scala), che ha causato un numero globale di vittime inferiore a 100, secondo le valutazioni più recenti dell'OCSE, dell'IAEA e dell'ONU <sup>1)</sup>.

Lo stoccaggio delle scorie radioattive dell'industria nucleare costituisce un problema volumetrico di scarsa rilevanza su scala globale e l'industria nucleare costituisce il solo esempio d'industria energetica a ciclo produttivo completamente chiuso, dalla miniera al trattamento delle scorie stesse (rad-waste).

Le applicazioni civili non-energetiche dell'energia del nucleo hanno dato e continuano a dare un contributo sostanziale allo sviluppo dell'umanità. In Nord-America, Europa e Giappone sono decine di milioni all'anno le indagini radiodiagnostiche (*i.e.* 35 milioni all'anno nei soli USA) e centinaia di migliaia gli interventi di radioterapia metabolica eseguiti con radionuclidi e radio farmaci marcati con radionuclidi (RN) artificiali (2009).

## 1 INTRODUZIONE

Con questo scritto si vuole stimolare l'interesse da parte della classe dirigente e del pubblico non specializzato, verso una conoscenza più approfondita sul *ruolo pacifico dell'energia del nucleo* e si vogliono sfatare alcuni miti ed inesattezze tecnico-scientifiche relativi a tale problematica, spesso artatamente diffusi dai media o da personaggi in malafede per motivi di interesse economico, o talvolta esclusivamente ideologico. E' peraltro ormai rianimato un dibattito sulla *politica energetica Italiana*, basato su informazioni accurate, al fine di poter rispondere alla domanda del perché il mondo avrà un crescente bisogno d'energia e perché tale energia, peraltro non solo d'origine nucleare, ma proveniente da qualsiasi fonte energetica integrativa eco-compatibile, dovrà essere caratterizzata da basso tasso d'inquinamento. Dopo questa osservazione preliminare le considerazioni seguenti risulteranno molto più evidenti.

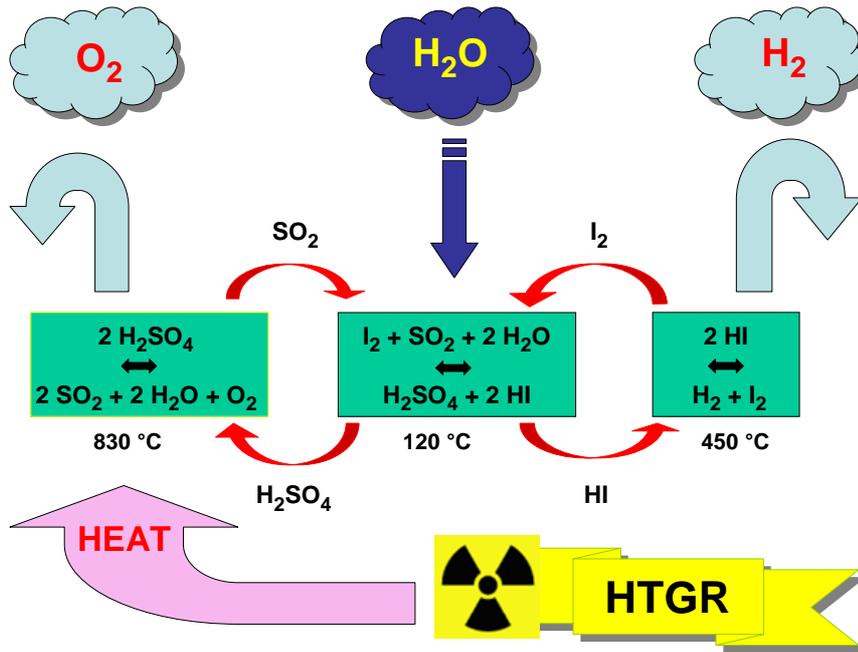
***“Più della metà degli esseri umani mai vissuti sono attualmente al mondo, e nei prossimi 50 anni la popolazione mondiale utilizzerà una quantità d'energia superiore a quella totalmente consumata dagli albori dell'umanità fino alla data odierna”.***

L'umanità deve affrontare un futuro caratterizzato da un cambiamento radicale, o del modo di produrre l'energia, o dello stato di salute di tutti gli ecosistemi planetari, o - in ultima analisi - del suo stesso modo di esistere. Chiunque, singolo individuo o governo, non abbia ben presenti questi inconfutabili dati oggettivi, difficilmente potrà affrontare con lucidità il problema energetico globale. In questo contesto s'inserisce la necessità di potenziare metodi alternativi per la produzione d'energia in *sostituzione* alla *combustione di materiali fossili*. L'*energia nucleare*, così come le *fonti energetiche rinnovabili già consolidate* (i.e. idroelettrica, geotermica) e quelle *integrative* (i.e. biomasse, eolica, maree, solare termico e fotovoltaico), ed in prospettiva l'impiego su larga scala - seppur a *medio-lungo termine* - dell'idrogeno (i.e. *idricità di origine nucleare o NuH2*, FIG. 1) come vettore energetico in parziale sostituzione dell'elettricità, sono tutt'altro che in competizione fra loro<sup>1-12)</sup>

E' noto come impianti produttivi industriali od energetici di dimensioni medie o grandi ed in *numero limitato* siano più facilmente gestibili dal punto di vista della sicurezza, dell'affidabilità e – fatto non trascurabile - dei costi d'esercizio rispetto a numerosi impianti di piccole dimensioni disseminati su larghe aree di territorio. Infatti, contrariamente all'opinione percepita dal pubblico non specializzato, il cosiddetto *scale-up* di un impianto industriale (agricolo, chimico, energetico) comporta un proporzionale incremento della produttività, ma contemporaneamente un incremento meno che proporzionale del numero degli addetti, dei costi di realizzazione e di manutenzione, dei sistemi di sicurezza e di gestione, nonché del rischio globale (basti pensare al rischio ed all'impatto dei numerosissimi impianti di riscaldamento e condizionamento domestici od ai trasporti in automobile privata, a confronto con quello dei grandi impianti centralizzati di teleriscaldamento o di trasporto collettivo) \*.

---

\* I grossi impianti energetici vengono spesso denominati dagli ambientalisti *mega-centrali*, centrali a *mega-carbone*, etc., per evidenziarne la potenziale pericolosità, in base al criterio “piccolo è bello e sicuro”, in



**FIG. 1:** Il processo termochimico zolfo–iodio (S-I) per la produzione di idrogeno nucleare (NUH<sub>2</sub>), tra tutti quelli finora considerati, si trova ad uno stadio di sviluppo più avanzato.

Sono stati già realizzati nel mondo alcuni impianti sperimentali che hanno dimostrato la fattibilità della produzione continua di idrogeno <sup>6,9)</sup>.

Purtroppo, alcuni ambientalisti ed ecologisti fantasiosi, anziché affrontare seriamente il problema energetico globale, si accaniscono ad ignorare l’esistenza dell’energia del nucleo, con grave detrimento per lo sviluppo dell’umanità e la protezione globale dell’intero Pianeta.

La protezione dell’ambiente da parte di scienziati seri e rigorosi ha spesso poco a che vedere con le prese di posizione ideologiche di movimenti ecologisti e partiti politicamente orientati, anche se spesso la parola *ambientalismo* di grande effetto mediatico, viene utilizzata con spregiudicatezza da questi ultimi <sup>13-15)</sup>. Nella stessa direzione antienergetica ed in maniera sinergica ai precedenti, sono schierati i movimenti antimoderni e/o genericamente antioccidentali integralisti religiosi ed antiglobalizzazione, nonché i seguaci delle cosiddette ideologie *New Age* <sup>♦</sup>.

contrasto con la ragionevolezza e l’evidenza dei dati reali di origine statistica ed oggettiva che dimostrano esattamente il contrario.

<sup>♦</sup> Negli USA, negli anni ’80 del Novecento era in auge lo slogan provocatorio “*sono morte più persone nell’automobile di Ted Kennedy che in qualsiasi impianto nucleare*”, escogitato per controbattere le posizioni antinucleariste sostenute tra l’altro dal noto e potente ora defunto Sen. *Liberal* Ted Kennedy. Il candidato *Liberal* 2004 alla Casa Bianca per il Partito Democratico John Kerry, aveva viceversa dichiarato di essere favorevole alla ripresa dei Piani Energetici Nucleari USA, come peraltro l’attuale inquilino della Casa Bianca Barack Obama.

<sup>♦</sup> I seguaci del movimento *New Age*, nato a metà degli anni ’60 del Novecento e consolidatosi negli anni ’80 e ’90, sostengono che terminata la precedente Era dei Pesci durata due millenni (*i.e.* era Cristiana, della spiritualità ma anche della “superstizione”), a partire dall’equinozio di primavera dell’anno 2000, l’umanità sia entrata nell’Era dell’Acquario (l’undicesima casa) dopo ca. 100 anni di transizione (i seguaci della *New Age* si definiscono *acquariani*). Molto nota la melodia *The Age of Aquarius* lanciata da Dionne Warwick negli anni

La peculiarità dell'energia nucleare consiste nel fatto che è la sola opzione già ampiamente sperimentata e con elevato grado d'ingegnerizzazione, caratterizzata da *elevata potenza installata rispetto alle dimensioni dell'impianto* (densità di potenza) e con la capacità di produrre vasti quantitativi d'elettricità *pulita e sicura* su scala planetaria, come peraltro avviene già oggi (17% dell'intera energia elettrica planetaria e 33% nei 22 Paesi dell'OCSE-OECD. E' rilevante osservare come questa cospicua percentuale d'energia elettrica sia attualmente prodotta con solo 440 impianti nucleari di potenza (NPP, Nuclear Power Plant) in 36 Paesi, mentre ~ 40 sono in costruzione in 12 Paesi <sup>12-14</sup>).

La situazione reale è molto più concreta, e già oggi i due terzi della popolazione mondiale risiedono in Paesi dove le *Centrali Nucleari* costituiscono un fattore chiave nella produzione d'elettricità e nel settore delle infrastrutture industriali e civili, e metà della popolazione mondiale vive in Paesi in cui s'intendono costruire, oppure sono già in fase di costruzione nuovi *Reattori Nucleari*. Pertanto, l'espansione dell'impiego dell'energia nucleare non richiede alcun cambiamento fondamentale, ma piuttosto una decisa accelerazione delle attuali strategie e politiche energetiche, dopo quasi un quindicennio di stagnazione, fenomeno che si è verificato peraltro esclusivamente nei Paesi più avanzati dal punto di vista tecnologico e dotati di maggiore disponibilità energetica (USA, Europa dell'Ovest, Giappone), in evidente contrapposizione rispetto a quelli meno avanzati che hanno proseguito con maggiore determinazione nella politica energetica nucleare \*.

Entro 50 anni il 50% dell'energia nucleare potrebbe essere utilizzata per produrre *idricità* (nuclear hydricity, o NuH2) mediante metodi *pirochimici o termochimici* in reattori ad alta o molto alta temperatura (HTGR) con turbine a gas a ciclo Brayton a compressione isoentropica (FIG. 1) \*\*, aggirando il circolo vizioso dell'utilizzo dello *steam reforming*

---

'60. Gli Acquariani sono seguaci di teorie misticiste, neo-pagane, orientaleggianti, panteistiche, spiritualistiche, rinnegano le religioni monoteiste contaminate da concezioni giudaico-cristiane (sono ovviamente anti-Cattolici ed estimatori di Lucifero), credono nell'astrologia, nella reincarnazione, nel Karma, nella telepatia, negli UFO e nei segni nei campi di grano, nel magnetismo animale, nel fluido magnetico, nell'occultismo, agopuntura, macrobiotica, meditazione, medicine olistiche (complementari ed alternative), sonnambulismo, ipnotismo e Mesmerismo, nel potere dei cristalli, nei Tarocchi, Gnosticismi, Induismo, Kabbala ebraica, Taoismo, Teosofia, Alchimia, medicine orientali, Shiatsu giapponese, Hippies, Wikka, Uomo Verde e figli dei fiori e sono sospettosi nei confronti della modernità, delle tecnologie, del progresso ritenendo che l'umanità debba ritornare ad un'era pre-illuministica e pre-cristiana: in conclusione il loro movimento è rigidamente antiscientifico ed ovviamente antinucleare.

\* Come verrà esposto nel seguito, la maggior parte dei Paesi più avanzati non ha affatto rinunciato all'impiego dell'energia elettronucleare, essendo tale forma di produzione energetica già ampiamente consolidata sul loro territorio, bensì ha adottato una *moratoria* alla costruzione di nuovi impianti. In totale controtendenza, l'Italia ha fermato o addirittura smantellato le centrali elettronucleare già in funzione o in costruzione, con un enorme danno economico, ambientale e sanitario per l'intero Paese; quindi sul costo del kW.h elettrico Italiano sono stati caricati fino a pochi anni orsono anche i costi di smantellamento degli impianti in fase di costruzione e mai portati a termine.

\*\* La *pirolisi* del metano od idrocarburi leggeri per produrre idrogeno (cracking) non rappresenta ovviamente la soluzione del problema, in quanto comporta comunque consumo di idrocarburi rientrando nel circolo vizioso della co-produzione di ossidi di carbonio. Il cracking diretto dell'acqua avviene a temperature molto elevate (900-1100 °C) e solo in presenza di catalizzatori metallici o di ossidi refrattari <sup>4-9</sup>. I metodi *termochimici* di decomposizione dell'acqua sfruttano reazioni chimiche a temperature elevate (400-850 °C), ma più contenute delle precedenti; fra i più studiati: il *processo zolfo-iodio* o acido solforico – iodio (SI) della General Atomics USA basato sulla Reazione di Bunsen  $I_2 + SO_2 + 2 H_2O \leftrightarrow 2 HI + H_2SO_4$  seguita da  $2 HI \leftrightarrow H_2 + I_2$

d'idrocarburi, la produzione di *syngas* da carbone, o la *gasificazione* di biomasse, ed in questa prospettiva, secondo proiezioni dell'American Nuclear Society (<http://www.ANS.org>), l'utilizzo di combustibili fossili per la produzione d'energia elettrica potrebbe essere ridotto al 5% del totale <sup>7-10</sup>).

L'*acqua potabile* è attualmente inaccessibile ad almeno 1 miliardo di persone sul Pianeta e l'energia nucleare potrebbe essere il fattore chiave per l'estrazione di *acqua potabile* dalle *acque salmastre* ed il suo conseguente utilizzo per impieghi civili, l'allevamento del bestiame e la coltivazione intensiva di derrate agricole per alimentazione umana ed animale <sup>4,16-18</sup>).

Inoltre, è assolutamente rilevante ricordare che le materie prime fossili vanno salvaguardate in quanto *non rinnovabili* ed al contempo indispensabili per una Industria Chimica moderna e la loro distruzione indiscriminata – tra l'altro mediante un processo chimico *primordiale* come la combustione - non è altro che un delitto contro le generazioni future <sup>19</sup>). L'Industria Chimica necessita di energia per il proprio funzionamento e la disponibilità d'energia elettronucleare ecocompatibile è la soluzione più avanzata di tale esigenza, mentre attualmente gran parte dell'energia utilizzata nell'industria viene ottenuta mediante combustione degli idrocarburi, che sono al contempo la materia prima più importante del ciclo produttivo.

## 1.1 Le applicazioni non-energetiche dell'energia del nucleo

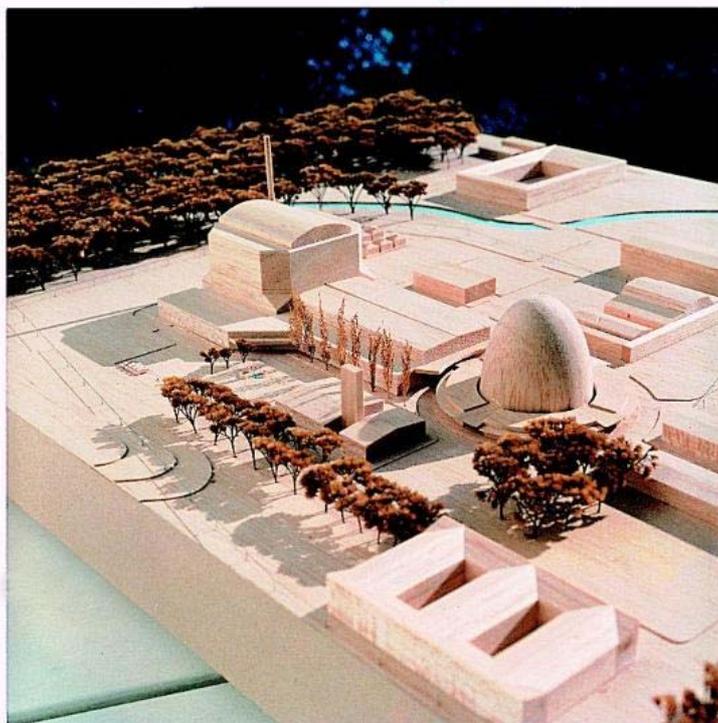
Contestualmente, le applicazioni *non-energetiche* dell'energia del nucleo sono di straordinaria importanza nei più svariati settori della ricerca, della sanità e qualità della vita umana ed animale, della protezione ambientale e dei beni culturali, dei nuovi materiali, dei voli aerei e spaziali, delle tecnologie avanzate, delle nano- e biotecnologie <sup>16-18,20</sup>). In questo ambito, oltre a numerosissimi *acceleratori di particelle* di media ed alta energia per l'induzione di reazioni nucleari e la produzione di radionuclidi, in 56 Paesi del mondo sono attualmente in funzione 284 reattori nucleari da ricerca \*, a loro volta utilizzati per la produzione di radionuclidi, per studi sui materiali avanzati e per impieghi radioanalitici (FIG. 2) <sup>21-24</sup>). Di questi reattori nucleari da ricerca, 54 sono in funzione nelle sole Università

---

schematizzato in FIG. 1, varie varianti del *processo ferro-calcio-bromo* (UT-3) di Argonne-NL, USA, il *processo zolfo-ibrido* (HyS), il *ciclo Deacon inverso magnesio-cloro*, il *processo rame-cloro* a bassa temperatura del ANL (Cu-Cl); i metodi termochimici non utilizzano idrocarburi e non hanno quindi sottoprodotti di combustione.

\* Nonostante la violenta opposizione dei movimenti *anti-Nuke* e *dei Grünen*, il 02 Mar 2004 il reattore nucleare da ricerca ad alto flusso FRM-II da 20 MW (upgradabile fino a 40 MW) della Framatome-ANP GmbH (Germany) - schematizzato in FIG. 2 - ha raggiunto la criticalità ed è stato inaugurato a Garching (presso Monaco di Baviera, Germania). Si tratta tra l'altro di una intensa *sorgente di neutroni* utilizzabile per avanzate ricerche di base ed applicative in fisica, chimica, biologia, medicina (<http://www.ka-muenchen.de/>). Viceversa, presso il JRC-Ispra (VA) della CE era in funzione un reattore da ricerca ad alto flusso denominato ESSOR (Essai ORGEL test reactor, Organic Liquid Heavy Water Reactor) da 25 MW con refrigerante a fluidi organici, di caratteristiche e prestazioni estremamente avanzate; tale impianto è in standby da molti anni con costi esorbitanti ed attualmente in fase di decommissioning con costi e tempi che si prevedono ulteriormente strabilianti.

Statunitensi, mentre in Italia – Patria di Enrico Fermi, *ideatore dell'attivazione neutronica con neutroni lenti* - i reattori da ricerca in funzione sono solo 3, due di tipo TRIGA Mark II della General Atomics (*i.e.* LENA Università di Pavia da 250 kW ed ENEA-Casaccia-Roma potenziato ad 1 MW ad  $^{235}\text{U}$  di medio arricchimento) ed un piccolo reattore veloce (TAPIRO dell'ENEA-Casaccia da 5 kW, ad  $^{235}\text{U}$  arricchito al 93,5%)<sup>25)</sup>.



**FIG. 2:** Plastico del complesso del reattore FRM-II da ricerca ad alta densità di flusso da 20 (40) MW entrato in funzione nel Mar 2004 a Garching, Monaco di Baviera, Germania. Si tratta di un'intensa sorgente di neutroni per applicazioni in fisica, chimica, biologia, medicina.

Numerosi prodotti di fissione indotta da neutroni termici (PF o FP) come  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  e  $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}$  e di attivazione neutronica come  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{177\text{g}}\text{Lu}$ ,  $^{186\text{g}}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{W} \rightarrow ^{188\text{g}}\text{Re}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  e  $^{252}\text{Cf}$ , per citare solo alcuni fra i più rilevanti, sono dotati di emivite non eccessivamente lunghe e trovano già svariati impieghi nell'industria (sterilizzazione di derrate alimentari, radiografie industriali, *e.g.* con  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{192}\text{Ir}$ ) e nella cura di patologie tumorali (*e.g.*  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  e numerosi altri radiolantanoidi,  $^{186\text{g}}\text{Re}$ ,  $^{188\text{g}}\text{Re}$ ) e post-chirurgiche (*e.g.* trattamento della *resostenosi dopo angioplastica coronarica* con  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{252}\text{Cf}$ )<sup>4,22,23,26,27)</sup>. Nel solo Nord-America sono 35 milioni all'anno le *diagnosi mediche* compiute mediante composti marcati con radionuclidi artificiali (*i.e.* mediante *radiofarmaci*), pari al 13% di tutte le indagini diagnostiche, ed un numero analogo viene eseguito in Europa e Giappone \*\*.

\*\* Escluse le numerose tecniche radiodiagnostiche e radioterapiche basate sull'impiego di raggi X e gamma, quali radiografie, schermografie, TAC (o CT), terapia radiante, radioterapia stereotassica, IMRT (intensity-

Nei soli USA le indagini radiodiagnostiche compiute mediante numerosi composti marcati col radionuclide a breve emivita  $^{99m}\text{Tc}$ , ottenuto dal *generatore*  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , sono 35 milioni all'anno (si tratta anche in questo caso di un prodotto di fissione o d'attivazione in reattore nucleare)<sup>24-29</sup>.

I trattamenti di *radioterapia metabolica* compiuti con composti marcati con radionuclidi (radiotraccianti o radiofarmaci) e sorgenti radioattive sigillate (brachiterapia, radioterapia endocavitaria) sono decine di migliaia ogni anno solo in Italia<sup>26-30</sup>. Secondo l'ONU e l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS, WHO), il numero d'indagini radiodiagnostiche e trattamenti radioterapici compiuti con radionuclidi è ritenuto un indice della qualità della sanità nelle varie aree geografiche del Globo<sup>31,18</sup>.

Purtroppo, in conseguenza di una politica sanitaria miope, e spesso di una scarsa conoscenza scientifica, attualmente tali preziosi radionuclidi sono stoccati per la quasi totalità nelle discariche nucleari (definitive o *ad interim*) e lasciati decadere nel tempo, e sono quindi difficilmente reperibili sul mercato ed in ogni caso a prezzi molto elevati. Tale situazione è particolarmente grave per il nostro Paese, poiché l'Italia importa dall'estero la quasi totalità della radioattività per impieghi medici, industriali e di ricerca, come avviene peraltro per i prodotti chimici, i farmaci, l'energia, la microelettronica, nonché per numerose derrate alimentari e numerosi altri prodotti tecnologici. I costi elevati e la scarsa disponibilità sul mercato hanno rallentato di almeno due decenni l'introduzione in Italia di tali tecnologie biomediche avanzate, con grave detrimento per la salute (e purtroppo spesso la stessa sopravvivenza, data la mancanza di diagnosi precoce e cure adeguate) di centinaia di migliaia di Italiani.

Va puntualizzato come, in questo contesto, su scala mondiale la Chimica Nucleare, la Radiochimica e la Chimica delle radiazioni abbiano svolto e continuano a svolgere un ruolo chiave sia nel settore *nucleare energetico*, sia nelle innumerevoli applicazioni *non-energetiche* dell'energia del nucleo<sup>17,18,20-22</sup>.

## 2 IL COMBUSTIBILE NUCLEARE ... VIRTUALMENTE **INESAURIBILE** ED I CONSUMI ENERGETICI IN **ITALIA**

L'uranio è un elemento chimico radioattivo naturale di alto numero atomico ( $Z = 92$ ), scoperto ed isolato da Chimico Tedesco Martin Heinrich Klaproth nel lontano 1789. Tale elemento aveva applicazioni pratiche poco significative prima della scoperta della *fissione indotta* nel 1939<sup>32-37</sup>. Il torio è un elemento chimico radioattivo naturale di numero atomico  $Z = 90$ , scoperto dal Chimico Svedese Jöns Jakob Berzelius nel 1828. Gli unici radionuclidi naturali *fertili* sono il  $^{238}\text{U}$  ed il  $^{232}\text{Th}$ , mentre l'unico radionuclide naturale fissile è il  $^{235}\text{U}$  \*.

---

modulated radiation therapy), Gamma-Knife a  $^{60}\text{Co}$ , IORT (radioterapia intra-operatoria, o Intra Operative RadioTherapy). A queste vanno aggiunte le numerose tecniche di radioterapia con acceleratori di elettroni, ioni leggeri o pesanti (adronterapia), nonché neutroni per la tecnica radioterapica BNCT.

\* Un isotopo (più propriamente *nuclide*) è *fertile* se, in seguito ad irraggiamento con neutroni, dà luogo alla produzione di un nuovo nuclide questa volta *fissile*, cioè assoggettabile a fissione nucleare. Il nuclide  $^{238}\text{U}$  è fertile e dà luogo alla formazione del nuclide  $^{239}\text{Pu}$  (ed altri nuclidi di Pu per cattura radiativa multipla) fissile; il

L'energia ricavabile per fissione completa di 1 kg di  $^{235}\text{U}$  è pari a quella contenuta in 2 milioni di kg (2 mila tonnellate) di petrolio equivalente (TEP o TOE), oppure 3 mila tonnellate di carbone equivalente (TEC o TCE)<sup>7,22</sup>, o anche la potenza esplosiva pari a quella di 20 000 tonnellate di TNT (tritol, trinitrotoluene), come è facilmente ricavabile dalle seguenti equivalenze\*:

$$\begin{aligned} & \mathbf{1 \text{ kg di } ^{235}\text{U} \text{ fissionato completamente}} \text{ produce un numero di fissioni pari a:} \\ & [6,022 \cdot 10^{23} \text{ fiss.mol}^{-1} / (0,235 \text{ kg.mol}^{-1})] \cdot 204 \text{ MeV.fiss}^{-1} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J.MeV}^{-1} / 4,184 \\ & \text{GJ.tonTNT}^{-1} \equiv 20 \text{ 000 ton di TNT} \end{aligned}$$

ed in questo processo viene consumata una massa di materia (equivalente alla stessa energia):

$$\begin{aligned} & 6,022 \cdot 10^{23} \text{ at.mol}^{-1} / (0,235 \text{ kg.mol}^{-1}) \cdot 204 \text{ MeV.at}^{-1} / 931,501 \text{ MeV.u}^{-1} \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g.u}^{-1} \\ & = 0,93 \text{ g} \sim \mathbf{1 \text{ grammo}} \end{aligned}$$

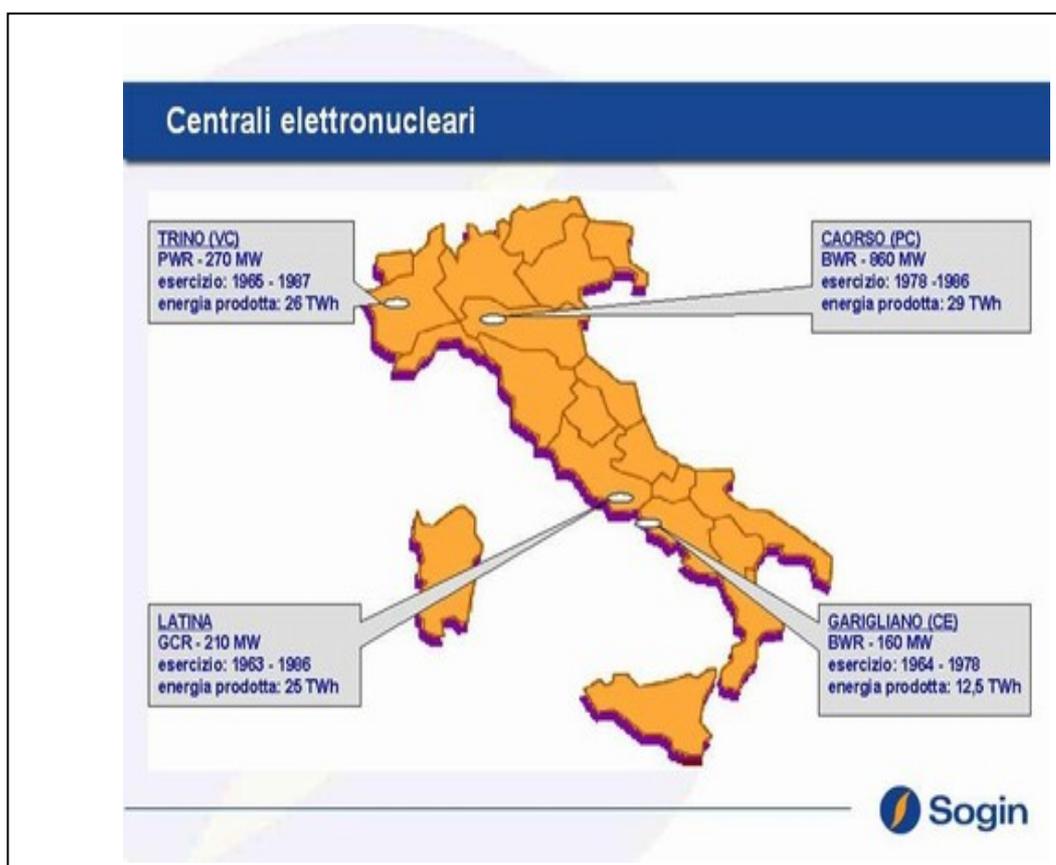
Limitatamente alla sola Italia, secondo dati della Società SoGIN del Gruppo ENEL, le 4 centrali nucleari attualmente dismesse, ancorchè di dimensioni contenute, hanno prodotto energia elettrica in quantitativi rispettivamente di 26 TW.h (Trino Vercellese, VC da 260 MWe), 29 TW.h (Caorso, PC da 870 MWe), 25 TW.h (Borgo Sabotino, LT da 210 MWe) e 12.5 TW.h di (Garigliano, Sessa Aurunca, CE da 160 MWe), per un totale di 92,5 TW.h, pari all'energia elettrica prodotta dalla combustione di 8 milioni di tonnellate di petrolio equivalente (TEP, o TOE) (vedi FIG. 3).

Contrariamente all'opinione diffusa, l'uranio con i suoi 3 radioisotopi naturali  $^{238}\text{U}$  (percentuale naturale 99,27%),  $^{235}\text{U}$  (percentuale naturale media 0,72%) e  $^{234}\text{U}$  (presente nell'U naturale all'equilibrio secolare in concentrazioni dello 0,055%, quale prodotto del decadimento del  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234\text{m,g}}\text{Pa} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{U}$ )<sup>32,38,39</sup>, è un elemento affatto raro in natura, ubiquitario nella crosta terrestre e particolarmente concentrato nelle acque salmastre (e.g. 3,2 ppm, 3 200 kg.km<sup>-3</sup>, o ~ 3 ton.km<sup>-3</sup> nel Mare Adriatico e nel Mediterraneo)<sup>38,33,40,41</sup>. Tale elemento è talmente comune in natura, che l'ingestione di uranio naturale dalla *dieta* da parte dell'uomo (i.e. prevalentemente *per-os* da bevande ed alimenti) è pari fino a ~ 60 µg.d<sup>-1</sup> (1,5 µg.d<sup>-1</sup> *per-os* e 0,6 µg.a<sup>-1</sup> *per inalazione* secondo UNSCEAR 2000)<sup>31</sup>, anche se la quasi totalità viene escreta rapidamente per via fecale ed urinaria (entro 24 ore), senza significativi

nuclide  $^{232}\text{Th}$  fertile da luogo al nuclide  $^{233}\text{U}$  fissile. Un isotopo si dice *fissile* se, in seguito ad irraggiamento neutronico, da luogo a *fissione nucleare* con produzione d'energia (204 MeV.fiss<sup>-1</sup> di  $^{235}\text{U}$ ), accompagnata da emissione di neutroni ( $\nu \approx 2,4$  neutroni emessi.fiss<sup>-1</sup>); 1 MeV  $\approx 1,602 \cdot 10^{-13}$  J  $\approx 0,383 \cdot 10^{-13}$  calorie, i.e. tale valore è una quantità minuscola d'energia per ogni fissione, ma enorme per kg di  $^{235}\text{U}$ .

\* Nel *Système International d'Unite* SI, l'energia ed il lavoro si misurano in joule, J; 1 tonnellata metrica (ton) di TNT è pari per definizione ad un'energia di 4,184 GJ (gigajoule)  $\equiv 1 \text{ Gcal}_{\text{th}}$ , e quindi la potenza esplosiva di un ordigno nucleare è comunemente espressa in kton o Mton. Tuttavia, in base all'equazione di Einstein  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ , l'energia di 20 kton di TNT rilasciata da 1 kg di  $^{235}\text{U}$  corrisponde alla diminuzione  $\Delta m$  di soli 0.001 kg della massa iniziale di uranio (~ 0,93 grammi). Altri fattori di conversione utili sono: 1 TOE (ton oil equivalent)  $\equiv 1 \text{ TEP}$  (ton equivalente di petrolio)  $\equiv 41,868 \text{ GJ} \equiv 11,63 \text{ MW.h} \equiv 10 \text{ Gcal}_{\text{th}}$ ; 1 TCE (ton coal equivalent)  $\equiv 1 \text{ TEC}$  (ton carbone equivalente)  $\equiv 29,307 \text{ GJ} \equiv 7 \text{ Gcal}_{\text{th}}$ ; 1 bboE o BOE (barrel oil equivalent)  $\approx 6,12 \text{ GJ} \approx 5,8 \text{ MBTU}(59^\circ\text{F})$ ; 1 quad  $\equiv 10^{15} \text{ BTU(IT, International Table)} = 1,055 \text{ 055 852 62 EJ}$  (exajoule).

fenomeni di accumulo (viene segnalato solo un lieve accumulo nel tessuto osseo al crescere dell'età), come avviene spesso per elementi chimici privi di qualche utilità biologica significativa e per i quali *non esiste quindi alcun fenomeno naturale* di regolazione (*i.e.* il processo biologico di regolazione è denominato *omeostasi*)<sup>42,43</sup>. Nonostante l'intake quotidiano significativo, l'accumulo di uranio è quindi minimo e secondo l'ICRP (International Commission for Radiological Protection)<sup>44</sup>, il Reference Man 2005 (individuo maschio adulto sano di 70 kg, altezza 170 cm, età 20-30 anni) contiene in totale solo 90 µg di U ed il tessuto osseo rappresenta l'organo critico col 31% della quantità totale, anche se la dose alfa al tessuto osseo rappresenta meno dell'1% della dose alfa totale dovuta a radionuclidi naturali; i restanti 55 µg di U sono presenti nei tessuti molli e nel sangue (vedi <http://www.ICRP.org> per la pubblicazione **ICRP 23**)<sup>44</sup>).



**FIG. 3:** Dislocazione degli impianti nucleari Italiani per la produzione di energia elettrica in funzione in Italia dal 1965 al 1987. Le centrali sono attualmente di proprietà della SoGIN (Società Gestione Impianti Nucleari del Gruppo ENEL, <http://www.SOGIN.it>).

La concentrazione di U nelle acque salmastre è in prima approssimazione proporzionale alla salinità ed i laghi salati secchi o “chiusi” ad elevata concentrazione salina sono diffusi nelle aree desertiche di tutti i Continenti. Nel suo stato di ossidazione più stabile, l'uranio(VI)

è altresì presente in molte *acque dolci*, prevalentemente sotto forma di idrosso- e carbonato-complessi, la cui solubilità dipende fortemente da pH e tensione di ossido-riduzione Eh<sup>33-38</sup>. Nella crosta terrestre l'uranio (2,7 ppm) è 36 volte più abbondante dell'*argento* e 675 volte più dell'*oro*, e la sua concentrazione è simile a quella di metalli comuni come *stagno* (2,3 ppm) *piombo* (14 ppm) nonché altri di interesse tecnologico quali cesio (3,0 ppm), afnio (3,0 ppm), tantalio (2,5 ppm) e tungsteno (1,25 ppm)<sup>33,37</sup>. Ovviamente, nella fase attuale, conviene estrarre l'uranio dai numerosi (almeno 60) minerali nei quali si trova in concentrazioni particolarmente elevate, talvolta superiori allo 80-90% in peso (*e.g.* uraninite-pechblenda, brannerite, autunite, carnotite, coffinite, torbernite, uranofane, xenotime, becquerelite, columbite, gadolinite, goethite, niobite, ortite, schoepite, soddyite, sperrilite, titanite, uranopilite)<sup>33</sup>, ma ricordiamo che la sua estrazione dalle acque dell'Adriatico era già stata presa in considerazione più di due decenni orsono dal CNR italiano. A tuttoggi sono noti almeno 250 minerali contenenti uranio e torio in varie concentrazioni e viene considerata redditizia l'estrazione se la concentrazione non è minore del 0,1%.

Miniere d'uranio di buona resa sono state attive fino a pochi anni orsono nelle Prealpi Bergamasche (*i.e.* Val Seriana, BG), mentre altre non sono mai state sfruttate (*i.e.* Valvedello, SO), e giacimenti significativi sono presenti in Calabria, Piemonte, Valle d'Aosta, cioè in pratica sull'intero territorio nazionale<sup>\*\*</sup>. Con le attuali tecniche di estrazione da minerali redditizi, *senza* quindi ricercare nuovi giacimenti od utilizzare fonti di bassissima concentrazione, le scorte mondiali stimate di U risultano sufficienti – secondo diverse stime – per almeno altri 100-150 anni<sup>40,41</sup>.

La quasi totalità dei reattori nucleari operativi nei Paesi poveri d'uranio (Francia, Inghilterra, Svizzera, vicino Est Europeo) è alimentata con <sup>235</sup>U leggermente arricchito al 3-4% (LEU, Low-Enriched Uranium)<sup>45-47</sup>, o con MOX (Mixed OXides fuel, costituito da radionuclidi d'uranio e plutonio riciclati come ossidi)<sup>48,47</sup>, e tale scelta è dettata da ragioni economiche e non da limitazioni tecnologiche, anche se il riciclo del combustibile (*fuel reprocessing* per la realizzazione di MOX per il processo *U-Pu*) presenta ancora rilevanti aspetti psicologici e di sicurezza (*e.g.* proliferazione di materiale radioattivo, sabotaggio, terrorismo). Paesi ricchi d'uranio come Australia, Canada, Russia, Sud-Africa ed USA,

---

<sup>\*\*</sup> La sola miniera in località Novazza, Valgoglio, Val Seriana (BG), nella quale – ennesima dissipazione di denaro pubblico - l'ENI investì 70 miliardi delle vecchie Lire fino al 1975, con l'intenzione di partecipare successivamente ai piani di arricchimento del combustibile (impianto EUODIF della Cogema-AREVA di Tricastin in Francia, <http://www.cogema.com>, ed impianto Europeo COREDIF del quale era auspicata la collocazione in Italia), era in grado di approvvigionare la Centrale Elettronucleare di Caorso, avendo risorse per 4,8 kton di U e una capacità produttiva di 385 ton.a<sup>-1</sup>. Attualmente l'idea di realizzare un impianto di arricchimento dell'uranio sul territorio nazionale è ritenuta antieconomica, dato il prezzo relativamente basso e l'ampia disponibilità sul mercato di tale materiale arricchito.

E' opportuno ricordare che l'estrazione manuale d'uranio dalle miniere, com'era compiuta in passato, è oggi praticamente sostituita nei paesi tecnologicamente avanzati dall'estrazione meccanica o mediante iniezione di fluidi liquidi (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluito), che minimizza i problemi d'esposizione del personale al gas radioattivo naturale <sup>222</sup>Rn, sempre presente nei sottosuoli uraniferi, come peraltro in concentrazioni minori nelle miniere di carbone e d'altri minerali. *Caveat*: in anni recenti la rivalutazione dei supposti effetti benefici e terapeutici di basse dosi di radiazioni ionizzanti (Teoria dell'Ormesi da Radiazioni, vedi seguito) ha creato un fiorente mercato nell'utilizzo di miniere abbandonate per l'inalazione - supposta *terapeutica* - al gas radioattivo <sup>222</sup>Rn (ed ai suoi discendenti radioattivi).

possono invece permettersi di utilizzare il combustibile una sola volta prima di smaltirlo in discarica (processo *uranium once through*, UOT), anziché riciclarlo sotto forma di MOX. Va comunque rilevato che anche questi Paesi stanno riprendendo in considerazione il *fuel reprocessing*, perché alla lunga il processo UOT costituisce uno spreco di materie prime.

Le centrali nucleari peraltro **non** richiedono l'impiego di uranio arricchito in  $^{235}\text{U}$  per il proprio funzionamento (vedi reattori CANDU e gli ormai obsoleti MAGNOX) <sup>♦</sup> ed il  $^{238}\text{U}$ , che costituisce il 99,27% dell'U naturale, è un nuclide *fertile* utilizzabile per produrre altro combustibile nucleare (plutonio) nei reattori autofertilizzanti a spettro neutronico veloce (*fast breeders*), con un incremento globale della resa energetica di almeno 100 volte (*i.e.* il rapporto isotopico naturale fra  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  è  $99,27 / 0,72 \equiv 138$ ), mentre nei reattori convenzionali con fattore di conversione prossimo all'unità (*converters*), il contributo alla produzione di energia da parte di plutonio e attinoidi minori (AM, MA) è comunque pari al 10-20% del totale <sup>★ 45-48</sup>.

I reattori al **torio** (l'unico radionuclide naturale è il  $^{232}\text{Th}$ , contenente all'equilibrio secolare tracce di  $^{228}\text{Th}$ ) sono una valida alternativa a quelli ad **uranio**, ed il Th è 3-4 volte più abbondante dell'U nella crosta terrestre (*i.e.* particolarmente abbondante nel minerale *monazite*, presente in ogni parte del Pianeta), mentre la sua concentrazione nelle acque dolci e salmastre è trascurabile, poiché la maggior parte dei composti di torio(IV) è estremamente poco solubile <sup>34-37</sup>. Il  $^{232}\text{Th}$  è a sua volta un combustibile nucleare *fertile* in grado di produrre il radionuclide *fissile*  $^{233}\text{U}$  in reattori autofertilizzanti termici (*thermal breeders a Th-U*) ed il processo Th-U è in realtà il più favorevole fra tutti quelli considerati, data l'elevata efficienza di fissione  $1/\alpha$  del  $^{233}\text{U}$  (elevato rapporto fra sezione d'urto di fissione e sezione d'urto totale), con l'ulteriore vantaggio di minimizzare la co-produzione di attinoidi minori (MA, AM) a lunga emivita <sup>47-54</sup>.

♦ I reattori Canadesi, CANDU, funzionano con U naturale (*i.e.* **non** arricchito isotopicamente in  $^{235}\text{U}$ ) e contengono acqua deuterata (acqua pesante,  $\text{D}_2\text{O}$ ), indispensabile come moderatore dei neutroni. I reattori Inglesi MAGNOX, raffreddati a gas ( $\text{CO}_2$ ) pressurizzato e moderati con grafite, funzionavano ad U naturale con cladding (rivestimento) del combustibile in lega di magnesio (da cui il nome) ed alcuni erano utilizzati anche per la produzione di plutonio di grado militare; ad esempio il reattore di Latina era un MAGNOX da 200 MWe per la produzione di energia elettrica. Il  $^{235}\text{U}$  altamente arricchito (HEU), o in alternativa alcuni specifici radionuclidi di Pu particolarmente puri, sono invece necessari per la realizzazione di ordigni nucleari per usi bellici.

★ Il *fattore di conversione*  $C = \eta - 1 - S$  è definito come il numero di nuclidi fissili ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  oppure  $^{233}\text{U}$ ) prodotto rispetto al numero di nuclidi fissili consumato ( $^{235}\text{U}$  oppure MA);  $\eta = \nu / (1 + \alpha)$  è il *fattore di fissione* che per alcuni radionuclidi fissili può raggiungere valori ampiamente superiori a 2; S è il numero di neutroni perso per processi diversi dall'assorbimento (cattura o fissione) e  $\nu$  è il numero medio di neutroni emessi per ogni fissione ( $\nu = 2,426$  nel caso di fissione termica di  $^{235}\text{U}$ ). Per neutroni con energie termiche  $\eta$  è maggiore per il  $^{233}\text{U}$  (2,287), mentre per neutroni veloci è maggiore per il  $^{239}\text{Pu}$  (2,93). I reattori termici convenzionali hanno valori di C non inferiori a 0,8 (la fissione di 100 nuclidi di  $^{235}\text{U}$  porta alla formazione di 80 nuclidi di  $^{239}\text{Pu}$ , o  $^{241}\text{Pu}$ ). I reattori con fattori di conversione molto inferiore all'unità  $\sim < 0,7$  (*transmuters o burners*) sono concepiti per la trasmutazione delle scorie nucleari (siano AM o PF), ma ancorché tecnicamente realizzabili, non sono attualmente utilizzati dati gli elevati costi di tale processo, rispetto allo smaltimento delle scorie in discarica od al riprocessamento del combustibile. E' già stato dimostrato come in un nuclear transmuter (NTR) si possano trasmutare fino al 99,9% dei RN presenti inizialmente, a condizione che il combustibile esausto sia preventivamente sottoposto a riprocessamento e ripartizione. Il processo combinato di ripartizione e successiva trasmutazione è denominato P&T (partitioning and transmutation) <sup>47,48</sup>.

Il Premio Nobel per la Fisica Carlo Rubbia ha evidenziato nel Set 2004, durante la General Conference annuale dell'IAEA dedicata a *Nuclear Fuel Cycles and Challenges*, che mediante un ciclo autofertilizzante chiuso a Th-U, 5 000 ton all'anno di Th naturale potrebbero produrre tutta l'energia necessaria al giorno d'oggi (sia termica sia elettrica), e su scala globale 5 000 ton sono una quantità irrisoria per una materia prima abbondante come il Th (anche in questo caso il conto è presto fatto, vedi seguito) \* e per rendersene conto basta ricordare che attualmente vengono emesse nell'atmosfera 50 000 ton.min<sup>-1</sup> di CO<sub>2</sub> per combustione dei fossili (solidi, liquidi, gassosi). E' altresì facile calcolare come la stessa quantità di energia possa essere prodotta dalla stessa quantità di qualsiasi materiale fissile quale: <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu o da una qualsiasi miscela di attinoidi minori fissili di Np, Am e Cm.

Riassumendo, *i combustibili nucleari sono virtualmente inesauribili* rispetto ai combustibili fossili attualmente utilizzati <sup>41,42,48</sup>, od almeno disponibili per un periodo di tempo di molte *migliaia d'anni*, anche ipotizzando un consumo molto superiore a quello attuale, in particolare se si utilizzasse il riciclo del combustibile e fosse potenziato l'impiego di reattori autofertilizzanti (*breeders*) tali da aumentare la resa del processo U-Pu di almeno **100** volte, come peraltro è previsto con la futura entrata in esercizio dei reattori della Generazione IV (*Gen IV*) <sup>48,54</sup>.

Per concludere, per alimentare una centrale elettrica di potenza da 1 GWe sono necessarie o *10 000 tonnellate al giorno di carbone*, oppure poco più di *3 kg al giorno di <sup>235</sup>U*. La realizzazione di un impianto nucleare richiede ingenti investimenti iniziali, in quanto il reattore deve essere approvvigionato di combustibile nucleare fin dal momento dello *start up*. Tuttavia i costi di gestione sono molto più contenuti rispetto a quelli di un impianto termoelettrico, in quanto il combustibile nucleare esaurito deve essere ripristinato parzialmente solo con la periodicità di alcuni anni di esercizio (~ 33% ogni 18 mesi) <sup>47</sup> e non in continuazione durante il funzionamento come nel caso di combustibili fossili, con una conseguente limitatissima dipendenza dalla disponibilità e dai costi di mercato.

### **3 *ITALIA* FANALINO DI CODA FRA I PAESI TECNOLOGICAMENTE AVANZATI, NON SOLO NEL SETTORE NUCLEARE ENERGETICO**

L'Italia, 5° o 6° potenza economica mondiale, è attualmente al 1° posto al mondo nell'importazione di materie prime per la produzione d'energia (90% del totale). In particolare, il nostro Paese compra all'estero il 18% della propria energia elettrica (9,9 Gwatt elettrici, GWe) \*, prodotta in Francia mediante centrali nucleari ed importata direttamente,

---

\* A titolo di confronto, l'attuale inventario d'uranio impoverito (DU o Depleted Uranium), sottoprodotto dell'industria per l'arricchimento del <sup>235</sup>U (LEU), ammonta a 850 000 tonnellate metriche nei soli USA e su scala mondiale è presente in quantità almeno tripla <sup>47</sup>. Nonostante numerose campagne di *disinformazija*, il DU è un materiale *innocuo* dal punto di vista radiologico, quindi il suo accumularsi progressivo ed il costo contenuto ne suggeriscono numerosi impieghi civili, oltre che i più noti impieghi militari (durante la Guerra del Golfo sono state usate 320 ton di DU). Il DU sarà inoltre un combustibile prezioso per i reattori autofertilizzanti del futuro.

\* All'epoca del referendum del 1987, la capacità elettronnucleare degli impianti in esercizio o in costruzione in Italia era pari a soli 3,4 GWe (con 2 impianti da 1 GWe ancora in fase di precommissioning), molto meno della potenza elettronnucleare attualmente utilizzata (da 6,5 a 9,9 GWe di import di energia elettronnucleare nel 2009,

oppure triangolata attraverso Austria, Slovenia e Svizzera. Un ulteriore quantitativo d'elettricità d'origine non-nucleare pari allo 0,27% del totale (150 MWe), è importato dalla Grecia attraverso il Canale d'Otranto <sup>♦</sup>. La situazione è tragicomica e comporta enormi costi per la bilancia commerciale del nostro Paese, in quanto in Italia i consumi d'energia elettrica sono aumentati in media del 2-6% su base annua, solo dopo la moratoria antinucleare del 1987 <sup>10,12-14</sup>.

Come conseguenza, il *costo unitario* dell'energia elettrica (per kW.h) in Italia è il più alto d'Europa <sup>♦</sup>, quasi doppio rispetto alla media Europea (70% in più nel 2004 secondo fonti Ministeriali), triplo rispetto a quello di Paesi Europei nuclearizzati quali: Francia, Inghilterra e Spagna, e secondo solo al Giappone su scala mondiale, *i.e.* è rilevante osservare che Spagna la tariffa elettrica è *decresciuta* del 29% dal 1996 al 2001, mentre prezzi unitari molto più contenuti sono in vigore nei Paesi ampiamente nuclearizzati dell'Est Europeo.

### **3.1 Breve Storia delle tormentose vicende del Nucleare Italiano nel contesto Internazionale: l'ennesima lezione da non dimenticare**

Con le prime applicazioni della scoperta dei raggi X nel 1895 (Wilhelm Conrad Röntgen), e, sull'onda di questa, della radioattività nel 1896 (Henry Becquerel, Marie Sklodowska-Curie, Pierre Curie), della fissione indotta nel 1939 (Otto Hahn, Fritz Straßmann, Lise Meitner, Otto Carl von Frisch), della fissione spontanea nel 1940 (Konstantin

---

secondo varie fonti). In ogni caso il piano energetico elettronucleare all'epoca del referendum (PUN o Progetto Unificato Nucleare 1983-88) era ampiamente insufficiente, contrariamente a quanto sostenuto in quegli anni dagli ambienti politici ed ideologicamente antinucleari ed antienergetici. Per la verità il precedente Piano Energetico Nazionale (PEN), auspicato dal Ministro Carlo Donat Cattin negli anni '70, prevedeva la costruzione di ben 20 Centrali Nucleari da 1 GWe ciascuna entro il 1985, peraltro ridotte a 12 già nella fase di programmazione. Se fosse stato realizzato tale piano, ora in Italia non meno del 37% dell'energia elettrica sarebbe d'origine nucleare, collocando il nostro Paese fra i più avanzati Paesi dell'OCSE e rendendoci ampiamente autosufficienti dall'estero. Per tornare ai giorni nostri, il Parlamento Italiano ha emanato il D.L. n°7 del 07 Feb 2002 (meglio noto come "decreto sbloccacentrali"), voluto dal Ministro Antonio Marzano, per la costruzione di impianti aggiuntivi per 12 GWe in un periodo di 10 anni, pur non specificando la tipologia degli impianti stessi (si tratterebbe di un incremento del 22% della potenza elettrica attualmente utilizzata, leggermente superiore all'attuale import di energia elettronucleare dall'estero); successivamente il piano è stato ridimensionato a soli 6 GWe. La potenza elettrica *nominale* installata in Italia è attualmente di 82 GWe (di cui 58 GW termoelettrici, 23 idroelettrici, 0,8 geotermici e 0,5 eolici e 0,0015% fotovoltaici), tuttavia una porzione consistente non può di fatto essere utilizzata ed è quindi solo potenziale, per cui la potenza elettrica effettiva è di 55 GWe comprese le importazioni di energia elettronucleare dall'estero (18% del totale).

<sup>♦</sup> L'elettrodotto, della lunghezza totale di 163 km, è parzialmente interrato per 43 km in territorio Italiano ed in parte sommerso a 1 000 m di profondità sotto il Canale d'Otranto e collega Aetos (Epiro, Grecia) con Otranto, alimentando la Centrale ENEL di Galatina e la Provincia di Lecce. I lavori per la realizzazione sono iniziati nel 1997 per un investimento di 339 MEuro, di cui 262 a carico dell'ENEL e 77 dell'Ente Energetico Greco (l'Unione Europea ha contribuito alla spesa con 131 MEuro, pari al 38% del totale). Va evidenziato che tale energia è verosimilmente di produzione Turca. In base al progetto originario, l'ulteriore potenza elettrica disponibile dovrebbe essere di 150 MWe, cioè pari a solo il 15% della capacità di una centrale nucleare o termoelettrica di dimensioni medie (*i.e.* 1 GWe). In Italia attualmente l'elettrodotto è gestito dal GRTN (Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale SpA).

<sup>♦</sup> Malgrado l'entrata in vigore dell'Euro nel 2001 nei Paesi dell'Unione Europea, i prezzi internazionali delle merci sono tuttora espressi in US\$.

Antonovich Petrzhak, Georgij Nikolaevič Flerov) ed a partire dal Dic 1942 dell'immensa energia presente nel nucleo atomico (Enrico Fermi, Walter Zinn), il XX secolo appena terminato ha costituito una rivoluzione straordinaria e senza precedenti nella Storia dell'intera umanità<sup>32,14-17</sup>). Tale epoca, con i suoi aspetti prevalentemente positivi ma anche raramente negativi, è stata più volte definita impropriamente *Era Atomica*, mentre sappiamo che l'energia coinvolta nei processi di trasmutazione, fissione e fusione è di origine *Nucleare* e non già atomica (*i.e.* nonostante ciò, ancora oggi l'Agenzia Internazionale per il controllo dell'energia nucleare con Sede a Vienna si chiama International Atomic Energy Agency, IAEA). Lo stesso termine greco atomo, *ἄτομος* coniato anticamente da Democrito significa letteralmente “indivisibile”, in contrasto con l'evidenza dei processi fisici coinvolti ♦♦.

Paradossalmente, la *Storia dell'Energia Nucleare* era nata proprio in Italia nei primi decenni del Novecento (1926-1938), in seguito agli studi Accademici del Gruppo di via Panisperna con le scoperte straordinarie di Enrico Fermi e dei suoi collaboratori, al punto che la 1° *Conferenza Internazionale di Fisica Nucleare* fu organizzata proprio a Roma nel 1931<sup>51-62</sup>). Nessuno negava l'evidenza che l'Era Atomica fosse nata proprio in Italia a Roma (e Palermo) nel primo quarto del XX secolo, con scarsi mezzi finanziari ma il sostanziale appoggio politico e morale da parte di scienziati di livello come Orso Mario Corbino (Direttore dell'Istituto di Fisica di Roma, Senatore del Regno, Ministro dell'Istruzione 1921 e successivamente Ministro dell'Economia Nazionale 1923-24) e del Premio Nobel 1909 Guglielmo Marconi (Presidente del CNR 1928, Presidente della Regia Accademia d'Italia 1930 e di numerose altre prestigiose Istituzioni pubbliche). Nella sua autobiografia postuma, il Premio Nobel per la Chimica 1951 Glen(n) Theodor Seaborg, frequentatore di innumerevoli Premi Nobel e potenti del mondo intero, attore determinante nel Progetto Manhattan per la costruzione in tempi brevissimi della *Bomba* (periodo denominato talvolta *The Big Rush*), dichiara di aver ritenuto Enrico Fermi l'uomo più intelligente e preparato che avesse mai conosciuto. Le capacità dei ricercatori italiani quindi erano (e sono) ammirate, invidiate, e di conseguenza temute.

Con queste premesse, le principali potenze nucleari del dopoguerra (USA, Inghilterra, Francia ed URSS) vedevano con sospetto che quell'Italietta provinciale, del bel canto, dei maccheroni e dei mandolini – uscita oltretutto malridotta dalla guerra perduta, peraltro in buona compagnia assieme a Germania, Giappone ed altri Paesi dell'Est Europeo (Finlandia, Polonia, Repubbliche Baltiche, Romania, Ungheria) – si rendesse indipendente dal punto di vista sia energetico, sia economico, ed a maggior ragione strategico. I distributori dei derivati del petrolio (multinazionali e Paesi produttori) erano interessati ad un ricco cliente in rapida

---

♦♦ Dal 1898, in un solo decennio, furono scoperti ~ 40 “nuovi elementi o entità chimiche”, che dovevano ragionevolmente trovare sistemazione in poche caselle della Tavola Periodica degli Elementi. Nel 1913 i Radiochimici Kasimir Fajans (di origine Polacca) e Frederick Soddy ipotizzarono, indipendentemente l'uno dall'altro in Germania ed UK, come anche atomi di uno stesso elemento chimico potessero essere diversi fra loro, possedendo lo stesso numero atomico Z, ma una massa diversa (ma come sappiamo oggi diverso numero di neutroni N e quindi diverso numero di massa A) ed in seguito al suggerimento di un Medico la Dr.ssa Margaret Todd<sup>15</sup>), venne coniato il termine **isotopo** (*ἰσοτόπος*) per descrivere tale proprietà; era caduto uno degli ultimi baluardi dell'atomismo classico di Newton e Dalton, secondo cui gli atomi di uno stesso elemento chimico, oltre che indivisibili, dovevano essere (dogmaticamente) tutti uguali fra loro.

ripresa e ricostruzione come l'Italia del Piano Marshall e del *boom economico*, assetato d'energia ed al contempo strategicamente dipendente e quindi ricattabile politicamente. Nell'Italia del II dopoguerra la strada dell'energia nucleare ebbe quindi nemici potenti fin dagli esordi. Le motivazioni furono diverse e variegata, apparentemente contraddittorie, ma il fine ultimo più che palese, specialmente secondo una rilettura compiuta ai giorni nostri.

A parte la stagnazione dovuta alle vicende belliche, i qualificati piani energetici nucleari del nostro Paese furono quindi *cancellati* nei primi 2 decenni del II dopoguerra da scelte politiche incardinate sulla *dipendenza strategica* dell'Italia dai Paesi produttori di petrolio in passato, e di gas naturale e carbone negli ultimi 20 anni (*i.e.* Paesi Arabi e Repubbliche dell'ex-URSS), scelte che hanno contribuito tra l'altro a scatenare od almeno rinfocolare le cruenti vicende belliche nel Golfo Persico (Iran, Iraq, Kuwait) e nel Caucaso (Cecenia)\*, con buona pace della *disinformazija* diffusa artatamente da pacifisti poco coerenti ed antinuclearisti viscerali.

Peraltro, mal comune mezzo gaudio, negli stessi anni '60 del Novecento anche la Chimica Italiana venne disintegrata consapevolmente col primo Governo di centro-sinistra nel 1960, la *nazionalizzazione* della sua principale Industria la Montecatini (1960), seguita dalla nazionalizzazione del principale ente elettrico l'Edison (1963) e la fusione di entrambi nella Montedison (1966) (poi Enimont (1989), Enichem (1991), nuova Edison (2002) ed ora Edison-Italenergia ad ampia partecipazione azionaria Francese e Spagnola), azienda il cui dramma ebbe il suo apice negli anni '90, con la tragica fine del manager Raoul Gardini, capo incontrastato della famiglia Ferruzzi, coinvolto nello Scandalo mani Pulite nel 1993<sup>58,59</sup>). Si trattò della dissipazione cosciente ed indiscriminata dell'immenso patrimonio scientifico e tecnologico che l'Italia aveva sviluppato nel II dopoguerra sull'onda del Nobel per la Chimica conferito a Giulio Natta nel 1963 per i suoi studi e brevetti sui polimeri stereoregolari, quali il polipropilene isotattico utilizzato per la produzione di materie plastiche di largo impiego (Moplen), film sottili (Moplefan), e fibre tessili (Meraklon)\*\*. Le scoperte di Natta introdussero una rivoluzione nel settore della Chimica Industriale e nella vita di tutti noi, che sarebbe incredibilmente arretrata senza la disponibilità di polimeri artificiali a basso costo (attualmente viene prodotto 1 kg all'anno di Moplen per ogni abitante della terra)<sup>63,18</sup>.

---

\* Nella zona di Baku e Majkop (Mar Caspio, Azerbaijan) sono localizzati i principali giacimenti petroliferi e di gas naturale dell'ex URSS-Occidentale (Caucaso). La direttrice fra Baku e l'Europa-Occidentale attraversava la Repubblica storicamente autonoma della Cecenia-Inguscèzia (le numerose guerre Russo-Cecene hanno la loro origine nel 1700); le sanguinose vicende belliche degli ultimi 15 anni hanno obbligato l'attuale Governo Russo a deviare il gasdotto e l'oleodotto, che sono stati spostati ed attualmente aggirano tale regione autonoma da Nord. Nella sola campagna per la conquista della città di Grozny, capitale della Cecenia, assediata, rasa al suolo e poi occupata dalle truppe Russe nel 1994, si sono contate più di 100 000 vittime civili (40% bambini) su una popolazione totale di meno di 800 000 abitanti e una parte della popolazione superstite vive ancora nelle tende dopo oltre 15 anni dai combattimenti.

\*\* Giulio Natta nacque ad Imperia il 26 Feb 1903, ottenne il Nobel per la Chimica nel 1963 condividendolo col Tedesco Carl Ziegler, depositò più di 500 brevetti, e morì a Bergamo nel 1979. Né il centenario della nascita, né il 40-ennale del Nobel sono stati commemorati dai media nazionali, dall'Università di Milano o da fonti governative. Solo la Società Chimica Italiana, il Politecnico di Milano e l'Accademia dei Lincei, hanno commemorato l'avvenimento nel 2003 con eventi minori per addetti ai lavori. Il 26 Feb 2003, le TV nazionali erano impegnate a trasmettere i funerali di Stato del simpatico attore Alberto Sordi, deceduto pochi giorni prima.

Bisogna ricordare che *Giulio Natta fu l'unico Italiano* a ricevere il Premio Nobel nel dopoguerra, per la Chimica e da cittadino Italiano, e per aver compiuto le sue ricerche quasi interamente in Italia (Milano, Pavia, Torino). Infatti prima di lui vanno annoverati per il conferimento del Nobel in materie scientifiche in Italia solo Camillo Golgi (1906), Guglielmo Marconi (1909) ed Enrico Fermi (1938), mentre gli altri Nobel del dopoguerra furono conferiti a scienziati Italiani naturalizzati statunitensi (Emilio Segrè 1959, Salvador E. Luria 1969, Renato Dulbecco 1975, Riccardo Giacconi 2002), oppure operanti all'estero (Carlo Rubbia 1984, Rita Levi Montalcini 1986).

Era iniziata quella che oggi è comunemente denominata *fuga dei cervelli*, che peraltro non interessò solo l'Italia, ma coinvolse anche altri Paesi usciti sconfitti dal II conflitto mondiale, come Germania, Giappone ed Ungheria (5 Nobel per la Chimica e 3 per la Fisica erano di origine Ungherese), senza risparmiare ad esempio la stessa Svezia Patria di Alfred Bernhard Nobel (i Nobel Hernest Orlando Laurensen naturalizzato Lawrence e Glen Theodor Soebjerg naturalizzato Seaborg erano d'origine Svedese). L'Italia, da Paese trainante della Chimica Europea del II dopoguerra (l'Italia era denominata la Raffineria d'Europa), divenne rapidamente dipendente dall'estero anche in questo settore, come in quello energetico, farmaceutico, microelettronico, ed altri.

La situazione degli anni 1950-1970 non era quindi nuova per l'Italia, e costituiva purtroppo una realtà anche prima del II conflitto mondiale, quando Enrico Fermi, dopo i numerosi risultati scientifici ed i successi nella sintesi di nuovi nuclidi (isotopi) radioattivi mediante la tecnica dell'attivazione neutronica con neutroni lenti (termalizzati) ideata dal suo gruppo di Roma<sup>\*</sup>, chiese al CNR i finanziamenti necessari per la costituzione dell'Istituto Nazionale di Radioattività, con la costruzione di un Ciclotrone avente lo scopo di fornire densità di flusso neutronico superiori rispetto a quelle allora disponibili con sorgenti radioattive (il primo Ciclotrone fu costruito a Berkeley nel 1932 da Herbert O. Lawrence e Stanley M. Livingstone, e Fermi non era personaggio da farsi sfuggire l'importanza di tale realizzazione tecnologica per la prosecuzione delle sue ricerche). A parte la scoperta di numerosi radionuclidi (e di due nuovi elementi battezzati *esperio* ed *ausonio*, la cui scoperta fu successivamente smentita), Fermi era concretamente sulla strada della scoperta della

---

\* Il 22 Ott 1934, Fermi e collaboratori irraggiarono con neutroni alcuni cilindretti d'argento in una vasca di pesci rossi, dimostrando come l'acqua, rallentando (termalizzando) i neutroni, rendesse più efficiente il processo di attivazione. Relativamente ai retroscena della scoperta dell'attivazione neutronica, è interessante ricordare la polemica sollevata nel 1958 da Oscar D'Agostino (1901-1975), l'unico Radiochimico del Gruppo di Via Panisperna, sul settimanale *Candido* di Giovanni Guareschi<sup>61</sup>. D'Agostino, che diede un rilevante contributo alle scoperte di Fermi, venne emarginato dal gruppo ed escluso dal brevetto sull'attivazione mediante neutroni lenti (depositato il 26 Ott 1934 a nome E. Amaldi, E. Fermi, E. Majorana, F. Rasetti), pur avendo ottenuto il risultato di usufruire degli eventuali utili della scoperta. E. Fermi ottenne il Nobel con la seguente motivazione: "for his demonstrations of the existence of new radioactive elements produced by neutron irradiation, and for his related discovery of nuclear reactions brought about by slow neutrons". Franco Rasetti (1901-2001), l'ultimo dei "Ragazzi", è scomparso il 05 Dic 2001 all'età di cent'anni a Waremmes in Belgio, dove si era rifugiato più di vent'anni prima, totalmente dimenticato dai media nazionali e dalla popolazione italiana. Rasetti, da sempre contrario agli impieghi bellici dell'energia nucleare, si era allontanato da tempo dalla Fisica per occuparsi delle sue vere passioni: la Fauna e la Flora, diventando in breve uno dei maggiori esperti al mondo di fauna del Cambriano.

fissione indotta, come risulta dal carteggio con la Radiochimica Tedesca Ida Noddack-Tacke ed i suoi collaboratori, che già nel 1925 aveva identificato mediante tecniche radiochimiche seguite da spettrometria X l'elemento di  $Z=43$  (da lei denominato *masurio*) in minerali uraniferi, ipotizzando la sua formazione mediante un nuovo modo di trasmutazione mediante rottura dell'uranio in frammenti pesanti \*\*<sup>32,28,49-53</sup>). E' noto che nel 1934 la Noddack suggerì a Fermi la strada per la validazione della scoperta della fissione rimanendo inascoltata, mentre la scoperta del masurio fu attribuita ad Emilio Segrè e Carlo Perrier (Palermo 1937), che lo battezzarono *tecnezio* ritenendolo erroneamente un elemento artificiale (τεχνητός, artificiale). Oggi è riconosciuto che tale elemento radioattivo è presente in tutti i minerali uraniferi e toriferi come avevano sostenuto correttamente i coniugi Noddack dal 1925 al 1934. Fermi, Amaldi e Seaborg dichiararono successivamente che il fatto di aver sottovalutato i suggerimenti della Noddack fu il più grande errore della loro vita<sup>17)</sup>.

Come è noto Sua Eccellenza Fermi, come veniva appellato secondo i protocolli dell'epoca, di fronte all'ottenimento di un finanziamento da parte del CNR inferiore a quanto richiesto (*i.e.* 150 000 Lire dell'epoca per un paio d'anni, anziché le 300 000 richieste più 230 000 per il personale) e dall'incalzare delle notizie provenienti dalla Germania sull'avanzamento degli studi riguardanti la fissione nucleare, decise di approfittare di un regolare *congedo sabbatico con assegni* per 2 anni dall'Università di Roma presso la Columbia University di New York, ed in occasione del conferimento del Premio Nobel per la Fisica nel Dic 1938 abbandonò l'Italia, per ritornarvi solo nel 1949 e nel 1954 per brevi periodi e già nella fase terminale di una grave forma tumorale che l'aveva colpito negli USA; S.E. Fermi morì a Chicago nel 1954.

La motivazione ufficiale del ridimensionamento del finanziamento da parte del CNR è da ricercarsi – non già in motivazioni ideologiche in quanto Fermi era sempre rimasto ai margini dell'attività politica Italiana – bensì nella situazione di ristrettezze economiche in cui verteva l'amministrazione Italiana in seguito al recente conflitto al confine fra Somalia ed Etiopia, allo scoppio della guerra civile Spagnola ed alle sanzioni economiche stabilite dalla Società delle Nazioni nei confronti del Governo Fascista Italiano<sup>56,57,60,61)</sup>.

Poco dopo il suo arrivo in USA, con un'enorme disponibilità di finanziamenti ed il contributo determinante di illustrissimi collaboratori<sup>57)</sup>, Fermi realizzò nel 1942 la prima Pila Atomica (dalla struttura di mattoni di grafite che ricordava vagamente quella della pila di Alessandro Volta), mentre – come Fermi temeva - nel frattempo la fissione indotta era già stata scoperta nel 1939 a Berlino dai già citati Radiochimici Tedeschi Otto Hahn (Nobel per la Chimica 1944), Lise Meitner, Fritz Straßman e Otto Frisch e la fissione naturale dai russi Petrzhak e Flerov nel 1940. Dagli archivi storici risulta che i coniugi Noddack avevano dato ad Hahn ed ai suoi collaboratori gli stessi suggerimenti che avevano dato a Fermi negli anni precedenti, anche se i Noddack ebbero poche possibilità di difendere le proprie ragioni dopo la morte, avvenuta rispettivamente nel 1960 (Walter) e 1979 (Ida).

La versione ufficiale è come sempre diversa ed ideologizzata, ed attribuisce la fuga dall'Italia di Fermi a motivazioni esclusivamente politico-razziali, riguardanti in particolare il

---

\*\* Quello che Fermi aveva definito un "rather complex decay" nel 1934.

fatto che la moglie Laura Capone era di religione e famiglia ebraica e in Italia nel Set-Nov 1938 erano state promulgate le famigerate leggi per la difesa della razza. In realtà Fermi, nominato direttamente da Benito Mussolini come più giovane membro della Regia Accademia d'Italia, presieduta dal Nobel Guglielmo Marconi, aveva perso da poco sia l'utile protezione politica del Ministro e Scienziato Orso Mario Corbino (deceduto nel Gen 1937), sia quella dello stesso Guglielmo Marconi (deceduto nel Lug 1937), e quindi, seppur stimato e riverito, aveva visto sfumare definitivamente la possibilità di proseguire in Italia le sue ricerche, rivelandosi un *cervello in fuga ante litteram*.

### 3.2 Gli anni ruggenti del Nucleare Italiano

I primi anni ruggenti del Nucleare Italiano del II dopoguerra, furono di grandissima rilevanza internazionale e culminarono con la costituzione del CISE di Segrate (Centro Informazioni Studi ed Esperienze, co-finanziato da Adriatica di Elettricità, Cogne, Edison Italiana, Falck, Fiat, Montecatini, Pirelli e Terni), realizzato attorno al gruppo del Fisico Milanese Giuseppe Bolla con lo scopo istituzionale di sviluppare le conoscenze e tecnologie necessarie alla realizzazione di un reattore nucleare completamente nazionale (poi progetto CIRENE, CISE REattore a Nebbia) <sup>♥</sup>. Successivamente venne costituito il CNRN (Comitato Nazionale Ricerche Nucleari), nato all'interno del CNR con i prestigiosi auspici del Fisico Edoardo Amaldi, amico e collaboratore di Enrico Fermi dagli anni '30 del Novecento ed ideatore e fondatore del CERN di Ginevra. Solo nel 1956 il CNRN divenne meno dipendente dal CNR, il ruolo del CISE venne peraltro ampiamente ridimensionato (di fatto venne smembrato, chiuso definitivamente nel 2002 ed al suo posto è attualmente in costruzione un centro residenziale) e venne costituito il Centro di Ricerca Nucleari di Ispra (VA) sull'onda della politica statunitense *Atoms for Peace* lanciata dal presidente Dwight D. Eisenhower del 1953, giungendo infine alla costituzione nel 1960 del CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare).

Comunque, i programmi nucleari del CNEN ad Ispra non ottennero mai la spinta decisiva ed il Centro di Ispra divenne successivamente, e fa parte tuttora, dell'EURATOM della Commissione delle Comunità Europee (JRC-EC, Joint Research Centre of European Commission), operazione che, di fatto, privò l'Italia della sovranità sulle ricerche svolte presso il centro stesso. La trasformazione infine del CNEN in ENEA (Ente Nazionale per l'Energia Nucleare e le Energie Alternative), dopo alcuni anni di sopravvivenza, snaturò completamente - dopo il referendum del 1987 - le finalità di quest'ultimo Ente, che

---

<sup>♥</sup> I reattori Canadesi CANDU, che hanno tuttora un grandissimo successo sul mercato internazionale, sono una evoluzione del reattore CIRENE ideato dal Prof. Mario Silvestri del Politecnico di Milano in collaborazione con Scienziati Canadesi, basato sull'utilizzo di uranio di composizione isotopica naturale come combustibile, acqua pesante come moderatore di neutroni ed acqua normale come fluido di raffreddamento. Silvestri quantificò e premonì il costo per l'Italia della eventuale rinuncia alla costruzione di impianti nucleari in un noto libro del lontano 1968 <sup>55</sup>). Un esemplare di CIRENE da 40 MWe era in costruzione a Borgo Sabotino (Latina) ed è ora di proprietà come sito dimostrativo della SoGIN SpA, Società del Gruppo ENEL creata nel 1999, la cui missione primaria è lo smantellamento dei siti nucleari Italiani, ma che è contemporaneamente impegnata nella gestione dei nuovi impianti nucleari acquisiti dall'Italia all'estero.

attualmente si occupa marginalmente di problemi energetici, e di energia nucleare in particolare. L'ENEA fu successivamente ribattezzato Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, dando il colpo finale alle strategie energetiche nucleari del nostro Paese, con la concomitante dissipazione sconsiderata dell'ingentissimo patrimonio culturale e di conoscenze tecnologiche sviluppato negli anni precedenti (all'epoca in nostro Paese era considerato fra i leader Internazionali nel Settore Nucleare). Le pressioni esercitate dalle compagnie multinazionali di distribuzione dei derivati del petrolio, rette dai Paesi usciti vincitori dal II conflitto mondiale, e la diffidenza delle superpotenze nei confronti di un'Italia indipendente dal punto di vista energetico, nonché politicamente instabile e poco affidabile, hanno contribuito ulteriormente all'assestamento della situazione attuale.

Un'eccezione a questa situazione poco edificante fu l'indubbio successo nella costruzione nel 1959-1975 dell'elettrosincrotrone da 1,1 GeV o 1 100 MeV (e degli anelli di accumulazione ADA 1961-64 ed ADONE 1969-73), presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), Ente emanato dal CNR e costituito l'8 Ago 1951 in seguito alla fusione di 4 Istituti di Ricerche Nucleari (Roma, Torino, Padova e Milano), che costituiscono anche le prime 4 Sezioni del nuovo Ente <sup>59</sup>. L'INFN ebbe come Presidenti in quegli anni scienziati di grande valore come Gilberto Bernardini (1951-59), Edoardo Amaldi (1960-65) e Giorgio Salvini (1966-70) <sup>55,56,60,62</sup>. L'Anello Di Accumulazione ADA, progettato dal Fisico Austriaco operante a Roma Bruno Touschek \*, fu una prima mondiale di tutto rispetto presto ripresa in altri Paesi del mondo; il grande anello di accumulazione ADONE raggiunse energie di 3 000 MeV (3 GeV). Le finalità dell'INFN, che all'epoca dipendeva dal CNEN, non erano tuttavia in competizione con quelle degli altri Enti, essendo stato concepito per studi di Fisica Nucleare Fondamentale ed Applicata a tematiche non energetiche, e quindi di nessun ostacolo per le strategie energetiche del Paese <sup>55,62</sup>.

E' sicuramente una fortuita coincidenza il fatto che subito dopo la costituzione del CNEN nel 1960, il suo Segretario Generale Felice Ippolito fosse stato implicato in un caso ancora discusso di peculato e deviazione di denaro pubblico (tra l'altro utilizzava elicotteri di servizio per usi privati, come fanno abitualmente politici, manager e funzionari dei giorni nostri) e quindi eliminato elegantemente dalla scena politica nel 1963 (fu incarcerato), seppur con un metodo meno cruento di quello utilizzato per eliminare il Presidente dell'ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) Enrico Mattei, il cui aereo precipitò a Bescapè in Provincia di Pavia in circostanze ancora non chiarite proprio l'anno precedente (27 Ott 1962) <sup>64</sup>. E' opportuno altresì ricordare che negli anni precedenti Mattei si schierò apertamente in favore dei programmi nucleari italiani, che riteneva sinergici ed affatto in competizione con i progetti di sviluppo della ricerca petrolifera sul territorio e sulle coste italiane. Rivisti al giorno d'oggi, ed alla luce degli scandali petroliferi degli ultimi 20 anni, i peccati di Felice Ippolito risultano assolutamente veniali e le imputazioni nei suoi confronti risibili <sup>62</sup>.

Ovviamente, una lettura superficiale degli eventi storici, limitatamente agli ultimi 10-25 anni, può far ritenere che l'attuale situazione tragicomica italiana sia la conseguenza delle scelte libere e democratiche dell'opinione pubblica, coronate dalla moratoria antinucleare del

---

\* Incidentalmente una cara zia di Touschek si chiamava appunto Ada.

1987; in realtà, mai come nell'occasione del referendum del 1987 la credulità popolare e la scarsa conoscenza scientifica del grosso pubblico italiano fu fatta maggiore oggetto di raggio. L'*ondata emozionale* seguita alla catastrofe di Chernobyl <sup>♦</sup> fu sfruttata *ad-hoc* in maniera spregiudicata. I media trasmettevano all'epoca - senza alcun controllo scientifico o smentita da parte del Governo o di esperti - notizie inconsistenti e contraddittorie su: tumori e malattie genetiche, inesistenti malformazioni nella prole (mai verificatesi neppure nei decenni successivi), improbabili alghe giganti cresciute nel golfo di California, bambini già morti di leucemia in vicinanza di centrali nucleari non ancora costruite (Montalto di Castro, Viterbo) <sup>♦</sup>, con una totale confusione fra *attività e concentrazioni, becquerel e millicurie*, in una fantasmagorica atmosfera di totale anarchismo ideologico ed emotivo, ed ovviamente di relativismo scientifico. Per completare tale quadro sconcertante, nel 1996 alla presidenza dell'ENEL (il principale Ente Elettrico Italiano) fu nominato dal Governo l'ambientalista On. Enrico (Chicco) Testa, impegnato politicamente con il partito dei Verdi nella campagna antinucleare degli anni '80 <sup>\*</sup>. Come risultato, attualmente l'Italia è il Paese Europeo (e mondiale) che dipende maggiormente dall'estero dal punto di vista energetico, con le conseguenze che sono sotto gli occhi di tutti (costi elevati, inquinamento, black-out, dipendenza energetica e politica dall'estero). Gli scandali che hanno coinvolto numerosi uomini politici italiani in seguito ad affari spregiudicati con i Paesi produttori di petrolio e gas naturale nello scorcio del secolo appena terminato, nonché gli attuali costi abnormi dei carburanti e dell'energia (col costo del petrolio a più di 70 US\$.bbl<sup>-1</sup>, dovrebbero aver aperto gli occhi anche agli ingenui ed ai più riottosi.

### 3.3 La percezione dell'Opinione Pubblica e la disinformazione

Un recente sondaggio compiuto in tutti i Paesi dell'UE (Feb 2004) dall'European Economic and Social Committee (EESC, <http://www.esc.eu.int/pages/en/home.asp>) ha

---

<sup>♦</sup> Alle ore 01,23 di notte del 26 Apr 1986, una manovra errata nel reattore nucleare n. 4 del "Lenin Complex" di Chernobyl (Ucraina), provocò due esplosioni di gas in rapida sequenza, seguite da un incendio, con la fuoriuscita in fasi successive per una decina di giorni di un'enorme nube radioattiva, che fu trasportata dai venti e dalle piogge disperdendosi in gran parte dell'Europa Centro-Settentrionale e Sud-Orientale. Qualche osservatore ha evidenziato come il disastro di Chernobyl non fosse stato esclusivamente un incidente nucleare, ma l'ennesima tragica ratifica pratica del fallimento del *Sistema Comunista*.

<sup>♦</sup> Tale affermazione dolosamente assurda, ma di sicuro effetto mediatico, fu compiuta in vari dibattiti televisivi sulle reti nazionali durante la campagna referendaria del 1987, dall'On. Gianni Francesco Mattioli (Prof. Ordinario di Fisica Matematica, Università di Roma "La Sapienza"). Nel dibattito dell'epoca, l'unico capace di smentire pubblicamente le dichiarazioni farneticanti di Mattioli, fu l'anziano Prof. Edoardo Amaldi, che gli attribuì pubblicamente il colorito appellativo di *imbecille*, suscitando le reazioni stizzite di numerosi benpensanti. La centrale nucleare di Montalto di Castro, già quasi completata nelle sue strutture non nucleari, venne smantellata ed gli enormi costi di tale operazione sono stati caricati sul costo del kW.h elettrico di ogni utente Italiano fino ad anni recenti.

<sup>\*</sup> Nel Gen 2005 lo stesso ex-Presidente dell'ENEL Chicco Testa, attivista ambientalista ed antinuclearista all'epoca del referendum del 1987, ha dichiarato sul Corriere della Sera che il Mondo ha necessità di energia elettronucleare e che i risultati del Referendum del 1986 furono male-interpretati (!) dalla classe politica e dai media (Chicco Testa è laureato in Filosofia e non ha alcuna competenza diretta in materie tecniche o scientifiche, ma ha goduto e gode di rilevanti cariche dirigenti ed organizzative nel settore tecnologico).

mostrato come il pubblico Europeo sia oggi largamente favorevole all'impiego dell'energia nucleare col 54% di consensi, il 33% di contrari e il 11% d'astenuiti. Gli intervistati hanno sostenuto in maniera *pragmatica più che ideologica* di preferire l'opzione nucleare alla situazione attuale, con la finalità primaria di risolvere i problemi di costo, approvvigionamento ed inquinamento ambientale (in altre parole, nessuno vuole un impianto industriale o energetico di potenza *fuori dalla porta di casa propria*, ma i più realisti si rendono conto della sua indispensabilità, *i.e.*, atteggiamento definito NIMBY)<sup>▲</sup>. Tale risultato ricalca quello ottenuto da un *field-pool* compiuto in California nella primavera del 2003, con due terzi degli intervistati a favore della ripresa dei programmi nucleari ed un ribaltamento diametrico dell'opinione espressa negli anni successivi all'incidente di Three Mile Island (TMI) del 1979 (avvenuto peraltro senza provocare vittime o danni materiali, ma ampiamente sfruttato per fini propagandistici e prevalentemente ideologici).

Bisogna prendere atto che l'abbandono temporaneo di una tecnologia ritenuta pericolosa in base allo stato delle conoscenze di una data epoca non significa che tale tecnologia non possa essere rilanciata con successo in tempi successivi. Ciò è avvenuto ad esempio nel caso del dirigibile (il più leggero dell'aria), abbandonato per numerosi anni dopo la tragedia dello Zeppelin Hindenburg del 1937 (che causò peraltro solo 37 vittime, prevalentemente fra i membri dell'equipaggio) - attribuita erroneamente per decenni alla pericolosità peraltro ancora ampiamente sopravvalutata dell'idrogeno - a favore dell'aeroplano (il più pesante dell'aria)<sup>4)</sup>. All'epoca la Germania era di fatto obbligata dalle sanzioni economiche internazionali all'impiego dell'idrogeno (prodotto per via chimica da carbone ed idrocarburi), in quanto gli USA all'epoca detenevano la quasi totalità dei giacimenti naturali d'elio. Oggi i palloni sonda ad idrogeno sono ampiamente utilizzati per studi atmosferici e meteorologici ed il dirigibile (ad elio a scopo ampiamente precauzionale) è preso nuovamente in considerazione per trasporti che non richiedano tempi brevi d'esecuzione<sup>▼</sup>, dati i costi competitivi e la maggiore eco-compatibilità rispetto all'aeroplano ed ai trasporti via nave, ed oggi molti ritengono che lo stesso idrogeno costituirà il trasportatore d'energia (*vettore energetico*) del prossimo futuro.<sup>6)</sup> Peraltro, il primo volo aereo dei fratelli Wright avvenne nel 1903 e nel 2003 ne è stato commemorato il centenario, e già oggi sembra impensabile una società civile senza trasporti di massa con aerei sicuri, efficienti ed a costi sempre più contenuti ed abbordabili da tutte le borse. La tragedia dello *tsunami* che ha colpito il Sud Est Asiatico nel Dic 2004 è stata riportata con grande enfasi dalle cronache e dai media, anziché passare inosservata come avviene abitualmente in casi simili, in quanto molte migliaia di danarosi cittadini Occidentali ed Italiani si trovavano in vacanza esotica da quelle parti grazie ai trasporti aerei agevoli, rapidi e nel complesso relativamente economici.

Un caso analogo ha investito l'Italia in anni recenti, quando una campagna allarmistica contro il cosiddetto inquinamento elettromagnetico o *elettrosmog* – i cui effetti dannosi sono stati ampiamente smentiti da decenni da numerose fonti scientifiche Italiane ed Internazionali<sup>61)</sup> – ha tentato di impedire od almeno ostacolare la diffusione dei telefoni cellulari e delle

---

<sup>▲</sup> L'acronimo della sindrome NIMBY significa "Non In My Back Yard", *i.e.*, non nel mio cortile dietro casa.

<sup>▼</sup> Il nuovo Zeppelin NT viene attualmente costruito a Friedrichshafen dalla Zeppelin Luftschifftechnik GmbH.

trasmissioni radiotelevisive (accanendosi in particolare sulla Radio Vaticana per più che evidenti motivazioni ideologiche), vedendo ancora l'ENEL sul banco degli imputati, con il risultato inaspettato e paradossale che oggi il nostro Paese ha il numero maggiore di telefoni cellulari pro-capite al Mondo. La campagna anti-elettrosmog ha contribuito tra l'altro a causare il disastro aeronautico di Linate del Nov 2001 con 118 vittime, avendo rallentato l'entrata in funzione del radar di terra dell'Aeroporto di Linate, che era fermo da più di un anno a causa della verifica che si protraeva sulla sua compatibilità con la normativa concernente l'inquinamento elettromagnetico. Si tratta quindi di una tipica presa di posizione ideologicamente preconstituita, che ha già provocato un numero consistente di vittime nella sola Italia, non essendo provata alcuna implicazione per la salute animale dovuta a tali agenti <sup>65</sup>).

Un caso analogo, con implicazioni economiche e di vittime molto più rilevante, talmente controverso d'aver causato perfino guerre regionali fra Paesi Africani, riguarda l'utilizzo su larga scala del DDT come agente insetticida per contenere la diffusione della malaria, del tifo, della febbre gialla, del dengue. La malaria uccide ogni anno dai 2 ai 3 milioni di persone (specialmente in Africa), un bambino ogni 30 secondi, avendo raggiunto un numero di vittime tre volte superiore a quello di tutte le guerre mondiali del secolo scorso. In realtà il DDT (sintetizzato nel lontano 1870) • contribuì a debellare tale malattia in numerose parti del Pianeta (compresa l'Italia nel II dopoguerra e numerosi altri Paesi Europei), anche se successivamente tale composto venne inserito - in base al cosiddetto Principio di Precauzione - nell'elenco dei famigerati 12 POPs (Persistent Organic Pollutants), stilato dall'ONU (UNEP, UN Environment Programme) e controfirmato a Stoccolma da 91 Paesi nel 2001 (Convenzione di Stoccolma sui POPs) <sup>66</sup>, e di fatto il DDT fu eliminato dal mercato (oggi viene prodotto solo in Cina ed India). Quando l'uso del DDT fu interrotto nello Sri Lanka nel 1964, nel giro di 5 anni i casi di malaria risalirono da 17 a 500 000. Il bando del DDT in Sud Africa nel 1996 causò un incremento del 450% dei casi di malaria. Nonostante tali episodi, in Costa d'Avorio gli ambientalisti (?) proposero l'impiego delle zanzariere (!) in alternativa al DDT, antepoendo la protezione degli insetti a quella delle popolazioni locali.

Peraltro, dopo il 2000, Paesi come India, Indonesia, Ecuador, Botswana e Sud Africa hanno reintrodotta l'impiego del DDT sul proprio territorio, nonostante le raccomandazioni dell'ONU, accusando i Paesi più sviluppati di razzismo ed insensibilità, e il Governo Ugandese ha recentemente accusato la UE di violare i diritti civili delle popolazioni Africane grazie al bando di tale insetticida. La stessa OMS ne ha ri-consigliato l'impiego in determinati Paesi da 2006.

La *clorazione* è notoriamente il metodo più efficace per la sterilizzazione dell'acqua ed è ampiamente utilizzato in ogni parte del Mondo, e l'Accademia Nazionale delle Scienze degli USA e l'Associazione Internazionale per la Ricerca sul Cancro (AIRC, IARC) hanno valutato nel 1991 come tale presidio sanitario abbia già contribuito a salvare 50 milioni di individui, prima che il suo utilizzo fosse condannato da una pressante campagna allarmistica supportata dall'EPA USA sui presunti (ma mai dimostrati) lievi effetti cancerogeni collaterali.

---

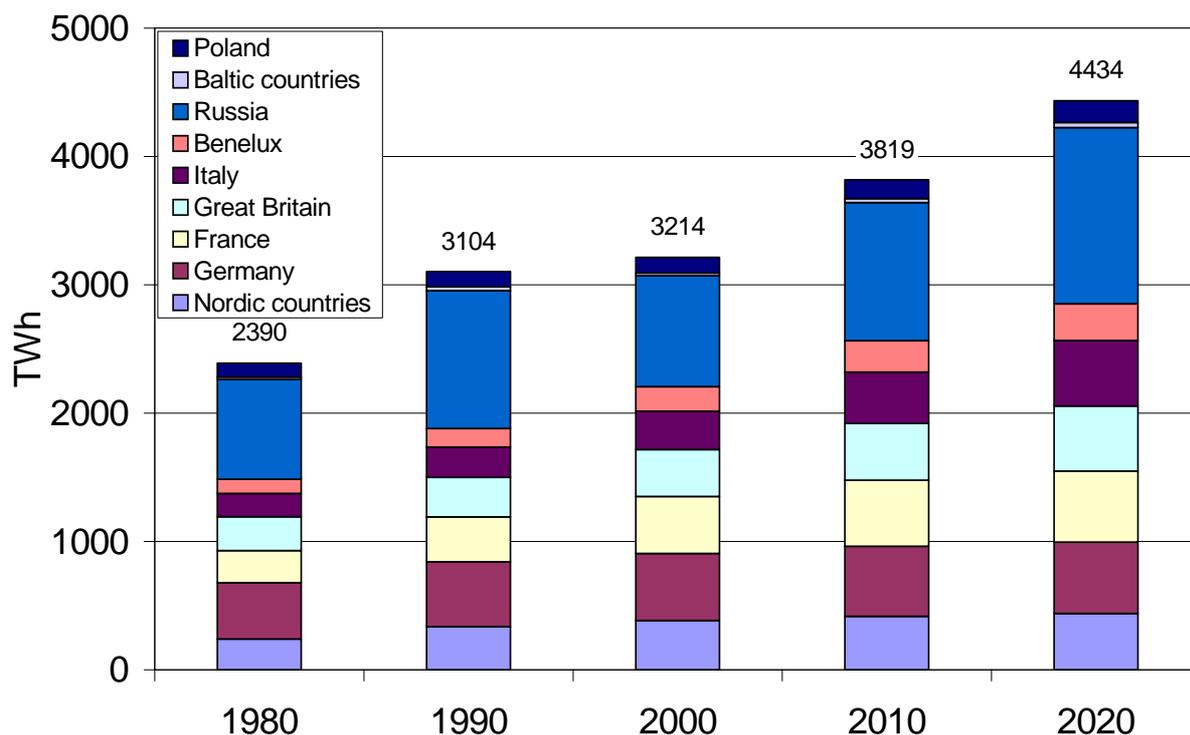
\* Nel 1948, il Chimico Svizzero Paul Hermann Müller ottenne il Premio Nobel per la Medicina "for his discovery of the high efficiency of DDT as a contact poison against several arthropods".

Proprio nel 1991 il Governo Peruviano interruppe tale pratica ottenendo come risultato lo scatenarsi di un'epidemia di *colera* che colpì in 5 anni 1 milione di persone con 10 000 vittime, dopo oltre cento anni da quando tale malanno era stato eradicato dal Paese.

Le campagne di disinformazione hanno spesso indotto comportamenti irrazionali del pubblico e talvolta nello stesso legislatore; in Italia negli anni '90, in seguito ad una pressante campagna ecologista basata su fondamenti scientifici inconsistenti, venne promulgata una legge per limitare l'impiego dei sacchetti di plastica (shoppers) nei supermercati, sostituendoli con sacchetti di carta. Gli shoppers erano accusati di essere poco ecologici, sia in quanto prodotti di sintesi dell'industria chimica, sia in quanto meno naturali di quelli di carta prodotti dalla cellulosa degli alberi, sia in quanto accusati di produrre inquinamento da diossine durante la combustione. La realtà è diametralmente opposta: gli shoppers di plastica sono più igienici, resistenti e leggeri e possono essere riutilizzati più volte rispetto a quelli di carta, la loro combustione è praticamente completa e senza sottoprodotti (non si tratta di materiali clorurati) a differenza di quella della carta, inoltre l'industria cartaria è caratterizzata da elevatissimo impatto ambientale ed utilizza come materia prima il legno degli alberi con un evidente consumo di materiale pregiato, oppure carta riciclata e stracci <sup>66,67</sup>. La *carta riciclata* è notoriamente molto più inquinante rispetto a quella di prima produzione, in quanto *caricata* con inchiostri, coloranti, plastificanti, materiali ed additivi per renderla più robusta ed elegante alla vista ed al tatto, e l'unico vantaggio del suo utilizzo è relativo al risparmio di alberi per la sua produzione. Il caricamento della carta viene compiuto mediante resine polifenoliche potenziali precursori della produzione di diossine (derivate dalla condensazione dei fenoli in presenza di cloruri ed in condizioni particolare), ma molto più economiche delle resine acriliche. Per questi motivi, negli stessi anni in cui in Italia veniva legiferato per l'impiego degli shoppers di carta, in altri Paesi veniva legiferato nella direzione opposta (ad esempio in Canada, le fabbriche di carta erano sotto accusa negli stessi anni '90 per il presunto inquinamento da diossine riscontrato nel Golfo antistante Vancouver, città con un retroterra dotato di foltissime foreste di conifere utilizzate per la produzione di carta). Oggi, gli shoppers di carta sono praticamente scomparsi dal mercato e come unico esito di tale polemica, l'utilizzo degli shoppers è ora gravato da un'ennesima tassa. E' indubbio invece che i supporti di plastica (magnetici o ottici) sostituiranno sempre più rapidamente quelli di carta nei settori più svariati nel prossimo futuro, compresa la stampa e l'editoria, come avviene già ampiamente con la sostituzione delle tradizionali versioni cartacee delle riviste con versioni elettroniche su supporto magnetico.

L'energia idroelettrica è invece normalmente accettata dall'opinione pubblica (escluse ovviamente le Comunità Montane interessate), eppure limitatamente alla sola Italia – a parte l'enorme dissesto idrogeologico e faunistico - l'industria idroelettrica ha provocato 600 vittime nel 1923 (Gleno, Brescia, Lombardia) e più di 2 000 nel 1963 (Vajont, Pordenone, Friuli) <sup>1)</sup> ed i bacini idroelettrici e le dighe in esercizio in Italia sono 10 000 (2 000 di potenza superiore a 1 MWe) e solo 800 fra questi sono dotati di un presidio umano permanente. Altrettanto gravi e cruenti sono stati i disastri idrogeologici, non connessi alla produzione di energia (*i.e.* Stava, Val di Fiemme).

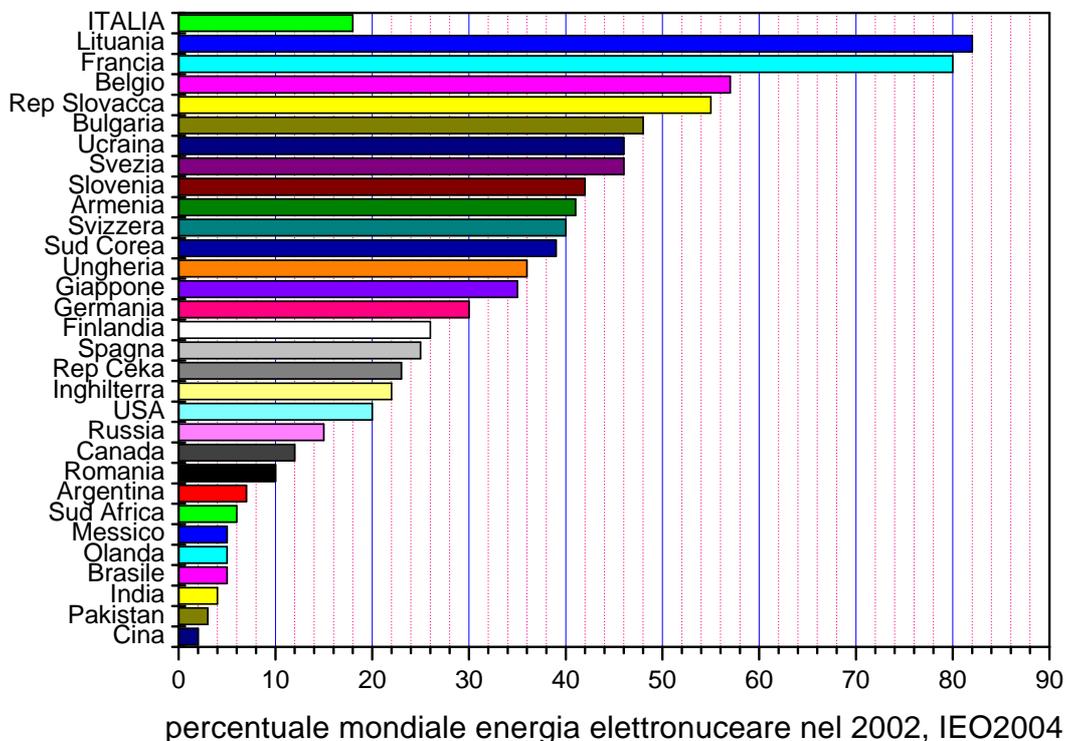
Quasi tutti i Paesi Europei hanno da decenni una solida base d'energia elettronucleare prodotta entro il proprio territorio, variabile dal 10 al 82% del fabbisogno interno totale, che è riassunto efficacemente nelle FIGs. 4 e 5. Paesi dell'Est Europeo come Armenia, Bulgaria, Lituania, Repubblica Ceca, Repubblica Slovacca ed Ungheria, usciti recentemente da una situazione di sottosviluppo economico e sociale, hanno un parco nucleare che copre il 35-82% del fabbisogno interno. La Lituania con il 82% d'energia elettronucleare, ha superato pochi anni orsono (2004) anche la Francia che si attesta sull'80%, e poiché gli impianti nucleari del Paese sono di vecchia concezione (RBMK ex-Sovietici), tale Paese sta provvedendo rapidamente alla loro modernizzazione (riqualificazione) con l'aiuto dell'UE. Altri Paesi emergenti, quali Argentina, Brasile, Corea del Sud, India, Kazakistan, Repubblica del Sud-Africa, Russia, Ucraina stanno potenziando le proprie strutture nucleari, oppure iniziando a produrre energia nucleare su scala sempre maggiore affiancandosi ai Paesi già altamente nuclearizzati<sup>10-12</sup>). Solo in Cina è prevista la costruzione di non meno di 2 impianti nucleari all'anno per i prossimi vent'anni. La situazione del nucleare energetico mondiale nel 2002 è riassunta in FIG. 5 (dall'International Energy Outlook 2004, IEO2004, dell'IEA dell'OECD, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>).



**FIG. 4** - Una recente valutazione e proiezione al 2020 dei consumi elettrici nei principali Paesi dell'Unione Europea allargata all'Est. Il nostro Paese mostra un inarrestabile incremento dei consumi di energia elettrica, variabile dal 2 al 6% su base annua.

Bisogna osservare come la maggior parte degli impianti nucleari sia in costruzione proprio in Paesi in rapido sviluppo economico come Cina, Corea del Sud, India, mentre nei

Paesi avanzati dove la disponibilità di energia elettronucleare è già consistente (compreso l'import dall'estero come nel caso dell'Italia), si è verificata una moratoria od almeno un rallentamento nella costruzione di nuovi impianti.



**FIG. 5:** Distribuzione mondiale di energia elettronucleare nel 2002 secondo il rapporto IEO2004 dell'OCSE. Il dato relativo all'Italia è stato inserito dagli autori !

E' dell'estate 2005 l'annuncio che anche Paesi come Iran e Corea del Nord siano intenzionati a riprendere rapidamente i propri programmi nucleari energetici, malgrado il clima di sospetto internazionale nei confronti dei regimi politici al potere in tali Paesi, ed a condizione che tali Paesi siano disponibili a permettere i controlli da parte di organismi internazionali come l'IAEA, è difficile sostenere che essi non possano ambire allo sviluppo come i Paesi più ricchi ed avanzati.

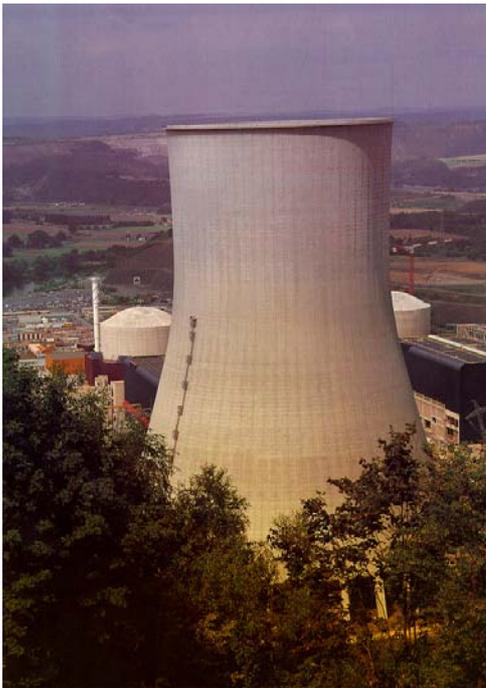
Un tipico reattore nucleare di potenza (Nuclear Power Plant, NPP) ha una potenza installata (capacità) variabile da qualche centinaio di MWe fino a 1 800 MWe (e.g. 862 MWe Centrale BWR di Caorso, Piacenza \*, o 257 MWe Centrale di Trino Vercellese, entrambe

\* Il reattore di Caorso (ora denominato ARTURO) era alimentato da 560 elementi di combustibile arricchito al 3-4% (LEU) da 400 kg ciascuno, il 30% dei quali veniva sostituito ogni 18 mesi. Ogni elemento di combustibile è costituito a sua volta da un insieme di barre o pin, contenenti pellets d'ossido d'uranio, inglobate in un involucro (cladding o canning) di una lega speciale di zirconio (Zircaloy). Le 1 032 barre di combustibile già irraggiate (190 tonnellate) sono depositate nelle piscine adiacenti al reattore e verranno smaltite all'estero a costi esorbitanti mediante un contratto con Cogema (Francia), BNFL (Inghilterra) e il Governo Russo. Il bistrattato

attualmente in standby, seppur dotate di licenza di esercizio dell'IAEA)<sup>28)</sup>. Normalmente una centrale nucleare dispone di 2-6 unità, in grado di intervenire come backup in caso d'emergenza o manutenzione (e.g. nel 1896 il Lenin Complex di Chernobyl aveva 4 unità in funzione e 2 in costruzione).

Un'intera centrale con la sua isola nucleare, come conseguenza della elevata densità di potenza, copre una superficie di qualche centinaio di migliaia di m<sup>2</sup>, non dissimile da una centrale termoelettrica o da un qualsiasi impianto industriale non energetico. Le centrali di dimensioni maggiori (più di 1 GWe) vengono utilizzate per la produzione di potenza energetica di base, mentre reattori di dimensioni più ridotte (qualche centinaio di MWe) sono concepiti per sopperire ai picchi di richiesta elettrica, o ad esigenze locali, specialmente in zone non servite da altre fonti energetiche.

**FIG. 6a:** Impianto N4 della Framatome ANP ed EDF. Esempolari: Chooz 1 (1996) e 2 (1997), Civaux 1 (1997) e 2 (1998), Francia.



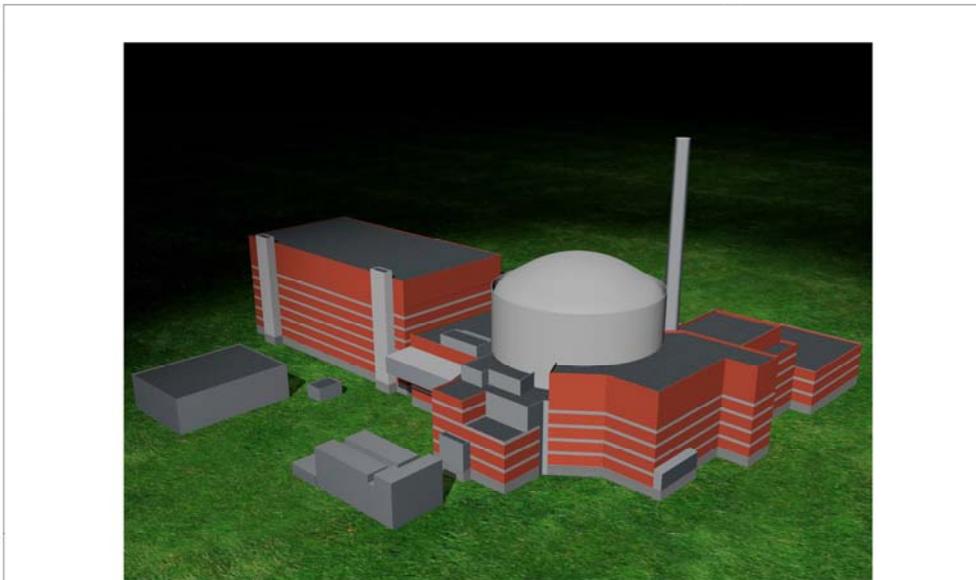
**FIG. 6b:** Impianto KONVOI della Siemens. Esempolari: Isar 2 (1988), Emsland (1988), Neckarwestheim 2 (1989), Germania.

Fra i modelli di reattore nucleare più consolidati ed affidabili in esercizio, ricordiamo gli N4 della Framatome, gestiti dall'ente elettrico Francese Electricité de France, EDF (installati prevalentemente in Francia) ed i KONVOI della Siemens (installati prevalentemente in Germania). Nelle FIGs. 6a e 6b sono mostrate le torri evaporative di raffreddamento tipiche di tali impianti come di altri impianti industriali di potenza.

---

ARTURO ha prodotto 29 miliardi di kW.h dal 1978 al 1986.

Nonostante le torri evaporative siano spesso utilizzate sui media per rappresentare il potenziale rischio nucleare di tali impianti, i vapori provenienti da esse appartengono al sistema secondario di raffreddamento, sono costituiti esclusivamente da vapore acqueo e non sono fonte di alcun inquinamento ambientale di tipo radioattivo o altro. Il reattore Europeo EPR rappresentato schematicamente in FIG. 7 - di cui si parlerà nel seguito - è la più avanzata evoluzione tecnologica dei KONVOI ed N4 ed è privo di tali torri evaporative, che sono state sostituite da una singola ciminiera per l'espulsione dell'aria dei sistemi di filtraggio e condizionamento.



**FIG. 7:** Vista pittorica di un impianto nucleare della nuova generazione (EPR–Siemens-AREVA, della TVO, Finlandia). Per ottimizzare ulteriormente il recupero di energia termica, le torri evaporative di raffreddamento sono state eliminate e sostituite da una ciminiera.

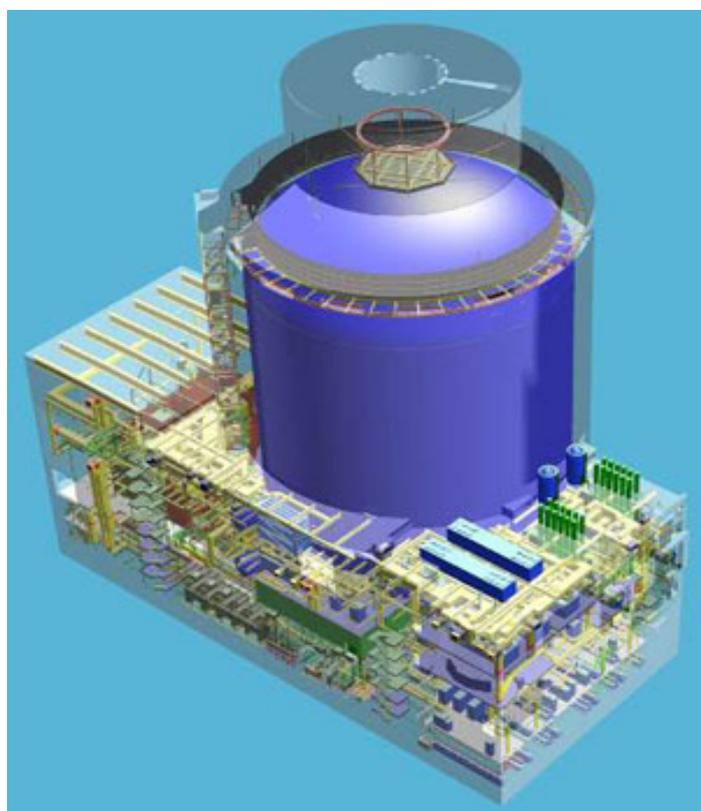
I reattori a spettro neutronico termico, moderati e raffreddati con acqua leggera, grafite o acqua pesante sono i più diffusi e testati, mentre i *fast breeders* quali gli esemplari Italo-Francesi PHÉNIX da 233 MWe e SUPERPHÉNIX da 1 200 MWe (Creys-Malville, France) •, o lo statunitense EBR-II (Hanford, Richland, WA) sono stati ampiamente sperimentati con successo. Poco diffusi ma estremamente promettenti - specialmente per la produzione nucleare di idrogeno - sono i reattori a gas ad alta temperatura, taluni dei quali a letto di sfere di combustibile (PBR) inglobato in grafite e carburo di silicio.

Il *burnup* (energia totale generata per unità di combustibile iniziale) del combustibile è

---

• L'SPX fu realizzato dal Consorzio NERSA fra (EDF-Francia, ENEL ed SBK-Belgio) col 33% di partecipazione ENEL, che all'epoca era un Ente Pubblico, e ciò spiega il particolare occhio di favore col quale l'Italia è attualmente trattata dalla Francia in fatto di importazione di energia elettrica.

passato negli ultimi anni dai canonici 33 GW(termici).giorno.(tonnellata metrica iniziale d'U)<sup>-1</sup>, ovvero 33 GW.d.IMT<sup>-1</sup>, a valori più che doppi fino a 65 GW.d.IMT<sup>-1</sup>. I reattori attuali sono progettati per 60 anni di d'esercizio, contro i 25 anni degli impianti delle prime generazioni <sup>47,48</sup>). In una centrale nucleare termica della *Gen(eration) II* un terzo della potenza è trasformato in energia elettrica, quindi con rendimenti di conversione in energia elettrica del 33%, e rendimenti ancora maggiori si ottengono mediante reattori della *Gen III* (fino al 37%) e reattori veloci (45-55%), mentre numerosi reattori della *Gen IV* sono in fase avanzata di progettazione <sup>48</sup>). I principali tipi di reattori ed impianti nucleari sono elencati in TAB. 1. Un elenco dettagliato degli impianti nucleari in funzione, progettati o de-commissionati su scala mondiale è reperibile alla pagina della World Nuclear Association [http://www.world-nuclear.org/wgs/decom/database/php/reactorsdb\\_index.php](http://www.world-nuclear.org/wgs/decom/database/php/reactorsdb_index.php).



**FIG. 8:** Schizzo del reattore nucleare Inglese-Statunitense A(dvanced) P(assive) 1000 da 1100 MWe della BNFL-Westinghouse Electric Co. Tale reattore a sicurezza intrinseca (passiva, o inerente) della *Gen III+* ha avuto la licenza dal US NRC il 13 Set 2004. E' il 4° modello di reattore di questa generazione ad ottenere tale autorizzazione, che costituisce la prima fase per la successiva costruzione ed esercizio. Data la comprovata autorevolezza dell'NRC, i reattori nucleari licenziati da tale ente di controllo vengono approvati in ogni parte del mondo.

Fra i reattori più avanzati della *Gen III+* va inoltre segnalato l'AP1000 (Advanced Passive 1000, FIG. 8) della BNFL-Westinghouse Electric Co. da 1,150 GWe <sup>69</sup>). Tale reattore Advanced-PWR a *sicurezza intrinseca* (altrimenti definita passiva o inerente) \*, costituito da

\* Negli impianti nucleari a sicurezza passiva o inerente, i principali sistemi di sicurezza sono basati su processi fisici o chimici che non richiedono intervento di motori, pompe o sistemi basati sull'impiego di energia elettrica o meccanica esterna. Fra questi ricordiamo: gravità, circolazione naturale di fluidi, raffreddamento spontaneo, immissione spontanea di acqua borata (*chemical shim*), coefficiente di temperatura negativo, vasca di contenimento per eventuale core fuso (*corundum*), sistemi *ridondanti* e *diversi* (*multipli* o *almeno doppi* e *basati su principii diversi*).

300 moduli trasportabili su rotaia o su chiatta è progettato per operare con un *core* costituito interamente da MOX<sup>47,70</sup>.

**TAB. 1:** Tipi principali d'impianti e reattori nucleari, e loro acronimi.

<b>Acronimo</b>	<b>Sigla del tipo di reattore nucleare o del processo</b>	<b>Dati tecnici essenziali</b>
LWR	Light Water R	termico moderato ad acqua leggera
HWR	Heavy Water R	termico moderato ad acqua deuterata
BWR	Boiling Water R	ad acqua surriscaldata
PWR	Pressurized Water R	ad acqua surriscaldata ad alta pressione
PHWR	Pressurized Heavy Water R	ad acqua pesante ad alta pressione
ABWR	Advanced BWR	BWR avanzato Gen III+ o Gen IV
APWR	Advanced PWR	PWR avanzato Gen III+ o Gen IV
CANDU	CANadian Deuterium Uranium R	termico ad U naturale ed acqua pesante
MAGNOX	MAGNesium OXide	termico ad U naturale, grafite, gas
HTGR	High Temperature Gas R o Gen IV	ad alta temperatura raffreddato a gas
AHTR	Advanced HTR	ad alta temperatura avanzato
VHTR	Very High Temperature Gas R	ad alta temperatura raffreddato a gas
PBR	Pebble Bed R	raffreddato a gas con letto a sfere-grafite
FBR	Fast Breeder R	a spettro veloce autofertilizzante
PX	PHÉNIX	FBR Frances
SPX	SUPERPHÉNIX	FBR-LMFBR Italo-Francese
EPR	European Pressurized water R	Europeo AREVA-Siemens
IRIS	International R Innovative Sicure	PWR <i>Gen IV</i> , a partecipazione Italiana
PIUS	Process Inherent R Ultimate Safety	Svedese della ABB-Atom
ATR	Advanced Thermal R	Giapponese a MOX, moderato con D <sub>2</sub> O
AP1000	Advanced Passive PWR	PWR <i>Gen III+</i> , Westinghouse-Toshiba
RBMK*	versione sovietica di BWR	BWR sovietico, moderato a grafite
VVER	versione russa di PWR	PWR russo di nuova generazione
LMFR	Liquid Metal Fast R	veloce raffreddato con metallo liquido
MOX	Mixed OXide fuel	combustibile ri-processato in ossidi misti
UOT	Uranium Once Through	processo ad uranio a ciclo aperto

Il 13 Set 2004 l'US Nuclear Regulatory Commission (NRC) ha dato l'approvazione per la sua realizzazione (si tratta del 4° reattore della *Gen III+* ad ottenere tale licenza); data la modularità, la sua costruzione *in situ* richiederà solo 36 mesi.

In Giappone, Paese dove il 35% dell'energia elettrica è attualmente prodotto mediante

centrali nucleari, sono in costruzione numerosi nuovi impianti per portare tale percentuale al 60% entro il 2020, nonostante sporadici incidenti che hanno provocato alcune vittime negli ultimi anni, vittime dovute ad esplosioni ed ustioni da vapore surriscaldato e non a contaminazione od esposizione a radiazioni nucleari. In questo Paese superaffollato (*i.e.* popolazione doppia di quella Italiana su un territorio di pari superficie), l'entrata in esercizio di un reattore d'ultima generazione di tipo Advanced-BWR richiede attualmente 48 mesi dalla data di commissionamento.

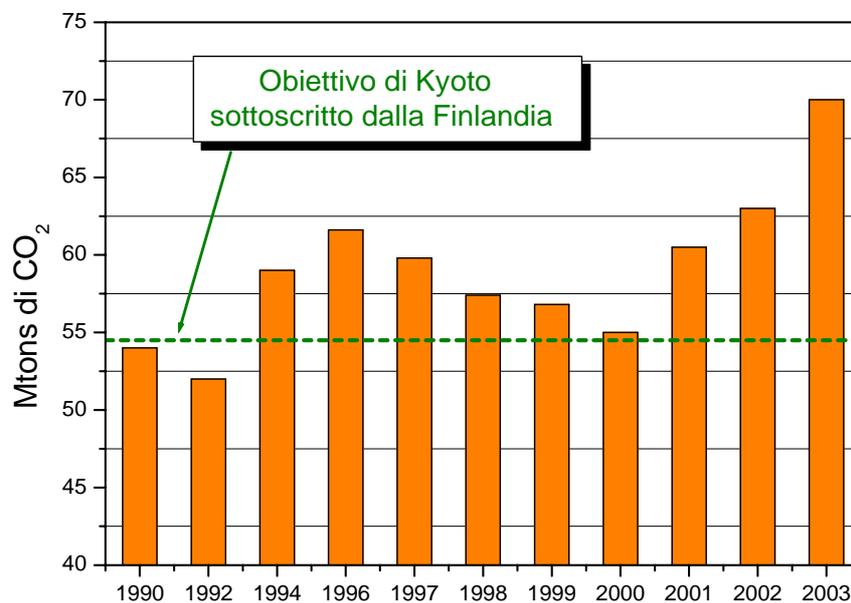
**TAB. 1 cont:** Tipi principali d'impianti e reattori nucleari, e loro acronimi.

U-Pu	Uranium-Plutonium	a processo uranio-plutonio
Th-U	Thorium-Uranium	start-up processo torio-uranio
Th-Pu	Thorio-Plutonio	start-up processo torio-plutonio
<i>LLW</i>	Low Level Waste	scorie di bassa radiotossicità ed emivita
<i>ILW</i>	Intermediate Level Waste	scorie a radiotossicità intermedia
<i>HLW</i>	High Level Waste	scorie ad alta radiotossicità/lunga emivita
TRIGA	Training Research and Isotopes GA	termico pulsato della General Atomics
ESSOR	Essais ORGEL test R	ad alto flusso del JRC-Ispira
ORGEL	Organic Liquid Heavy Water R	raffreddato con fluidi organici
Gen I	Generation I	della prima generazione ora <i>obsoleti</i>
<i>Gen II</i>	<i>Generation II</i>	attuali impianti di potenza, BWR o PWR
<i>Gen III</i>	<i>Generation III</i>	attuali impianti di potenza, BWR o PWR
<i>Gen III+</i>	<i>Generation III+</i>	LWR avanzati a sicurezza intrinseca
<i>Gen IV</i>	<i>Generation IV, 6 disegni</i>	avanzati a sicurezza intrinseca
1. VHTR	Very High T gas R of Gen IV	a gas a temperature molto alta, UOT
2. SCWR	Super Critical Water R of Gen IV	raffreddato a vapore super critico, UOT
3. MSR	Molten Salt R of Gen IV	raffreddato a sali fusi
4. GCR	Gas Cooled R of Gen IV	veloce raffreddato ad He
5. SFR	Sodium cooled Fast R of Gen IV	veloce raffreddato a Na, IFR
IFR	Integral Fast R	a metallo liquido
6. LFR	Lead cooled Fast R of Gen IV	veloce raffreddato a Pb o LBE
ELSY	European Lead-cooled System, LFR	LFR Europeo
SSTAR	Small Secure Transportable Autonomous R	International LFR

\* Il reattore di Chernobyl era un RBMK1000, senza barriere di contenimento

In Paesi emergenti come Cina, India e Corea del Sud, con una popolazione totale di ca. 2,5 miliardi di persone, i nuovi reattori nucleari di potenza in costruzione sono alcune decine.

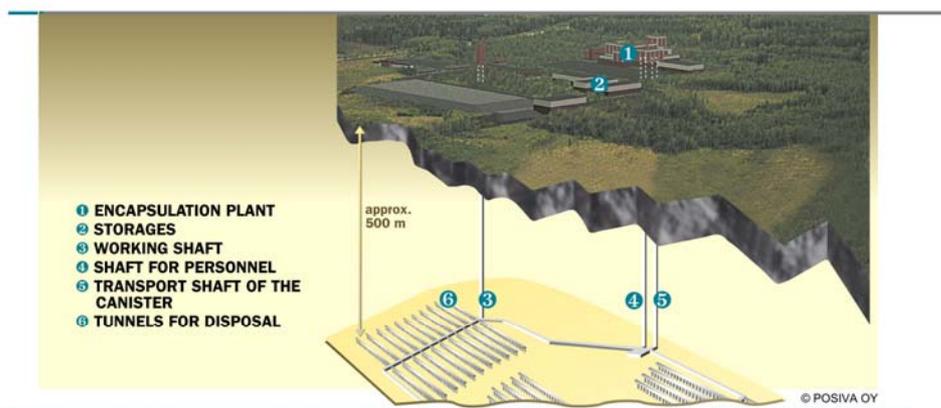
La Finlandia, Paese del Nord-Europa particolarmente attento alle problematiche ambientali, ha evidenziato l'impossibilità di rispettare il protocollo di Kyoto sull'immissione di gas serra nell'ambiente (FIG. 9). Per porre rimedio in maniera realistica a tale problema, nel Dic 2003, dopo approvazione da parte del Governo, il gestore elettrico Finlandese TVO (Teollisuuden Voima Oy) ha firmato un contratto col consorzio fra AREVA-Framatome ANP e Siemens (<http://www.aveva.com>) per la costruzione del primo reattore di concezione totalmente Europea, denominato EPR (European Pressurized water Reactor) da 1 600 MWe (netti) <sup>66)</sup>, interrompendo la stagnazione iniziata nei primi anni '90 del Novecento. Il consorzio ha attualmente 75 000 dipendenti, coinvolge 100 Paesi e prevede di completare l'impianto nel Mag 2009. Solo in Finlandia sono 150 le imprese che partecipano alla realizzazione dell'impianto. Le scorie saranno depositate in una repository gestita da Posiva Oy, posta a 500 m di profondità a 200 km a Nord-Ovest di Helsinki, già esistente senza rilevanti problemi d'accettazione da parte della popolazione (FIG. 10). Il sito nucleare di Olkiluoto, come si presentava all'inizio dei lavori (Dic 2003) e come si presenterà nel 2009 è rappresentato nelle FIGs. 11-13, mentre una vista schematica dell'EPR è rappresentata nelle FIGs. 14-15 <sup>71)</sup>. Questo evento è di straordinaria importanza per la Politica Energetica Europea, poiché i Paesi Nordici Europei si sono sempre dimostrati all'avanguardia nel settore della protezione ambientale e della salute dei propri cittadini.



**FIG. 9:** Andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> in Finlandia nell'ultimo decennio, ed obiettivi perseguiti da questo Paese per il raggiungimento dei limiti imposti dal protocollo di Kyoto (1997). L'abbondante superamento dei limiti di Kyoto, ha indotto il Governo Finlandese alla ripresa dei programmi nucleari interrotti a fine degli anni '80 del Novecento.

Sull'onda del successo Finlandese, nel 2007 inizierà la costruzione di un secondo esemplare di EPR presso il sito nucleare di Flamanville, nei pressi di Cherbourg nella penisola di Cotentin (Normandie, France), con un investimento già effettuato di 3 miliardi di Euro che raggiungeranno i 4,5 a fine progetto; l'impianto entrerà in funzione dopo 4 anni aggiungendosi ai 59 reattori Francesi già dislocati in 19 siti nucleari, a dimostrazione che anche in Francia, dove l'80% dell'energia elettrica è già di origine nucleare, sono previsti ulteriori incrementi nei consumi energetici negli anni a venire.

Bisogna aggiungere che numerosi Comuni Francesi si sono contesi accanitamente l'installazione del nuovo EPR sul proprio territorio, dimostrando come la percezione del rischio sia molto diversa da Paese a Paese. I costi stimati del *Decommissioning* dei siti nucleari Italiani è stimato pari a 10 miliardi di Euro (20 000 miliardi delle vecchie Lire), cioè pari al costo di costruzione di più di 3 nuovi impianti EPR. In pratica il nostro Paese è orientato a spendere denari pubblici per impedire la produzione di energie sul nostro territorio ed acquistarne viceversa all'estero, a pochi km dal confine Italiano, nonostante l'evidente spreco di denaro pubblico. Ovviamente, come dimostrato dall'incidente di Chernobyl, la radioattività non conosce confini e la vicinanza o la lontananza dal luogo di produzione ha effetti poco significativi sull'eventuale impatto ambientale e ciò si verifica sia nel caso della radioattività, sia nel caso di ogni altro tipo di agente inquinante chimico o biologico.



**FIG. 10:** Vista pittorica della repository Finlandese di Posiva Oy, la cui realizzazione è iniziata nel 1980. L'impianto si trova a 500 m di profondità nelle vicinanze del complesso nucleare di Olkiluoto, a Nord-Ovest di Helsinki. I complessi nucleari Finlandesi sono 2, con 6 unità di potenza in totale, e producono il 25,8% del fabbisogno interno di elettricità (2004).

### 3.4 La ripresa dei programmi nucleari Italiani

Dopo decenni di stagnazione, le cui origini sono *ampiamente antecedenti* alla moratoria antinucleare del 1987 il nostro Paese sta riprendendo con sempre più vigore i programmi nucleari, per ora al di fuori del territorio nazionale, sfruttando la robusta esperienza d'aziende come Ansaldo-Nucleare (GE) ed Ansaldo-Camozzi (BS e Sesto San Giovanni, MI) ed almeno altre 80 piccole e medie imprese (PMI). L'obiettivo dichiarato del Governo è di raggiungere l'autosufficienza energetica senza impostazioni dirette di energia elettronucleare dall'estero e di assestare il Paese su un 25% di energia elettronucleare, il che significa la costruzione di 8 unità di tipo **EPR** da **1,600 GWe**<sup>71)</sup>, oppure di **12** unità di tipo **AP1000** da **1,150 GWe**<sup>69,70)</sup>.



**FIG. 11:** Il sito nucleare Finlandese di Olkiluoto, come si presentava nel Dic 2003, all'inizio dei lavori di scavo per la realizzazione di OL3<sup>70,71)</sup>.

In questa prospettiva, nel Nov 2004 l'ENEL è diventato proprietario del 66% dell'ente elettronucleare slovacco **Slovenske Elektrarne** (SE) e sta già partecipando alla realizzazione e gestione di impianti nucleari per tale ente, essendo proprietario del 12% dell'impianto EPR di Flamanville; trattative sono inoltre in corso fra ENEL ed EDF per l'acquisto di una quota di centrali nucleari Francesi. Poiché l'ENEL non è più un Ente di Stato (la proprietà Statale su ENEL è scesa ulteriormente a solo il 20% nel Feb 2005), l'ENEL non è tenuto a rispettare i risultati del Referendum del 1987, che riguardavano esclusivamente la partecipazione di Enti Pubblici ai programmi nucleari internazionali.



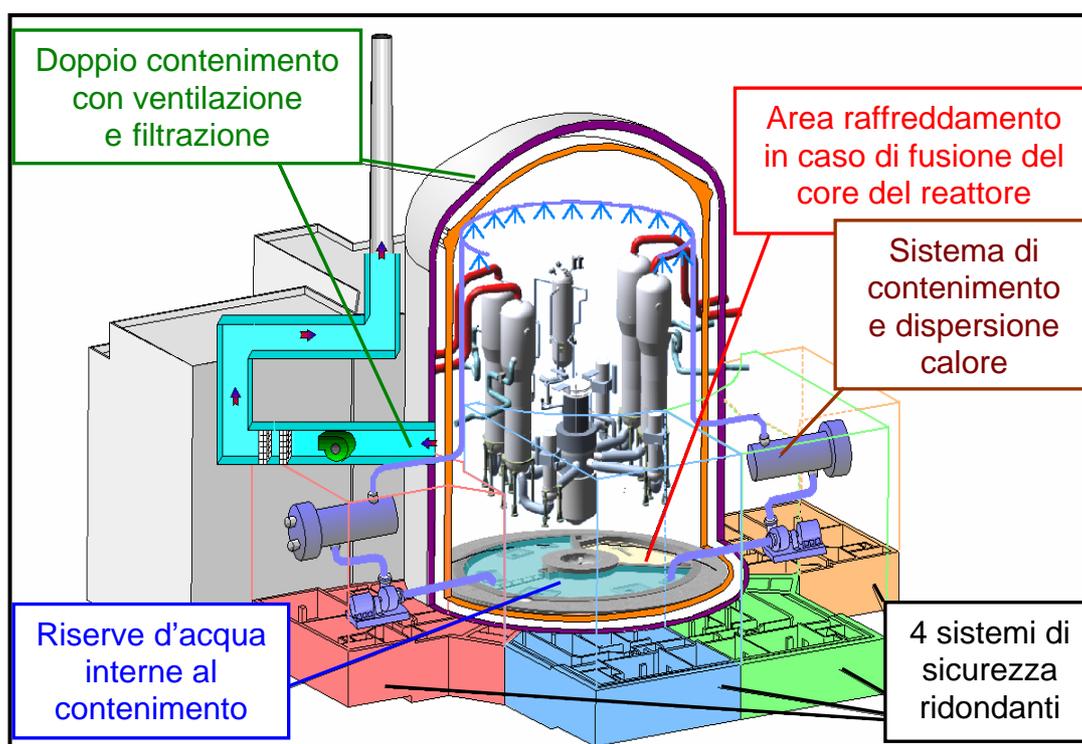
**FIG. 12:** Il sito nucleare Finlandese di Olkiluoto come si presentava nel Feb 2004, dopo i primi scavi per i lavori di costruzione della terza unità di potenza OL3.



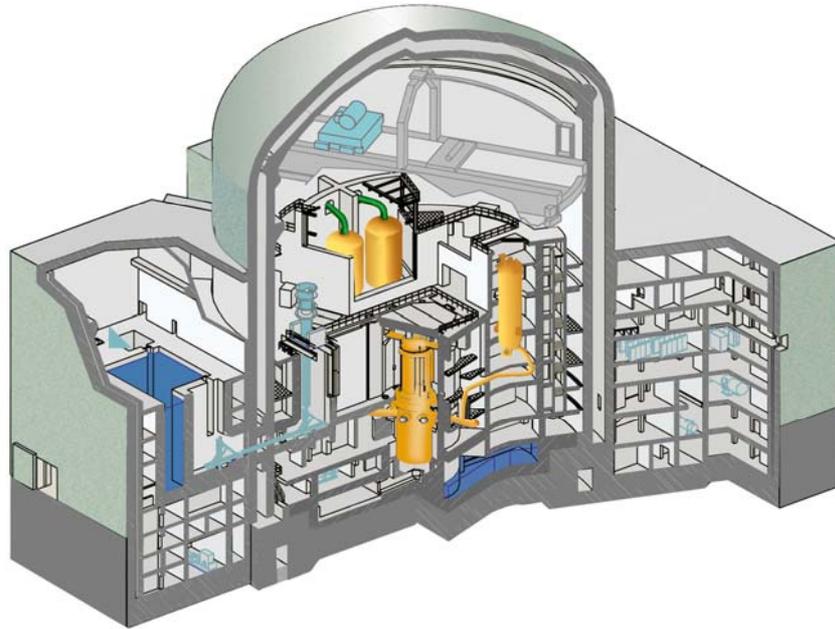
**FIG. 13:** Vista pittorica del sito nucleare di Olkiluoto, come si presenterà nel Mag 2009. Un secondo esemplare di EPR è stato commissionato e verrà installato a Flamanville, Francia.



**FIG. 14:** Spaccato prospettico dell'isola nucleare di OL3, il primo esemplare del reattore Europeo EPR ad acqua pressurizzata e sicurezza intrinseca che entrerà in funzione nel 2012.



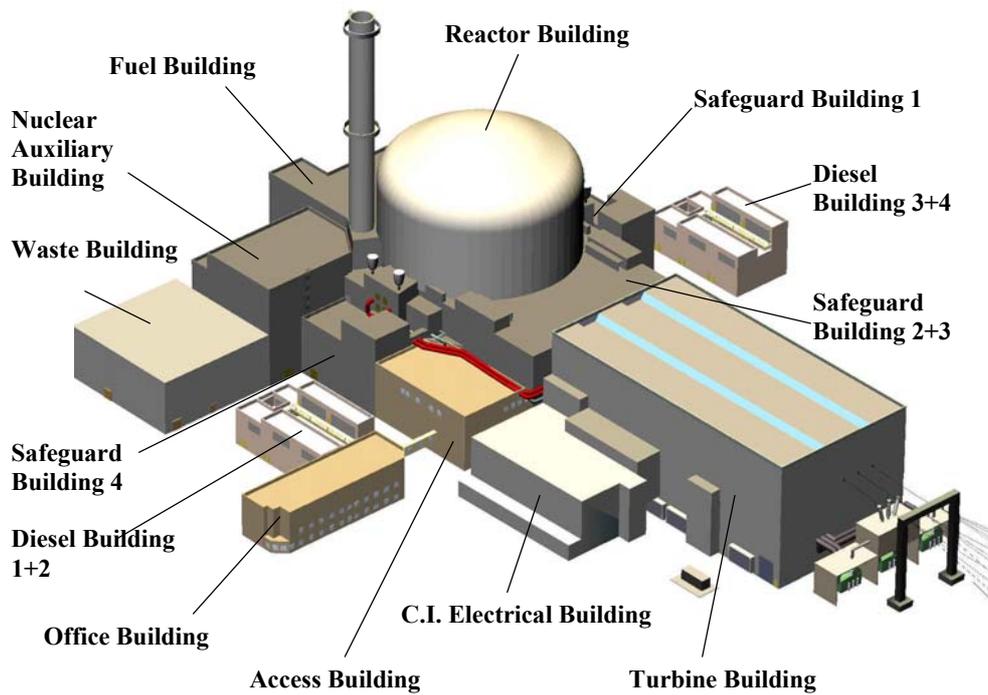
**FIG. 15:** Schema del reattore Europeo EPR della *Gen III+*. OL3, il primo esemplare di tale reattore, è in costruzione in Finlandia nel sito di Olkiluoto, 200 km a NO di Helsinki. Il reattore e' stato commissionato nel Dic 2003 e si affiancherà a 2 unità BWR della Westinghouse Atom.



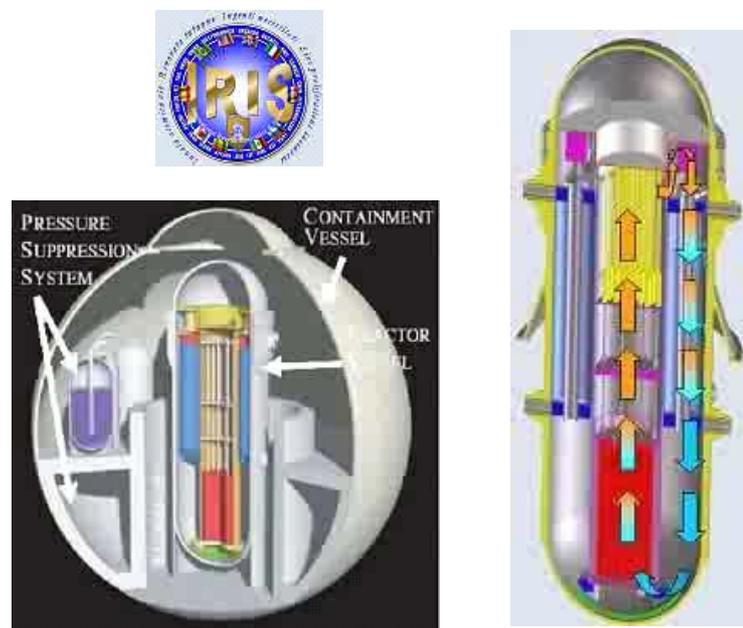
**FIG. 16:** Spaccato prospettico dell'edificio e dell'isola nucleare di OL3, il primo esemplare del reattore Europeo EPR ad acqua pressurizzata e sicurezza intrinseca.



**FIG. 17:** Spaccato prospettico dell'isola nucleare di OL3 e delle annesse turbine da 1 600 MWe (netti). E' evidente dalla figura e dal camion parcheggiato come le dimensioni dell'impianto siano molto contenute.



**FIG. 18:** Vista d'insieme dell'impianto nucleare di OL3 e degli impianti tecnici connessi. Altri esemplari di EPR sono in fase di progettazione in Francia.



**FIG. 19:** Il reattore IRIS della *Gen IV* è progettato da un consorzio internazionale di 10 Paesi con 21 Soci. Al progetto partecipano le Società del Gruppo Ansaldo e 4 Università Italiane. Appare particolarmente evidente la compattezza dell'impianto, con il core del reattore completamente inglobato nel vessel di contenimento <sup>72)</sup>.

Trattative sono altresì in corso con EDF (France) e British Nuclear Fuel Ltd. (BNFL, UK)) per lo stoccaggio definitivo delle scorie nucleari Italiane prodotte nel passato. Per ora, infatti, tali scorie non sembrano trovare sistemazione in una *repository nazionale*, a differenza di quanto avviene nei Paesi Europei più avanzati (e.g. proteste delle Comunità Locali a Scanzano Ionico, Catanzaro, 2003).

Fra le iniziative nucleari più avanzate, le Società del Gruppo Ansaldo partecipano assieme a 4 Università Italiane (Milano, Pisa, Roma, Torino), ad un consorzio di 10 Paesi (Brasile, Croazia, Messico, USA, Giappone, Lituania, Messico, UK, USA) per la progettazione del reattore **IRIS** (International Reactor Innovative and Sicure) della *Gen III+* (FIG. 19)<sup>72</sup>. Tali azioni sono d'estrema rilevanza per la politica energetica del nostro Paese, che finalmente sta avviandosi a recuperare il terreno perduto, non solo nel campo dell'approvvigionamento energetico, ma anche – come ricaduta indiretta - nel settore della protezione ambientale, della sanità e del miglioramento della qualità della vita.

#### 4 **SENSAZIONE DEL RISCHIO E RISCHIO OGGETTIVO**

Bisogna prendere atto che non è ragionevole ipotizzare che possa esistere una qualsiasi attività umana (od animale) priva di alcun rischio oggettivo (*i.e.* rischio reale). Il rischio è associato all'attività lavorativa, così come ai periodi di riposo o di svago. La credenza nell'utopia di una possibile vita priva di rischi, applicata in maniera acritica, ha portato tra l'altro ad elaborare il cosiddetto *Principio di Precauzione*, che è entrato prepotentemente anche nella legislazione di alcuni Paesi Europei. A titolo esplicativo, la semplice azione di uscire di casa ed attraversare la strada sulle *strisce pedonali* deve ritenersi ad alto rischio, visto che secondo l'ACI (Automobile Club d'Italia) ogni anno vengono investiti 16 000 pedoni – 45 al giorno - sugli attraversamenti pedonali e di questi 800 trovano la morte (6% del totale); tuttavia anche vivere esclusivamente all'interno della propria abitazione sarebbe a maggior ragione inaccettabile e rischioso, in quanto comporterebbe a sua volta innumerevoli riflessi negativi sulla salute, sul reddito, sulle relazioni sociali, sulla qualità della vita dello stesso interessato. In questo contesto, la già citata campagna contro l'elettrosmog, basata sul Principio di Precauzione, ha portato ad esiti paradossali e l'Italia ha adottato una legislazione molto più restrittiva di quella di ogni altro Paese Europeo, con elevati costi per il parziale adeguamento degli impianti esistenti ed un affare economico potenziale stimato conservativamente dell'ordine di 50 000 miliardi delle vecchie Lire (25 miliardi di Euro), qualora si decidesse che tutti gli attuali elettrodotti e piloni elettrici debbano essere adeguati alla legislazione e di conseguenza o eliminati od interrati.

Anche i rapporti eterosessuali dovrebbero essere considerati attività ad alto rischio, in quanto ad esempio la principale causa (99,7%) del tumore femminile alla cervice dell'utero (3,6% dei tumori femminili) con 470 000 nuovi casi l'anno al mondo e 25 000 in Europa (3 700 con 1 700 decessi in Italia), è una serie di agenti virali di origine biologica trasmessi sessualmente, gli *human papillomavirus (HPV) ad alto rischio*, nonostante la diagnosi precoce e gli interventi terapeutici abbiano ridotto drasticamente l'esito infausto negli ultimi

decennii e siano in fase di sviluppo efficienti vaccini <sup>73,74</sup>). Pertanto, in base al Principio di Precauzione, anche la riprocreazione eterosessuale con finalità esclusivamente riproduttiva dovrebbe essere bandita, in quanto causa ogni anno di un numero di vittime molto maggiore del virus HIV e della sindrome AIDS, vittime che in Italia sono in rapida decrescita a qualche centinaio l'anno (<http://www.ISS.it>).

Alla stessa stregua dovrebbero essere bandite attività ludiche o sportive come sci, alpinismo, sport acquatici, pugilato, calcio, maratona, che provocano ogni anno un numero di vittime non trascurabile.

In realtà, è ormai ampiamente acclarato come sensazione o *percezione* del rischio e rischio oggettivo siano due *concetti o fenomeni* percepiti dall'individuo e dal pubblico in maniera completamente diversa, in conseguenza della non completa razionalità della psiche umana. Le Compagnie d'Assicurazioni, perfettamente al corrente dei dati oggettivi (d'origine statistica), sono una fonte attendibile sulle varie tipologie di rischio, che si riflettono ovviamente sui costi delle polizze stesse. Bisogna evidenziare che una polizza contro il rischio nucleare (ove prevista), ha costi aggiuntivi essenzialmente nulli rispetto a quella per i rischi convenzionali, in quanto tale rischio è virtualmente inesistente e paragonabile a quello di un incidente di caccia o di essere colpiti da un meteorite. Alcuni semplici esempi - più volte citati - confermano tale constatazione:

- L'individuo umano medio teme i voli aerei molto più dei trasporti in automobile. In realtà, nella sola Italia avvengono più di 6 000 decessi su base annua, in seguito ad incidenti stradali (*i.e.* in crescente calo date le tecnologie emergenti ed innovative, e la legislazione stradale sempre più restrittiva). Le morti erano più di 8 500 all'anno solo pochi anni orsono. I feriti e gli infermi causati da tali incidenti sono molte decine di migliaia ogni anno.
- Gli incidenti ferroviari hanno provocato più vittime in Italia e su scala planetaria degli incidenti aerei, anche se il treno è ritenuto un mezzo di trasporto molto sicuro. Nonostante ciò, l'individuo medio teme di più i viaggi aerei che quelli su treno od automobile. I mezzi a due ruote (cicli e motocicli) sono ancora più pericolosi di quelli a quattro ruote.
- Gli incidenti astronautici sono rarissimi ed hanno provocato poche decine di vittime in oltre 40 anni, eppure colpiscono profondamente l'immaginario collettivo (Shuttle Challenger 1986 e Columbia 2003). Altrettanto rari, ma ad alto impatto emotivo, sono i disastri navali sia civili (Titanic 1912 e la nave ospedale sorella Britannic 1916, Andrea Doria 1956), sia militari (sommersibile nucleare Kursk 2000). I calcoli vanno compiuti per unità di tempo di trasporto e non di distanza, altrimenti i trasporti lenti (automobilistici, ferroviari, navali) sarebbero ulteriormente penalizzati rispetto a quelli veloci (aerei ed astronautici).
- L'individuo umano medio teme malattie rare, che causano poche vittime su scala planetaria (*e.g.* BSA o *morbo della mucca pazza*, SARS o *Severe Acute Respiratory Syndrome*), molto più di malattie a larga diffusione (*e.g.* colera, dengue, febbre gialla, malaria, morbillo, parassitosi endemiche, varie forme di epatite), che causano viceversa milioni di vittime ogni anno <sup>73-75</sup>). Sono peraltro più di 30 le *nuove malattie epidemiche* insorte a partire dagli anni '70 del Novecento, probabilmente di origine animale e diffuse nelle grandi aree urbane in conseguenza della promiscuità e dell'elevata densità abitativa.

- Solo in Italia si verificano annualmente 3 000 decessi per la tubercolosi infantile e degli adulti (TBC), nonostante l'opinione diffusa che tale malattia sia stata sconfitta da tempo con la scoperta degli antibiotici streptomina (1940), isoniazide (1950), etambutolo (1960) e rifampina (1970), *i.e.* negli anni '20 del Novecento le vittime nella sola Italia erano 60 000 l'anno. Attualmente i casi di TBC in USA colpiscono prevalentemente gli ultrasessantacinquenni e sono ancora 23 000 all'anno <sup>73)</sup>.
- Ogni anno, negli Ospedali Italiani si riscontrano, secondo dati del Ministero della Salute, 15 000 decessi in conseguenza di setticemie (infezioni) contratte *durante* il periodo di ricovero, pari al 3% delle 500 000 ospedalizzazioni che avvengono ogni anno.
- In Australia, Canada, SudAfrica, USA, la psicosi sulla sterilità di cibi e bevande è un fenomeno sociale molto diffuso, con enormi aspetti economici (*vedasi i controlli accurati alle frontiere ed alle dogane relativamente all'import di cibi, semi, bevande*). Nonostante le innumerevoli precauzioni e la legislazione estremamente attenta, negli USA si verificano annualmente 14 milioni di casi d'intossicazione alimentare da parassiti d'origine biologica (*Salmonella enteritidis o enterica ed altri 2 200 tipi di Salmonella, inoltre Escherichia coli, Listeria monocytogenes, ed altri 100 agenti patogeni biologici*), con 60 000 ricoveri seguiti da 1 800 decessi <sup>20)</sup>. Dati attendibili relativamente alla situazione Italiana sono irripetibili, contraddittori o comunque sottovalutati dalle fonti d'informazione (si ricordino i casi mortali di *colera, salmonellosi, gastroenterite acuta, brucellosi*, che solo in casi particolarmente gravi sono riportati dalle cronache).
- Le malattie endemiche dovute al consumo d'uova crude, hanno provocato grave allarme da parte dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS, World Health Organization WHO), così come le recenti pandemie diffuse dalle carni avicole in varie zone geografiche del mondo (*Salmonella gallinarum e Salmonella pullorum*). Nonostante ciò, il consumo mondiale annuo sia di uova sia di pollame è in costante aumento ed ha raggiunto i 20 kg pro-capite (260 uova all'anno per abitante, con ampie variazioni nelle varie aree geografiche del Pianeta).
- I parassiti dei vegetali (*i.e.* pest) e degli animali, spesso trasmissibili all'uomo, provocano ogni anno danni incalcolabili alle colture agricole ed agli allevamenti del Nord America e danno quindi adito ad una capillare azione di controllo alle frontiere.
- Fra gli animali che provocano più vittime ogni anno su scala mondiale sono alcune specie di serpenti (20 000 vittime.a<sup>-1</sup>), meduse ed insetti (2-3 milioni di vittime.a<sup>-1</sup> per la sola malaria, molte centinaia di vittime solo negli USA per punture da parte di api) e non già le bestie ritenute feroci quali tigri, leoni, coccodrilli e squali (questi ultimi provocano meno di 10 vittime.a<sup>-1</sup> in tutto il mondo su un totale di 50 attacchi), contrariamente a ciò che è portato a ritenere l'immaginario collettivo. Gli attacchi ed azzannamenti dovuti ai cani - i migliori amici dell'uomo - sono viceversa in numero molto elevato (~ 4 000 casi.a<sup>-1</sup> denunciati nel solo Comune di Roma, 70 000 in Italia, 4 milioni in USA) e riguardano specialmente i bambini fra 5 e 9 anni (morsicature al viso data la bassa statura) e gli anziani.
- I decessi correlati al fumo (70 000 all'anno in Italia), all'alcool (30 000 all'anno in Italia), ad abitudini alimentari non corrette, all'impiego di droghe d'abuso, sono enormemente

superiori agli stessi incidenti stradali, nonostante le pressanti campagne di sensibilizzazione.

- Nel solo 2003, l'AIDS ha causato 3 milioni (2,8 – 3,5) di decessi su scala planetaria, su 42 milioni di casi d'infezione da virus HIV, e l'OMS prevede che le vittime su scala planetaria raggiungeranno i 68 milioni entro il 2020. Poco consola sapere (una visione egocentrica dei problemi è sempre in agguato) che la maggior parte di questi decessi si è verificato ed avverrà in Paesi esotici del 3° e 4° mondo, in quanto le vittime di tale sindrome in Europa e Nord America sono comunque superiori a quelle causate dagli stessi incidenti stradali. Tuttavia, l'individuo medio si sente poco toccato da tale malanno poiché si ritiene erroneamente che esso colpisca soltanto gruppi sociali ben identificati, denominati comunemente *a rischio*. Tale convinzione valida 20 anni orsono all'insorgenza della sindrome è ora smentita dai dati epidemiologici nazionali ed internazionali (OMS ed ONU).

- L'individuo medio sembra temere l'energia nucleare più del fuoco o dell'acqua o del vento: eppure solo in Italia si verificano annualmente dai 160 ai 180 decessi dovuti ad esplosioni di gas infiammabili compressi per uso domestico (metano, GPL, gas di città). Come sempre, ai decessi devono essere sommate le lesioni agli individui ed i danni materiali spesso ingenti. Nonostante ciò, il gas naturale ed il metano vengono importati allo stato liquido su imponenti *navi gasiere* che approdano presso i principali scali portuali Italiani (Genova, Livorno, Taranto, Venezia). Le vittime d'incendi boschivi o d'abitazioni non rientrano in tali valutazioni, in quanto spesso tali eventi vengono considerati ineluttabili fenomeni naturali.

- Come già ricordato, limitatamente all'Italia, l'energia idroelettrica ha provocato ca. 600 vittime nel 1923 (Gleno, Brescia, Lombardia) e più di 2 000 vittime nel 1963 (Vajont, Pordenone, Friuli) <sup>1)</sup> e le dighe e bacini idroelettrici in esercizio in Italia sono ~ 10 000 (2004) e solo 800 fra queste sono dotate di un presidio umano permanente. I disastri idroelettrici minori sono ricordati raramente (Stava-Tesero, Val di Fiemme, 268 morti nel 1985).

Malgrado i precedenti che si sono verificati frequentemente in molti Paesi del Globo, la Cina ha recentemente realizzato a tempi di record la costruzione della più grande diga idroelettrica del mondo, che prevede tra l'altro la deviazione del fiume Yangtze collegandolo con lo Huang He (fiume Giallo), con un dissesto idrogeologico che è già stimato essere senza precedenti. Tale diga, che ha comportato l'eliminazione per inondazione programmata di intere città e villaggi, alimenta 26 turbine da 700 MWe ciascuna (totale 18 GWe), con una potenza elettrica pari al 33% di quella attualmente disponibile in Italia (55 GWe, 2009). I programmi di sviluppo idroelettrico della Cina sono peraltro molto diversificati e distribuiti sull'intero territorio nazionale.

- Trascuriamo conservativamente le esondazioni disastrose sempre più frequenti, le cui vittime in Italia sono state fortunatamente in numero limitato. Gli uragani in Italia sono un fenomeno raro, ma non altrettanto negli USA in Giappone e nelle aree oceaniche dove sono all'ordine del giorno, come ha mostrato la disastrosa alluvione e la distruzione della città di New Orleans (Louisiana, USA) del 31 Ago 2005, che ha provocato un migliaia di vittime ed enormi danni materiali. Lo *tsunami* avvenuto il 26 Dic 2004 nell'Oceano Indiano, ha

comportato un bilancio provvisorio di quasi 300 000 vittime nelle aree circostanti l'Oceano Indiano. Tutti gli osservatori sono concordi nell'affermare che una maggiore disponibilità energetica e quindi una rete più efficiente di comunicazioni civili e militari, o almeno una rete informativa più trasparente, avrebbero potuto ridimensionare ampiamente il disastro.

- E' infine di attualità il più colossale disastro ecologico mai avvenuto in seguito alla fuoruscita di greggio nel Golfo del Messico nella primavera del 2010.

**TAB. 2:** Rateo di Dose medio nell'anno 2000 (unità  $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ ), dovuto a diverse sorgenti di radiazioni ionizzanti, secondo il rapporto UNSCEAR 2000 del United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, e anni del rilascio dalle varie sorgenti <sup>31,44</sup> .

Sorgente	Dose Rate 2000	Attività nell'atmosfera	Anno/i del rilascio
Fondo naturale medio	2,4		
Diagnostica Medica	0,4		
<i>Test con Armi Nucleari</i>	0,005	2 600 000 PBq	Fino agli anni 1960
<i>Incidente di TMI</i>	0	0,001 PBq	1979
<i>Incidente di Chernobyl</i>	0,002	2 000 PBq	1986
Ciclo Combustibile	0,0002	3 400 PBq	Fino al 1998
Reattori Nucleari		3 900 PBq	Fino al 1998

Il Premio Nobel per la Chimica 1951 Glen(n) Theodor Seaborg (1912-1999), scopritore dei primi 5 elementi transuranici, ha dichiarato prima di morire per i postumi di un infarto alla veneranda età di 87 anni, dopo aver manipolato sostanze radioattive per tutta la vita <sup>66)</sup>:

1) *La convinzione che il plutonio sia la “sostanza più tossica conosciuta dall'uomo” è falsa. Molte sostanze biologiche come il Bacillo Botulino, sono di molti ordini di grandezza più tossiche a breve termine. Di ca. 50 lavoratori esposti professionalmente a contaminazione da plutonio, seguiti dal punto di vista clinico per ca. 50 anni, solo 1 ha contratto un tumore osseo.*

2) *Le acque contaminate da radioisotopi possono essere efficientemente decontaminate mediante impiego di resine a scambio ionico. Tale processo avviene naturalmente anche in certe rocce naturali.*

3) *La Yukka Mountain nel Nevada è un sito geologicamente sicuro per lo stoccaggio delle scorie nucleari <sup>#</sup>. L'NRC sta attualmente prendendo questa decisione. I calcoli hanno*

<sup>#</sup> John Kerry candidato 2004 del Partito Democratico USA alla Casa Bianca, pur schierandosi apertamente a favore dei programmi nucleari energetici USA, durante la campagna elettorale si era dichiarato critico nei confronti della *national repository* della Yukka Mountain, la cui apertura era invece sostenuta dall'Amministrazione del Presidente uscente e poi riletto George W. Bush. A tuttoggi con l'amministrazione Obama il deposito è in attesa di entrata in esercizio.

*dimostrato che la stessa quantità d'elettricità prodotta mediante combustione di carbone, provoca un numero di vittime 10 000 volte maggiore rispetto a quella prodotta con metodi nucleari.*

#### 4.1 Hormesys, od ormesi, e farmaci miracolosi

Gli esordi della radioattività hanno portato talvolta ad operazioni commerciali spregiudicate e assolutamente prive di fondamenti scientifici, come peraltro accade oggi con gli asseriti poteri terapeutici dei *campi magnetici* \*, dei *farmaci omeopatici* dalla improbabile efficacia \* o di svariatissime *medicine alternative* le cui proprietà terapeutiche sono prive di qualsiasi fondamento scientifico od efficacia provata \*. Questo avvenne nel caso del *Radio-Vitale*, un farmaco radioattivo ritenuto prodigioso per l'improbabile e mai provata cura di svariate patologie quali anemia, asma, eritema, distribuito in Italia a partire dal 1923 dalla nota casa Bolognese A. Gazzoni e C. (la stessa delle ormai mitiche Idrolitina e Pasticca del Re Sole) con certificazione d'autenticità di Madam Curie, del Sen. O.M. Corbino e consigliato da insigni medici dell'epoca (in pratica si trattava di pasticche contenenti cloruro

---

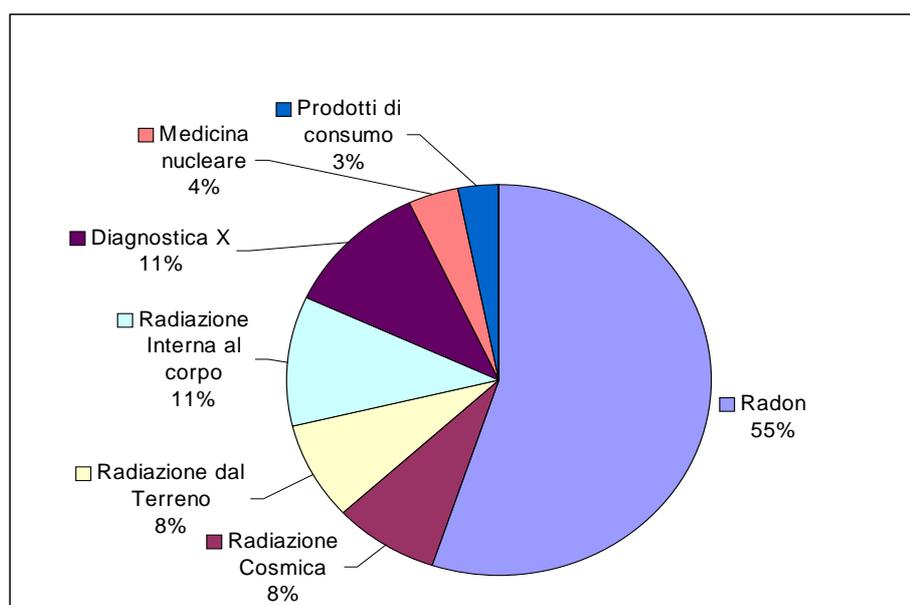
\* Come già osservato, la legislazione Italiana è la più restrittiva al Mondo nel settore dei campi elettromagnetici a bassa frequenza (ELECTromagnetic Fields, ELF), tuttavia paradossalmente e senza alcuna prova scientifica, gli stessi campi magnetici sono ampiamente pubblicizzati in maniera spregiudicata per poco probabili e comunque non provate proprietà terapeutiche.

\* La medicina *omeopatica* (dal greco ομοιος παθος, simile malattia) fondata/inventata dal Medico Tedesco Samuel Hahnemann (1755-1843) si basa sul principio *similia similibus curantur* (i simili curano i simili), in contrapposizione al principio *contraria contrariis curantur* sostenuto dai seguaci del Medico del III Secolo Claudio Galeno (medicina *allopatrica* da αλλος, altro); in questo contesto i composti di arsenico estremamente diluiti sarebbe comunque efficaci nella cura delle intossicazioni da parte di questo elemento. Inoltre la medicina omeopatica si basa sulla convinzione priva di qualsiasi significato scientifico che un composto chimico dotato di attività farmacologica possa mantenere tale attività anche dopo elevata diluizione nel solvente. Dopo un numero molto elevato di diluizioni, nella soluzione *non sono più contenute* molecole del farmaco stesso (limite di Avogadro, o diluizione infinita), tuttavia tali soluzioni continuerebbero ad esercitare l'effetto terapeutico. Per spiegare tale fenomeno, il Biologo Francese Jacques Benveniste elaborò una teoria denominata della *Memoria dell'Acqua* che ebbe un certo scalpore negli anni '90 del Novecento, secondo la quale l'acqua pur non contenendo più molecole del composto originario, continuerebbe a mantenere comunque la memoria delle molecole stesse e quindi ad esercitare gli stessi effetti biologici (*metabiochimica, molecular memory*); le ricerche – poi clamorosamente smentite in quanto frutto di semplici fluttuazioni statistiche – nonché gli stessi collaboratori di Benveniste erano finanziate da industrie produttrici di farmaci omeopatici (<http://www.amasci.com/freenrg/digibio.html>). Paradossalmente i farmaci omeopatici, che non contenendo alcun medicamento o che contenendolo in tracce dovrebbero avere costi praticamente nulli a parte il confezionamento e la pubblicità, hanno costi di mercato molto superiori rispetto ai farmaci convenzionali. Poiché ogni paziente deve essere considerato una entità a se assolutamente specifica ed irripetibile, ogni terapia omeopatica deve essere personalizzata dal medico omeopata (medicina olistica), il quale ovviamente personalizza anche le parcelle presentate al paziente. Il 27 Ago 2005 è stato pubblicato su *Lancet* il risultato di uno studio compiuto da studiosi dell'Università di Berna, secondo cui l'omeopatia si basa esclusivamente sull'effetto *placebo*, cioè sull'autoconvincimento da parte del paziente. Ciò elimina i rischi tossicologici associati all'impiego di medicinali omeopatici, ma non il danno alle finanze degli interessati <sup>75)</sup>.

\* Ogni anno continuano ad essere sterminati rinoceronti, tigri ed altre specie a rischio d'estinzione, per l'estrazione di piccole quantità di *presunti medicinali* (o afrodisiaci) facenti parte dell'armamentario della medicina tradizionale africana, cinese e sud-asiatica. Alcuni fra questi vengono importati spesso clandestinamente e commercializzati anche in Italia, normalmente a prezzi esorbitanti (vedi anche nota sulla New Age a pag. 3).

e/o solfato di radio, il primo solubile, il secondo estremamente poco solubile, caratterizzati quindi da biodistribuzione e radiotossicità estremamente diversi), del *Radiomittolo* distribuito dalla stessa casa, della sedativa e rassodante *Radiocremeline*, oppure del *Tho-Radia* un prodotto distribuito in Francia come crema di bellezza (a base di torio e radio, creata dall'inesistente Dr. Alfred Curie), della crema *Activa*, della *Radioaktive Zahncreme* un dentifricio debolmente radioattivo distribuito in Germania (ed utilizzato da James Chadwick - studente in Germania - come sorgente di radiazioni nei suoi esperimenti scientifici durante un periodo di prigionia di 4 anni a Berlino durante la I Guerra Mondiale)<sup>56,58</sup>, ed ancora della *Tubéradine* per curare la bronchite, della *Digéradine* per favorire la digestione, della *Vigoradine* per lottare contro la fatica, delle compresse di *Radiumcure* per calmare il dolore e impedire le infiammazioni, delle pillole *Radiovie* consigliate agli anemici.

Peraltro, ancora oggi in numerose località termali o Spa Europee (Austria, Italia \*\*, Repubblica Ceca, Ungheria e altre nell'intera Mittel-Europa), vengono vantate le proprietà terapeutiche di acque sorgive e fanghi radioattivi, ed i *pazienti* si recano in gallerie sotterranee ricche del gas radioattivo radon (gallerie talvolta denominate *emanatoria*, dal primo nome del <sup>222</sup>Rn) per usufruire dei vantati effetti benefici delle radiazioni emesse da questo gas e dai suoi discendenti radioattivi.



**FIG. 20:** Contributi percentuali di diverse sorgenti di radiazione alla dose efficace media totale alla popolazione degli USA <sup>76</sup>).

\*\* Gli autori hanno misurato personalmente (luglio 2004) l'elevato contenuto di <sup>222</sup>Rn (e dei suoi discendenti radioattivi) naturali presente nelle acque termali di Bormio (Valtellina). Tali acque, che sgorgano calde alla sorgente ad alta quota, ritenute benefiche per secoli dalle popolazioni locali, hanno fatto fiorire una rigogliosa industria turistica. Acque e fanghi radioattivi sgorgano a Boario Terme, Chianciano Terme, Ischia ed in ogni area geografica Italiana ad elevata attività geotermica (Campi Flegrei, Larderello e Monte Amiata, zone Etna e Vesuviana).

Per la verità oggi si ritiene che il 55% della dose naturale da radiazioni negli USA sia dovuta proprio al  $^{222}\text{Rn}$  (FIG. 20) \*, con grande variabilità nelle varie zone geografiche del globo. Sempre negli USA il prezzo delle abitazioni è condizionato da una certificazione del contenuto di  $^{222}\text{Rn}$  negli ambienti, la misura della cui concentrazione costituisce un florido mercato. Si noti che il contributo alla dose annuale dovuto all'industria nucleare non è neppure riportato in FIG. 20 in quanto trascurabile rispetto agli altri contributi. Va ricordato che molti studiosi, sostenitori della teoria dell'*ormesi* da radiazioni (*hormesis* da *ormone*, dal Greco **ορμόνη** che significa letteralmente *stimolo*), ritengono di aver dimostrato come *basse dosi* di radiazioni ionizzanti abbiano un *effetto protettivo sui sistemi biologici* (risposta adattiva, adaptive response)<sup>75,77-79</sup>, come sembrerebbe dimostrare la longevità di popolazioni che risiedono da millenni in zone geografiche con elevatissimi (rispetto agli standard radioprotezionistici) fondi naturali di radiazioni terrestri o cosmiche (Iran, popolazioni Andine e del Tibet, popolazioni che vivono in zone ad elevata attività geotermica, vulcanica e sismica con elevati livelli di radioattività naturale, quali quelle citate nella sezione precedente) \*. Allo stesso modo, non verrebbero riscontrate variazioni significative rispetto alla media, nell'incidenza di tumori in popolazioni che risiedono in zone ad elevatissimo fondo di radioattività ambientale naturale. I sostenitori dell'*ormesi* da radiazioni avrebbero evidenziato inoltre una particolare resistenza a patologie tumorali da parte di gruppi selezionati di popolazioni che hanno subito delle rilevanti contaminazioni radioattive negli ultimi decenni in seguito ad incidenti radiologici \*\*. Anche in Italia il  $^{222}\text{Rn}$  è presente, seppur in concentrazioni variabili da regione a regione (vedi FIG. 21) e da località a località ed ovviamente la sua presenza non ha nulla a che fare con la presenza di basi militari sul territorio <sup>76</sup>.

I sostenitori della teoria dell'*ormesi*, evidenziano peraltro come la specie umana e le altre specie animali terrestri si siano sviluppate e vivano in un ambiente naturalmente radioattivo (radioattività nella crosta terrestre, da elementi essenziali radioattivi come il potassio ( $^{40}\text{K}$ ), raggi cosmici, neutrini, particelle esotiche, materia oscura) e che l'ipotesi cautelativa denominata LNT (Linear No Threshold), utilizzata nel settore radioprotezionistico, oltre che priva di una qualsiasi base scientifica (tale ipotesi si basa ancora sul già citato Principio di Precauzione), possa essere addirittura controproducente per la salute degli individui. Negli USA, Paesi dove il valore di mercato di un immobile può

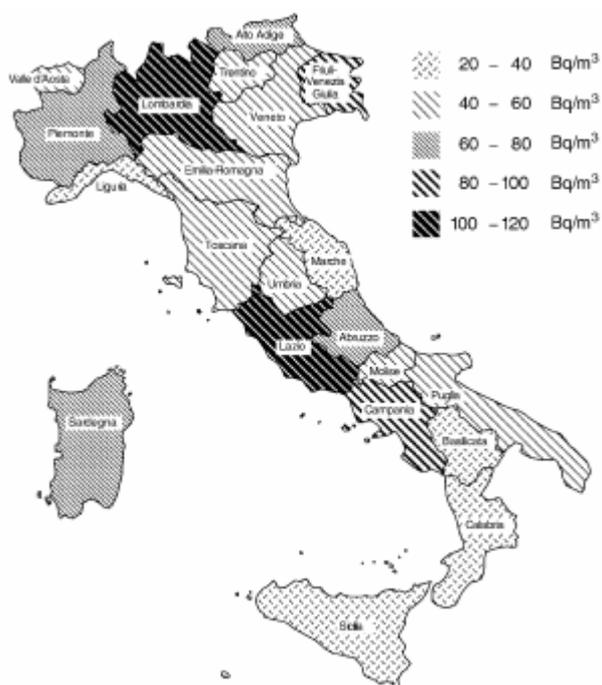
---

\* In realtà la quasi totalità della dose (detta di immersione) dovuta alla respirazione del gas  $^{222}\text{Rn}$  è dovuta ai suoi discendenti radioattivi a vita breve (radionuclidi di At, Bi, Pb, Po, Tl); infatti il  $^{222}\text{Rn}$  inspirato, viene espirato per la quasi totalità con la frequenza della respirazione umana, mentre i suoi discendenti radioattivi si formano rapidamente e decadono con emissione alfa, anche nelle zone più profonde del sistema polmonare (alveoli).

\* Le due regioni Italiane con fondi naturali di  $^{222}\text{Rn}$  nelle abitazioni più elevati sono Lombardia e Lazio, mentre per Calabria e Sicilia mancano dati quantitativi (FIG. 21).

\*\* Nel 1982-1984 si verificò una contaminazione accidentale da parte di  $^{60}\text{Co}$  di barre d'acciaio utilizzate per la costruzione di 180 edifici di Taiwan (divisi in 1 700 appartamenti), con esposizione cronica a radiazioni di almeno 10 000 individui in un periodo variabile fra 9 e 21 anni. La contaminazione fu scoperta nel 1992 ed i ratei di dose agli individui esposti sono risultate comprese fra 50 e 600  $\text{mGy}\cdot\text{a}^{-1}$ , superiori alle dosi medie impartite ai sopravvissuti dei bombardamenti nucleari sul Giappone e molto superiori a quelle assorbite dai liquidators dell'incidente di Chernobyl. Nella popolazione esposta, anziché il previsto incremento di casi di leucemia e tumori solidi, si è avuto un calo del 3% rispetto alla media nazionale di Taiwan di tali patologie.

diminuire sensibilmente in caso siano riscontrate elevate concentrazioni di radon *in-door*, è al contempo e paradossalmente molto fiorente l'industria dell'ormesi, che prevede l'esposizione dei *pazienti* a  $^{222}\text{Rn}$  in miniere abbandonate o cunicoli sotterranei scarsamente ventilati. Numerosissimi cittadini statunitensi quindi pagano profumatamente per abitare in appartamenti con basse concentrazioni naturali di radon e pagano nuovamente per esporsi volontariamente allo stesso gas radon in miniere abbandonate. Questo evidente paradosso dimostra ancora una volta a quali comportamenti contraddittori possa portare un approccio irrazionale a certe tecnologie e conoscenze su argomenti controversi.



**FIG. 21:** Sulla base degli esiti di una recente campagna nazionale di misure sul campo, il valore medio della concentrazione di radon in aria nelle abitazioni italiane è risultato di  $77 \text{ Bq.m}^{-3}$ . La dose efficace alla popolazione risulta pari a  $1,5 \text{ mSv.a}^{-1}$  <sup>79)</sup>. Le percentuali di case con concentrazioni superiori a  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  o a  $400 \text{ Bq.m}^{-3}$  sono rispettivamente il 5% e l'1%. Un livello di  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  implica una dose efficace di  $3 \text{ mSv.a}^{-1}$ , da confrontarsi con la dose massima ammissibile per la popolazione di  $1 \text{ mSv.a}^{-1}$ , a dimostrazione ulteriore del fatto che la normativa di radioprotezione attualmente in vigore è estremamente cautelativa.

## 5 UN REATTORE NUCLEARE NON E' UNA BOMBA E PERTANTO NON PUO' ESPLODERE

L'incidente nucleare più grave (incidente radiologico di livello 7 nella scala INIS o severe nuclear accident) è ritenuto ad esempio quello dovuto alla fusione parziale o totale del nocciolo (*core o corundum*) del reattore nucleare conseguenza di una perdita parziale o totale dei fluidi di raffreddamento o **LOCA** (Loss Of Coolant Accident) <sup>47,48)</sup>. Tuttavia, un reattore nucleare, **non** è un ordigno militare e pertanto **non** può dare luogo ad un esplosione nucleare anche in caso di *fusione del core*, come previsto dalla teoria <sup>13,28,32,45-48)</sup> e come hanno poi dimostrato in maniera definitiva gli **unic** 2 incidenti di qualche rilevanza in oltre un cinquantennio dell'Era Nucleare, quello *senza vittime* di Three Mile Island TMI (1979) • <sup>76)</sup> e

• Il 28 Mar 1979 si verificò un LOCA, con parziale fusione del nocciolo dell'unità TMI-2 del Complesso Nucleare di Three Mile Island, Harrisburg, PA, USA, con fuoriuscita di quantità di radioattività insufficienti per

quello di Chernobyl (1986), che ha comportato un numero *globale* di vittime inferiore a 100 (cento) secondo le più recenti stime dell'ONU, dell'IAEA e della NEA-OECD, anche tenendo conto delle proiezioni nei decenni successivi<sup>31,47,76,80-82</sup>). Tali incidenti hanno quindi sfatato il mito della *sindrome cinese*\*, che aveva alimentato la fantasia di scrittori di fantascienza e contribuito ad arricchire registi spregiudicati ed incrementare la popolarità d'attori di film di cassetta<sup>83</sup>). In entrambi i casi, la parziale fusione del nocciolo del reattore non fu causata da un'esplosione nucleare (né la provocò successivamente), bensì da un'esplosione chimica dovuta a malfunzionamento elettromeccanico nel primo caso ed un incendio nel secondo.

La distinzione fra i due tipi di eventi esplosivi non è affatto trascurabile, un'esplosione nucleare è conseguenza di una reazione nucleare a catena incontrollata estremamente rapida (come avviene negli ordigni nucleari), mentre un'esplosione di tipo chimico di gas od altro è un processo non nucleare, che può talvolta essere altrettanto distruttivo e che si può verificare sia in impianti nucleari sia in impianti non nucleari convenzionali (gas combustibili, depositi di carburante).

Gli altri incidenti nucleari minori dell'industria energetica nucleare (1 all'anno in oltre 50 anni) hanno provocato un numero limitatissimo di vittime (qualche decina e *mai* per esposizione a radiazioni) e danni materiali trascurabili. Il contributo alla dose da radiazioni alla popolazione è misurabile ed è sempre stato molto inferiore (di fatto trascurabile) – escluso l'incidente di Chernobyl - al fondo naturale da radiazioni d'origine cosmica o terrestre, compresa l'esposizione a radiazioni per radiodiagnostica medica, come è riassunto quantitativamente in TAB. 2. Malgrado questa evidenza, una fiorente filmografia ha tentato di avvalorare la pericolosità degli impianti nucleari e delle attività umane ad essi collegate, come nel caso del film *Silwood* del 1983, interpretato dall'attrice politicamente impegnata sul fronte antinucleare Meryl Streep e dal noto attore di fantascienza Kurt Russell.

Le applicazioni militari dell'energia del nucleo, superata positivamente la *guerra fredda*, hanno avuto più un significato di deterrenza strategica che un'effettiva applicazione. Di fatto, gli ordigni nucleari sono stati impiegati *solo una volta* nell'intera Era Nucleare (1945), mentre le armi incendiarie, esplodenti o perforanti convenzionali, nonché le armi

---

comportare qualsiasi danno radiologico o sanitario alla popolazione. In pratica, le doppie barriere di contenimento impedirono fuoriuscite significative di radioattività durante e dopo l'incidente, anche se vennero prese misure sanitarie a scopo precauzionale (di fatto vennero distribuite alla popolazione capsule di ioduro o iodato di potassio per ingestione orale, per il blocco della tiroide ed evitare il rischio della eventuale captazione del principale prodotto volatile di fissione, lo <sup>131</sup>I).

\* Con *sindrome cinese* s'indicava la sequenza dei fenomeni che si presumeva *erroneamente* dovessero seguire alla fusione del core di un reattore nucleare, con grande e repentino aumento di temperatura, fusione del basamento del reattore, sprofondamento del nocciolo fuso nel sottosuolo, raggiungimento della *criticalità* ed una successiva esplosione nucleare sotterranea catastrofica amplificata dal contatto con eventuali falde acquifere sotterranee. L'aggettivo *cinese* deriva dal fatto che la Cina si trova in una posizione geografica del Globo opposta rispetto agli USA, Paese in cui era ambientato l'omonimo film di *disinformazione*. Una campagna di raccolta di firme negli USA alla fine degli anni '70 si basava sullo slogan "impedite a Jane Fonda di privarci dell'energia", in quanto la nota attrice aveva sposato la causa antinuclearista ed aveva interpretato il film stesso con grande successo mediatico. Casualmente, proprio nel 1979 avvenne l'incidente di TMI, Middletown, Harrisburg, PA, USA<sup>77</sup>). Gli incidenti di TMI e Chernobyl hanno confermato peraltro la correttezza della teoria e l'erroneità della Sindrome Cinese e delle ipotesi catastrofiste desunte dal documento WASH-1400 dell'US-NRC del 1975 (conosciuto come **rapporto Rasmussen**) ed amplificate dal noto film.

chimiche e biologiche, continuano ad essere utilizzate in innumerevoli controversie interne ed internazionali, conflitti locali ed atti di terrorismo, in ogni area geopolitica del pianeta. Le più recenti stragi - dovute al terrorismo internazionale - sono state compiute con mezzi rudimentali ed utilizzando la potenza dirompente del fuoco (New York 2001), o di esplosivi ed armi convenzionali (Bali 2002, Istanbul 2003, Madrid e Beslan 2004, per ricordare alcune fra le più devastanti avvenute in Paesi non coinvolti o coinvolti solo indirettamente in situazioni di guerra).

La realtà è che sono attualmente in corso nel Globo più di 50 conflitti armati (un numero più elevato di ogni epoca precedente), che si svolgono con armi convenzionali ed un enorme numero di vittime civili e militari, ed in nessun caso i belligeranti fanno o hanno fatto uso di armamenti nucleari, nonostante la disponibilità degli stessi. Alcuni autori ritengono che i conflitti del domani potrebbero addirittura essere incruenti e basati sulla debolezza strutturale del sistema economico internazionale, ormai quasi totalmente informatizzato e quindi facile preda di *hacker* privi di scrupoli o terroristi, rendendo ancora più improbabile l'uso di armi relativamente complesse come quelle nucleari <sup>84</sup>. Esclusi quindi gli eventi bellici del 1945, le vittime dell'impiego dell'energia del nucleo sono ritenute - mediante stime grandemente cautelative ed ampiamente conservative - in numero trascurabile, mentre **le persone sottoposte a diagnosi o curate mediante radiazioni d'origine nucleare sono molte decine di milioni** ogni anno in tutti i Paesi più avanzati del mondo <sup>16,18,22,26-28,30</sup>.

Gli esperimenti nucleari nell'atmosfera compiuti nel dopoguerra fino agli anni '60 del Novecento (TAB. 2), sono stati banditi a scopo precauzionale in ogni Paese del mondo per evitare i possibili rischi dovuti alla ricaduta (*fall-out*) di materiale radioattivo e la contaminazione degli ecosistemi, anche se dopo oltre mezzo secolo dagli eventi non sono stati *mai* provati effetti a breve o lungo termine sulle popolazioni coinvolte (*e.g.* poligono nucleare USA nell'atollo di Bikini nelle Isole Marshall, Micronesia, Oceano Pacifico e poligono nucleare Francese nell'atollo di Mururoa, Polinesia Francese, Sud-Pacifico), ciò nonostante numerosi documentari e filmati ad effetto hanno tentato per anni di dimostrare l'opposto, attribuendo erroneamente a tali eventi malattie somatiche nella popolazione (*e.g.* cancro o cataratta da radiazioni), nonché malformazioni e mostruosità della prole (*i.e.* *teratogenesi*).

Comunque, sempre a scopo precauzionale e sotto la spinta pressante dell'opinione pubblica, successivamente ai test nucleari le popolazioni delle Isole Marshall sono state evacuate temporaneamente e sottoposte a controlli medici accurati, che continuano anche oggi, seppur senza alcun esito sanitario significativo.

Tali eventi hanno viceversa provocato un immane disagio per le popolazioni interessate, che sono state costrette contro la propria volontà ad un'*evacuazione forzata*, rivelasi a posteriori non necessaria. Esperimenti analoghi di cui si hanno scarse notizie, dati gli effetti ancora rilevanti della ex Cortina di Ferro, sono stati compiuti essenzialmente dalla Cina e dall'ex URSS.

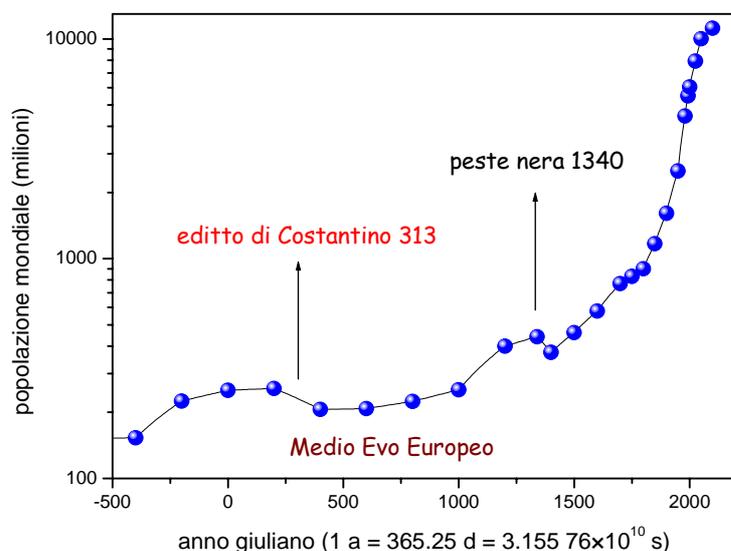
## 6 GLI OBIETTIVI DELL'IMPIEGO PACIFICO DELL'ENERGIA NUCLEARE

Per diverse migliaia di anni, l'umanità ha avuto un impatto minimo sulla biosfera: durante il *Medio Evo Europeo* gli abitanti della terra erano poco più di 350 milioni e *solo 5 secoli fa*, all'epoca del Rinascimento Europeo (*i.e.* l'epoca di Giordano Bruno, Tommaso Campanella, Cristoforo Colombo, Marsilio Ficino, Galileo Galilei, Leonardo da Vinci, Bernardino Telesio, per limitarci alla sola penisola Italiana), della dinastia Ming Cinese, e del primo Imperatore Moghul Indiano, il mondo era ancora scarsamente popolato, con 450 milioni di individui in totale, pari alla popolazione attuale della sola Europa allargata all'Est (FIG. 22). Da allora, grazie alle rivoluzioni in campo agricolo, industriale e sanitario, la popolazione mondiale è cresciuta di quasi *15 volte*. Di questi 6 828 811 907 d'esseri umani che popolano la Terra (22 Giu 2010, ore Italiana 09,36), svariate centinaia di milioni godono di una qualità della vita, un benessere ed un'aspettativa di vita senza precedenti, prevalentemente nei Paesi dotati di maggiore disponibilità energetica. Tali condizioni di vita sono negate però ad un terzo dell'umanità che non ha ancora accesso all'elettricità, e ad un altro terzo che ne gode con un accesso limitato. Enormi popolazioni vivono in condizioni d'estrema povertà. Oltre 1 miliardo di persone non ha accesso ad acqua potabile, mentre 2,4 miliardi di persone non usufruiscono di servizi sanitari adeguati: ogni giorno, 40 000 persone – 28 al minuto - muoiono di malattie che potrebbero essere evitate tramite un minimo sviluppo economico e disponibilità energetica. E', infatti, ampiamente acclarato che lo sviluppo e la qualità della vita umana sono *più che proporzionali* alla disponibilità energetica, ed è inaccettabile ed anche inverosimile pretendere che – malgrado le roboanti dichiarazioni di principio - la situazione attuale di disequilibrio possa permanere a lungo<sup>1,18</sup>). Dal grafico di FIG. 22 si evince anche una diminuzione della pendenza della curva di crescita nei decenni più recenti, e ciò è dovuto a quella che gli esperti denominano *transizione demografica* verificatasi dal 1900 al 2000, ovvero una rapida crescita temporanea causata dalle rilevanti ed incalzanti scoperte scientifiche (farmaci, igiene, tecniche chirurgiche, disponibilità energetica, telecomunicazioni, cibo ed acqua potabile abbondanti) e conseguente miglioramento delle condizioni di vita, seguita da una stabilizzazione con un aumento repentino dell'aspettativa di vita degli adulti ed una contemporanea rilevante diminuzione della mortalità infantile.

La situazione attuale è evidenziata dall'andamento dei consumi d'energia che, secondo l'International Energy Outlook 2004 (IEO2004) dell'Energy Information Administration (EIA) dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), o Organization for Economical and Cooperation Development (OECD), ha superato nel 2004 il valore annuo di 10 miliardi di tonnellate di *petrolio equivalente* \*, (*i.e.*  $10^{13}$  kg), vale a dire una potenza totale equivalente installata di 13 300 GW totali (13 TW). Il calcolo è presto fatto:  $10^{10}$  TOE.a<sup>-1</sup> =  $41,868 \cdot (365 \cdot 24 \cdot 3\ 600)^{-1} \cdot 10^{10}$  GW = 13,3 TW; per ottenere la stessa quantità di energia è sufficiente la fissione completa di 5,0 kton.a<sup>-1</sup> di <sup>235</sup>U (arricchito al 100%), oppure di <sup>232</sup>Th (naturale) o di qualsiasi altro radionuclide fissile.

---

\* Per *petrolio equivalente* si intende l'insieme di qualsiasi fonte d'energia, convertita in petrolio crudo (**crude oil** o black gold). 1 barile di petrolio (barrel, bbl) ≡ 42 gallon ≡ 158,97 dm<sup>3</sup>; *i.e.* la densità media del petrolio è stata posta pari a 640 kg.m<sup>-3</sup>, o 102 kg.bbl<sup>-1</sup>; i derivati del petrolio hanno densità variabile fra 536 e 994 kg.m<sup>-3</sup>.



**FIG. 22:** Andamento della popolazione mondiale negli ultimi 2 500 anni. Le decrescite più rilevanti sono coincise con la caduta dell'Impero Romano e con l'epidemia di peste nera del tardo Medio Evo Europeo. A partire dal 1500 il Rinascimento Europeo ed in maniera ancora più marcata dal 1700 la *rivoluzione industriale*, hanno contribuito in maniera esponenziale all'incremento della popolazione. Le 2 *guerre mondiali* non hanno variato la popolazione mondiale in maniera

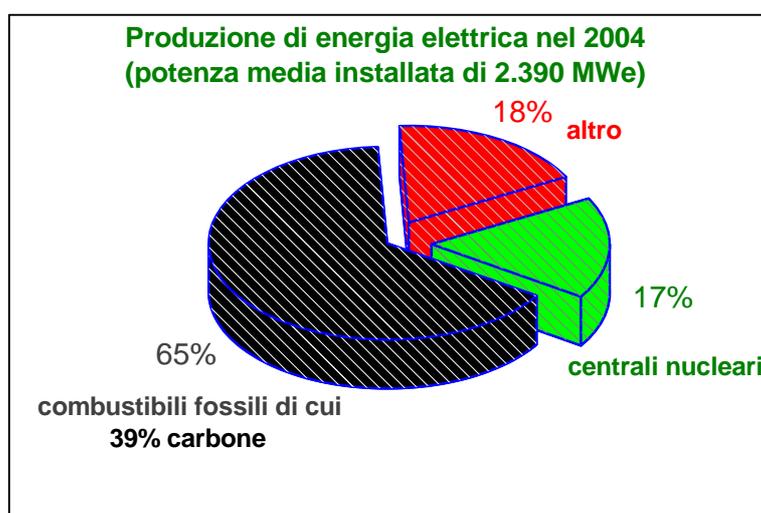
Dell'intera riserva d'energia, il 53% è consumato nei paesi più sviluppati (Nord-America, Europa, Giappone). Questo consumo d'energia *totale* (elettrica, termica, radiante, altro) è coperto per l'80% da combustibili fossili, il cui impiego massiccio rappresenta – secondo la maggior parte degli autori \* - sempre più una minaccia per la nostra salute e la vita sul nostro pianeta <sup>7,68</sup>. Di tale energia, il 30% è usato per la produrre elettricità, il cui consumo è quasi triplicato negli ultimi 30 anni raggiungendo nel 2009 una potenza di 2 390 GWe (l'Italia ha avuto picchi di consumo di 55 GWe nel 2003-06, pari al 2,3% del totale). Il 65% di tale potenza *elettrica* è ottenuto con combustibili fossili (di cui il 39% carbone), e solo il 17% con centrali nucleari (FIG. 23) •.

Secondo l'ultimo rapporto mensile dell'International Energy Agency (IEA), a giugno 2004 la produzione di petrolio crudo ha raggiunto i 28,6 Mbbl.d<sup>-1</sup> nei soli Paesi dell'OPEC (pari al 35% della produzione mondiale), la più alta dal novembre 2001, contro un limite stabilito di 21,7 Mbbl.d<sup>-1</sup> ed un'ulteriore incremento d'estrazione si è verificato in Set 2004. Secondo queste proiezioni, la domanda totale crescerà dai 81,4 Mbbl.d<sup>-1</sup> del 2004 a 83,2 Mbbl.d<sup>-1</sup> nell'anno in corso 2005. L'IEA prevedeva peraltro una decelerazione dell'aumento della domanda nel 2005 (ma non ovviamente un calo), legata ad una più moderata espansione dell'economia mondiale e nel 2005 l'aumento sarebbe stato solo di 1,8 Mbbl.d<sup>-1</sup> contro i 2,5 Mbbl.d<sup>-1</sup> del 2004.

\* Bisogna osservare che alcuni autori, in controtendenza, sostengono come un incremento nell'impiego di fossili e nelle emissioni di CO<sub>2</sub> favorisca invece un aumento della vegetazione (le piante si nutrono di CO<sub>2</sub> durante la *fotosintesi clorofilliana*) ed un abbassamento della temperatura del Pianeta <sup>14</sup>.

• Il 30% dei ~ 13,3 TW è pari a 3 990 GW, tuttavia la trasformazione di questi ultimi in energia elettrica avviene con un rendimento non superiore al 65% in dipendenza dal processo utilizzato (33% nel caso di NPP termici) e quindi 3 990 GW ▪ 0,6 = 2 394 GWe. Il rendimento superiore degli impianti termoelettrici dipende dalla maggiore temperatura d'esercizio (530 °C), rispetto ai reattori nucleari BWR (285 °C) o PWR (275 °C). I reattori nucleari come l'EPR avranno rendimenti del 37-41%, mentre i reattori del *GEN IV* avranno rendimenti fino al 45-50%.

In conclusione, i benefici provenienti dall'energia del nucleo risultano immensi e paragonabili solo a quelli dovuti ai formidabili prodotti della chimica contemporanea (e.g. antibiotici, antistaminici, farmaci antitumorali ed antirigetto, fertilizzanti, coloranti, materiali polimerici strutturali, biopolimeri, resine, pesticidi, esplosivi, metalli e leghe ad alte prestazioni), che hanno portato l'*aspettativa di vita* in Paesi come l'Italia dai 45 anni d'inizio secolo agli attuali 78 per gli uomini ed 83 per le donne, con un incremento di 10 anni nel solo ultimo ventennio. Si stima infatti che la sola scoperta degli antibiotici di sintesi abbia incrementato l'*aspettativa di vita* della popolazione di 15 anni <sup>19,85</sup>.



**FIG. 23:** Ripartizione percentuale dei vari metodi di produzione d'energia elettrica nel mondo nel 2009. Dei 2 390 GWe utilizzati su scala planetaria, 380 GWe sono prodotti in centrali nucleari di potenza (NPP).

I trasporti rapidi ed accessibili a tutti, sono un ulteriore indice dello sviluppo di una Società avanzata. Treni veloci quali il Florida Bullet Train in USA, il TGV in Francia, ed i più recenti treni veloci in Spagna, hanno delle centrali nucleari dedicate interamente al loro funzionamento. La costruzione dello Shinkansen in Giappone fra Tokyo ed Osaka iniziò nel 1959 (ora la linea raggiunge Niigata sul Mar del Giappone) è già nel lontano 1972 il treno raggiungeva velocità di  $220 \text{ km.h}^{-1}$ , nonostante ciò il Giappone sta potenziando e raddoppiando la già efficientissima linea ferroviaria che congiunge il Nord col Sud del Paese (la rete ferroviaria Giapponese è stata completamente privatizzata da alcuni decennii). Esperimenti realizzati nell'Estate 2004, hanno già permesso al TGV di raggiungere la velocità di  $480 \text{ km.h}^{-1}$ , ed è già stato progettato un treno Europeo superveloce completamente sotterraneo, in grado di collegare Vienna con Madrid alla velocità di  $700 \text{ km.h}^{-1}$  (2 400 km e 24 ore con le linee attuali), collegando Vienna con Parigi in ca. 2 ore (1 200 km e 12 ore attuali). Altrettanto avveniristica, ma realizzabile, sembra essere la realizzazione di una linea ferroviaria sotto-oceanica ultraveloce, fra Europa ed USA.

In Italia le linee ferroviarie ad alta velocità (TAV) sono finalmente in fase di realizzazione, seppure con un ventennio di ritardo rispetto agli altri Paesi, anche se a tuttoggi non si ravvede quale sarà la fonte d'energia elettrica che verrà utilizzata per la loro

alimentazione, data la già precaria situazione energetica italiana. Tuttavia, se realizzati ed opportunamente alimentati, i treni veloci in costruzione in Italia permetteranno di raggiungere Genova da Milano in 40 minuti, Napoli da Roma in 1 ora e dimezzeranno il tempo di tragitto fra Milano e Roma, diminuendo ampiamente l'inquinamento acustico e visivo. Anche la realizzazione del ponte sullo Stretto di Messina lungo più di 3 km, dopo oltre 30 anni di rinvii, se fornito di linee ferroviarie veloci potrebbe contribuire fortemente ad accelerare i trasporti di merci e persone fra Calabria e Sicilia. L'opera è sicuramente realizzabile, infatti il Confederation Bridge (New Brunswick, Canada), inaugurato nel 1997 è lungo 12 km con 24 piloni ed il ponte sullo Stretto di Bering fra Asia (Siberia) ed America (Alaska), già in fase di progettazione, sarà lungo 85 km con (con 220 piloni di 300 m), nonostante le temperature che possono scendere fino a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Sempre il rapporto IEO2004 stima che il consumo mondiale d'energia raddoppierà entro il 2050, mentre il consumo d'elettricità raddoppierà già entro il 2025.*

## **7 IL PROTOCOLLO DI KYOTO AMPLIAMENTE DISATTESO, POICHE' IRREALISTICO ED IRREALIZZABILE**

La maggior parte dell'energia mondiale è attualmente ottenuta dalla *combustione* di materiali fossili (ed in misura marginale da quella di residui solidi urbani, RSU e biomasse) <sup>#</sup>. Nell'atmosfera terrestre, l'azione riscaldante dei *gas serra* (greenhouse gas) - quali principalmente idrocarburi (in particolare metano,  $\text{CH}_4$ ), diossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) e vapore acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ ) - rappresenta un fenomeno naturale e di fondamentale importanza per l'equilibrio degli ecosistemi. Bisogna ricordare che - indipendentemente dalle attività antropiche - numerosi idrocarburi volatili vengono introdotti nell'ambiente da svariate fonti naturali: ad esempio le piante per proteggersi dagli aumenti di temperatura sopra i  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  introducono annualmente nell'atmosfera 300 milioni di tonnellate del diterpene 2-metil-1,3-butadiene (*i.e.* isoprene) <sup>## 85)</sup>, che costituisce da solo il 60% degli idrocarburi prodotti dalle piante ed il 2% di tutto il carbonio fotosintetico, e l'*isoprene* è a sua volta un efficiente gas serra, nonché agente allergenico per l'uomo dando luogo facilmente alla produzione di specie radicaliche e contribuendo alla produzione di ozono nella bassa troposfera ed alla sua

---

<sup>#</sup> Attualmente (2010), in Italia ~ il 75% dei RSU viene gettato in discarica (conferito in gergo); tuttavia i RSU possono essere utilizzati molto più efficacemente negli *inceneritori*, normalmente alimentati a gas (in quanto tali rifiuti hanno spesso un basso potere calorico) ed operanti a temperature molto elevate ( $900 - 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) per distruggere con la massima efficienza possibile i materiali organici alogenati (clorurati e fluorurati) e ridurre al minimo il volume delle ceneri. Ovviamente il processo comporta consumo di combustibile, tuttavia una parte del calore può essere riutilizzata per produrre energia; in tempi recenti, per rendere più accettabile tale tecnologia all'opinione pubblica, è stato introdotto il termine sinonimo *termovalorizzatori*. Si tratta in ogni caso d'impianti di dimensioni contenute, ad esempio il termovalorizzatore di Trezzo d'Adda, fra i più moderni in esercizio in Italia, impegna una superficie di  $23\,500\text{ m}^2$ .

<sup>##</sup> Le Blue Mountain dell'Australia, le Blue Ridge Mountains in USA ed il Jamaica's Blue Mountain Peak devono il loro nome al caratteristico colore bluastro dovuto a tale fenomeno. L'isoprene è un importante prodotto di sintesi dell'Industria Chimica, tuttavia il quantitativo annuo dell'isoprene di sintesi è di sole 20 kton <sup>80)</sup>.

distruzione nella stratosfera <sup>66,85</sup>). Per ogni abitante umano della terra esistono allo stato stazionario ben 75 kg (480 milioni di tonnellate in totale) di “*termiti*” - le grosse formiche tropicali - che producono da sole annualmente col proprio metabolismo anaerobico quantità di CH<sub>4</sub> dell'ordine di 20 milioni di tonnellate (oltre ai suoi derivati clorurati). Malgrado tali cifre impressionanti, per migliaia d'anni, un livello più o meno costante di gas serra ha creato l'ambiente moderato che ha fatto da cornice all'evoluzione della vita e delle civiltà umane, impedendo che il mondo fosse ricoperto da ghiacci perenni.

Il problema risiede nel fatto che nel XXI secolo, l'attività umana potrebbe causare un raddoppiamento della concentrazione di questi gas cattura-calore e tale cambiamento, in termini geologici, è improvviso e senza veri precedenti (anche la cosiddetta piccola glaciazione si stemperò in un periodo d'alcuni secoli dal 1400 al 1750).

Una centrale elettrica a carbone da 1 GWe, consuma giornalmente 10 000 tonnellate di carbone (la stessa quantità di energia viene prodotta con poco più di 3 kg di <sup>235</sup>U), produce giornalmente 30 000 tonnellate di CO<sub>x</sub>, 600 tonnellate di SO<sub>x</sub>, 80 tonnellate di NO<sub>x</sub> e 600 tonnellate (6%) di residui di combustione leggeri e pesanti (se una mole di C si convertisse completamente in una mole di CO<sub>2</sub> consumando una mole di O<sub>2</sub>, il rapporto fra le masse sarebbe esattamente di 11/3). Ciò significa che ogni anno la combustione dei fossili da parte dell'uomo immette 25 miliardi di tonnellate di diossido di carbonio \*, CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, pari a 70 milioni di tonnellate al giorno, ovvero 800 ton·s<sup>-1</sup>. Mentre la popolazione mondiale aumenta ad una velocità leggermente superiore a 2 persone·s<sup>-1</sup>, ovvero 120 persone·min<sup>-1</sup>, le quantità di CO<sub>2</sub> rilasciate dai combustibili fossili cresce ad una velocità di 50 000 ton·min<sup>-1</sup>. Ciò smentisce clamorosamente la campagna in atto in Italia, che tende a rivalutare l'uso del carbone e del gasolio pesante (*i.e.* con le denominazioni fantasiose ed accattivanti, ma mendaci, di carbone pulito, eco-carbone, eco-diesel, gasolio bianco !), minimizzandone o sottacendone l'impatto ambientale.

Ovviamente, il carbone coke (ottenuto dal *coking* ad alta temperatura del minerale, coal) <sup>18,1</sup> e gli idrocarburi leggeri e intermedi reagiti con vapore acqueo (*steam-reforming* e *steam-cracking*), continueranno ad essere per molto tempo una fonte insostituibile di numerose varianti del *gas di sintesi*, che è essenzialmente una miscela d'idrogeno e monossido di carbonio (*i.e.* syn-gas, gas di città, crack-gas, gas d'acqua, oxo-gas, methanol syngas), utilizzabile a sua volta per la produzione di materie prime di base (*e.g.* ammoniaca e da questa acido nitrico, nitrati, nitroglicerina, dinamite, esplosivi, urea, fertilizzanti, farmaci), idrocarburi ramificati (*i.e.* mediante processo Fischer-Tropsch), nonché idrogeno per i processi industriali d'idrogenazione catalitica, ed in prospettiva futuribile per la produzione di idricità (hydricity) <sup>1,8</sup>). Una parte sempre più consistente di tale miscele gassose è inoltre utilizzata per la produzione di metanolo (alcool metilico) per usi industriali tradizionali e per

---

\* Il nome chimico corretto (IUPAC) dell'anidride carbonica CO<sub>2</sub> è *diossido di carbonio*; se la combustione avviene in ambiente povero d'ossigeno (od aria) si ha formazione di miscele di CO<sub>2</sub> e monossido di carbonio, CO. Altri simboli utilizzati: CO<sub>x</sub>: miscela di C<sup>(IV)</sup>O<sub>2</sub> e diossido di carbonio C<sup>(II)</sup>O; SO<sub>x</sub>: miscela di diossido e triossido di zolfo S<sup>(IV)</sup>O<sub>2</sub> e S<sup>(VI)</sup>O<sub>3</sub>, precursori dell'acido solforico H<sub>2</sub>S<sup>(VI)</sup>O<sub>4</sub>; NO<sub>x</sub>: miscela di svariati ossidi d'azoto N<sup>(II)</sup>O, N<sup>(III)</sup>O<sub>2</sub>, N<sup>(IV)</sup>O<sub>2</sub>, N<sup>(IV)</sup>O<sub>2</sub>, N<sup>(V)</sup>O<sub>2</sub>, N<sup>(V)</sup>O<sub>5</sub>, alcuni dei quali precursori dell'acido nitrico HN<sup>(V)</sup>O<sub>3</sub> nell'atmosfera ossidante di combustione

l'alimentazione di celle a combustibile \*\*.

Bisogna ricordare che:

- le risorse fossili – carbone, petrolio, metano e gas naturale – non sono rinnovabili e vengono consumate ad una velocità tale da prevederne un esaurimento nel corso del prossimo XXI secolo, anche se gli studiosi più pessimisti – appoggiati dagli ambientalisti orientati ideologicamente contro il modello di sviluppo industriale Occidentale - sostenevano negli anni '60 del Novecento che tale esaurimento si sarebbe verificato entro la fine del XX secolo, come era stato preannunciato *erroneamente* nel rapporto dell'MIT “I limiti dello sviluppo” del 1972 per il Progetto del Club di Roma sui Dilemmi dell'Umanità •<sup>86)</sup>.

- i prodotti di scarto delle fonti energetiche fossili (compresi gli elementi radioattivi contenuti nei *fumi*, così come nel *fly-ash* e nel *bottom-ash* delle centrali termoelettriche) vengono dispersi direttamente nei vari ecosistemi <sup>1,66,67)</sup>. I costi di contenimento di tali rifiuti solidi, liquidi ed aeriformi risulterebbero assolutamente insostenibili e qualora venissero affrontati renderebbero l'energia elettronucleare ampiamente competitiva rispetto a tutte le altre fonti •. Talvolta i residui pesanti e leggeri di combustione vengono utilizzati nei materiali da costruzione, per sfruttare tra l'altro le loro ottime proprietà coibentanti, tuttavia le elevate concentrazioni di radioattività in alcuni di questi continuano a porre problemi radioprotezionistici, specialmente nel caso di utilizzo per abitazioni.

- quasi sempre le fonti energetiche rinnovabili e quelle integrative – *essendo caratterizzate da bassa o bassissima densità di potenza* - modificano in maniera significativa il territorio o ne sottraggono ingentissime porzioni alle altre attività umane civili ed industriali (e.g., centrali eoliche e solari, ad esclusione di centrali idroelettriche di grandi dimensioni) <sup>1)</sup>.

Si stima che la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera passerà dai valori pre-industriali di 275 ppm al livello attuale di 365 ppm, sino ad un valore che si prevede supererà i 550 ppm durante il XXI secolo. Più rilevante è il fatto che le attività antropiche stanno introducendo nell'ambiente grossi quantitativi di gas refrigeranti ed antincendio, quali i

---

\*\* Sia l'idrogeno tal quale allo stato gassoso compresso od allo stato liquido ultra-refrigerato (LH<sub>2</sub>), sia il metanolo liquido (CH<sub>3</sub>OH, alcol metilico) ottenuto per ulteriore ossidazione della miscela, sono le materie prime d'eccellenza per alimentare le celle a combustibile (fuel cell) di prossima generazione.

• Il Club di Roma (CoR) è stato fondato dal ex manager FIAT Dr. Aurelio Peccei (1908-1984) a Roma nel 1968 ed ha elaborato finora numerosi documenti catastrofisti sul futuro dell'umanità, incentrati su un numero limitato di problemi cardinali, fra loro strettamente correlati: sovrappopolazione del Pianeta, inquinamento incontrollabile, esaurimento delle risorse, carestie, desertificazione, fame. L'attuale Presidente del CoR è il Principe Giordano HRH El Hassan bin Talal, <http://www.clubofrome.org/> Malgrado le previsioni pessimistiche del CoR, le risorse di combustibili fossili scoperte successivamente furono molto rilevanti e le nuove stime prevedono ulteriori riserve per almeno altri 50 anni, utilizzando le tecnologie di estrazione già note e giacimenti sufficientemente redditizi •. Gli attuali giacimenti petroliferi vengono sfruttati solo parzialmente, per non accrescere eccessivamente i costi di produzione, quindi in caso di sfruttamento più efficiente le scorte naturali potrebbero durare per un periodo molto più lungo, tuttavia come evidenziato nel testo, ciò non significa che la loro distruzione mediante combustione debba proseguire indiscriminatamente.

•• L'ipotesi fantasiosa di recuperare il CO<sub>2</sub> prodotto dalla combustione, pompandolo nel sottosuolo ed immagazzinandolo allo stato solido (come ghiaccio secco) nelle cavità naturali lasciate libere dall'estrazione del petrolio e del gas naturale, è tecnicamente fattibile, ma una parte consistente dell'energia prodotta dovrebbe essere utilizzata per i sistemi di pompaggio, canalizzazione e compressione, rendendo l'impiego dei fossili fortemente antieconomico.

bromoclorofluorocarburi (BCFC e CFC) e l'esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ), gas serra con un effetto riscaldante (*relative warming effect*, RWE) molte migliaia di volte più elevato della stessa  $\text{CO}_2$  e con l'ulteriore svantaggio di assottigliare lo strato protettivo d'ozono presente naturalmente nella stratosfera<sup>66,4)</sup>. Incidentalmente, nella città di Venezia, negli ultimi 10 anni si sono verificati i più frequenti fenomeni di acqua alta degli ultimi 2 secoli ed è stato dimostrato che la loro frequenza è correlata - con elevato livello di confidenza - con la concentrazione di  $\text{CO}_2$  presente nell'atmosfera. Il reale impatto di tale cambiamento è ancora oggetto di studio<sup>14)</sup>, in quanto è noto che in ere geologiche passate si sono avute concentrazioni di  $\text{CO}_2$  anche dieci volte superiori alle attuali, con notevole sviluppo di fauna e flora. Tuttavia, gli esperti nel settore climatico sono quasi tutti concordi nell'affermare che l'accumulo di gas serra potrebbe assumere caratteristiche catastrofiche nel corso del XXI secolo appena iniziato, in conseguenza del fatto che la crescita del livello marino, le temperature estreme, i temporali violenti, le siccità devastanti e la diffusione di malattie potrebbero impedire la produzione di derrate agricole e rendere molte regioni inabitabili con la destabilizzazione dell'intera biosfera. Questo cambiamento climatico globale, interessa tutte le nazioni ed aree geografiche del pianeta, in quanto:

- nel Nord-America, le emissioni giornaliere di  $\text{CO}_2$  sono pari a 54 kg pro-capite,
- In Europa e in Giappone le emissioni giornaliere superano i 23 kg per persona,
- la Svezia – Paese estremamente sensibile ai problemi ambientali – risulta al 2° posto dopo gli USA nella graduatoria dei consumi,
- l'Italia risulta al 4° posto nelle emissioni pro-capite, malgrado i costi unitari elevatissimi dell'energia,
- in Cina, Paese popolato da 1.3 miliardi di abitanti, il livello di emissioni giornaliere supera già i 6 kg per persona.

Nelle stime non è evidenziato l'impiego ancora massiccio del *legname* per la produzione d'energia, con evidente danno al patrimonio boschivo planetario ed alla salute degli ecosistemi<sup>1,62)</sup>. Ovviamente il carbone ed il legname sono ancora di largo impiego nei Paesi meno sviluppati del 3° e 4° mondo (Messico, Sud Est Asiatico), tuttavia numerose città Italiane utilizzano ancora tali combustibili, ed anzi numerose centrali termoelettriche Italiane sono state *riconvertite* da metano a carbone, nonostante i dati riportati nel capitolo precedente e con buona pace dello slogan – peraltro palesemente mendace - "*il metano ti da una mano*" in voga fino a pochi anni orsono<sup>#</sup>.

La combustione indiscriminata di legname e residui agricoli ed urbani nelle metropoli della Cina, dell'India e del Sud-Est Asiatico, ha creato negli ultimi anni un imponente fenomeno d'inquinamento *geostazionario* su quelle aree geografiche, denominato *brown-*

---

<sup>#</sup> La combustione del metano da luogo alla formazione di  $\text{CO}_x$  ed  $\text{NO}_x$  (e piccole quantità di  $\text{SO}_x$ ), quindi non si tratta affatto di un combustibile pulito. Essendo inoltre il metano molto più costoso di petrolio e carbone, il suo impiego massiccio ha dato una mano esclusivamente ai Paesi produttori (Paesi Arabi, Russia, Texas, Alaska) ed alle compagnie importatrici e distributrici in Italia.

*cloud*, costituita da uno strato di 3 km di polveri e smog\*. Tale fenomeno è evidenziabile dai satelliti ed anche dalla Piramide del CNR Italiano posta alle pendici del Monte Everest.

Limitatamente alle attività antropiche, un ulteriore fenomeno correlato all'industria energetica consiste nella combustione incontrollata nel sottosuolo di *miniere di carbone abbandonate*; alcune di tali miniere sono in fiamme ad elevata profondità talvolta da decenni, alcune addirittura da secoli, e sembra non esistano sistemi per interromperne la combustione.

Bisogna infine ricordare il contributo rilevante all'immissione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera dovuto ai *cementifici*, infatti, l'ossido di calcio necessario per la produzione di cemento è ottenuto per arrostitimento di materiali calcarei (e.g. marne, clinker) ed a tuttoggi non è stata ancora scoperta una valida alternativa al cemento come materiale da costruzione.

Contrariamente alla percezione diffusa, negli USA il consumo di energia nucleare è inferiore alla media dei Paesi più avanzati (8% del totale e 20% dell'energia elettrica), sia per ragioni politiche in quanto gli USA furono promotori del *Nuclear Non-Proliferation Treaty* (NPT) del 1968<sup>4,15-17)</sup>, al quale aderiscono attualmente 188 Paesi (compresa la Cina dal 1992 ed esclusa la Corea del Nord), sia date le immense riserve petrolifere e di gas naturale disponibili in quel Paese, che costituiscono la motivazione sostanziale del ripetuto diniego all'accettazione dei protocolli di Vienna (1985), Montreal (1993), Kyoto (1997) e Buenos Aires (Dic 2004) sulla riduzione delle emissioni di gas serra nel periodo 2008-2012.

Tale politica energetica è stata stigmatizzata da James Ephraim Lovelock, *ambientalista* di fama internazionale, nonché ideatore della *Teoria di GAIA* ed inventore tra l'altro negli anni '60 del *detector gascromatografico a cattura di elettroni* (ECD) per la determinazioni di composti clorurati nell'ambiente, risoluto sostenitore dell'energia nucleare per coerenza con la sua decennale attività di ricerca nel settore della protezione ambientale e la sua campagna per il miglioramento della qualità della vita sul nostro pianeta (<http://www.ecolo.org/lovelock/>)<sup>87-92)</sup>, FIG. 24.

Nonostante questa evidenza, la *disinformazione* diffusa artatamente tende a sostenere che gli USA sarebbero in grave difficoltà per la presente crisi petrolifera, mentre come Paese

---

\* Bisogna osservare che la concentrazione di particolato nell'atmosfera delle città (le cosiddette polveri sottili di diametro aerodinamico inferiore a 10 µm, o PM<sub>10</sub>), è un indice estremamente grossolano d'inquinamento, di scarsissimo significato dal punto di vista sanitario, in quanto tale indice non fa alcun riferimento alla composizione del PM<sub>10</sub> stesso (presenza di metalli pesanti, benzene, idrocarburi policiclici aromatici, aldeidi, ammine, chetoni, ed altri composti organici volatili o VOC). La legislazione Europea attuale, alla quale l'Italia deve ottemperare, prevede semplicemente un limite di 55 µg.m<sup>-3</sup> di PM<sub>10</sub>, superato il quale le città devono essere precluse al traffico veicolare, senza alcun riferimento alla sua composizione. In realtà gli studi più recenti hanno dimostrato che: 1) la frazione di particolato più pericolosa per la salute umana è quella in grado di raggiungere le zone più profonde del sistema polmonare, o frazione alveolare, con diametro aerodinamico da 2,5 µm a 0,1 µm, o PM<sub>2,5</sub>, e tale frazione è trasportabile dai venti anche a distanze considerevoli (aree rurali) dalle sorgenti, che sono normalmente localizzate nelle aree urbane ed industriali, 2) la composizione chimica delle polveri sottili è molto più significativa che non la loro concentrazione, infatti ad esempio le sabbie Sahariane trasportate dai venti possono comportare un incremento significativo dei valori di PM<sub>10</sub>, ma hanno scarsissimi effetti sanitari (a parte il fastidio), mentre concentrazioni molto più basse di sostanze cancerogene come il benzene proveniente dalle benzine d'autotrazione, od i metalli nobili (Pt, Pd e Rh) provenienti dall'usura dei convertitori catalitici (marmitte catalitiche) degli autoveicoli di nuova costruzione, hanno un impatto sulla salute umana dimostrato e significativo (mentre il Pb contenuto nelle benzine tradizionali non presenta proprietà cancerogene, viceversa numerosi composti del Pt hanno proprietà cancerogene provate).

grande produttore di combustibili fossili (ed U), nonché per la vicinanza con gli immensi giacimenti petroliferi del Golfo del Messico, aree Caraibiche, Colombia e Venezuela, tale Paese si trova in una posizione molto più solida, privilegiata ed autosufficiente dal punto di vista energetico rispetto all'Europa ed al Giappone, con enormi riserve petrolifere già accumulate negli anni (l'Italia al contrario non ha riserve petrolifere significative, e l'approvvigionamento dipende esclusivamente dalla disponibilità del momento sul mercato internazionale). Come nota positiva si può aggiungere che, anche negli USA la politica energetica - nonostante l'energica opposizione degli Stati produttori di combustibili fossili (Alaska e Texas, *i.e.* Stato d'origine e bacino elettorale dell'ex Presidente George W. Bush e della sua famiglia) - si sta nuovamente orientando anche con la nuova amministrazione Obama su un potenziamento del nucleare energetico \*.



**FIG. 24:** James Ephraim Lovelock, ambientalista e nuclearista convinto, ideatore del detector gascromatografico a cattura di elettroni e Padre della **Teoria di GAIA**, raffigurato a fianco di una statua della Dea della Terra <sup>87)</sup>.

Una motivazione completamente diversa ha giustificato il rifiuto della firma del protocollo di Kyoto da parte della Cina, giacché questo enorme Paese affamato d'energia dato

---

\* Il Senatore Repubblicano del New Mexico Pete V. Domenici, intervenendo al Winter Meeting dell'ANS (Washington D.C., Nov 2004), ha dichiarato di ritenere imminente il rilancio dei programmi nucleari USA e l'apertura della repository nazionale USA della Yukka Mountain, progetto fortemente contestato dal candidato del partito Democratico John Kerry durante la campagna elettorale per la Casa Bianca del 2004.

il rapidissimo tasso di sviluppo (più del 9,7% su base annua 2004, contro meno del 2% dell'Italia e del 1% nel 2005), non ha ancora la tecnologia sufficiente per uno sviluppo massiccio dell'energia nucleare. Obiettivo dichiarato della Cina è oggi quello di fornire in tempi brevi ai propri cittadini elettrodomestici, frigoriferi e mezzi di trasporto. Solo nel 2001 il governo cinese ha annunciato la costruzione di un numero limitato di centrali nucleari di potenza (2 all'anno per i prossimi 20 anni), grazie alla nuova politica di distensione ed al progressivo rapido avvicinamento alla tecnologia occidentale avvenuto negli ultimi 10 anni. Malgrado i precedenti disastrosi in molti Paesi del Globo, la Cina ha recentemente annunciato la costruzione della più imponente diga idroelettrica del mondo, che prevede tra l'altro la deviazione del fiume Yangtze collegandolo con lo Huang He (fiume Giallo), con un dissesto idrogeologico senza precedenti (altro che fonte energetica rinnovabile eco-compatibile !). Tale diga, che ha provocato l'eliminazione per inondazione programmata di intere città e villaggi, alimenta 26 turbine da 700 MWe ciascuna e numerosi analoghi progetti di grandi dimensioni sono in atto in quel Paese. La Cina è proiettata ad avere una potenza elettrica installata di 240 GWe entro il 2020.

Il protocollo di Kyoto è entrato formalmente in esecuzione il 16 Feb 2004 ed i Paesi che hanno aderito sono finora 141. L'Italia, dalla data dell'accordo ha incrementato le proprie emissioni del 14%, anziché diminuirle del 3,5% come stabilito. La Federazione Russa, ha invece accettato di firmare il protocollo di Kyoto solo nel Nov 2004, anche se tutti gli osservatori sono concordi nell'affermare che tale enorme Paese non sarà in grado di onorare quest'impegno (esattamente come l'Italia). Bisogna ricordare, che il crollo dell'ex Unione Sovietica (FSU, Former Soviet Union), ha comportato a partire dal 1990 – com'era facilmente prevedibile durante una fase di transizione talmente rivoluzionaria - una grave recessione economica in tutti i Paesi dell'unione, con un conseguente repentino calo dei consumi e dell'immissione di CO<sub>2</sub> nell'ambiente, anche se le emissioni sono ora nuovamente in progressivo aumento anche in questi Paesi (IEO2004).

## **8 COME IMPEDIRE UN CAMBIAMENTO CLIMATICO CATASTROFICO**

Constatato che l'umanità non è mai regredita spontaneamente per quanto riguarda lo sviluppo demografico e tecnologico, se non in seguito a catastrofi planetarie, immani epidemie o conflitti cruenti che abbiano provocato l'estinzione d'interi civiltà (FIG. 17), una popolazione mondiale in continuo aumento necessita di vasti quantitativi d'energia, per:

- supportare infrastrutture per l'alimentazione, l'istruzione e la sanità pubblica e privata
- fornire energia ad impianti produttivi, fabbriche, abitazioni e mezzi di trasporto rapidi e sicuri
- creare riserve di acqua dolce, mediante dissalazione dell'acqua dei mari e degli oceani
- rendere vivibili metropoli, città e zone rurali durante eccessive ondate di caldo o di freddo, che si verificano con sempre maggiore frequenza anche in regioni come l'Italia, caratterizzate da millenni da un clima temperato
- fornire energia per sopperire rapidamente a calamità naturali (terremoti, maremoti,

alluvioni, eruzioni vulcaniche)

- rendere abitabili zone desertiche, troppo aride e calde o troppo fredde, che attualmente ricoprono la maggior parte del pianeta. Paesi e Stati aridi come Australia, California, Colorado, Hawaii, Israele, New Mexico e Sud Africa, hanno già dimostrato nei fatti come la disponibilità energetica possa permettere l'immagazzinamento e trasporto dell'acqua per l'*irrigazione artificiale* di zone desertiche, in controtendenza rispetto a ciò che avviene in aree del pianeta soggette a progressiva desertificazione (deserti del Gobi, Kalahari, Sahara). La *dissalazione dell'acqua di mari ed oceani* mediante impianti nucleari – già tecnicamente realizzabile - potrebbe risolvere il problema d'approvvigionamento idrico in numerose regioni aride del Globo.

Tenendo ben presente che *l'elettricità e l'idricità non sono fonti energetiche, bensì soltanto modi per distribuire energia* (vettori energetici)<sup>4-10,30</sup>, le grandi metropoli di domani potrebbero funzionare con poche emissioni dirette, utilizzando elettricità, batterie caricate elettricamente e celle a combustibile ad idrogeno prodotto mediante energia nucleare<sup>93,94</sup>, anche se la possibilità concreta di utilizzo dell'idricità in tempi brevi è vista con cautela da numerosi esperti. Taluni infatti sostengono che se l'idrogeno venisse utilizzato su vasta scala - anche se la sua pericolosità è stata grandemente ridimensionata<sup>4</sup> - le inevitabili perdite nell'atmosfera di questo gas estremamente volatile e leggero, potrebbero comportare a loro volta la distruzione dell'ozono nella stratosfera con l'ulteriore formazione di ingenti quantità di vapore acqueo ed ulteriore aumento di temperatura del Pianeta<sup>8</sup>). La produzione attuale d'idrogeno (prevalentemente da fossili) da parte dell'Industria Chimica internazionale costituisce una tecnologia consolidata ed è pari a ~ 50-60 milioni di ton.a<sup>-1</sup> e questa enorme quantità viene utilizzata prevalentemente per la produzione di ammoniaca (e da questa esplosivi e fertilizzanti) e l'idrogenazione di idrocarburi<sup>1,93,94</sup>. Tale quantitativo dovrebbe essere incrementato di un fattore 100 per sopperire al fabbisogno energetico sotto forma d'idricità, cioè 5 miliardi di tonnellate stimate.

L'unica soluzione ragionevole consiste quindi nel generare enormi quantità d'elettricità ***in modo pulito***. L'elettricità pulita derivante dalle *fonti d'energia rinnovabili*: eolica, solare, e con qualche riserva da biomasse e geotermica – necessita di un ulteriore forte appoggio dal punto di vista economico, ma la capacità collettiva di queste tecnologie di produrre elettricità nei prossimi decenni è limitata. Tali tecnologie sono talvolta denominate impropriamente *nuove o alternative*, anche se il loro impiego è speculato ed utilizzato talvolta fin dai primordi della civiltà umana (*e.g.* mulini a vento e viti a coclea per il prelievo dell'acqua e per la produzione di lavoro meccanico, dissalazione dell'acqua marina per evaporazione, produzione di lavoro meccanico mediante energia potenziale da bacini idrici)<sup>#</sup>. Secondo gli studi dell'OCSE, anche dopo altri ulteriori 20 anni di sovvenzioni e supporto alla ricerca, queste *fonti d'energia rinnovabili* (o meglio *integrative*) potranno fornire meno del 3% dell'elettricità mondiale. Attualmente in Italia, malgrado decenni di finanziamenti, di ricerca

---

<sup>#</sup> Basti ricordare le innumerevoli macchine idrauliche e belliche ideate da Archimede Siracusano e Leonardo da Vinci. Ampie zone degli attuali Paesi Bassi (Olanda) sono state prosciugate nei secoli e bonificate mediante l'utilizzo di piccoli mulini a vento e la costruzione di dighe per contenere il terreno strappato all'acqua di mare.

e finanziamenti molto ingenti, il contributo di tali fonti è inferiore all'1% del totale, con l'esclusione dell'energia idroelettrica, che è già ampiamente sfruttata con i 10 000 bacini idroelettrici già citati che, come già accennato, non sono scevri da rischi e da un pesante impatto sugli ecosistemi (*e.g.* dissesto idrogeologico, ed influssi irreversibili su fauna e flora alpina ed appenninica). Incidentalmente, fondi immensi in termini umani e di capitale sono stati utilizzati senza successo per oltre 50 anni per ottenere energia da  *fusione nucleare* (*i.e.* il processo naturale che avviene nel sole e nelle stelle), il che dimostra come ciò che sembra a portata di mano sulla carta, sia spesso destinato a rimanere un sogno per limitazioni tecnologiche o fisiche intrinseche.

Quindi anche se vivessimo in condizioni di massimo risparmio energetico, in un paesaggio coperto da pannelli solari e centrali eoliche, avremmo comunque bisogno, per soddisfare buona parte delle nostre esigenze energetiche, di *fonti continue d'elettricità* su vasta scala. Bisogna precisare che con la tecnologia attuale, già estremamente avanzata, l'ENEL ha realizzato in Sardegna *pale eoliche sperimentali* con l'incredibile potenza fino a 2,5 MWe ciascuna, tale che con 400 di tali unità sarebbe possibile produrre la stessa quantità di energia di una centrale elettrica da 1 GWe, seppur ricoprendo e rendendo inabitabile per il rumore assordante una grossa superficie di territorio. A parte il danno estetico ed i rilevanti problemi d'usura meccanica delle pale tuttora ampiamente irrisolti, il limite principale di tali impianti è costituito dal fatto che nelle vicinanze di una centrale eolica non possono vivere nemmeno gli insetti, e gli esperimenti di fornire di cuffie insonorizzanti gli animali d'allevamento, affinché potessero cibarsi d'erba coltivata in tali aree, hanno prodotto finora risultati molto deludenti (*e.g.* in Australia, California, Germania, Hawaii, Israele, Olanda). In Italia l'energia elettrica di origine eolica è meno dello 0,6% del totale).

Per quanto riguarda le potenzialità dell'energia solare in Italia, il calcolo è presto fatto: la potenza termica solare media nell'arco dell'anno nelle Regioni più assolate del territorio Italiano è pari a  $\sim 180\text{-}190 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  \* <sup>95</sup>). Utilizzando celle fotovoltaiche (al silicio monocristallino o policristallino, germanio o materiali polimerici) con un rendimento del 10% (nota: celle ad arseniuro di gallio GaAs, irrealizzabili sul larga scala per semplici ragioni economiche, danno rendimenti fino al 33 %; per ottenere una potenza elettrica pari a 1 GWe sarebbe quindi necessario ricoprire di pannelli di silicio un territorio pari a 55 milioni di m<sup>2</sup>, cioè una superficie di  $7.5\cdot 7.5 \text{ km}^2$  (indicativamente la superficie ricoperta da una città di medie dimensioni come Bergamo, Brescia, Pavia, Piacenza, Padova).

E' da ricordare tuttavia il grande sforzo che l'Italia sta compiendo col progetto Archimede dell'ENEA, una centrale solare denominata *termodinamica* \*\* da 20 MWe

---

\* L'*insolazione media* annua nelle principali città Italiane è pari a 0,15 (Nord, Milano), 0,165 (Centro, Roma), 0,185 kW.m<sup>-2</sup> (Sud, Palermo) e supponendo un'efficienza di conversione fotovoltaica del 11%, ciò corrisponde ad aree coperte da soli pannelli solari di 67, 53 e 45 milioni di m<sup>2</sup> rispettivamente, per una centrale elettrica fotovoltaica da 1 000 MWe (appezzamenti di territorio  $8.2\cdot 8.2$ , di  $7.3\cdot 7.3$  e  $6.7\cdot 6.7 \text{ km}^2$  rispettivamente). Talvolta viene utilizzato impropriamente il termine "isole di luce" per indicare aree del nostro territorio dotate di insolazione particolarmente elevata, in realtà i valori numerici reali nelle varie aree geografiche Italiane sono ineluttabilmente quelli riportati in precedenza <sup>95</sup>).

\*\* denominata *termodinamica* in quanto prevede l'accumulo di energia termica in sali fusi a temperature elevate, in particolare nitrati di sodio e potassio anidri a 550 °C (caveat: a meno di prevedibili problemi di corrosione ed

nominali, formata da 360 specchi parabolici collettori e concentratori della luce solare di 200 000 m<sup>2</sup> di superficie (cioè 0,5•0,5 km<sup>2</sup>)<sup>\*</sup>, su 40 ettari di terreno o area solare (cioè 400 000 m<sup>2</sup>), in fase di avanzata realizzazione (termine lavori 2007) presso la Centrale ENEL a ciclo combinato di Priolo Gargallo (attualmente da 760 MWe), rientrata recentemente in esercizio nel polo chimico di Siracusa (Sicilia orientale). L'energia termica immagazzinata mediante i sali fusi ad alta temperatura verrà convertita in energia elettrica con efficienze maggiori rispetto alle centrali fotovoltaiche convenzionali. Si tratta di un piccolo passo per la produzione di una quantità limitata d'energia seppure a bassissima densità di potenza<sup>\*\*\*</sup>, ma comunque d'estrema rilevanza scientifica e tecnologica. Purtroppo le enormi superfici necessarie per tali impianti sarebbero sottratte a qualsiasi altra attività umana, compresa agricoltura ed allevamento del bestiame, e questo aspetto non può non essere preso in considerazione in una seria valutazione d'impatto ambientale<sup>\*\*\*\*</sup>. I suoli, a causa della mancata insolazione, sperimenterebbero inoltre un consistente ed innaturale abbassamento di temperatura, che dovrebbe allarmare qualsiasi ambientalista.

### 8.1 Le nuove idee sono comunque sempre benvenute

Il diffuso clima di *relativismo scientifico* porta spesso l'opinione pubblica a ritenere poco attendibile, o comunque opinabile ed oggetto di discussione salottiera, qualsiasi informazione o teoria scientifica, con grave danno per la salute, l'economia ed un rallentamento nello sviluppo della società. Ancora peggio, tutte le teorie scientifiche o pseudoscientifiche - ancorchè fantasiose - diffuse dai media vengono considerate equivalenti ed ugualmente accettabili, specialmente se presentate in maniera accattivante e facile da comprendere senza eccessive competenze specifiche. In questo clima perfino le parole e le teorie di Albert Einstein (il 2005 è stato l'anno della Fisica, *annus mirabilis*, dedicato alla scoperta della Relatività Ristretta) sono state fraintese e maleinterpretate dai *filosofi da salotto*, come li ha definiti il Premio Nobel per la Fisica Richard P. Feynman<sup>89,90</sup>, l'ideatore della Teoria della Relatività (e Padre dell'Energia Nucleare) era un risoluto sostenitore dell'*oggettività* della verità scientifica (la velocità della luce è una costante della natura, i fenomeni fisici non dipendono dal sistema di riferimento e quindi non dipendono dalla soggettività dell'individuo) ed attribuiva ad errori dell'interpretazione umana le varie opinioni che soggetti diversi possono avere sullo stesso fenomeno fisico (*Principio di Relatività*,

---

all'instabilità termica dei nitrati stessi, che sono i costituenti di base di comuni esplosivi come la polvere pirica; alcuni nitrati, come il nitrato d'ammonio, possono addirittura esplodere per semplice percussione). In realtà tutte le macchine termiche sono "termodinamiche" e devono pertanto obbedire ai principi della termodinamica stessa. In base al II Principio della Termodinamica il rendimento di un qualsiasi ciclo termodinamico in una qualsiasi macchina termica è inferiore al 100% ed in base al Teorema di Carnot il massimo rendimento ottenibile  $\eta = 1 - T_2 / T_1$  dipende solo dalle temperature delle due sorgenti di calore, e maggiore è la temperatura d'esercizio  $T_1$  rispetto alla temperatura ambiente  $T_2$ , maggiore è il rendimento, a condizione che il Ciclo venga compiuto in condizioni quasi statiche-reversibili.

\* si suppone un'efficienza di conversione globale del 50%.

\*\*\* Potenza installata per unità di volume o superficie dell'impianto.

\*\*\*\* Una centrale solare fotovoltaica termodinamica da 1 GWe (del tipo Archimede) richiederebbe 10 milioni di m<sup>2</sup> di specchi analoghi, cioè 3•3 km<sup>2</sup>.

peraltro già elaborato da Jules-Henri Poincaré nel 1895). Eppure la sua visione del mondo fu utilizzata impropriamente per sostenere acriticamente l'affermazione “tutto è relativo”, che è in netto contrasto con la teoria stessa. Einstein soleva affermare di fronte ai sostenitori dell'opinabilità dell'interpretazione umana del mondo: “lei è sicuro che la Luna non esista se lei non la guarda ?”<sup>96,97</sup>), dimostrando una totale fiducia nell'oggettività della realtà naturale e nella fallacia dell'interpretazione umana. In controtendenza, i negatori del relativismo scientifico sostengono ad esempio le seguenti affermazioni solo apparentemente ovvie: 1) la temperatura del Pianeta Plutone ha un certo valore in un dato punto della sua superficie, anche se l'uomo non sarà mai in grado di recarsi là a misurarla, oppure: 2) la faccia nascosta della Luna esisteva anche prima che l'uomo mandasse dei satelliti artificiali ad osservarla.

In questo contesto, alcuni autori, come Howard Odum<sup>98</sup>), hanno sviluppato in anni recenti una metodica inusitata per il calcolo dei bilanci energetici locali e planetari, introducendo la definizione di grandezze innovative e fantasiose quali *emergy* (i.e., da *energy memory*), *transformity*, *empower* (*emP*), *emdollar* (*em\$*) ed altre, con la finalità di normalizzare l'intero bilancio energetico del pianeta e delle attività antropiche ad un unico sistema di riferimento, l'energia solare, ritenuto per definizione rinnovabile ed a costo zero in quanto inesauribile almeno fino all'estinzione del sistema solare e del nostro sistema planetario (~ 5 miliardi d'anni, a meno d'improbabili cataclismi naturali o impatti di grossi meteoriti o comete). In tale trattazione - ad esempio - una foresta (o un giacimento petrolifero) è vista come un immenso serbatoio di energia accumulata in passato in un periodo di tempo estremamente lungo dalla luce solare (quindi *emergia*), dal quale è possibile ottenere una piccola frazione dell'energia accumulata trasformandola in lavoro meccanico od energia elettrica, ad esempio mediante un processo ad alta entropia quale la combustione. Mentre l'energia si misura in joule (J), l'*emergia* di Odum si misura in *emergy joule* o (*emJ*) e l'*emergia* solare in *solar emergy joule* (*sej*), ed il rapporto - sempre maggiore dell'unità - fra *emergia* ed energia è definito *transformity* della fonte energetica per ottenere un prodotto od un servizio ed è misurato in  $emJ.J^{-1}$  o  $sej.J^{-1}$ ; l'energia solare ha quindi per definizione una *transformity* unitaria. Per ogni trasformazione d'*emergia* (o energia) in un'altra, per opera della natura o dell'uomo, il valore della *transformity* del prodotto o servizio risulta ampiamente crescente (i.e. si tratta di un modo inusuale per enunciare l'ineluttabilità del II Principio della Termodinamica classica). Odum peraltro è estremamente ardimentoso, ed introduce all'apoteosi della sua trattazione anche un IV e V Principio della Termodinamica (che si aggiungono ai 3 Principi classici, più il Principio Zeresimo)<sup>98,99</sup>), seppur in maniera poco convincente<sup>89</sup>). Purtroppo la trattazione di Odum, anche se innovativa nel linguaggio e nell'impostazione, pecca di superficialità e di (apparente) scarsa informazione, in quanto essendo frutto di un'opinione ideologicamente preconcepita *ignora* in maniera totale e pregiudiziale l'esistenza dell'energia nucleare (i.e. 17% dell'attuale energia elettrica mondiale) e tende a sopravvalutare le fonti energetiche naturali *rinnovabili*, rispetto all'effettivo uso che di queste può essere compiuto senza arrecare danni collaterali agli ecosistemi. Ovviamente, la stessa definizione “naturale” è opinabile, in quanto qualsiasi fonte energetica è in ultima analisi naturale, compresa l'energia nucleare proveniente dalla fissione

dell'uranio o del torio.

In positivo bisogna considerare, secondo l'opinione (difficilmente condivisibile) del filosofo della scienza ed approfondito studioso del *metodo galileiano* Paul K. Feyerabend, sostenitore dell'indispensabilità (secondo lui storicamente comprovata) dell'*anarchismo nel metodo scientifico*, che qualsiasi teoria od elucubrazione teorica è comunque benvenuta per lo sviluppo della conoscenza scientifica, anche se frutto di un approccio intuitivo ed irrazionale. Feyerabend nel suo accanito dibattito con l'amico e rivale il logico e filosofo della scienza Imre Lakatos, allievo come lui stesso di Karl R. Popper, sostiene come Galilei - ben lungi dal basarsi su solide basi di matematica, ottica ed astronomia di cui viceversa era padrone il suo contemporaneo Johannes Kepler - avesse *recepito* l'ipotesi eliocentrica copernicana in maniera intuitiva ed ampiamente irrazionale (*a pelle* come si dice oggi), ed avesse formulato delle ipotesi *ad-hoc* (*anarchismo del metodo*) per sostenere la sua visione dell'universo, anche se essa appariva palesemente in contrasto con le semplici osservazioni ottenibili col senso comune e suffragate da secoli di dottrina aristotelica (*e.g.* esperimenti del sasso e della torre, caduta dei gravi su un piano inclinato, teoria dei moti relativi, prime osservazioni dei pianeti e delle stelle col telescopio)<sup>100,101</sup>.

Purtroppo la convinzione che le grandi scoperte scientifiche e tecnologiche siano spesso (se non sempre) dovute al caso ed alla fortuna dello sperimentatore è ampiamente diffusa e difficile da estirpare (*e.g.* la *mela cadente sul naso* che avrebbe suggerito la teoria della gravitazione universale a Sir Isaac Newton, l'*aquilone catturafulmini* di Benjamin Franklin, le *sei scimmie disposte ad anello legate per le code* che avrebbero suggerito a Friederich August Kekulé von Stradonitz la struttura del benzene, la *muffa antibatterica* di Alexander Fleming (da non confondersi col più noto Ian Fleming padre dell'Agente 007), la *paraffina moderatrice di neutroni* di Enrico Fermi) e tale convinzione viene ampiamente utilizzata per esorcizzare il pubblico meno competente, convincendolo che si possano ottenere risultati spettacolari senza un'appropriata cultura e preparazione scientifica (un'ulteriore conseguenza del *relativismo scientifico*). Con la caparbietà, l'ironia e l'intuito, l'anarchismo galileiano avrebbe quindi demolito molte delle convinzioni dell'epoca, impersonate dal povero signor *Simplicio* protagonista del Dialogo sui due Massimi Sistemi del Mondo<sup>99</sup>, a dimostrazione - secondo Feyerabend - che le svolte più significative nella Storia del Pensiero Scientifico sarebbero frutto più dell'intuizione che di una provata base razionale. Feyerabend, al culmine della sua trattazione, afferma che la *Scienza* moderna è l'equivalente di ciò che in passato furono le *Religioni* con le quali ha in comune il *carattere mitico e l'assolutismo*, con lo spiacevole inconveniente che tutti coloro che non utilizzano il metodo scientifico ufficiale (in una data epoca storica) risulterebbero emarginati dalla comunità scientifica stessa, e che la *Scienza* viene utilizzata dai governi in modo spregiudicato per il mantenimento del potere e salvaguardare quindi lo *status-quo*.

Per confutare tale argomentazione apodittica, basta ricordare che un Paese come l'Italia (4° o 5° potenza economica mondiale), a partire dagli anni '70 del Novecento, ha impegnato per la ricerca scientifica meno dell'1% del PIL (attestandosi su valori simili od inferiori a quelli di molti Paesi sottosviluppati) e che gli scienziati nella società italiana (più che in molti

Paesi Occidentali) hanno delle retribuzioni scadenti, un potere decisionale trascurabile, ed indici di consenso assolutamente irrilevanti da parte del grosso pubblico e di conseguenza di molti uomini politici che lo rappresentano in Parlamento. A questa situazione oggettivamente drammatica si aggiunge il dato che, a partire dagli stessi anni '70, anche l'Industria Italiana ha ridotto drasticamente i finanziamenti per la ricerca, attestandosi – con meritevoli eccezioni - sull'attuale 4% del proprio prodotto (altro che commistione fra Scienza, Potere Economico e Stato).

Chi scrive si trova in maggiore sintonia con la visione pragmatica e realistica di Thomas Alva Edison inventore tra l'altro del fonografo, della lampadina ad incandescenza, e d'innomerevoli altre creazioni della razionalità umana, del duro lavoro e dell'ingegno (brevettò più di mille invenzioni) più che dell'anarchismo scientifico. Edison, che aveva svolto la sua attività di geniale inventore ininterrottamente dall'età di soli 11 anni fino alla morte (avvenuta ad 84 anni), sosteneva nel 1879 il noto motto “il genio è costituito per l'1% da intuito e per il 99% da sudore”, esprimendo un concetto sicuramente impopolare ai giorni nostri, ed in totale contrasto con la visione anarcoide di Feyerabend<sup>100</sup>. Con queste premesse ideologiche, non è difficile comprendere perché molti giovani antepongano le illusioni di una carriera ritenuta facile e ben remunerata (“Gioco del Calcio”, “Saranno Famosi”, “Le Veline e Velone”, “Il Grande Fratello”) ad una carriera Scientifica ricca d'ostacoli e scarsamente riconosciuta dalla Società.

E' evidente peraltro come le ricerche e le invenzioni di personalità pragmatiche come Edison, del genio eclittico Leonardo, del geniale e sfortunato inventore del telefono Antonio Meucci, della Pila Galvanica Alessandro Volta, della radio Guglielmo Marconi, del padre della Missilistica e dell'Astronautica Wernher von Braun, dell'inventore della Chimica Industriale Organica Walter Reppe, dell'inventore della Pila Atomica Enrico Fermi, del discusso (ed invidiato) inventore del PC Bill Gates, abbiano dato un **reale** contributo allo sviluppo ed al benessere della Società umana, a differenza delle sterili ed eccentriche teorie di Odum e Feyerabend.

Basta pensare che la sola introduzione della *pastorizzazione del latte* \* in Inghilterra a fine del XIX secolo, dimezzò in un solo anno la mortalità infantile dovuta a parassiti ed agenti patogeni naturali d'origine biologica. D'altronde i nomi delle numerose decine di Premii Nobel per la Medicina e la Chimica, conferiti a scienziati che hanno sconfitto (od arginato) malattie gravissime come: colera, difterite, morbillo, peste, TBC, tifo, malaria, sono raramente conosciuti dall'opinione pubblica o ricordati dai media, anche se tali malattie mietevano decine di milioni di vittime ogni anno nella sola Europa fino al secolo scorso.

La razionalità (di Edison) e non l'anarchismo metodologico (di Feyerabend) e le discussioni salottiere dei filosofi, od il semplice buon senso, dovrebbero portare alla conclusione che chi ha contribuito attivamente, o ha avvallato in maniera supina ed acritica le

---

\* Sterilizzazione mediante riscaldamento a temperatura moderata (60-85 °C), ideata da Louis Pasteur nel 1860. Poiché la convinzione che il latte appena munto sia dotato di particolari proprietà nutrizionali e terapeutiche era (ed è tuttora) diffusa e sedimentata nella cultura popolare, gli studi e la proposta di Pasteur vennero guardati con sospetto per molto tempo, dilazionando l'introduzione della pasteurizzazione per decenni ed in alcuni Paesi per almeno un secolo, con un enorme numero di vittime innocenti ed inconsapevoli.

scelte energetiche italiane (e molte altre) non dovrebbe lamentarsi oggi per le inevitabili conseguenze. Ad esempio, un cittadino Italiano coerente con le proprie scelte antinucleari (o più globalmente antienergetiche) del passato o del presente, dovrebbe rinunciare spontaneamente a quella percentuale di energia elettronucleare che viene importata dall'estero (18%), auto-limitando i propri consumi in maniera proporzionale e mettendo a disposizione la sua parte d'energia per anziani, bambini e bisognosi assolutamente incolpevoli di quanto accaduto \*. E' facile invece verificare come una simile osservazione provochi in genere due tipi di reazioni:

1) una rassegnata richiesta di scuse per la scelta avventata, seguita da un'accusa alle Istituzioni ed ai Partiti Politici per non aver saputo trasmettere un messaggio corretto all'epoca dei fatti (in realtà in un Paese libero come l'Italia, l'elettore è sempre responsabile delle proprie azioni e delle proprie scelte);

2) una stizzita reazione (talvolta accompagnata da insulti e contumelie) ed un netto rifiuto di affrontare l'argomento, tipica di chi ha posizioni preconcepite ed ideologicamente precostituite.

In entrambi i casi comunque, l'interessato dichiarerà con decisione di *non essere disponibile ad accettare volontariamente alcuna riduzione della propria disponibilità energetica*.

## 9 IL DISASTRO DEL **LENIN COMPLEX DI CHERNOBYL** DEL 26 APRILE 1986, FRA LEGGENDA E REALTA'

I dati riportati in TAB. 2 <sup>31,76,103)</sup> non sono comprensivi dell'incidente di Chernobyl del 1986 (l'unico nell'intera storia dell'energia nucleare ad aver comportato un numero significativo di vittime), che non va dimenticato e del quale non va sminuita la gravità, ma che deve essere inquadrato realisticamente per darne la giusta prospettiva. Come già esposto, a Chernobyl non avvenne alcuna esplosione nucleare, bensì due esplosioni in rapida sequenza di vapore e gas combustibili (verosimilmente una miscela d'idrogeno e monossido di carbonio), seguite da un incendio <sup>80 p.28)</sup>. I dati definitivi sulle vittime causate da tale incidente sono stati *grandemente ridimensionati* e sono risultati del tutto trascurabili per l'Italia (a parte l'impatto psicologico ed economico).

Le vittime totali sicuramente accertate sono state alcune decine in tempi brevi durante e dopo l'incidente (31 decessi in pochi giorni per varie cause fra il personale di pronto intervento, *i.e.* denominati *liquidators*) \*, ed avrebbero dovuto essere qualche migliaio dal 1987 ad oggi secondo le proiezioni più pessimistiche, limitatamente alle aree prossime

---

\* Nell'estate particolarmente afosa del 2003, si ebbe un incremento nei decessi degli anziani in Italia di ~ 4 000 unità nel solo mese di luglio, pari al 100% in più in alcune città del Nord come Milano e Torino. In Francia – Paese altamente nuclearizzato – le vittime stimate furono oltre 20 000, in quanto molte degli impianti nucleari erano fermi per ordinarie operazioni di manutenzione programmate da tempo.

\* I *liquidators* intervenuti a Chernobyl in tempi successivi all'incidente furono oltre 600 000, 134 dei quali ricoverati per esposizione acuta a radiazioni ionizzanti, e secondo l'OCSE-2002, 14 fra questi sono deceduti per tale esposizione<sup>7</sup>.

all'impianto. Per la verità, i 1 800 casi di tumore alla tiroide nelle popolazioni (specialmente bambini nati dopo il 1986) dell'Ucraina e della Bielorussia, attribuiti all'incidente, sono stati nella maggior parte dei casi curati con successo con una riduzione dei decessi a qualche decina (10 decessi su 700 casi accertati secondo l'OMS), mentre altre patologie tumorali come leucemie e linfomi *non* si sono discostate dalla normale incidenza statistica presente naturalmente nelle regioni interessate. Bisogna osservare come quest'ultimo dato sia in netto contrasto con le previsioni statistiche basate sugli attuali standard di radioprotezione, che sono evidentemente troppo cautelativi e basati sulla ipotesi radioprotezionistiche denominata LNT (Linear No Theshold), che prevede effetto zero a dose zero senza alcuna dimostrazione scientifica di tale assunzione.

**TAB. 3** - Dose efficace media annua (in  $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ ) alla popolazione negli Stati Uniti derivante da diverse sorgenti di radiazione e il loro contributo percentuale <sup>17)</sup>.

	SORGENTE	RATEO DI DOSE $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$	FRAZIONE DEL TOTALE (%)
Radioattività naturale	Radon	2	55
	Cosmica	0,27	8
	Terrestre	0,28	8
	Interna al corpo	0,39	11
	TOTALE NATURALE	3 (a)	82
Radioattività artificiale	Diagnostica X	0,39	11
	Medicina nucleare	0,14	4
	Prodotti di consumo	0,1	3
Altre sorgenti artificiali	Esposizioni lavorative (b)	< 0,01	< 0,3
	Ciclo combustibile nucleare (c)	< 0,01	< 0,3
	Ricadute radioattive (d)	< 0,01	< 0,3
	Varie	< 0,01	< 0,3
	TOTALE ARTIFICIALE	0,63	18

- (a) 1 volo transoceanico di 8 ore  $0,01 \text{ mSv}$ ; dormire a fianco di una persona  $0,01 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ .  
 (b) Esposizioni in normali attività lavorative, non per lavoratori professionalmente esposti.  
 (c) Ove presenti impianti di produzione e riprocessamento. (d) Escludendo l'evento Chernobyl 1986.

Le stime definitive dell'OCSE valutano in *meno di un centinaio il numero totale di vittime su scala mondiale (50 secondo alcune fonti)*, numero proiettato ad oltre 25 anni dall'incidente (meno dei disastri idrogeologici in Italia), mentre l'unica patologia tumorale riscontrata con

certezze è risultata appunto il tumore alla tiroide. Nessuna altra patologia neonatale, come deformità infantili o danni genetici accertati (*teratogenesi*), è stata correlata all'incidente, anche nelle zone colpite più duramente dal fall-out radioattivo. Per contro, l'evacuazione forzata d'ingenti gruppi di popolazione, concomitante con la situazione politica di disintegrazione dell'ex Unione Sovietica, ha provocato un elevato disagio sociale e *rilevanti disturbi di tipo psichico e psicosomatico*, definiti comunemente *distonia vegetativa* o semplicemente *Sindrome di Chernobyl*.

Tale Sindrome ha colpito, seppur in minore misura, anche Paesi (come l'Italia) non coinvolti direttamente nell'incidente e per i quali il numero reale di vittime è stato valutato essere nullo <sup>103</sup>). Il disagio psicologico ha invece provocato un numero difficilmente stimabile di aborti volontari, crisi cardiache talvolta associate a decesso e sindromi neurologiche, specialmente nei Paesi Occidentali, dovute esclusivamente alla incontrollata campagna allarmistica di *disinformazione*.

Nonostante le cifre ampiamente confortanti, non è raro che le fonti di *disinformazione* continuino a riportare dati assolutamente inverosimili sul reale numero di vittime (15 000, 30 000, 7 000 000) \*, trasmettano messaggi allarmistici relativi a malformazioni della prole umana ed animale, nonché notizie di inverosimili mutazioni nelle specie vegetali, che come si è detto non corrispondono affatto alla realtà dei fatti. Bisogna ricordare che analoghe previsioni catastrofiche furono riportate al tempo dell'incidente di TMI, che viceversa si è dimostrato essere privo di vittime e con danni materiali limitati all'impianto stesso. In TAB. 3 sono confrontate le dosi da radiazioni ionizzanti d'origine naturale con quelle d'origine antropica.

Per concludere, bisogna considerare uno scenario più ampio nel suo insieme (a  $4\pi$ ): ogni anno, gli incidenti nelle miniere di carbone e le esplosioni di gas naturale causano decine di migliaia di morti. Nella sola Cina sono ca. 10 000 i morti all'anno nelle miniere di carbone, pari ad un equivalente di 500 morti all'anno in un Paese come l'Italia <sup>1)</sup>. Tuttavia, uno stillicidio di incidenti in miniera che provocano la morte di numerosi minatori ed addetti ai soccorsi passa quasi sempre inosservato da parte dei media, sebbene possa aver causato in un solo giorno un numero di vittime superiore a quello registrato nel corso dell'intera storia dell'energia nucleare. Analogamente non si fa caso al fatto che l'inquinamento atmosferico generato dall'uso eccessivo di combustibili fossili è responsabile, secondo studi condotti dall'OMS, ogni anno della morte di quasi 3 milioni di persone con un tasso di mortalità previsto per il 2025 pari ad un fattore tre più alto.

***Tali valori sono equiparabili a qualche centinaio di “Chernobyl d'inquinamento” ogni giorno per il prossimo futuro.***

---

\* Le stime preliminari ampiamente conservative riportate dall'ONU e dell'OMS erano di 15 000 o 30 000 decessi. Peraltro un editoriale uscito nel 2004 sul New York Times ha affermato che gli individui che hanno sofferto (*suffered*) in varia misura per l'incidente ed i suoi postumi sono 7 milioni. Il rapporto NEA-OECD-2002 e successivamente il Chernobyl Forum 2003-05 stilato sotto l'egida di FAO, UN-OCHA, UNDP, UNEP, UNSCEAR, OMS, su cui è basata la presente trattazione, ridimensiona il numero di vittime a meno di 100 <sup>80,103</sup>).

## 10 SCORIE NUCLEARI: CONTENIMENTO SICURO O DISPERSIONE DISASTROSA?

Il miracolo dell'energia nucleare consiste nella capacità di estrarre vasti quantitativi d'energia da una piccola quantità di U (o Th), elementi naturali presenti in concentrazioni significative sul nostro pianeta <sup>33,38)</sup>. Le scorie dell'industria nucleare conservano la stessa minuscola quantità iniziale d'uranio, e possono essere depositate in modo sicuro sotto depositi naturali od artificiali sotterranei. Il combustibile esaurito prodotto ogni anno dai reattori di tutto il mondo (200 000 m<sup>3</sup> di MILW e 10 000 m<sup>3</sup> di HLW, Low Intermediate and High Level Waste), potrebbe trovare posto all'interno di una struttura a due piani costruita su un campo da pallacanestro od da un grosso albergo di 100•100•20 m<sup>3</sup> <sup>102)</sup>.

La *national repository* della Yucca Mountain, Nevada, è stata progettata per contenere la totalità delle scorie prodotte sul territorio USA dalla nascita dell'industria nucleare e per i prossimi 70 anni. E' quindi necessario sfatare il mito che i residui o scorie dell'industria nucleare (*radwaste*) costituiscano un enorme problema volumetrico; si tratta in realtà di un *quantitativo insignificante su scala globale*. Poiché quindi la produzione di una quantità elevata d'energia genera un quantitativo minimo di scorie facilmente gestibili, l'uranio è stato definito da molti come il dono della natura per *ripulire lo sviluppo economico*, al contrario dei residui dei combustibili fossili che occupano spazi troppo ampi per essere agevolmente gestiti e pertanto sono dispersi direttamente nell'ambiente.

Nonostante le osservazioni precedenti ampiamente rassicuranti, sono in fase avanzata di studio in numerosi Paesi del Mondo (compresa l'Italia su progetti congiunti fra INFN, ENEA, varie Università Italiane, Ansaldo Nucleare) <sup>#</sup>, progetti per la *trasmutazione nucleare delle scorie radioattive* a lunga emivita, quali i prodotti di fissione (FP) scarsamente radiotossici <sup>99gTc e <sup>129Tc</sup></sup> e gli attinoidi minori (MA) ad elevata radiotossicità <sup>237Np, <sup>241Am</sup>, <sup>243Am</sup></sup> ed altri <sup>4,48,49)</sup>. I progetti precedenti seguono due strategie principali completamente diverse:

1) trasmutazione delle scorie mediante irraggiamento neutronico in reattori nucleari termici o veloci dedicati a tale scopo (nuclear transmuters o burners, NTR con coefficiente di conversione inferiore a 0,8), possibilità già ampiamente testata ed impedita solo per ragioni economiche •;

2) irraggiamento delle scorie mediante neutroni secondari veloci da *spallazione*, ottenuti mediante irraggiamento con fasci intensi di protoni di alta energia (0,6 - 3 GeV) su target di piombo fuso, lega eutettica a basso punto di fusione Pb-Bi (LBE) <sup>##</sup>, oppure mercurio liquido a temperatura ambiente, che fungono da Spallation Neutron Source (SNS), oltre che da fluidi di raffreddamento. Queste ultime tecniche, denominate con la sigla ADS (Accelerator Driver

---

<sup>#</sup> Progetti TRASCO (TRASmutazione SCORie), TRASCO-ADS, X-ADS.

• I reattori con fattori di conversione inferiori all'unità (transmuters o burners) concepiti per la trasmutazione delle scorie nucleari, ancorché tecnicamente realizzabili, non sono attualmente utilizzati dati gli elevati costi di tale processo, rispetto allo smaltimento delle scorie in discarica od al riprocessamento del combustibile.

<sup>##</sup> Numerosi sommergibili nucleari Russi (ex- Sovietici), hanno operato per molti anni alimentati per molti anni con reattori nucleari compatti raffreddati a Pb liquido. Tale tecnologia, ampiamente sperimentata nell'Est Europeo, viene ora studiata anche nell'Europa dell'Ovest, in USA e Giappone.

Systems for Transmutation basate su un'idea del Premio Nobel Carlo Rubbia), prevedono l'accoppiamento dell'acceleratore di protoni (probabilmente un LINAC combinato normalconduttivo e superconduttivo, meno verosimilmente un ciclotrone) con un reattore nucleare sub-critico raffreddato a metallo liquido in circolazione forzata o naturale (progetto Ansaldo X-ADS). La potenza richiesta per raggiungere la criticalità verrebbe fornita dall'acceleratore (3-5% del totale) in un delicato equilibrio con i neutroni ritardati di fissione delle scorie, mentre il sistema - fissionando gli attinoidi minori ed le tracce di radionuclidi di U e Pu di scarsa utilità pratica presenti nel combustibile esausto e nel MOX - potrebbe auto-sostenersi dal punto di vista energetico, senza alcun rischio di criticalità. Secondo l'opinione espressa dal Nobel Carlo Rubbia nella General Conference dell'IAEA del Set 2004, 1 tonnellata di attinoidi fissionata completamente potrebbe produrre una quantità di energia pari a 3 milioni di tonnellate di carbone (il calcolo - relativamente banale - è stato già eseguito nel capitolo 1).

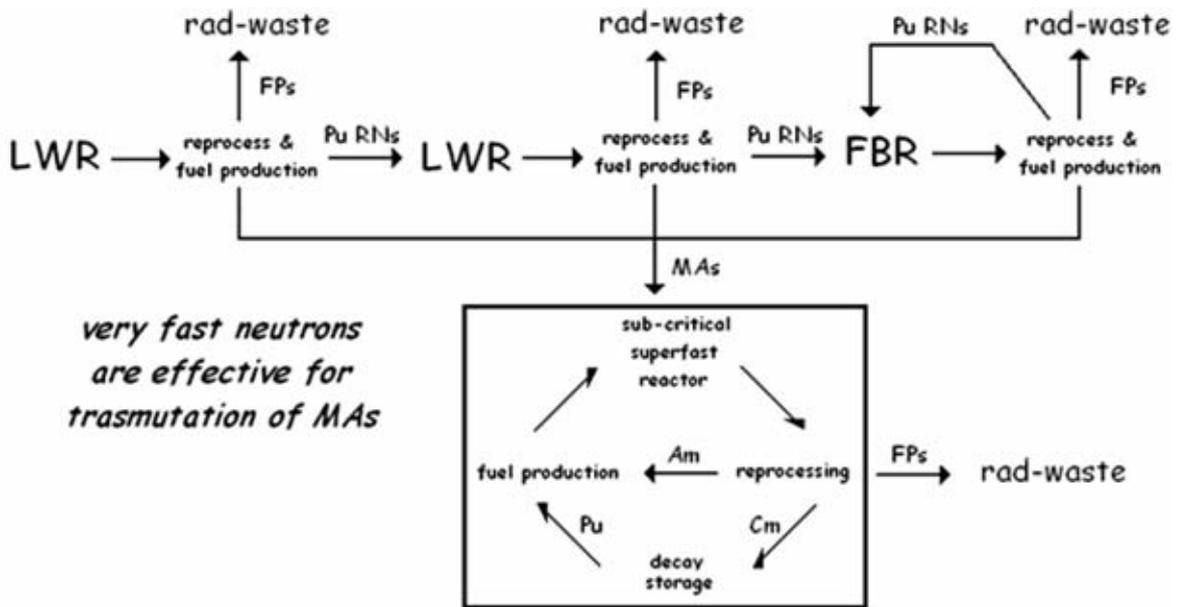
Escluso il caso dell'industria nucleare, i Governi e le Popolazioni hanno viceversa trasformato l'ambiente in una discarica aperta di rifiuti di combustibili fossili, essenzialmente per poter rispondere alle pressioni dell'opinione pubblica che chiede un'energia d'elevata qualità e bassa entropia (quindi elettrica o meccanica), facilmente disponibile ed a *basso prezzo*: bisogna considerare che nella maggior parte dei Paesi, il prezzo dell'energia nucleare, viceversa, comprende già all'origine una somma stanziata per il costo d'immagazzinamento e lo smaltimento permanente e sicuro delle sue scorie. Il prezzo del combustibile nucleare è stazionario e tendenzialmente in diminuzione, date le grandi scorte accumulate e la disponibilità di uranio arricchito e plutonio provenienti dagli ordigni nucleari dismessi, nonché dalle enormi scorte di Depleted Uranium accumulate nei decenni. Ovviamente il diverso trattamento cui sono sottoposti i residui dell'industria nucleare (stoccaggio in discariche geologicamente sicure) ed i prodotti di combustione (immissione diretta nell'ambiente), dipende da due considerazioni contrastanti che hanno risvolti tecnici ed al contempo psicologici. E' indubbio che le scorie nucleari non possano essere immesse indiscriminatamente nell'ambiente, data la loro elevata radiotossicità e lunga emivita, a differenza di quanto avviene con i residui della combustione che, almeno secondo un approccio alquanto superficiale, sono poco tossici, e comunque diluibili negli ecosistemi \*. Purtroppo quest'ultima convinzione è smentita dai dati più recenti sull'impatto ambientale di tali discariche incontrollate (gas serra, metalli pesanti, scorie radioattive provenienti dalla combustione dei fossili o TENORM \*\*), che stanno evidentemente modificando gli ecosistemi in cui viviamo .

---

\* Per la verità sono state anche valutate (ENI in Italia) le possibilità di recuperare la CO<sub>2</sub> emessa dalle centrali termoelettriche, solidificandola come ghiaccio secco, ed immagazzinandola nel sottosuolo al posto del petrolio estratto. Tale processo, tecnicamente fattibile, avrebbe ovviamente dei costi enormi che renderebbero l'impiego di combustibili fossili improponibile dal punto di vista economico.

\*\* NORM significa "Naturally Occurring Radioactive Material" e TENORM "Technologically Enhanced NORM", quali gli scarti radioattivi provenienti dalla combustione di carbone e petrolio, che contengono in forma concentrati le catene radioattive naturali di U e Th, nonché ovviamente il <sup>40</sup>K presente nel potassio, elemento indispensabile per il metabolismo della fauna e della flora, dalle quali si sono formati i giacimenti di combustibili fossili.

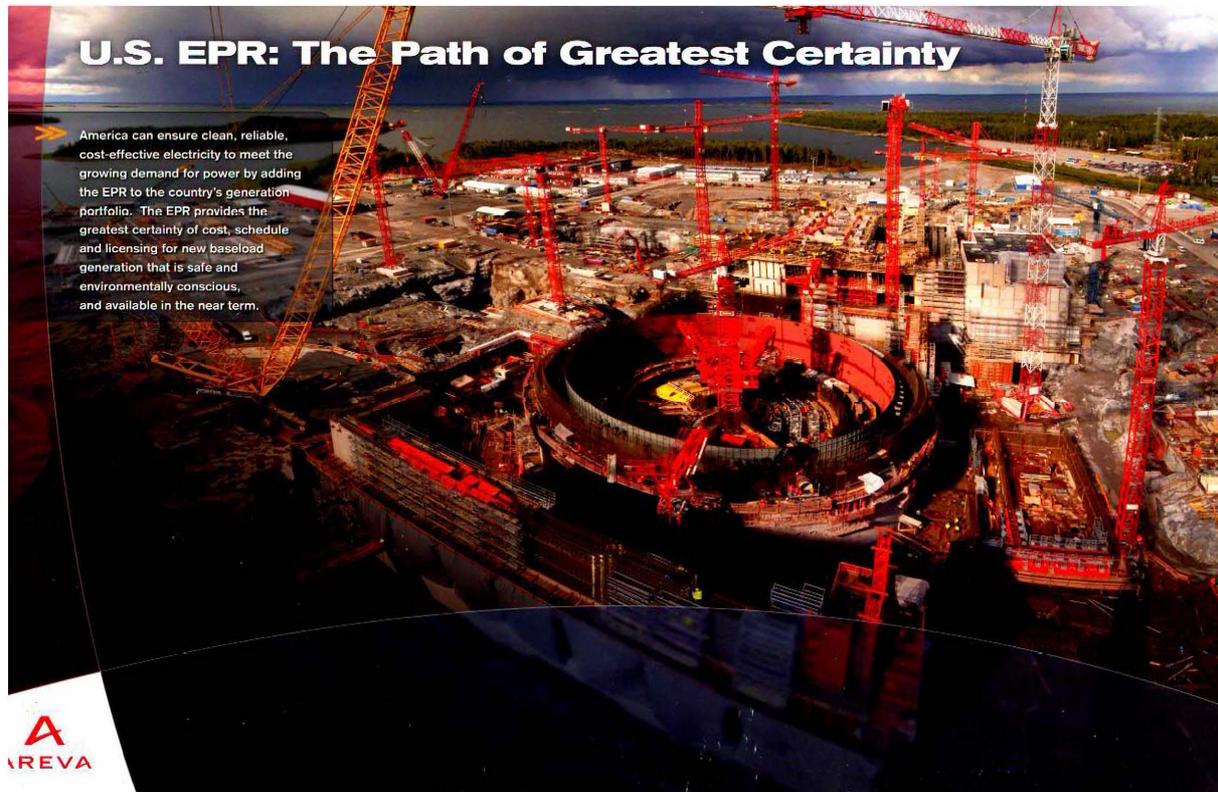
L'elevata radiotossicità delle scorie nucleari fa sì che l'industria nucleare sia l'*unica* fra le tante che nel proprio ciclo comprende anche la raccolta, il trattamento e lo smaltimento dei rifiuti da essa prodotti, rappresentando l'unico esempio di ciclo energetico chiuso utilizzato su larga scala. In pratica questo significa che *l'energia nucleare è la più pulita* fra quelle impiegate in maniera intensiva, riuscendo a mantenere costi competitivi con quelli della combustione dei fossili, malgrado comprenda al proprio interno anche i costi dello smaltimento dei rifiuti prodotti <sup>7,10,11</sup>). Grazie agli efficaci sistemi di schermatura e di contenimento, i radwaste dell'energia nucleare civile non hanno mai arrecato alcun danno a persone o all'ambiente.



**FIG. 25:** Ciclo del combustibile nucleare con riciclo di un reattore ad acqua leggera, LWR (in due fasi) nel quale gli attinoidi minori (MAs) sono trattati separatamente dai radionuclidi di U and Pu. Possono essere aggiunte più fasi di riciclo a condizione che il combustibile esausto non contenga radionuclidi con elevate sezioni d'urto di assorbimento, la cui concentrazione aumenta generalmente col *burn-out* (i.e. utilizzo o vecchiaia) del combustibile stesso <sup>47,103</sup>).

Una soluzione naturale, appoggiata dalla scienza, per l'immagazzinamento sicuro e l'isolamento dalla biosfera delle scorie radioattive è quella di sfruttare siti geologici stabili. Basti pensare che diversi miliardi di m<sup>3</sup> di gas naturale sono rimasti sotto terra, nello stesso sito geologico, per molti milioni d'anni. A confronto, la quantità di scorie radioattive che necessita di un luogo d'immagazzinamento permanente è minuscola e per di più non si tratta di gas volatili o di liquidi, ma di materiale ceramico o vetroso, solido e stabile. I contenitori di tali materiali vetrificati sarebbero costituiti da strati concentrici d'acciaio o rame, in grado di resistere per migliaia d'anni alle condizioni di corrosione più sfavorevoli. Strati supplementari

di protezione sono forniti da *barriere multiple di protezione artificiale*, tra cui il combustibile ceramico e contenitori robusti destinati a durare nel tempo<sup>\*</sup>.



**FIG. 26:** Il cantiere dell'EPR di Olkiluoto, Finlandia, come si presentava nel 2005. Gli USA sono intenzionati ad installare alcuni EPR sul proprio territorio.

La natura peraltro ha fornito numerosi ed ottimi esempi d'*immagazzinamento* di scorie radioattive, permettendo ad esperti di radiazioni, geologi e ingegneri di produrre piani dettagliati per l'immagazzinamento sotterraneo sicuro delle scorie. Studiando ad esempio ciò che è avvenuto in quello che viene definito *reattore nucleare naturale* di Oklo<sup>1,35,36</sup>: 1,8 Ma orsono, nella zona oggi nota come Gabon in Africa, un ricco deposito di uranio naturale, stimato in ca. 400 000 tonnellate, produsse per un periodo di tempo di almeno 200 000 anni (forse 1 milione) una serie spontanea di reazioni nucleari di vasta portata, periodicamente favorite e moderate da infiltrazioni d'acqua. Da allora, nonostante migliaia di secoli di piogge tropicali e d'acqua sotterranea, le longeve *scorie radioattive* di quel *reattore naturale* si sono

<sup>\*</sup> Depositi di grandi dimensioni sono già stati realizzati in USA (Yucca Mountain, Nevada), Belgio, Finlandia, Russia, Svezia e numerosi altri Paesi Europei. In realtà molti di questi depositi hanno una licenza di esercizio limitata nel tempo, ad esempio nel caso della YM la licenza ha la durata di 70 anni, ciò in previsione di un possibile riutilizzo futuro delle scorie ad esempio in impianti di trasmutazione o in reattori nucleari autofertilizzanti.

spostate di meno di 10 metri. In anni successivi, i reattori naturali sono stati scoperti in ogni Continente con risultati analoghi. In conclusione una formazione geologica stabile costituisce già di per se una barriera altamente affidabile. Strati supplementari di protezione sono forniti da *barriere multiple di protezione artificiale*, tra cui il combustibile ceramico e contenitori robusti destinati a durare nel tempo. Inoltre le scorie così depositate, potranno se necessario essere recuperate in anni futuri, se nuove tecnologie (già in fase di studio) offriranno modi per riutilizzare il materiale e/o per ottenere isotopi radioattivi a tempi di dimezzamento più brevi, accelerando così il processo di disintegrazione del materiale radioattivo.

Uno schema di un ciclo avanzato del combustibile nucleare che prevede il completo riutilizzo dei radionuclidi di U e Pu e degli attinoidi minori, con la trasmutazione della maggior parte dei prodotti di fissione, viene mostrato in FIG. 25, mentre nelle FIGs. 26 e 27 è mostrato il cantiere dell'EPR Finlandese ed il dettaglio dei vari componenti dell'isola nucleare.

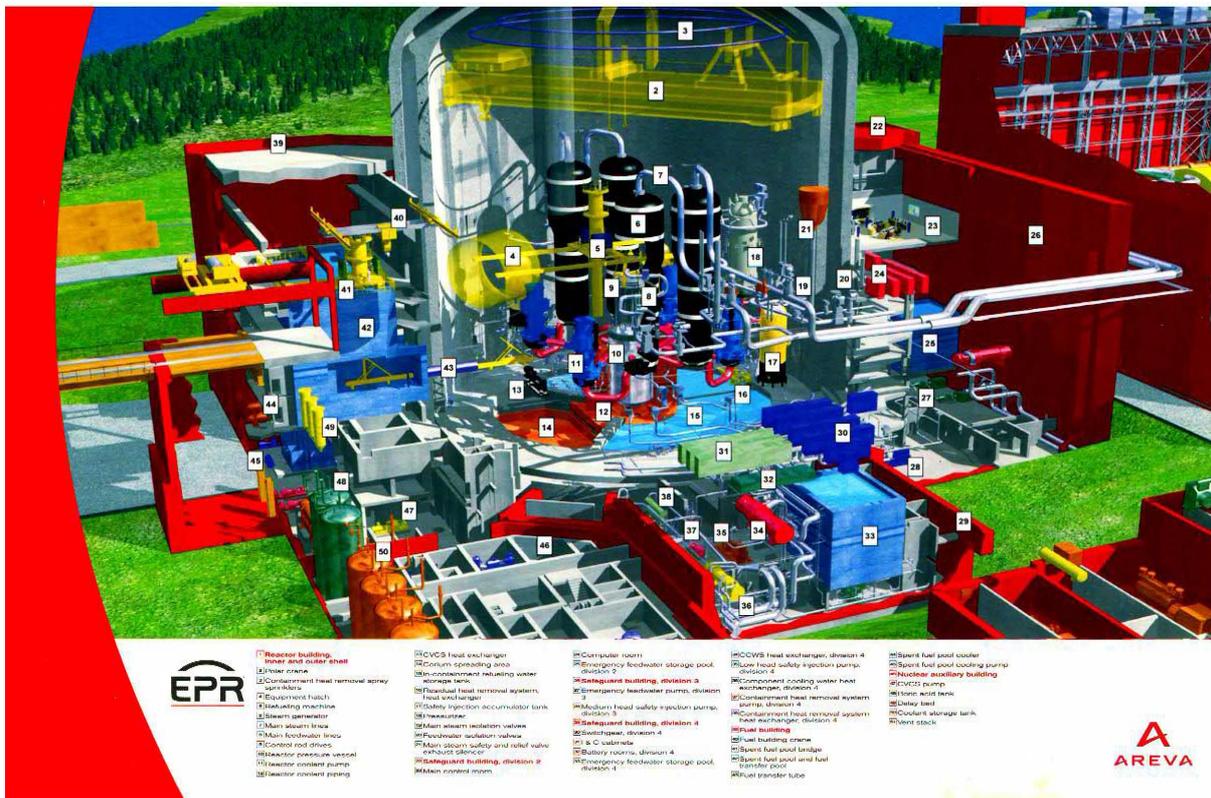


FIG. 27: Schema e dettagli tecnici dell'EPR, con l'isola nucleare, i servizi tecnici ed una parte degli edifici accessori.

## 11 CONCLUSIONI

Il *relativismo scientifico* diffuso dai media e da filosofi da salotto, come sono stati definita da Richard Feynman <sup>89)</sup>, porta spesso l'opinione pubblica a ritenere poco attendibile,

o comunque *interpretabile*, qualsiasi informazione o teoria scientifica, con grave danno per la salute, l'economia, lo sviluppo delle società umane. Di tale clima ha sofferto negativamente il nucleare energetico in molti Paesi del Mondo ed in Italia in particolare. D'altronde, questa non è una novità dei giorni nostri, in quanto le innovazioni tecnologiche hanno sempre suscitato sospetto nell'umanità, come è evidenziato in maniera eclatante dal caso della innocua *pastorizzazione del latte*: l'introduzione di tale metodica rivoluzionaria fu fortemente osteggiata, perché metteva in dubbio la convinzione ancestrale come la Storia dell'Umanità che il latte appena munto fosse dotato di particolari poteri benefici ed energetici, eppure la sua introduzione in Inghilterra a fine del XIX Secolo, dimezzò in un solo anno la mortalità neonatale ed infantile dovuta a parassiti ed agenti patogeni naturali d'origine biologica, con un deterioramento assolutamente trascurabile delle sostanze naturali presenti nel latte stesso (alcune proteine e vitamine termolabili).

Il Principio di Precauzione non deve quindi impedire irrazionalmente lo sviluppo delle attività umane; nel 1825 i noti scrittori Charles Dickens e William Wordsworth si unirono e sostennero una protesta popolare contro la costruzione di una linea ferroviaria fra Manchester e Liverpool con la velocità fantascientifica di  $30 \text{ km.h}^{-1}$ , che veniva paventato avrebbe ucciso fagiani, uccelli migratori e volpi, impedendo la produzione del latte da parte delle vacche e delle uova da parte delle galline, ed ottennero il loro obiettivo per 5 anni, anche se la ferrovia fu comunque inaugurata nel 1930. Posizioni analoghe furono sostenute nella seconda metà del '800 per rallentare la diffusione delle ferrovie nel West Americano. La seconda ferrovia fu la Napoli-Portici inaugurata nel 1839 nel Regno Borbonico delle Due Sicilie. Ovviamente oggi una posizione del genere risulterebbe primitiva, antimoderna ed antistorica ed ogni giorno molti milioni di persone utilizzano il treno come mezzo di trasporto economico e sicuro, non solo in Inghilterra ma in ogni parte del Mondo.

Per molte migliaia di anni, l'umanità ha utilizzato metodiche primitive per la produzione d'energia e di lavoro meccanico (acqua, fuoco, vento). Alcune fra queste hanno provocato e continuano a produrre un enorme impatto sugli ecosistemi e l'ambiente (e.g. combustibili fossili, bacini idroelettrici, sorgenti geotermiche) e da poco più di mezzo secolo a questa parte l'energia nucleare ha introdotto una rivoluzione senza precedenti per sostituire almeno in parte, o comunque affiancare tali tecnologie. I detrattori dell'energia nucleare e delle sue applicazioni paventano spesso il rischio di origine statistica (rischio stocastico) associato a queste tecnologie, trascurando il fatto che si tratta di un rischio globalmente insignificante; è come se di fronte al rischio di rimanere soffocati da un enorme pagliaio che sta per crollarci addosso, si concentrasse la propria attenzione ad evitare di essere punti dal famoso ago disperso nel pagliaio stesso.

Va segnalato tra l'altro che, mentre i processi che sfruttano l'energia solare sono intrinsecamente dotati di bassa efficienza, essendo pari al 11% per conversione fotovoltaica con celle solari al silicio (33% mediante impiego del costosissimo arseniuro di gallio GaAs) e solo all'8% con processi basati sulla sintesi clorofilliana <sup>104</sup>, neppure l'idrogeno sembra completamente scevro da impatto ambientale. Infatti alcuni ricercatori sostengono che essendo le perdite fisiologiche di idrogeno pari a ~ 10%, ciò potrebbe comportare un ulteriore

rischio per lo *strato di ozono* presente nella stratosfera terrestre <sup>105, 93)</sup>.

Tuttavia, va prevalentemente evidenziato che già al giorno d'oggi, oltre a fornire energia pulita, la vasta gamma di tecnologie nucleari contribuisce a:

- migliorare le diagnosi mediche
- curare le malattie dell'uomo
- potenziare le scienze della vita
- migliorare l'alimentazione umana
- proteggere la salute del bestiame
- estirpare pesti virulenti
- sterilizzare presidi chirurgici
- consolidare il controllo qualitativo industriale
- sviluppare risorse idriche
- promuovere la produttività agricola
- sterilizzare e conservare cibo, bevande, derrate alimentari
- far progredire le scienze ambientali
- preservare i beni culturali
- migliorare le prestazioni termomeccaniche di materiali polimerici per impieghi sanitari ed industriali
- migliorare e rendere più veloci i trasporti e le comunicazioni
- facilitare l'esplorazione spaziale
- alimentare sorgenti di luce e calore in aeroporti e zone remote.

Il popolo Giapponese, che subì gli unici 2 bombardamenti nucleari della Storia, ha scelto con decisione l'opzione nucleare per il proprio approvvigionamento energetico e la salvaguardia del proprio ambiente e della propria salute. Le centrali nucleari Giapponesi e Coreane sono normalmente costruite in vicinanza dei centri urbani ed industriali, sfatando l'ulteriore mito che tali impianti debbano essere localizzati in aree desertiche\*.

Il costo del kWe installato da fossili si avvicina a 1 000 US\$ con un prezzo sempre crescente della materie prime, mentre quello nucleare - compreso il riciclaggio delle scorie - è del 10-20% superiore ed il prezzo dei combustibili nucleari è costante o tendenzialmente decrescente. Già ora quindi, grazie alla disponibilità di combustibile a basso costo e alla migliore efficienza, le centrali nucleari - una volta costruite - possono risultare meno costose da gestire. Le centrali nucleari richiedono un investimento iniziale rilevante, ma un costo di gestione successivo decisamente inferiore.

Si osserverà un radicale cambiamento nell'accettazione che l'energia nucleare è la sola opzione testata, oggi come oggi, con la capacità di produrre vasti quantitativi di elettricità pulita su scala globale, solo quando l'umanità si sarà resa conto di non avere altra scelta se non quella di tenere pulito il pianeta su cui vive.

---

\* Il trasporto d'energia elettrica mediante elettrodotti aerei presenta ovviamente dei costi, così come il trasporto di qualsiasi merce, per la costruzione, manutenzione e gestione degli impianti e la parziale dissipazione della potenza elettrica lungo le linee di trasmissione. Costi unitari molto superiori si hanno in caso di trasporto via cavo interrato o sottomarino, data la necessità di elevati investimenti iniziali.

Per concludere, l'energia nucleare è una tecnologia insostituibile a *sviluppo sostenibile, pulita e biocompatibile*; infatti:

- i *combustibili nucleari sono virtualmente inesauribili* od almeno disponibili per un periodo di migliaia d'anni, in particolare se si utilizzassero i processi U-Pu e Th-U in reattori autofertilizzanti (*fast e thermal breeders* rispettivamente)
- il suo grado di sicurezza si è dimostrato superiore a quello delle principali fonti energetiche
- il suo consumo non causa alcuna forma d'inquinamento significativa
- il suo impiego consente di preservare preziose risorse fossili per le generazioni future
- i suoi costi sono competitivi, in diminuzione, e ormai confrontabili coi costi dei fossili
- le sue scorie sono gestibili in modo sicuro, anche nel lungo termine
- il suo impiego eviterà l'ulteriore dipendenza economica e strategica dai Paesi produttori di combustibili fossili
- il suo impiego permetterà di preservare le preziose risorse fossili, che trovano impieghi molto più utili e sofisticati che la semplice combustione.

Il 18% dell'energia elettrica utilizzata in Italia è d'origine nucleare ed è prodotta in Francia, con pesanti rischi di *black-out*, come quello avvenuto in 28 Set 2003, che in alcune aree del Paese è durato fino a 48 ore. Le riprese via satellite, più ancora delle centraline di rilevamento del particolato atmosferico, hanno mostrato come nei primi mesi del 2005, il Nord Italia sia risultato l'area più inquinata del Continente Europeo. E' giunta quindi l'ora che anche nel nostro Paese la classe dirigente prenda atto della realtà, per una rapida ripresa dei programmi nucleari energetici ed il potenziamento delle innumerevoli applicazioni *non-energetiche* dell'inesauribile energia del nucleo <sup>18,93,94,106-109</sup>.

Relativamente allo sviluppo del nucleare per uso pacifico, in Europa e nel resto del mondo si sta assistendo ad una moderata ma ineluttabile ripresa e parafrasando Karl R. Popper si può affermare che "niente è già stato", accogliendo quindi il messaggio ricco d'ottimismo di Konrad Lorenz: "il futuro è aperto" <sup>110,111</sup>.

*"Niente è già stato"*

Sir Karl R. Popper, filosofo della Scienza

*"Il futuro è aperto"*

K. Lorenz, etologo ambientalista, Nobel per la Medicina 1973.

## 12 DEDICA

Questo scritto è dedicato alle nostre tre giovani figlie Claudia Maria, Clelia Maria e Cornelia Dalmazia Maria, con l'auspicio che possano vivere in un mondo più libero e ripulito sia dal punto di vista ambientale, sia da quello ideologico.

## RIFERIMENTI BIBLOGRAFICI

- (1) Casali F., Energia pulita: Quale ? Rischi e benefici associati alla produzione di energia

- da varie fonti energetiche, con prefazione di Renato Angelo Ricci (ed. Cappelli, Bologna, 1987).
- (2) Hydrogen Systems and Nuclear Development, 2001 ANS Winter Meeting, Reno, NV, USA, Nov, 2001, <http://www.iesvic.uvic.ca>
  - (3) Fornaciari P., Il petrolio, l'atomo e il metano, Italia nucleare 1946-1997 (ed. 21° Secolo, Milano, 1998).
  - (4) Bonardi M., Groppi F., Mainardi C.H.S., Barni D., Michelato P., Sertore D., Winter Meeting 2001 dell'American Nuclear Society, Reno, Nevada, USA: EBR-I e "cinquantenario" della produzione di energia elettronucleare, trasmutazione nucleare, impieghi avanzati degli acceleratori, reattori e trasmutatori a metalli liquidi, desalinizzazione dell'acqua marina, celle a combustibile, applicazioni biomediche ed industriali delle radiazioni ionizzanti, Rapporto INFN/TC-01/21 (ed. SIS Pubblicazioni, Frascati, Roma, 2001).
  - (5) Simbeck D.L., Chang E., Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways – Scoping Analysis, Report NREL/SR-540-32525, US DOE, Golden, CO, USA, 2002.
  - (6) Nuclear Production of Hydrogen: Second Information Exchange Meeting (ed. Argonne, IL, USA, Oct 2003, OECD Nuclear Energy Agency, <http://www.nea.fr/>).
  - (7) GLOBAL 2003, Proc. Int. Conf. Nuclear Technology: achieving global economic growth while safeguarding the environment, New Orleans, LA, USA, Nov 2003, Trans. ANSAO, **89**, 1, (2003).
  - (8) Wald M.L., Economia all'Idrogeno, *Le Scienze* **430**, 58, (2004).
  - (9) 2001 ANS Winter Meeting, Hydrogen Systems and Nuclear Development, distributed on CD-ROM by Institute for Integrated Energy Systems (ed. University of Victoria, Canada, <http://www.iesvic.uvic.ca>, 2001).
  - (10) Lake J.A., Bennett R.G., Kotek J.F., L'energia nucleare della prossima generazione, *Le Scienze*, **402** (2002) 30-39.
  - (11) Rouben B., Bonardi M.L., Eds., The Globe, News Magazine of the International Committee of the ANS (ed. ANS, La Grange Park, IL, USA, May 2004, May 2005, <http://www.ANS.org/>)
  - (12) World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/>
  - (13) Groppi F., Bonardi M.L., La strategia dell'utilizzo delle risorse energetiche nucleari nel contesto della relazione fra rischi e benefici (ed. Giornate di Studio INPRAT, Roma, Nov 2003).
  - (14) Bonardi M.L., Groppi F., Il potenziamento del nucleare energetico in Europa e nel mondo: puntualizzazioni sull'atipicità del caso Italia, *Notiziario SIRR*, Roma, **7(3)**, 7, (2004).
  - (15) Cascioli R., Gaspari A., Le bugie degli ambientalisti. I falsi allarmismi dei movimenti ecologisti, con prefazione di Regge T. (ed. Piemme Ed., Casale Monferrato, 2004).
  - (16) Merricks L., The World Made New: Frederick Soddy, Science, Politics, and Environment (ed. Oxford University Press, Oxford, UK, 1996).
  - (17) Seaborg G., Seaborg E., Adventures in the Atomic Age, from Watts to Washington, (ed. Farrar, Strauss & Giroux, New York, USA, 2001).
  - (18) Waltar A.E., Radiation and Modern Life, Fulfilling Marie Curie's Dream (ed. Prometheus Book, New York, USA, 2004).
  - (19) Weissmehl K., Arpe H.,-J., Industrial Organic Chemistry (ed. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2003).
  - (20) Molins R., Ed., Food Irradiation: Principles and Applications (ed. Wiley, New York, USA, 2001).

- (21) Helus F., Colombetti L., Eds., Radionuclides Production, Vols. I,II (ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1983).
- (22) Vértes A., Nagy S., Klencsár Z., Eds., Handbook on Nuclear Chemistry, 5 Vols. (ed. Kluwer Academic, Amsterdam, The Netherlands, 2003).
- (23) Bonardi M., Critical review of the “Handbook on Nuclear Chemistry” by A. Vértes, S. Nagy and Z. Klencsár, Kluwer Academic, Radiat. Phys. Chem. **72**, 736, (2005).
- (24) Ehmann D.W., Vance D.E., Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis, A series of Monographs on Analytical Chemistry and its Applications, Vol. 116 (ed. John Wiley and Sons, New York, USA, 1991).
- (25) Fouquet D.M., Razvi J., Whittemore W.L., TRIGA research reactors: A pathway to the peaceful applications of nuclear energy, Nuclear News of the ANS (ed. ANS, Nov 2003, pp. 46-56, (2003)).
- (26) Welch M.J., Redvalny C.S., Eds., Handbook of Radiopharmaceuticals: Radiochemistry and Applications (ed. Wiley, New York, USA, 2003).
- (27) Eckelman W. C., Coursey B. M., Eds., Technetium-99m-Generators, Chemistry and Preparation of Radio-Pharmaceuticals, In: Special Issue of Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 793, (1982).
- (28) Bonardi M., Groppi F., Masurio-99m, masurio-99g, renio-186g e renio-188g: radioelementi chimici isomorfi, ma con attività specifica e proprietà chimico-fisiche differenti. Storia e produzione di radiotraccianti. Metodiche di produzione e controllo di qualità, Rapporto INFN/TC-01/04 (ed. SIS-Pubbl., Frascati, Roma, 2001).
- (29) Alfassi Z.B., Groppi F., Bonardi M.L., De Goeij J.J.M., On the “carrier-free” nature of <sup>99m</sup>Tc, Appl. Radiat. Isot. **63**, 37, (2005).
- (30) Bonardi M., La Radiochimica, ricerca e tecnica multidisciplinare, La Chimica e l’Industria **86**, 110, (2004).
- (31) UNSCEAR 2000, Sources and Effects of Ionizing Radiation (ed. UN Publication, New York, USA, 2000).
- (32) Fifty Years With Nuclear Fission, Vols. I, II, American Nuclear Society (ed. ANS, La Grange Park, Illinois, USA, 1989).
- (33) Cox, P.A., The elements - their origin, abundance and distribution (ed. Oxford University Press, Oxford, UK, 1994).
- (34) Kotegov K.V., Pavlov O.N., Shvedor V.P. Advances in Inorganic Chemistry and Radiochemistry, Vol. XI (ed. Academic Press, New York, USA, 1968, pp. 1-90 (1998)).
- (35) Cotton F.A., Wilkinson G., Chimica Inorganica, Capitolo 32, Gli Attinidi Traduzione italiana di Advanced Inorganic Chemistry, 1967, a cura di Bombi G. G., Bresadola S., Cattalini L., Peloso A., pp. 1082-1122 (ed. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1968, (1998).
- (36) Cotton E.A., Wilkinson G., Murillo C.A., Bochmann M., Advanced Inorganic Chemistry, 6-th ed. (ed. John Wiley and Sons, New York, USA, 1999).
- (37) Greenwood N.N., Earnshaw A., Chimica degli Elementi, Vol II, Gli Attinidi, pp. 1488-1524 (ed. Piccin, Padova, 1992).
- (38) Firestone R.B., Baglin C.M., Chu F.S.Y., Table of Isotopes, 8th Ed., Update on CD ROM (ed. Wiley, New York, USA, 1998).
- (39) J. Magill, G. Pfennig, J. Galy, 2006. Karlsruher Nuklidkarte. Chart of the nuclides, 7. Aufl. (ed. Haberbeck, Karlsruhe, FRG, 2006).
- (40) IAEA, Analysis of uranium supply to 2050, Report STI/PUB/1104 (ed. IAEA. Vienna, Austria, May 2001).
- (41) IAEA-OECD, Uranium 2003: Resources, Production and Demand (the Red Book) (ed.

- Extensa-Turpin, Bedfordshire, UK, 2003).
- (42) Abeles R.H., Frey P.A., Jencks W.P. , p. 22 (ed. Biochimica, Piccin, Padova, 1994).
  - (43) The Merck Index, 11-th Ed., Centennial Edition, pp. 1550-1552 (ed. Merck and Co., New York, USA, 1989).
  - (44) ICRP Publication 23: Reference Man: Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics, International Commission on Radiological Protection (ed. Pergamon Press, UK, 1975).
  - (45) Ott K.O., Bezella W.A., Introductory Nuclear Reactor Statics (ed. ANS, La Grange Park, IL, 1983).
  - (46) Ott K.O., Introductory Nuclear Reactor Dynamics (ed. ANS, La Grange Park, IL, USA, 1985).
  - (47) Cochran R.G., Tsoulfanidis N., The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management, 2nd (ed. ANS, La Grange Park, IL, USA, 1999).
  - (48) The Generation Four International Forum (GIF), <http://www.gen-4.org>
  - (49) An.N. Nesmeyanov, Radiochemistry (ed. MIR Publisher, Moskow, 1974).
  - (50) Friedlander G., Kennedy J.K., Macias E.S., Miller J.M., Nuclear and Radiochemistry, (ed. Wiley, New York, USA, 1981).
  - (51) Lieser K.H., Nuclear and Radiochemistry. Fundamentals and Applications, Revised Ed. (ed. Wiley and Verlag, VHC, Berlin, Germany, 2001).
  - (52) Choppin G., Liljenzin J.O., Rydberg J., Radiochemistry and Nuclear Chemistry, 3-rd Ed. (ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2002).
  - (53) Villani S., Isotope Separation (ed. ANS, Hinsdale, Illinois, USA, 1976).
  - (54) Durante M., Uranio impoverito nelle armi utilizzate nella Guerra del Kosovo: esiste un rischio di contaminazione radioattiva ?, Bollettino SIRR, **2**, 6, (1999).
  - (55) Silvestri M., Il costo della menzogna. Italia nucleare 1945-1968, Einaudi, Torino, 1968.
  - (56) Caprara G., Breve Storia delle Grandi Scoperte Scientifiche (ed. Saggi, Bompiani, Milano, 1998).
  - (57) Cordella F., De Gregorio A., Sebastiani F., Enrico Fermi: gli anni italiani, (ed. Editori Riuniti, Roma, 2001).
  - (58) Foresta Martin F., Dall'Atomo al Cosmo (ed. Editoriale Scienza, Trieste, 2002).
  - (59) Dossier XIV Legislatura, I Primi Cinquant'anni dell'INFN, Comitato Parlamentari per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo Sostenibile (ed. Copit, ONLUS, La Tipografica SAS, Roma, 2001, <http://www.copit.org>)
  - (60) Maltese G., Enrico Fermi in America: una biografia scientifica: 1938-1954 (ed. Zanichelli, Bologna, 2003).
  - (61) Cardone F., Mignani R., Enrico Fermi e i secchi della sora Cesarina (ed Edizioni Di Renzo, 2000).
  - (62) Curli B., Il progetto Nucleare Italiano (1952-1964), Conversazioni con Felice Ippolito, (ed. Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, Catanzaro, 2000).
  - (63) Maltese P., Olivieri P., Protospataro F., Il polipropilene: una storia italiana (ed. Thyrus, Terni, 2003).
  - (64) Li Vigni B., Il caso Mattei (ed. Editori Riuniti, Roma, 2003).
  - (65) Birattari C., Bonardi M., Giove D., Implicazioni protezionistiche connesse all'impiego di campi magnetici ed a radiofrequenza nelle indagini mediche mediante tomografia di risonanza magnetica nucleare, Rapporto dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Report INFN/TC-83/17 (ed. SIS Pubblicazioni, Frascati, Roma, 1983).
  - (66) Baird C., Environmental Chemistry (ed. W.H. Freeman and Co., New York, USA, 1999).

- (67) D. Atwood, Radionuclides in the Environment (ed. John Wiley and Sons, New York, USA, 2010).
- (68) Bianucci G., Bianucci-Ribaldone E., L'analisi chimica delle acque naturali ed inquinate (ed. Hoepli, Milano, 1987).
- (69) Bruschi H.J., The Westinghouse AP1000 – Final Design Approved, Nuclear News of the ANS, pp. 30-35 (ed. ANS, Nov 2004.).
- (70) Townsend L., Barge transportation of modular reactors, Nuclear News of the ANS, pp. 20-24 (ed. ANS, Sept 2004).
- (71) Twilley R.C., EPR development – An evolutionary design process, Nuclear News of the ANS, pp. 26-35 (ed. ANS, Apr 2004).
- (72) Carelli M.D, IRIS: A global approach to nuclear power renaissance, Nuclear News of the ANS, pp. 32-42 (ed. ANS Sep 2003).
- (73) Harper D.H., et al., Efficacy of a bivalent L1 virus-like particle vaccine in prevention of infection with human papillomavirus types 16 and 18 in young women: a randomised controlled trial, *Lancet*, **364**, 1757 (2004).
- (74) The Merck Manual of Medical Information, Home Ed. (ed. Merck Research Laboratories, New York, USA, 1997).
- (75) Shang A., Huwiler-Müntener K., Nartey L., Jüni P., Dörig S., Sterne J.A.C., Pewsner D., Egger M., Are the clinical effects of homoeopathy placebo effects? Comparative study of placebo-controlled trials of homoeopathy and allopathy, *Lancet*, **366**, 726, (2005).
- (76) NCRP Report n. 93, Ionizing radiation exposure of the population of the United States (ed. National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP, Bethesda, MD, USA, 1987).
- (77) Chen W.L., Luan Y.C., Shieh M.C., Chen, S.T., Kung H.T., Soong K.L., Yeh Y.C., Chou T.S., Mong, S.H., Wu J.T., Sun C.P., Deng W.P., Wu M.F., Shen M.L., *J. Amer. Physicians Surg.*, **9**, 7, (2004).
- (78) Luckey T.D., Radiation Hormesys (ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1991).
- (79) F. Bochicchio, G. Campos-Venuti, S. Piermattei, C. Nuccetelli, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri, M. Magnoni, G. Agnesod, G. Sgorbati, M. Bonomi, L. Minach, F. Trotti, M.R. Malisan, S. Maggiolo, L. Gaidolfi, C. Giannardi, A. Rongoni, M. Lombardi, G. Cherubini, S. D'Ostilio, C. Cristofaro, M. Pugliese, V. Martucci, A. Crispino, P. Cuzzocrea, A. Sansone Santamaria, M. Cappai, *Radiat. Meas.* **40**, 686, (2005).
- (80) Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts, 2002 Update of Chernobyl: Ten Years On (ed. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France, 2002).
- (81) All About Meltdowns, Excerpts from the Reactor Safety Study (WASH-1400) (commonly known as the Rasmussen Report) (ed. US NRC, USA, 1974).
- (82) Osif B.O., Baratta A.J., Conkling T.W., TMI 25 years later: The Three Mile Island Nuclear Power Plant Accident and its impact (ed. Penn State University Press, PA, USA, 2004, <http://www.psupress.org>).
- (83) Sindrome Cinese, The Chinese Sindrome (regia Bridges J., interpretato da Fonda J., Lemmon J., Douglas M., et al., USA, 1979).
- (84) Pierantoni F., La Guerra Incruenta, CeMISS, Centro Militare Studi Strategici (ed. Artistic & Publishing Co., Gaeta, Latina, [www.graficart-darco.it](http://www.graficart-darco.it))
- (85) Brown W.H., Introduction to Organic Chemistry, Harcourt Brace and Company, USA, 2000. Italian translation, Introduzione alla Chimica Organica, p. 132 (ed. EdiSES, Napoli, Italia, 2001).
- (86) Meadow D.H., Meadow D.L., Randers J., Behrens W.W. III, The Limits of Growth, I

- limiti dello sviluppo, Traduzione di Macaluso F., rapporto del System Dynamics Group, MIT, per il progetto del Club di Roma sui dilemmi dell'umanità (ed. Mondadori, Milano, 1972).
- (87) The James Lovelock official web site: <http://www.ecolo.org/lovelock/>
- (88) Lovelock J.E., Gaia: A New Look at Life on Earth (ed. Abraham, R.H.. Chaos, Gaia, Eros. Harper Collins, 1994).
- (89) Bunyard P. Gaia in Action: Science of the Living Earth (ed. Floris Books, 1996).
- (90) Lovelock J.E., Gaia: A New Look at Life on Earth (ed. Oxford University Press, 1979).
- (91) Lovelock J.E., Healing Gaia (ed. Harmony Books, 1991).
- (92) Margulis L., Sagan D., Slanted Truths: Essays on Gaia, Evolution and Symbiosis (ed. New York, USA, 1997).
- (93) M.L. Bonardi, F. Groppi, S. Manenti, E. Rizzio, E. Sabbioni, Production of Nuclear Hydrogen Nu<sub>2</sub> or Hydricity by High Temperature Nuclear Reactor, Report INFN/TC\_10/3, Giu 2010.
- (94) M.L. Bonardi, F. Groppi, S. Manenti, E. Rizzio, E. Sabbioni, Nuclear Chemistry, Radiochemistry, Radiation Chemistry, Health Physics and Sustainable Nuclear Energy Production, Report INFN/TC\_10/2, Giu 2010.
- (95) <http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/TabellaRadiazione.htm>
- (96) Feynman R.P., La relatività ed i Filosofi, In: Sei pezzi meno facili, pp. 117- 122 (ed. Adelphi, Milano, 2004).
- (97) Lindley D., La luna di Einstein, Perché la meccanica quantistica è strana, ma non così strana come credete (ed. Longanesi e C., Milano, 1997).
- (98) Odum H.T., Environmental Accounting: EMERGY and environmental decision making (ed. John Wiley and Sons, New York, USA, 1996).
- (99) Carrà S., Introduzione alla Termodinamica Chimica (ed. Zanichelli, Bologna, 1972).
- (100) Feyerabend P.K., Wider den Methodenzwang, Frankfurt am Main, 1975, Traduzione di Girello G., Contro il Metodo (ed. Saggi, Universale Economica Feltrinelli, Milano, 2002).
- (101) Galilei G., Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (ed. Biblioteca Aperta, Sansoni, a cura di Fabio Attori, Milano, 2001).
- (102) International Nuclear Societies Council, Current Issues in Nuclear Energy, Radioactive Waste (ed. ANS, La Grange Park, IL, USA, 2002).
- (103) Chernobyl Forum Official Web-Site: [http://www-ns.iaea.org/meetings/rw-summaries/chernobyl\\_forum.htm](http://www-ns.iaea.org/meetings/rw-summaries/chernobyl_forum.htm)
- (104) E.L. Singaas, D.R. Ort, E.H. DeLucia, *Oecologia* **128**, **15**, (2001).
- (105) T.K. Tromp, R.L. Shia, M. Allen, J.M. Eiler, Y.L. Yung, *Science* **300**, 1740, (2003).
- (106) M.L. Bonardi, D.S. Moore, Radionuclides and Radiochemistry, Part I: Their Role in Society, *Chem. Int., The News Magazine of IUPAC* **29(6)**, 10, (2007).
- (107) M.L. Bonardi, D. Moore, Radionuclides and Radiochemistry, Part II: Their Role in Society, *Chem. Int., The News Magazine of IUPAC* **30(1)**, 8, (2008).
- (108) M.L. Bonardi, *Rad. Phys. Chem.* **72**, 737, (2005).
- (109) M.L. Bonardi, F. Groppi, S. Manenti, E. Rizzio, E. Sabbioni, Generation III+ and IV nuclear reactors: Part I, production of Nuclear H<sub>2</sub> or Hydricity, *Bollettino SIRR*, Ago 2010.
- (110) Popper K.R., La società aperta ed i suoi nemici (ed. Armando, Roma, 2002).
- (111) Popper K.R., Lorenz K., Il futuro è aperto (ed. Bompiani, Milano, 2002).