Vincenzo Balzani[a], Giacomo Bergamini[a], Leonardo Setti[b]
[a]Dipartimento di Chimica "G. Ciamician"
Università di Bologna
[b]Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali
Università di Bologna
vincenzo.balzani@unibo.it

COME USCIRE DALLA CRISI ENERGETICA E CLIMATICA - PARTE 1*. PERCHÉ IL NUCLEARE NON È LA SOLUZIONE

Per uscire dalla crisi energetica e climatica dobbiamo sviluppare fonti di energia che ci permettano di raggiungere cinque obiettivi: garantire a tutti una sufficiente quantità di energia, permettere un ragionevole sviluppo economico, custodire il pianeta, rafforzare la coesione sociale e favorire la pace. L'energia nucleare non possiede i requisiti necessari per raggiungere questi obiettivi.

L'astronave Terra

Per capire bene il problema energia-clima nella sua complessità, è utile osservare la fotografia scattata dalla sonda Cassini-Juygens mentre era in viaggio nei pressi degli anelli di Saturno (Fig. 1). Da questa foto appare chiaro che la Terra, quel puntino appena visibile, è un'astronave che viaggia nell'infinità dell'universo. Bisogna subito aggiungere che si tratta di un'astronave del tutto speciale: come tutte le astronavi, infatti, ha nella stiva risorse limitate, ma a differenza delle comuni astronavi, non potrà mai atterrare in nessun luogo per fare rifornimento e non potrà mai ricevere pezzi di ricambio o altri aiuti materiali dall'esterno. Il suo unico punto di forza, che ne fa il luogo dove è possibile vivere, è la presenza, alla giusta distanza, di un'altra astronave molto particolare: il Sole. Essere consapevoli di questa realtà è il punto di partenza per capire come possiamo uscire con successo dalla crisi energetica e climatica [1, 2]. Per completare il quadro di riferimento dobbiamo aggiungere qualche dato. Attualmente siamo circa 7 miliardi di persone, con un aumento di circa 80 milioni all'anno. Ogni minuto nascono 15 cinesi e 37 indiani. Su questa astronave dobbiamo vivere tutti assieme: bianchi, neri e gialli, buoni e cattivi, credenti e non credenti. I problemi che abbiamo, i danni che abbiamo fatto o che faremo all'astronave dovremo risolverli da soli, senza neppure poter scendere. La Terra è l'unico luogo dove possiamo vivere e dove dovranno vivere anche le prossime generazioni. È in questo contesto che dobbiamo delineare la strategia giusta per uscire dall'era dei combustibili fossili.

*La seconda parte dell'articolo verrà pubblicata sul numero di aprile della rivista.

I combustibili fossili

Oggi l'energia è fornita in massima parte dai combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale, Fig. 2). Si tratta di una risorsa energetica molto comoda e potente, ma non rinnovabile, che l'uomo ha incominciato ad usare da meno di due secoli e che si sta rapidamente esaurendo. Nel mondo, ogni *secondo* si consumano circa 1.000 barili di petrolio e altri combustibili liquidi, 96.000 metri cubi di metano e 222 tonnellate di carbone. Secondo una recente indagine [3] (i) la produzione di petrolio convenzionale non aumenta più dal 2005 e non riuscirà mai a superare il tetto di 75 milioni di barili al giorno, (ii) il carbone è meno abbondante di quanto si pensasse e la sua produzione raggiungerà il picco entro il 2025 e (iii) le riserve di gas non-convenzionale (shale gas) sono state molto sovrastimate e ci si accorge che per estrarlo si possono inquinare le falde acquifere e causare l'emissione di grandi quantità di metano (potente gas serra) direttamente nell'atmosfera [4].

L'uso massiccio e prolungato dei combustibili fossili reca (in parte, ha già recato) gravi danni all'ambiente e alla salute dell'uomo. L'immissione nell'atmosfera di grandi quantità di anidride carbonica (circa 30 miliardi di tonnellate all'anno) sta causando l'aumento della temperatura del pianeta, con cambiamenti climatici che potrebbero avere conseguenze gravi o addirittura catastrofiche [5]. Le sostanze inquinanti generate dall'uso dei combustibili fossili (polveri sottili, idrocarburi aromatici, ossidi di azoto, ecc.) provocano l'insorgere di malattie che riducono sensibilmente l'aspettativa di vita delle persone [6]. La distribuzione molto eterogenea dei combustibili fossili sul pianeta è la causa principale di guerre (Iraq, Afghanistan, Libia), provoca tensioni nei corridoi di trasporto (ad es., nello stretto di Hormuz [7]), crea forti distorsioni nell'economia mondiale e genera insostenibili disuguaglianze (Tab. 1, [8]). La stessa crisi finanziaria della zona euro e in particolare dei paesi del sud Europa, Italia compresa, è in buona parte dovuta alle spese troppo alte che questi paesi debbono sostenere per approvvigionarsi di combustibili fossili [3].

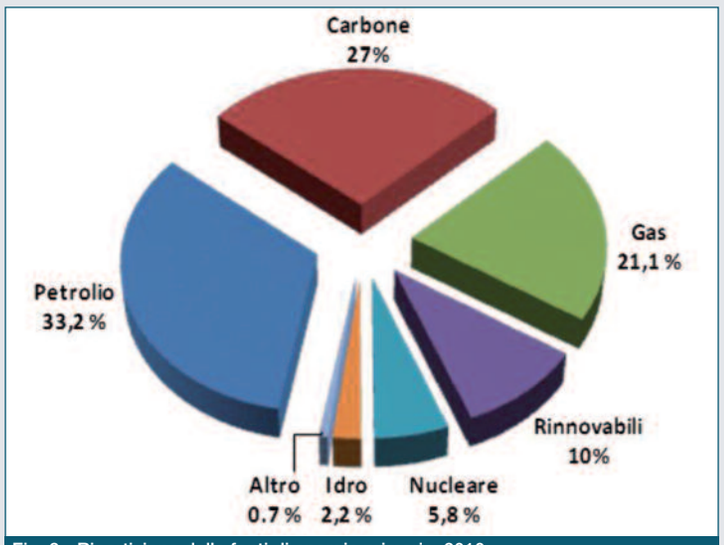

Fig. 2 - Ripartizione delle fonti di energia primaria, 2010

Fig. 1 - Fotografia scattata dalla sonda Cassini-Juygens il 15 settembre 2006 mentre era in viaggio nei pressi degli anelli di Saturno. Il puntino indicato dalla freccia è la Terra (cortesia della NASA)

In questo contesto, è assolutamente necessario rendersi conto che siamo in una situazione di emergenza, anche perché la storia insegna che le transizioni energetiche (ad esempio dal legno al carbone, dal carbone al petrolio) implicano profonde trasformazioni di tutta la società e quindi richiedono tempi dell'ordine di mezzo secolo [9]. La possibilità di continuare ad usare i combustibili fossili non va certamente al di là di questo arco temporale. Pertanto ogni anno che lasciamo passare senza adottare una adeguata strategia per una nuova transizione energetica porta inesorabilmente in una situazione di maggiore criticità.

Risparmio ed efficienza

Per rendere più facile e più rapida la transizione, è necessario imparare a consumare meno energia evitando di sprecarla ed utilizzandola in

Tab. 1 - Consumo di energia primaria (toe = tonnellate equivalenti di petrolio) ed emissioni di CO_2 in alcuni paesi del mondo, 2010.

Paese	Energia Primaria		Emissioni CO_2	
	Pro capite (toe/persona)	Totale (Mtoe)	Pro capite (ton/persona)	Totale (Mton)
Stati Uniti	7,31	2.286	19,6	6.145
Russia	4,84	691	11,9	1.700
Giappone	3,92	501	10,2	1.308
Germania	3,90	319	10,1	828
Francia	3,86	252	6,2	403
Italia	2,83	172	7,2	439
Cina	1,82	2.432	6,2	8.332
Brasile	1,32	254	2,4	464
India	0,43	524	1,4	1.707
Bangladesh	0,16	23	0,4	59
Mondo	1,65	11.164	4,5	33.158

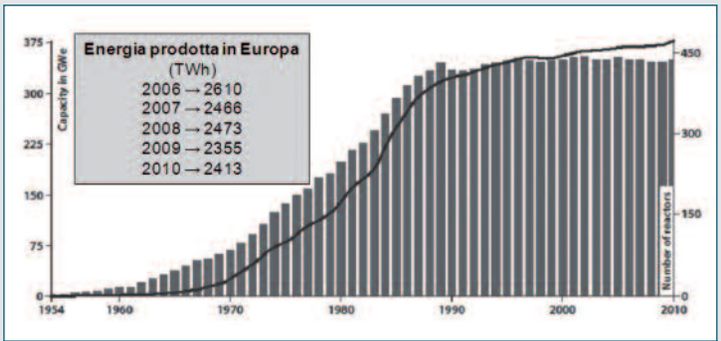

Fig. 3 - Sviluppo storico dell'energia nucleare: numero di reattori e potenza elettrica installata dal 1954 al 2010. Nel riquadro sono riportati i valori di energia elettrica nucleare prodotta in Europa negli ultimi 5 anni

modo più efficiente. La riduzione nei consumi energetici è importante per tre motivi: i combustibili fossili dureranno più a lungo, permettendoci di avere più tempo per sviluppare ed ottimizzare fonti alternative e, usandone meno, il loro costo non lieviterà e causeremo minori danni ambientali e sociali. Infatti è dimostrato che la bulimia energetica non accresce il benessere delle persone, ma causa problemi già da tempo segnalati [10] e di cui siamo tutti testimoni: incidenti stradali[a], ingorghi[b], inquinamento dell'aria[c], cementificazione del territorio[d], disuguaglianze[e].

Ridurre i consumi energetici in modo sostanziale è un obiettivo primario negli Stati Uniti [11, 12] ed è già una linea di indirizzo nell'Unione Europea, dove il Pacchetto Clima-Energia [13] sollecita gli stati membri ad una la riduzione del 20% nel consumo di energia entro il 2020. Si tratta di un ostacolo difficile da superare, tanto che si prevede che la riduzione sarà solo del 10%. Proprio per questo nel luglio scorso è iniziato l'iter per lo sviluppo di una nuova direttiva che si concluderà nel giugno 2014 e definirà gli obiettivi *obbligatori* che ogni Stato membro dovrà raggiungere al 2020 [14].

Necessità di una scelta strategica

Risparmio ed efficienza, seppure prioritari, non sono ovviamente sufficienti per perseguire l'obiettivo di una progressiva e decisa diminuzione dell'uso dei combustibili fossili. Per risolvere il problema dobbiamo cercare, sviluppare e ottimizzare fonti alternative di energia. Non possiamo, però, accontentarci di una soluzione qualsiasi e tantomeno di scelte peggiorative. Dobbiamo cercare, invece, di trasformare la crisi energetica in un'opportunità per raggiungere cinque obiettivi fondamentali: garantire a tutti una sufficiente quantità di energia, permettere un ragionevole sviluppo economico, custodire il pianeta, rafforzare la coesione sociale e favorire la pace. Abbiamo bisogno, quindi, di sostituire i combustibili fossili con fonti energetiche alternative che siano, per quanto possibile, abbondanti, inesauribili, ben distribuite su tutto il pianeta, non dannose per l'uomo e per l'ambiente, economicamente sostenibili, capaci di promuovere lo sviluppo, adatte a colmare le disuguaglianze e, infine, non utilizzabili come strumenti di guerra.

Allo stato attuale, le possibili fonti di energia alternative ai combustibili fossili sono l'energia nucleare e le energie rinnovabili, queste ultime in massima parte collegate, direttamente o indirettamente, all'energia solare. In questa prima parte esaminiamo in che misura l'energia nucleare soddisfa i requisiti richiesti. Nella seconda parte esamineremo le energie rinnovabili, per poi trarre indicazioni sulle azioni da mettere in atto.

L'energia nucleare

Il declino dell'industria nucleare

Circa mezzo secolo fa il nucleare aveva fatto sorgere la speranza di poter dare a tutto il mondo energia elettrica abbondante e a basso prezzo. Dopo una rapida crescita durata una ventina d'anni con un picco nel 1979, anno in cui erano in costruzione ben 233 reattori, lo sviluppo del nucleare si è arrestato (Fig. 3) sia per ragioni economiche [15], sia perché ci si è resi conto che questa tecnologia crea problemi più gravi di quelli che vorrebbe risolvere [2, 16]. Che il nucleare non sia economicamente conveniente in un regime di libero mercato lo dichiarano già da tempo le agenzie finanziarie più importanti [17, 18] e lo testimonia il fatto che la borsa americana premia le azioni delle utility che si ritirano dal nucleare [19]. In effetti, l'industria nucleare si era sviluppata solo grazie a forti sussidi [20], come testimoniato anche da una recente dichiarazione del Segretario all'Energia inglese, Chris Huhne, riportata dal quotidiano *The Independent* il 14 ottobre 2011: "The nuclear industry was like an expense-account dinner: everybody ordering the most expensive items on the menu because someone else was paying the bill".

Dopo il disastro di Fukushima (Fig. 4), i costi sono ulteriormente aumentati per la necessità di rafforzare i dispositivi di sicurezza [21-23] e il lento declino del nucleare si è tramutato in un crollo [1]. I reattori attualmente *in funzione* sono in numero molto minore dei 441 recentemente citati su questa rivista [24] e anche dei 435 riportati dalla International Atomic Energy Agency (IAEA) [25] e European Nuclear Society [26]. Quest'ultima cifra, infatti, considera operativi anche i 40 reattori chiusi da molti mesi per controlli (oltre ai quattro definitivamente inutilizzabili) in Giappone [27]. Altro segno del declino è che, mentre nel 2010 si era iniziata la costruzione di 16 reattori, nel 2011 si è iniziata la costruzione di 2 soltanto, a fronte della chiusura definitiva di 13 unità [27]. Non ci si può aspettare neppure che il numero di reattori

[a] In Europa, gli incidenti stradali hanno causato 34500 vittime nel 2008. http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics/trends/index_en.htm

[b] Nelle 90 principali aree metropolitane degli USA si sono registrate nel 2007 3,6 miliardi di ore di ritardi nel traffico veicolare, col risultato di sprecare 9,5 miliardi di litri di carburante. National traffic highway safety administration: www.nhtsa.gov/

[c] Secondo Legambiente, in Italia nel 2011 il 67% dei capoluoghi di provincia monitorati non ha rispettato il limite consentito di superamenti della soglia di PM10. http://consumatori.myblog.it/archive/2012/01/21/legambiente-mal-aria-2012-in-citta-c-e-sempre-piu-smog.html

[d] Dal 2001 al 2011, il 45% delle infrastrutture strategiche è rappresentato da strade. *Terra Rubata, Viaggio nell'Italia che scompare*, FAI, 2012. http://upload.wwf.it/earth/File/WWF_FAI_CONSUMO%20SUOLO/

[e] Ogni 1000 abitanti, ci sono 842 veicoli negli Stati Uniti, 36 in Cina; www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/facts/2010_fotw617.html

possa aumentare sostanzialmente nei prossimi anni perché, anche se ce ne sono 63 in costruzione (venti dei quali da più di 20 anni!) [25], alcuni Paesi nuclearizzati hanno avviato piani per uscire dal nucleare. Il Piano Energetico Europeo dell'European Climate Foundation nell'aprile 2010 [28], che si pone come obiettivo la riduzione delle emissioni di CO_2 di almeno l'80% entro il 2050, ritiene possibile raggiungere questo obiettivo con lo sviluppo delle energie rinnovabili, ma non con l'energia nucleare.

Negli Stati Uniti, dove le 104 centrali sono state costruite fra il 1960 e il 1990, si susseguono rinvii e rinunce riguardo i progetti di nuove costruzioni [29-31] nonostante gli impegni presi dal governo Bush di farsi carico del problema delle scorie [32] e le garanzie concesse dal governo Obama sui finanziamenti [33]. Si chiedono soltanto licenze per il prolungamento del tempo di vita delle centrali, cosa che preoccupa non solo la pubblica opinione, ma anche esperti. La Nuclear Regulatory Commission ha infatti riconosciuto che i reattori in funzione non sono pienamente equipaggiati per sostenere eventi estremi [21].

La Francia, nazione modello per lo sviluppo del nucleare, ha 58 reattori che inesorabilmente invecchiano e negli ultimi 15 anni ha soltanto un reattore in costruzione la cui entrata in rete, prevista per il 2013, subirà un ritardo di almeno tre anni, con un raddoppio dei costi. Il reattore dello stesso tipo che la compagnia francese AREVA sta costruendo in Finlandia, ha problemi ancora più gravi [2], tanto da minare la credibilità dell'industria nucleare francese [34]. Dopo Fukushima, la stessa France's Nuclear Safety Authority ha riconosciuto che è necessario un ampio aggiornamento dei sistemi di sicurezza con una spesa di € 15 miliardi [23], mentre la Corte dei Conti francese ha stimato in € 55 miliardi le spese di manutenzione fra il 2011 e il 2025 [35]. Il parco nucleare francese ha anche un grave elemento di fragilità: 44 dei 58 reattori sono situati su fiumi con scarsa portata d'acqua per cui, in caso di siccità, una parte dei reattori debbono essere spenti, come è già successo negli anni 2003, 2005 e 2006 [36].

Il Giappone ha in funzione soltanto 10 dei suoi 54 reattori [27]. I sei reattori di Fukushima Daiichi dovranno essere smantellati e la grande centrale di Hamaoka, con 3 reattori nuovi che si intendeva alimentare con Mox (una miscela di uranio e plutonio ottenuta riciclando il combustibile esausto, molto più pericolosa del solo uranio), rimarrà ferma per anni e forse sarà chiusa per sempre [37]. Il piano per costruire 14 nuovi reattori è stato abbandonato.

Fig. 4 - Una veduta dell'impianto di Fukushima dopo l'incidente

La Germania ha spento definitivamente 8 dei suoi 17 reattori e ha deciso di chiudere tutti gli altri entro il 2022. La Svizzera ha varato un piano per la chiusura progressiva delle sue 5 centrali. In Spagna è stata decisa e poi rimandata al 2013 la chiusura di una centrale e non si prevede di costruirne di nuove.

In Gran Bretagna, nel 2011 è stato chiuso uno dei 19 reattori e il nucleare non riparte perché le condizioni poste recentemente dal Governo spaventano gli investitori: ogni nuova centrale deve essere proposta, sviluppata, costruita e gestita dal settore privato, che deve sostenere anche gli interi costi dello smantellamento e della gestione delle scorie. In vari altri Paesi come Belgio e Svezia si dibatte da tempo se continuare od uscire dal nucleare e non ci sono reattori in costruzione. L'entrata nel nucleare della Polonia è stato posticipata al 2022. Gli stress test richiesti dalla Commissione Europea [38], se eseguiti col dovuto rigore, potrebbero sanzionare la chiusura di un certo numero dei 143 reattori europei.

In Cina (16 reattori operativi che forniscono 1,9% dell'elettricità), è sorto qualche dubbio dopo il disastro di Fukushima [39], ma continuerà il piano che prevede la costruzione di 26 reattori. Anche la Russia (32 reattori operativi e 10 in costruzione), che è in prima fila nell'export della tecnologia nucleare, e la Corea del Sud (21 reattori operativi e 5 in costruzione) proseguiranno con i loro piani di sviluppo, mentre è più incerta la situazione in India dove 20 piccoli reattori coprono soltanto il 2% dei consumi elettrici e altri 6 sono in costruzione.

Per completare il panorama bisogna anche ricordare un altro grave insuccesso dell'industria nucleare. Il reattore 3 di Fukushima era alimentato in parte con Mox, fornito da Francia e Gran Bretagna (molto attive in questo campo a differenza degli Usa) che avevano stipulato accordi con il Giappone per riciclare il combustibile esausto delle sue centrali. Ora che il Giappone e altre nazioni hanno rinunciato ai piani di estensione dell'uso del Mox perché troppo pericoloso, Francia e Gran Bretagna si trovano in grande difficoltà. In particolare i britannici hanno chiuso a Sellafield un costosissimo impianto per produrre Mox. Un messaggio segreto carpito da Wikileaks all'ambasciata Usa di Londra parla a questo proposito del più imbarazzante disastro economico della storia industriale britannica [40].

In conclusione, oggi si costruiscono nuove centrali principalmente nei Paesi ad economia pianificata e a più basso livello di democrazia, come Cina, Russia, India ed Iran, dove lo stato si fa direttamente carico dei costi e dei rischi dell'impresa e dove c'è una forte commistione fra nucleare civile e nucleare militare.

I reattori nucleari attualmente in funzione sono in grande maggioranza della cosiddetta Generazione II ed usano una tecnologia sviluppata negli anni Settanta. Quelli che sono in costruzione, detti di Generazione III e a volte etichettati come Generazione III+ o "evoluzionari", sono

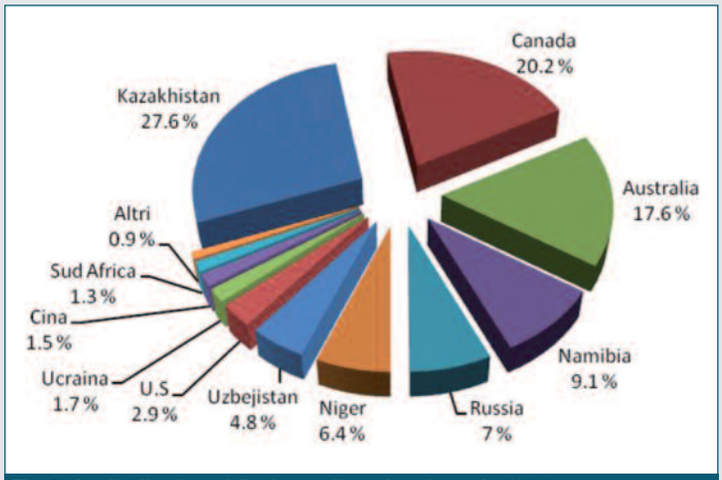

Fig. 5 - La distribuzione delle riserve di uranio nel mondo, 2010

Fig. 6 - Le persone evacuate a Fukushima saranno per sempre tormentate dalla preoccupazione di aver assorbito una dose di radiazioni sufficiente a compromettere la loro salute

basati sulla stessa tecnologia, seppure con miglioramenti in efficienza e sicurezza. I reattori di Generazione IV, basati su nuove tecnologie, sono solo allo stadio di progetti di ricerca che non potranno essere attuati prima di almeno 20 anni [2]. Molto più lontano nel tempo (almeno 50 anni) è il miraggio della fusione nucleare i cui studi sono frenati da costi enormi e gigantesche difficoltà tecniche [2].

Il combustibile nucleare: l'uranio

Il dibattito sulle riserve di uranio effettivamente sfruttabili è acceso e contraddittorio, come discusso in dettaglio altrove [2]. L'unica certezza è che si tratta di una risorsa finita, che raggiungerà un picco di produzione per poi declinare. Tra i primi 15 detentori di riserve di uranio non vi è un solo Paese dell'Unione Europea (Fig. 5, [2]). La Francia, dopo aver esaurito da tempo le sue scarse risorse, ne importa notevoli quantità dal Niger, sua ex-colonia che ha ri-colonizzato proprio per la presenza di miniere di uranio. Gli Stati Uniti importano uranio in grande quantità dalla Russia in base ad un accordo chiamato "From Megaton to Megawatt" del 1993 per smantellare parte delle testate nucleari, che oggi forniscono circa il 30% di tutta la domanda di uranio. I reattori nucleari fanno così la funzione di "termovalorizzatori" per lo smaltimento degli ordigni bellici. Quando, in poco meno di 15 anni, le testate nucleari si saranno esaurite, vi sarà un deficit di uranio difficilmente colmabile dalla produzione delle miniere oggi esistenti.

Per far funzionare una centrale standard per un anno occorrono 160 tonnellate di uranio ottenute processando almeno 160.000 tonnellate di materiale, sbancando quantità ancora maggiori di roccia. La filiera che porta dall'uranio grezzo al combustibile nucleare è complessa ed energivora. La raffinazione porta all'ossido U_3O_8 che viene trasformato in uranio esafluoruro (UF_6), successivamente sottoposto a processi di ultracentrifugazione per arricchirlo nell'isotopo fissile ^{235}U. L'UF_6 va infine ritrasformato con complicati processi chimici in barrette di UO_2.

Sicurezza delle centrali

Anche se il nucleare fosse economicamente conveniente, ci sono molti buoni motivi per rinunciare a svilupparlo.

Le centrali più recenti hanno standard di sicurezza elevati, ma in impianti e strutture così complesse e così pericolose non si può mai escludere che avvenga un incidente catastrofico, sfiorato nel 1979 a Three Mile Island a causa di difetti tecnici e poi accaduto nel 1986 a Chernobyl per errori umani e nel 2011 a Fukushima in seguito ad un disastro ambientale. Quanto è avvenuto a Fukushima [1, 41] dimostra che un incidente nucleare, a differenza di qualsiasi altro tipo di incidente, è fuori controllo persino in un Paese ben organizzato e tecnologicamente avanzato. In Giappone, col passare degli anni, forti pressioni del governo e costosissime campagne pubblicitarie delle compagnie elettriche avevano costruito il "mito del nucleare". Libri di testo, centri di pubbliche relazioni, parchi tematici rivolti particolarmente ai bambini, dove il nucleare è descritto come il paese delle meraviglie di Alice, avevano inculcato l'idea che l'energia nucleare era non solo necessaria, ma anche assolutamente sicura. Così è accaduto che in un Paese dove le auto con appena tre anni sono sottoposte a minuziose revisioni per poter circolare, reattori nucleari vecchi di decenni erano controllati solo da chi non aveva nessun interesse a fermarli [42].

Le conseguenze di un incidente nucleare non sono delimitabili né nello spazio né nel tempo: la radioattività si propaga attraverso l'atmosfera con movimenti incontrollabili delle masse d'aria e i luoghi fortemente contaminati non possono essere bonificati e rimangono quindi inagibili fino a quando la radioattività non è sufficientemente diminuita, cosa che può richiedere decine, centinaia o migliaia di anni. Proprio per queste ragioni nessuna assicurazione copre i danni causati da un grave incidente nucleare.

L'incidente di Fukushima è stato classificato di livello 7, lo stesso raggiunto dal disastro di Chernobyl, che è il massimo della scala di pericolosità. Nel caso di un incidente nucleare non si debbono contare solo le morti "immediate", ma anche quelle premature che avvengano nei decenni successivi, poiché l'esposizione alle radiazioni può provocare tumori. Per avere dati statistici attendibili bisogna fare uno studio epidemiologico serio sui tempi lunghi. A Chernobyl il numero di morti premature è stimato essere "solo" di 5.000 secondo l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,

controllato dalla lobby nucleare) [43], ma di 30-60 mila o anche un milione secondo altre indagini [44, 45].
A Fukushima la contaminazione radioattiva ha interessato l'aria, l'acqua, i vegetali, la carne e il pesce. Il livello d'informazione è stato scarso, come sempre succede nel caso di un incidente nucleare. In totale le persone evacuate sono state almeno 80 mila; molte di queste hanno ricevuto dosi imprecisate di radiazioni per cui è difficile stabilire il loro grado di rischio (Fig. 6). Bisogna poi considerare che le radiazioni producono effetti che vanno al di là del danno fisico tanto che il governo giapponese ha stabilito di dare 100.000 yen (circa 900 euro) per sei mesi, poi la metà per altri sei mesi, alle persone che hanno subito uno stress psicologico a causa dell'incidente. Queste persone, tuttavia, anche se oggi stanno bene, saranno per sempre tormentate dalla preoccupazione di aver assorbito una dose di radiazioni sufficiente a compromettere la loro salute. È come avere in corpo una bomba a orologeria che non si sa se e quando potrà esplodere [46].

Scorie e smantellamento

Forse più grave della sicurezza delle centrali e della scarsa disponibilità di uranio è l'insoluto problema delle scorie radioattive che rimangono pericolose per decine di migliaia di anni. Gli USA, che dispongono di un immenso territorio e delle tecnologie più avanzate, hanno cercato di costruire un deposito per queste scorie sotto una montagna del Nevada. Dopo 30 anni di lavoro ed una spesa di decine di miliardi di dollari, il progetto è stato abbandonato e le scorie vengono lasciate in contenitori posti sui piazzali delle centrali, in attesa che il problema venga ristudiato da capo [47-49]. Altre nazioni hanno progetti per depositi sotterranei, ma i progressi sono molto lenti [50]. In Germania, i lavori sono stati iniziati nel 1977 ma è ormai chiaro che il problema di trovare una soluzione passa alle prossime generazioni [51]. In Giappone, dove il problema è ancora più grave dopo Fukushima, non ci sono piani per depositi permanenti [52]. In Svezia e Finlandia i siti sono stati scelti e i depositi dovrebbero essere disponibili dopo il 2020. In Cina il sito potrebbe essere selezionato entro il 2020 e il deposito dovrebbe essere pronto per il 2050. Nel conto finale dell'energia nucleare bisogna anche includere i costi economici, sociali e politici, tutti imprevedibili ma comunque elevatissimi, richiesti dalla necessità di sorvegliare queste scorie radioattive, pericolose per un tempo praticamente infinito rispetto alla storia dell'umanità.
C'è poi il problema, spesso sottovalutato, dello smantellamento delle centrali nucleari a fine ciclo [2, 53, 54]. Si tratta di operazioni molto complesse, pericolose e costose. La procedura più comune consiste nel rimandare le operazioni di smantellamento per 50-100 anni, in attesa che la radioattività diminuisca e che divengano disponibili i sopra citati, ma tuttora non esistenti, depositi permanenti. Per le centrali che hanno avuto incidenti gravi non si può fare altro che coprirle con un sarcofago enorme, come si è già fatto a Chernobyl e probabilmente si farà a Fukushima, e starsene lontano per centinaia di anni. Lo smantellamento costosissimo di alcune piccole centrali (Fig. 7) [55] viene ingannevolmente reclamizzato come il ritorno del sito nucleare alla originale condizione di "giardino" [56].
In conclusione, anche lo smantellamento delle centrali a fine vita è una pesante eredità lasciata alle generazioni successive.

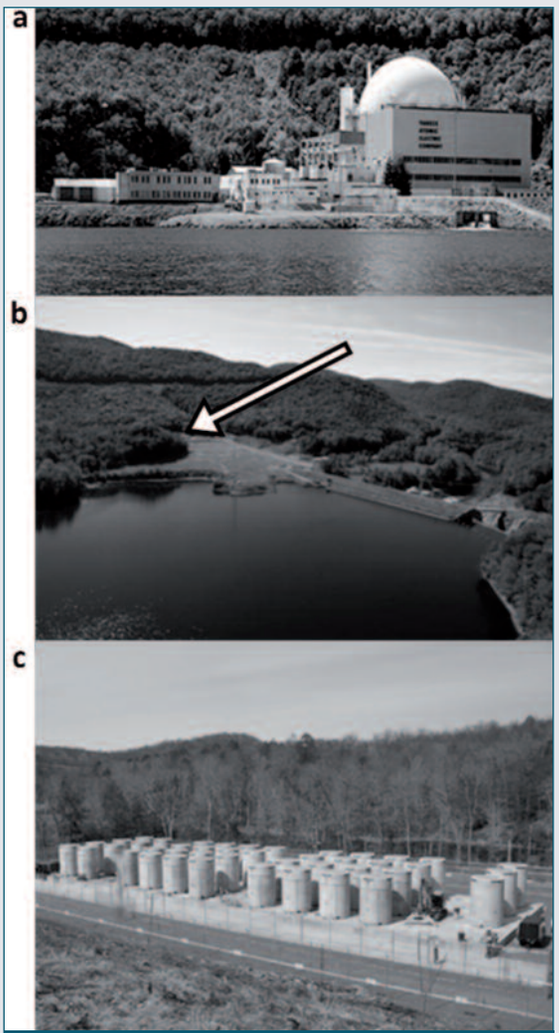

Fig. 7 - La piccola centrale nucleare Yankee Rowe (Mass., USA) prima (a) e dopo (b) lo smantellamento che ha richiesto 10 anni di lavoro. La freccia in (b) indica il luogo, nascosto dagli alberi, dove è stato costruito in grande piazzale (c) sul quale sono stati sistemati i 43 giganteschi contenitori speciali che racchiudono il combustibile spento e le parti del reattore a più alta radioattività (Greater than class C), in attesa che venga trasferito in un tuttora inesistente deposito permanente. Costi: costruzione della centrale (1960), $39 milioni; stima smantellamento (1990), $368 milioni; costo finale (2000), $508 milioni

Politica internazionale e problemi del terzo mondo

L'espansione del nucleare a livello mondiale non è auspicabile in quanto, al di là dei possibili incidenti, si tratta di una tecnologia per vari aspetti pericolosa. C'è infatti una stretta connessione dal punto di vista tecnico, oltre che una forte sinergia sul piano economico, fra nucleare civile e nucleare militare, come è dimostrato dalle continue discussioni sullo sviluppo del nucleare in Iran. Una diffusione generalizzata del nucleare civile porterebbe inevitabilmente alla proliferazione di armi nucleari e quindi a forti tensioni fra gli stati, aumentando anche la probabilità di furti di materiale radioattivo che potrebbe essere utilizzato per devastanti attacchi terroristici [57]. È anche evidente che, a causa del suo altissimo contenuto tecnologico, l'energia nucleare aumenta la disuguaglianza fra le nazioni. Risolvere il problema energetico su scala globale mediante l'espansione della tecnologia nucleare porterebbe inevitabilmente ad una nuova forma di colonizzazione: quella dei Paesi tecnologicamente più avanzati su quelli meno sviluppati. L'energia nucleare è particolarmente inadatta per i Paesi poveri di risorse finanziarie, scientifiche e culturali, che

sono proprio quelli ad avere il diritto di aumentare la loro disponibilità energetica nei prossimi anni.

L'Italia dice no al nucleare

Nel 2008 il Governo Italiano, guidato da Silvio Berlusconi, decise il ritorno al nucleare e nel febbraio 2009 l'Enel stipulò con la compagnia EDF (Electricité de France) un accordo preliminare per l'acquisto di quattro reattori EPR (European Pressurized Reactor) da 1600 MW ciascuno, costruiti dalla ditta francese AREVA.

Nei mesi successivi partì una forte campagna pro-nucleare da parte del governo, di alcuni esperti [58] e soprattutto di Enel [56], coinvolta anche nella pubblicazione di un opuscolo ambiguo che strumentalizzava la Chiesa cattolica fra i sostenitori del nucleare [59]. Successivamente fu istituito il Forum Nucleare Italiano, che si spacciava per "associazione no-profit" nonostante fosse finanziato con € 6 milioni da aziende italiane (Enel, Terna, Sogin) e straniere (Areva, Edf, Westinghouse, E.ON, GDF Suez) direttamente interessate al rientro dell'Italia nel nucleare. Questo Forum mise in atto su tutti i mezzi d'informazione una campagna pro-nucleare così subdola da essere bloccata dall'Istituto per l'Autodisciplina Pubblicitaria.

Per sostenere la validità del ritorno al nucleare il Governo, l'Enel e vari esperti (o presunti tali) fecero ricorso ad argomentazioni che a prima vista potevano apparire fondate, ma che in realtà erano facilmente confutabili sulla base di dati scientifici ed economici disponibili anche *prima* del disastro di Fukushima:

1) il nucleare è in forte sviluppo in tutto il mondo, cosa assolutamente non vera come abbiamo sopra dimostrato;
2) l'Italia ha bisogno di installare nuova potenza elettrica per mettersi al riparo da eventuali black out; in realtà la potenza disponibile (110 GW) è già molto superiore alle esigenze del Paese (48-52 GW è il picco dei consumi tra le 11 e le 19 di ogni giorno lavorativo);
3) lo sviluppo dell'energia nucleare è un passo verso l'indipendenza energetica del Paese; affermazione del tutto infondata perché l'Italia non ha miniere di uranio e neppure la complessa filiera industriale che fornisce il combustibile per alimentare i reattori;
4) l'uso dell'energia nucleare al posto dei combustibili fossili ci permette di ottemperare alle richieste dell'Unione Europea riguardo alla necessità di ridurre le emissioni di CO_2; in realtà le centrali nucleari per essere costruite, alimentate con uranio, liberate dalle scorie che producono e, infine, smantellate, richiedono un forte uso di combustibili fossili [60]; ma anche se non producesse gas serra, il nucleare non potrebbe aiutare a farci rispettare i parametri dettati dall'Unione Europea (riduzione della produzione di CO_2 del 17% entro il 2020) perché la costruzione di una centrale richiede almeno 10 anni;
5) il problema delle scorie ad alta radioattività è risolto; in realtà, come abbiamo visto, non lo è neppure negli USA[f];

6) i siti in cui installare le centrali sono facili da trovare; non è affatto vero perché gran parte dell'Italia è zona sismica, c'è scarsità di acqua per il raffreddamento dei reattori e il nostro Paese è popolato molto densamente;
7) il nucleare contribuisce al rilancio dell'industria italiana; affermazione smentita da 100 industriali italiani dell'associazione Kyoto Club che in un manifesto hanno affermato come il ritorno al nucleare comporterebbe un'enorme distrazione di risorse a discapito di piani per l'efficienza energetica e per lo sviluppo delle energie rinnovabili che - queste sì - porterebbero veramente a un forte aumento occupazionale.

Per tutte queste ragioni le forze politiche e sociali contrarie al rientro nel nucleare indissero un referendum abrogativo per la primavera 2011. Dopo l'incidente di Fukushima, il Governo cercò in ogni modo di evitare che si giungesse al referendum e nei mesi successivi tutte le forze interessate al ritorno al nucleare cercarono di convincere le persone a disertare le urne. Nonostante queste pressioni, le scarse e tendenziose informazioni fornite dai media e l'intensificarsi di pubblicità ingannevoli, il referendum tenutosi nel giugno 2011 ha raggiunto il *quorum* con il 57% di votanti e, di questi, il 95% ha chiesto la cancellazione delle decisioni del governo, opponendosi così al ritorno al nucleare.

La decisione presa dagli elettori di rinunciare al nucleare è stata molto saggia. Il rientro nel nucleare sarebbe stata un'avventura piena di incognite pericolose.

Conclusioni

I combustibili fossili costituiscono attualmente la principale fonte di energia per l'umanità. Si tratta però di una risorsa in via di esaurimento, il cui uso causa (i) gravi danni alla salute dell'uomo, (ii) variazioni climatiche che potrebbero rivelarsi disastrose ed irreversibili, (iii) seri problemi economici e finanziari a molte nazioni e (iv) pericolose tensioni

[f] In Italia, non siamo ancora riusciti a sistemare i rifiuti radioattivi degli ospedali [1]. Il 5% degli oneri di sistema che paghiamo nella bolletta elettrica (285 milioni nel 2010) è per lo smantellamento delle centrali nucleari chiuse 25 anni fa [http://qualenergia.it/articoli/20110216-operazione-trasparenza-sui-costi-bolletta] e il piano industriale della Sogin prevede una spesa di 4,8 miliardi entro il 2025 per trasformare i siti in "prato verde" [www.sogin.it/SiteAssets/uploads/2011/piano%20industriale%202011-2015%20cs.pdf]. Bene che vada, il risultato sarà un "prato verde" come quello della Fig. 7c. Anche l'ex ministro Tremonti, certamente non fra i primi, ha riconosciuto che avere centrali nucleari è a tutti gli effetti un debito [www.ilsole24ore.com/art/notizie/2011-03-20/litalia-debito-nucleare-081244.shtml].

sul piano politico e militare in varie zone del mondo. Col passare del tempo tutti questi problemi sono destinati ad acuirsi per cui è necessario sostituire i combustibili fossili con altre fonti di energia. La transizione energetica, comportando profonde trasformazioni nella società, richiederà tempi lunghi e ogni anno che passa senza che si adotti un'adeguata strategia aumenta il grado di criticità. È necessario ed urgente ridurre il consumo di energia mediante un'efficace campagna culturale e misure incisive in vari settori, ad esempio: la riqualificazione energetica degli edifici, la riduzione della potenza delle auto, abbassamento dei limiti di velocità, il potenziamento del trasporto pubblico, lo spostamento del traffico merci su rotaia e via mare, l'uso di apparecchiature elettriche più efficienti, l'ottimizzazione degli usi energetici finali e la rinuncia a produrre cose inutili.

Come vedremo nella seconda parte, l'attitudine a consumare di meno dovrà essere mantenuta anche quando la transizione energetica avrà avuto luogo perché è il fondamento per una gestione corretta di qualsiasi risorsa.

Contestualmente alla diminuzione nei consumi, è necessario decidere con urgenza quali energie alternative conviene sviluppare, tenendo ben presente che la soluzione del problema energetico non deve compromettere la sostenibilità ecologica e sociale, ma anzi fornire un'opportunità per rafforzarle e favorire la pace fra le nazioni [2, 61].

Un accurato esame del nucleare dimostra che questa fonte di energia è caratterizzata da alti costi, limitata disponibilità di combustibile, complessità e pericolosità degli impianti, mancanza di soluzioni convincenti per il collocamento delle scorie ad alta radioattività, difficoltà di smantellamento dei reattori a fine vita, stretto legame col nucleare bellico, fardelli lasciati alle prossime generazioni e impossibilità di trasmettere una tecnologia così complessa e pericolosa ai paesi in via di sviluppo. Per tutte queste ragioni, il nucleare non è la soluzione adatta per uscire dalla crisi energetica e climatica.

Bibliografia

[1] N. Armaroli, V. Balzani, Energia per l'astronave Terra, Nuova edizione aggiornata ed ampliata con gli scenari energetici per l'Italia di domani, Zanichelli, Bologna, 2011.
[2] N. Armaroli, V. Balzani, Energy for a Sustainable World, Wiley-VCH, Weinheim 2011.
[3] J. Murray, D. King, *Nature*, 2012, **481**, 435.
[4] M. Fischetti, *SciAm*, 2012, January 20; www.scientificamerican.com/article.cfm?id=fracking-would-emit-methane&WT.mc_id=SA_CAT_ENGYSUS_20120126
[5] IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change U.N. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, www.ipcc.ch
[6] http://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm
[7] Iran Able to Block Strait of Hormuz, January 9, 2012 www.bloomberg.com/news/2012-01-08/iran-able-to-block-strait-of-hormuz-general-dempsey-tells-cbs.html
[8] www.bp.com/statisticalreview
[9] V. Smil, Energy in the world history, Westview Press Inc., 1994.
[10] I. Illich, Energy and Equity, Marion Boyars, 1974 (versione italiana: I. Illich, Elogio della bicilcetta, Bollati Borlinghieri, 2006).
[11] American Physical Society, Energy = Future: Think Efficiency, American Physical Society, 2008, www.aps.org/energyefficiencyreport/
[12] The National Academies, America's Energy Future: Technology and The World Nuclear Industry Status Report, 2009, www.nap.edu/catalog.php?record_id=12710
[13] The EU climate and energy package, 2008, http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm
[14] COM(2011) 370 definitivo, 2011/0172 (COD) Commissione Europea Direzione Energia, http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0370:FIN:IT:PDF
[15] A. Clò, Si fa presto a dire nucleare, Il Mulino, Bologna,2010.
[16] H. Caldicott, Nuclear Power Is Not the Answer, The New Press, New York, 2006.
[17] Moody's, New nuclear generation: ratings pressure increases, 2009, http://nukefreetexas.org/downloads/Moodys_June_2009.pdf
[18] Citigroup, *New nuclear - The economics say no*, November 9, 2009, http://a4nr.org/wp-content/uploads/2010/06/Citigroup-Nuke-economics-report.pdf
[19] G. Haber, Constellation shares rise after nuclear announcement, *Baltimore Business Journal*, October 11, 2010, www.bizjournals.com/baltimore/stories/2010/10/11/daily6.html
[20] J. Johnson, *Chem. Eng. News*, 2011, **51**, 30.
[21] P. Behr, *SciAm,* 2011, July 13.
[22] J. Johnson, *Chem. Eng. News*, 2011, **14**, 27.
[23] Editoriale, *Nature*, 2012, **7380**, 113.
[24] P. Zanello, *Chimica e Industria*, 2011, **93**(10), 101.

[25] www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.oprconst.htm
[26] www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm
[27] Global Nuclear Generation Capacity Falls, www.worldwatch.org/node/9358
[28] European Climate Foundation, www.europeanclimate.org/index.php/programmes/power/roadmap-2050
[29] World Nuclear News, US new build plans delayed, September 17, 2010, www.world-nuclear-news.org/NN-US_new_build_plans_delayed-1709108.html
[30] Nuclear Power in a Post-Fukushima World, www.worldwatch.org/nuclear-power-after-fukushima
[31] The Real Cost of U.S. Nuclear Power, www.time.com/time/magazine/article/0,9171,2059603,00.html
[32] Salem News, Experts: U.S. Agrees to store enough nuclear waste to fill two Yucca Mountains - or face billions in penalties, 2010 www.salem-news.com/articles/march242010/nuke-costs.php
[33] J. Johnson, *Chem. Eng. News*, 2010, **10**, 31.
[34] NEI, NEI translates Roussely report into English. July 30, 2010, www.neimagazine.com/story.asp?storyCode=2057063
[35] Corte dei Conti francese, Rapporto Gennaio 2012, www.franceinfo.fr/sites/default/files/2012/01/31/514407/pdf/fichier/Synthese_rapport_thematique_filiere_electronucleaire.pdf
[36] http://observ.nucleaire.free.fr/DOSSIER-SECHERESSE-BLACK-OUT-NUCLEAIRE-ETE-2011.pdf
[37] The Japan Times, *Hamaoka nuclear plant successfully closed*, May15, 2011 www.japantimes.co.jp/text/nn20110514x2.html
[38] European Commission, *Stress tests: nuclear safety: stress tests well on track*, 2011, http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/stress_tests_en.htm
[39] H. Jia, *Chemistry World*, 2011, **8**, 11.
[40] P. Marks, *NewScientist*, August 3, 2011, www.newscientist.com/blogs/shortsharpscience/2011/08/sellafields-mox-plant-falls-vi.html?DCMP=OTC-rss&nsref=online-news
[41] E. Strickland, *ieee spectrum*, November, 2011, http://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/24-hours-at-fukushima/0
[42] N. Onishi, *New York Times*, June 24, 2011 www.nytimes.com/2011/06/25/world/asia/25myth.html?_r=1&ref=norimitsuonishi
[43] *Health effects of the Chernobyl accident: an overview*, World Health Organization, April 2006, www.who.int/mediacentre/factsheets/fs303/en/index.html
[44] I. Fairlie, D. Sumner, A. Nyagu, *The other report on Chernobyl*, April 6, 2006. The Green/EFA, www.chernobylreport.org/?p=summary
[45] A. Yablokov, V. Nesterenko, A. Nesterenko, *Chernobyl:Consequences of the Catastrophe for People and the Environment*, *Ann NY Acad Sci,* 2009, **1181**, www.strahlentelex.de/Yablokov%20Chernobyl%20book.pdf
[46] D. Normille, *Science*, 2011, **232**, 908.
[47] G. Hess, *Chem. Eng. News*, 2011, **32**, 12.
[48] E.A. Rosa *et al., Science*, 2010, **329**, 762.
[49] M.L. Wald, *SciAm*, 2009, August, 46.
[50] www.nirs.org/neconomics/weltstatusbericht0908.pdf
[51] World Nuclear News, Exploration to resume at German repository site, March 22, 2010, www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=27390
[52] www.japantimes.co.jp/text/nn20110507f1.html
[53] IAEA, Safe decommissioning for nuclear activities, 2002, www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1154_web.pdf
[54] NRC, *Fact Sheet on Decommissioning Nuclear Power Plants*, 2008, www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html
[55] Yankee Rowe, 2007, www.yankeerowe.com/; www.connyankee.com/html/fuel_storage.html
[56] Enel, *Energia nucleare, 4 risposte al futuro*, 2010, www.sni.enel-edf.com/it- IT/doc/brochure_it.pdf (cancellato dal gennaio 2012)
[57] M. ElBaradei, "Virtual" nuclear powers a looming threat, ElBaradei warns, Global Security Newswire, May 15, 2009, http://gsn.nti.org/gsn/nw_20090515_3217.php
[58] www.galileo2001.it/rapid/styled/files/page14-appello.pdf
[59] MAB.q, Energia per il futuro, 2010, http://dl.dropbox.com/u/7205667/Energia%20Per%20Il%20Futuro.pdf
[60] Life-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Power in Australia. ISA, The University of Sydney, Australia (2006), www.isa.org.usyd.edu.au
[61] The United Nations Secretary-General's High-level Panel on Global Sustainability, www.un.org/gsp/sites/default/files/attachments/GSPReport_unformatted_30Jan.pdf

ABSTRACT

Getting out from Energy and Climate Crisis. Part 1. Why Nuclear Power is not the Solution

The energy-climate crisis should be transformed into an opportunity to achieve five fundamental aims: to provide enough energy to each inhabitant of the Earth, to allow a reasonable economic development, to take care of the planet, to strengthen social cohesion, and to sustain peace. Nuclear energy does not meet the requirements needed to pursue these aims.