

ENERGIA NUCLEARE: REALTÀ E PROSPETTIVE

di Agostino Mathis

For the just started XXI century, a scenery is outlined of the possible technology paths for an adequate energy supply to the mankind, maintaining a climate stability in a greenhouse planet. A world-wide survey is given of the presently operational and planned fission nuclear power plants. A specific attention is then brought to the very long term perspectives of nuclear energy, with reference both to the availability of primary resources, and to the global radioactivity balance for the Earth Planet, and taking into account further technological developments, as fission fast reactors and Accelerator-Driven Systems, and fusion reactors. The "Generation IV Program" is described, by which 10 countries collaborate to the development of six new reactor concepts, to be implemented in the next decades with the aim of environment protection and compatibility with the above mentioned constraints. Finally, the anomalous position of Italy with respect to energy and environment items is discussed, in a perspective of growing difficulty for this country to maintain its past role in technology and economy.

Per il XXI secolo appena iniziato, viene delineato lo scenario delle possibili alternative energetiche e dei conseguenti impatti sulle risorse e sul clima del Pianeta Terra. Viene quindi fornito un panorama delle attuali e prossime installazioni per la produzione di energia nucleare da fissione nel mondo. Una particolare attenzione viene quindi posta sulla "sostenibilità" dell'energia nucleare anche a lunghissimo termine, per quanto riguarda sia la disponibilità di materie prime, sia il bilancio globale di radioattività per il Pianeta Terra, e tenendo conto di ulteriori sviluppi tecnologici come i reattori veloci e gli Accelerator-Driven System a fissione, ed i reattori a fusione. Viene poi descritto il "Generation IV Program", con cui 10 paesi hanno avviato lo sviluppo di sei tipi innovativi di reattori nucleari (di IV generazione), da porre in produzione nei prossimi decenni per salvaguardare l'ambiente soddisfacendo nel contempo le esigenze prima citate. Infine, viene posta in evidenza la posizione dell'Italia sulle problematiche dell'energia e dell'ambiente, del tutto anomala ed incoerente per un paese che volesse mantenere il ruolo tecnologico ed economico acquisito nel passato.

LO SCENARIO

Nel corso del XX secolo la popolazione mondiale è quadruplicata ed il consumo di potenza primaria si è moltiplicato per 16. In massima parte questa energia proviene dalla combustione di combustibili fossili, con la conseguente immissione nell'atmosfera di un crescente flusso di anidride carbonica (CO₂).

La teoria dell'effetto-serra, che sarebbe provocato da questa anidride carbonica e da altri gas diffusi dall'attività umana, tra cui in particolare il metano, appare sempre più credibile via via che si vanno accumulando le osservazioni sul clima e sui biosistemi. Una conferma indiretta può venire anche da una recente analisi modellistica del paleoclima dell'ultimo periodo glaciale (periodo che persiste da almeno un milione di anni, e nel quale tuttora viviamo) (1). Sulla base di questa analisi, viene avanzata l'ipotesi che già a partire da almeno 5-8 mila anni or sono, sia pure inconsciamente, l'"*homo sapiens*" abbia influito sul clima, al punto da averne finora ritardato la "naturale" tendenza verso una nuova era glaciale (e permettendo così

l'esplosione delle civiltà "storiche"): se così è, si tratta ora di evitare che gli effetti antropici eccedano in senso opposto, e cioè provochino un riscaldamento incontrollato.

Dall'era pre-industriale ad oggi la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è passata da circa 275 a circa 370 parti per milione (ppm). Senza interventi, essa potrà superare le 550 ppm entro questo secolo: a questi livelli, i modelli climatologici prevedono riscaldamenti globali dello stesso ordine di quello che ha posto termine all'ultimo massimo glaciale, ma che si sommerebbero a quest'ultimo, portando il globo terracqueo in una situazione non più verificatasi almeno da molti milioni di anni.

Il consumo di potenza primaria dell'umanità è oggi pari a circa 12 TW (equivalenti, in potenza elettrica, a 12.000 grandi centrali), di cui l'85% proviene da combustibili fossili. Nell'ipotesi di ammettere un ragionevole miglioramento del livello di vita anche nei paesi oggi in via di sviluppo, una stabilizzazione del livello di CO₂ rispettivamente a 550, 450 e 350 ppm richiederebbe la disponibilità, a metà di

questo secolo, di una potenza primaria esente da emissioni dell'ordine di 15, 25 e oltre 30 TW (2). Raggiungere questi obiettivi è tutt'altro che facile.

La regolamentazione obbligatoria delle emissioni non sembra politicamente accettabile, né praticamente attuabile (si veda la sorte del Protocollo di Kyoto, i cui stessi paesi firmatari hanno già in gran parte superato le emissioni del 1990, mentre dovrebbero ridurle mediamente del 5% entro 4-8 anni!). Per inciso, appare sempre più chiaro che la misura delle riduzioni previste dal Protocollo di Kyoto, anche in quanto limitata ai soli paesi industrializzati, avrebbe un effetto praticamente trascurabile sulla tendenza del clima globale (3)(4).

La via più efficace per ridurre le emissioni di gas che provocano l'effetto-serra (i cosiddetti gas-serra), mantenendo lo sviluppo economico non può quindi che risiedere in cambiamenti rivoluzionari nelle tecnologie per produrre, distribuire, accumulare, convertire l'energia. Il significato di questa affermazione non è chiaro a gran parte dei decisori politici (sia a livello nazionale che sovranazionale, ad esempio alla Commissione Europea), ma neanche ad importanti organi tecnico-politici come l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), il quale afferma "...known technological options could achieve a broad range of atmospheric CO₂ stabilization levels, such as 550 ppm, 450 ppm or below over the next 100 years or more. . . . Known technological options refer to technologies that exist in operation or pilot plant stage today. It does not include any new technologies that will require drastic technological breakthroughs..." (5). In realtà, questa affermazione non tiene conto degli ordini di grandezza in gioco, e cioè che in meno di cinquant'anni occorrerebbe mettere in produzione una potenza, esente da emissioni di gas-serra, che sia da una a tre volte tutta la potenza oggi consumata nel mondo: i cambiamenti "rivoluzionari" prima citati, infatti, dovranno essere tali non tanto dal punto di vista tecnologico, quanto dal punto di vista della loro accettazione ed implementazione su grande scala industriale in tutto il mondo.

Un'ampia analisi delle alternative tecnologiche che si offrono per raggiungere questi obiettivi viene fornita da (6). Da essa risulta che risparmio energetico e decarbonatazione (con sequestro della CO₂ non possono che essere dei palliativi transitori verso soluzioni più sostenibili a

lungo termine. Queste ultime si riducono alle rinnovabili (biomasse, solare termica e fotovoltaica, eolica, idraulica, geotermica, oceanica termica e mareale) ed alle nucleari (fissione e fusione).

Tutte le sorgenti rinnovabili soffrono all'origine di ridottissime densità di potenza per unità di superficie: la loro implementazione ingegneristica perciò comporta l'occupazione di vaste aree territoriali o marine, e quindi la costruzione e la gestione di immense infrastrutture, con l'utilizzo di materiali anche pregiati e di una quantità di energia che spesso si può paragonare a quella producibile dall'impianto stesso in tutta la sua vita utile. Inoltre, una analisi di rischio per queste tecnologie, effettuata sulla base di dati statistici ben sperimentati (tassi d'incidente per lavori di edilizia e di carpenteria, per trasferimenti o trasporti di biomasse su strada, ecc.) porterebbe ad esiti probabilmente non molto migliori (per potenze prodotte confrontabili) rispetto all'attuale, insostenibile, "standard di fatto" dell'industria energetica da fonti fossili o biomasse (circa 55 decessi **al giorno** in ambito mondiale, in buona parte ovviamente connessi all'estrazione ed al trasporto del carbone) (7).

L'ENERGIA DAL NUCLEO DELL'ATOMO: LO STATO ATTUALE

Attualmente l'energia nucleare serve soprattutto a produrre energia elettrica, ed è ottenuta a partire dall'isotopo ²³⁵U dell'Uranio (²³⁵U), il cui nucleo, come noto, sotto bombardamento neutronico può spaccarsi (fissione), producendo nuclei più leggeri (alcuni anche molto radioattivi), altri neutroni (che permettono di sostenere la reazione a catena), e molta energia (202 MeV). In pratica, ciò significa che la fissione di 1 kg di ²³⁵U produce una quantità di energia paragonabile a quella di 3000 tonnellate di carbone, e con una densità di potenza limitata soltanto dalla capacità ingegneristica di estrarre il calore dalla struttura moltiplicante.

Alcune conseguenze di questi dati di fatto sono immediate: gli impianti nucleari, per una data potenza, occupano spazi che sono ordini di grandezza inferiori rispetto alle sorgenti rinnovabili; il combustibile nucleare ha pesi e volumi trascurabili rispetto ai combustibili fossili; i rifiuti nucleari hanno

circa lo stesso peso e volume del combustibile e sono fortemente radioattivi (salvo trattamenti successivi, di cui si parlerà più avanti), ma sono rigorosamente confinabili e monitorabili: per restare all'esempio precedente, a fronte di circa 1 kg di prodotti di fissione prodotti da 1 kg di ^{235}U , le 3000 tonnellate di carbone genererebbero circa 10.000 tonnellate di CO_2 ed altri inquinanti gassosi, che a tutt'oggi vengono dispersi nell'atmosfera, oltre a centinaia di tonnellate di ceneri da sistemare in qualche modo nell'ambiente.

Attualmente nel mondo operano, o sono in costruzione o programmati, circa 500 reattori nucleari di potenza, che sono praticamente tutti varianti del reattore ad ^{235}U

detto "termico" (cioè, funzionante con neutroni rallentati da opportuni materiali moderatori): in particolare si citano il reattore ad acqua "leggera" (cioè, acqua naturale in contrapposizione all'acqua "pesante", la D_2O), nelle due versioni ad acqua pressurizzata e ad acqua bollente; il reattore moderato e refrigerato ad acqua "pesante" (essenzialmente il canadese CANDU); il reattore moderato a grafite e refrigerato ad acqua (come l'RBMK di Chernobyl); ed il reattore moderato a grafite e refrigerato a gas. Qui di seguito viene fornita la tavola dei reattori nucleari di potenza nel mondo, aggiornata al Dicembre 2003, con l'energia elettrica prodotta nel 2002 e l'uranio richiesto per il 2003.

Tabella 1. World Nuclear Power Reactors 2002-03 and Uranium Requirements.
December 2003

□	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2002		REACTORS OPERABLE Dec 2003		REACTORS under CONSTRUCTION Dec 2003		REACTORS PLANNED Dec 2003		URANIUM REQUIRED 2003
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
Argentina	5.4	7.2	2	935	0	0	1	692	140
Armenia	2.1	41	1	376	0	0	0	0	54
Belgium	44.7	57	7	5728	0	0	0	0	1163
Brazil	13.8	4.0	2	1855	0	0	1	1245	298
Bulgaria	20.2	47	6	3538	0	0	0	0	339
Canada**	71.0	12	16	11282	1	769	3	1545	1591
Chinese organisations:	[[[[[[[[[
-- Mainland	23.5	1.4*	8	6002	3	2535	4	3800	1216
-- Taiwan	33.9	21*	6	4884	2	2600	0	0	963
Czech Republic	18.7	25	6	3472	0	0	0	0	487
Finland	21.4	30	4	2656	0	0	1	1000	549
France	415.5	78	59	63293	0	0	0	0	10245
Germany	162.3	30	18	20609	0	0	0	0	3810
Hungary	12.8	36	4	1755	0	0	0	0	285
India	17.8	3.7	14	2550	8	3728	1	440	299
Iran	0	0	0	0	1	950	1	950	0
Japan	313.8	39	53	44153	3	3696	12	15858	7561
Korea DPR (North)	0	0	0	0	1	950	1	950	0
Korea RO (South)	113.1	39	18	14870	2	1900	8	9200	2843
Lithuania	12.9	80	2	2370	0	0	0	0	290
Mexico	9.4	4.1	2	1310	0	0	0	0	232
Netherlands	3.7	4.0	1	452	0	0	0	0	112
Pakistan	1.8	2.5	2	425	0	0	1	300	56
Romania	5.1	10	1	655	1	655	0	0	90
Russia	130.0	16	30	20793	6	5575	0	0	2736
Slovakia	18.0	65	6	2472	0	0	0	0	373
Slovenia	5.3	41	1	679	0	0	0	0	130
South Africa	12.0	5.9	2	1842	0	0	0	0	360
Spain	60.3	26	9	7405	0	0	0	0	1622

Sweden	65.6	46	11	9460	0	0	0	0	1536
Switzerland	25.7	40	5	3170	0	0	0	0	598
Ukraine	73.4	46	13	11195	2	1900	0	0	1492
United Kingdom	81.1	22	27	12082	0	0	0	0	2488
USA	780.1	20	104	98622	0	0	0	0	21741
WORLD	2574	16	440	360,890	30	25,258	34	35,980	65,699

Sources and definitions:

Reactor data: ANSTO, IAEA, WNA to 1/12/03.

IAEA- for nuclear electricity production & percentage of electricity (% e).

WNA: Global Nuclear Fuel Market (reference scenario, provisional 2003 data) - for U.

Operating = Connected to the grid.

Building/Construction = first concrete for reactor poured.

Planned = Approvals and funding in place.

kWh = kilowatt-hours.

TWh = Terawatt-hours (billion kilowatt-hours).

MWe = Megawatt net (electrical as distinct from thermal).

NB: 65,699 tU = 77,479 t U₃O₈

* These nuclear generation percentages are geographical.

** In Canada, construction refers to laid-up Bruce 3 unit, 'planned' is 3 laid-up Pickering A reactors.

Come si vede nella tabella 1, l'Italia è l'unico grande paese industriale assente: ciò è conseguenza del referendum tenutosi nel 1987 (relativo a norme per la costruzione di centrali nucleari) e dell'interpretazione datagli dai successivi governi, che portò al fermo delle centrali in operazione ed all'interruzione dei lavori per quelle in costruzione. Di conseguenza, l'Italia produce energia elettrica in gran parte da combustibili fossili importati, ed inoltre ne importa una frazione, che si avvicina al 20% e quasi tutta di origine nucleare, dai paesi vicini come Francia, Svizzera e Slovenia.

Nel 2002 la produzione netta di energia elettrica in Italia è stata di circa 270 miliardi di kWh. Come si vede dalla tabella precedente, oggi nel mondo si produce da fonte nucleare una quantità di energia elettrica dell'ordine di circa 10 volte l'intera produzione netta italiana! (Gli USA quasi tre volte tale produzione, la Francia una volta e mezza, il Giappone il 120%, ecc.). Alcuni paesi fanno un assegnamento quasi totale sulla produzione elettronucleare: la Lituania per l'80%, la Francia per il 78%, la Slovacchia per il 65%, il Belgio per il 57%. Anche paesi che a suo tempo avevano deciso un, sia pur graduale, abbandono del nucleare, ne sono tuttora fortemente dipendenti (e non è escluso che vi possano essere ripensamenti, con il cambiare delle maggioranze di governo): la Svezia per il 46% e la Germania per il 30%.

Oltre ai 440 reattori di potenza in operazione, ve ne sono poi 30 in costruzione e 34 in programma (e cioè, approvati e finanziati): in totale 64, pari a circa il 15% di quelli in operazione, così distribuiti:

Argentina	1	per 692 MWe
Brasile	1	per 1245 MWe
Canada	4	per 2314 MWe
Cina	7	per 6335 MWe
Taiwan	2	per 2600 MWe
Finlandia	1	per 1000 MWe
India	9	per 4168 MWe
Iran	2	per 1900 MWe
Giappone	15	per 19554 MWe
Corea del Nord	2	per 1900 MWe
Corea del Sud	10	per 11100 MWe
Pakistan	1	per 300 MWe
Romania	1	per 655 MWe
Russia	6	per 5575 MWe
Ucraina	2	per 1900 MWe

Si tratta di un panorama sotto molti aspetti impressionante, in particolare rispetto ai luoghi comuni diffusi in Italia. Come si vede, è soprattutto l'Asia a dimostrare la massima dinamicità, col Giappone e le due Coree in testa. Anche Russia e Ucraina non rinunciano al nucleare, nonostante l'incidente di Chernobyl.

Di speciale significato poi è il caso della Finlandia, che dopo un approfondito e sofferto dibattito nel 2002 ha deciso la costruzione della sua quinta centrale nucleare: non disponendo infatti di sufficienti energie alternative (né sole né vento adeguati) ed intendendo ottemperare al Protocollo di Kyoto, l'unica soluzione ritenuta realistica è risultata quella di portare dall'attuale 30% fin quasi al 50% la frazione di energia elettrica di origine nucleare. Per la nuova centrale è stato scelto il sito di Olkiluoto ed in data 18 dicembre 2003 è stato firmato, con la francese Areva e la tedesca Siemens, il contratto per la costruzione di un nuovo *European Pressurized Water Reactor*

(EPR) da 1600 MWe; per l'Areva, la Framatome ANP fornirà l'isola nucleare, mentre la Siemens fornirà l'isola turbina. Il costo totale previsto è di circa tre miliardi di euro. Nel frattempo, un recente sondaggio ha rilevato che negli ultimi 10 anni un 15% della popolazione finlandese da antinucleare è divenuta pronucleare (attualmente: 45% a favore; 28% contrari; 27% neutrali).

L'ENERGIA DAL NUCLEO DELL'ATOMO: LE PROSPETTIVE

L'isotopo fissile ^{235}U è soltanto lo 0,72% dell'uranio naturale. Una buona parte delle centrali nucleari attuali non prevede il ritrattamento del combustibile irradiato per recuperarne il plutonio, altro materiale fissile, nonché la grande frazione di uranio "depleto", il quale a sua volta può essere "fertilizzato" con bombardamento neutronico per produrre ulteriore materiale fissile (in particolare, l'assenza di ritrattamento vige per i circa 100 reattori degli USA, dopo che l'Amministrazione Carter aveva deciso di non costruire impianti di ritrattamento per usi civili, al fine di ridurre il rischio di proliferazione a scopi militari).

In questa ipotesi di ciclo del combustibile "ad un passaggio", il principale problema strategico dell'energia nucleare da fissione sarebbe la disponibilità di combustibile. Le attuali stime delle riserve minerarie di uranio accertate e probabili (cioè, minerali con 500-2000 parti per milione in peso di uranio) sono rispettivamente 3,4 e 17 milioni di tonnellate (8). La fissione del solo ^{235}U presente in natura fornirebbe quindi rispettivamente 60 e 300 TW-anno di energia primaria. Nell'ipotesi, considerata ad esempio in (9), che nel 2050 fosse operativo un parco di reattori ad ^{235}U da 10 TW (a fronte dei 0,36 TW nucleari attuali, con un impatto quindi di rilievo nello scenario energetico descritto all'inizio), le risorse di uranio si esaurirebbero rispettivamente in 6 o 30 anni!

Come vedremo, però, con una opportuna pianificazione del ritrattamento e della trasmutazione del combustibile irradiato, mediante l'uso di reattori "fertilizzatori" a flusso neutronico "veloce" (cioè, ad alta energia), è possibile estrarre dall'uranio naturale all'incirca 100 volte in più di energia (e quindi raggiungere una disponibilità di millenni per una potenza installata di 10 TW). Inoltre, a questi livelli di sfruttamento, può divenire conveniente ricavare l'uranio da

rocce molto diffuse come i graniti ed anche dall'acqua di mare: ad esempio, negli oceani vi sono 4,4 miliardi di tonnellate di uranio, equivalenti a 80.000 TW-anno dal solo ^{235}U .

Tuttavia, la più promettente fonte di energia nucleare a lungo termine resta la fusione tra nuclei atomici leggeri, anche se in questo campo non ci si può ancora ritenere nemmeno al punto in cui era arrivato Enrico Fermi con la sua prima "pila atomica" a fissione divenuta "critica" a Chicago nel 1942. Un progresso costante è stato fatto sulla linea dei reattori a fusione di tipo "tokamak" (una camera toroidale sotto vuoto spinto e confinamento magnetico del plasma). L'attenzione si è finora rivolta soprattutto alla reazione deuterio-trizio (D-T), per la quale si è giunti circa ad un fattore due al di sotto della soglia fornita dal criterio di Lawson per ottenere il "breakeven" (cioè: energia fornita dalle reazioni di fusione almeno pari all'energia necessaria per riscaldare il plasma).

Per reattori di potenza a fusione, bisognerà comunque andare ben oltre la soglia suddetta, in quanto molti neutroni dovranno attraversare il primo contenimento per finire in un volume di litio fuso, dove si produce calore da trasferire ai turbogeneratori e si fertilizza il litio stesso per produrre il trizio da "fondere" col deuterio. Il deuterio è disponibile negli oceani in quantità praticamente illimitate. Infatti, l'idrogeno è il più leggero ed il più abbondante degli elementi, costituendo il 76% della massa dell'universo ed il 93% del numero totale degli atomi. Un atomo su 6000-6500 atomi di idrogeno naturale è deuterio: un litro di acqua naturale potrebbe così fornire l'energia equivalente a 360 litri di benzina. Lo strato superiore spesso soltanto tre metri degli oceani potrebbe soddisfare alle prevedibili esigenze energetiche della Terra per almeno... 50 miliardi di anni! (10).

Oltre alla reazione D-T, si potrebbe utilizzare la reazione deuterio-elio3 ($\text{D}-^3\text{He}$), molto più energetica ed in grado di produrre particelle cariche, direttamente trasformabili in elettricità, ma ^3He è molto raro sulla Terra, e dovrebbe essere reperito su corpi extraterrestri come la Luna o i pianeti giganti di natura gassosa. Soltanto la reazione materia-antimateria, tuttavia, avrebbe un contenuto energetico superiore alla reazione $\text{D}-^3\text{He}$ (di 259 volte), mentre supererebbe di 1000 volte la fissione e di ben 7 miliardi di volte la combustione idrogeno-ossigeno di un propulsore spaziale (10).

Dopo una serie di esperimenti condotti in Europa e negli Stati Uniti (qui anche su concetti molto diversi come il confinamento inerziale mediante potenti raggi laser convergenti, nella *National Ignition Facility* sviluppata a fini militari), sembra ora esservi una nuova confluenza di interesse, anche da parte americana, sull'*International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER), che dovrebbe dimostrare la fattibilità ingegneristica di un reattore a fusione di potenza, con un investimento dell'ordine di 5 miliardi di Euro; anzi, il Dipartimento dell'Energia USA ha recentemente posto la partecipazione a questo progetto al primo posto nella lista di priorità dei 28 progetti considerati strategici per i prossimi 20 anni (11).

Tuttavia, non appare realistico fare assegnamento sulla fusione nucleare per far fronte, nel corso di questo secolo, all'esaurimento dei combustibili fossili ed alla destabilizzazione del clima.

Non resta quindi che riprendere in esame l'uso dei reattori a neutroni "veloci", e valutarne a fondo le opportunità sia come moltiplicatori di materiale fissile, sia, come vedremo, quali "bruciatori" di residui fortemente radioattivi provenienti dagli attuali reattori termici, ed anche, eventualmente, dallo smantellamento delle armi nucleari.

TRASMUTAZIONE E GESTIONE DEI RESIDUI RADIOATTIVI

Intanto è da premettere che in prospettiva la tradizionale distinzione tra i tre separati domini delle macchine acceleratrici per le ricerche di fisica, dei reattori a fissione e dei reattori a fusione potrebbe gradualmente dissolversi. Si possono infatti concepire vantaggiose tecnologie "ibride", che riuniscono acceleratori e reattori a fissione, oppure reattori a fusione e reattori a fissione.

Come già fatto cenno, l'obiettivo primario della tecnologia di trasmutazione è la riduzione del contenuto di attinidi, e quindi della radiotossicità dei residui di alto livello. Inoltre, tale tecnologia permetterà anche di accrescere grandemente l'utilizzo energetico delle risorse naturali e di ridurre le immobilizzazioni di uranio e altri attinidi richieste dal ciclo del combustibile. Occorre tuttavia tener presente che la chiusura completa del ciclo del combustibile richiederà un notevole impegno tecnico ed economico

per lo sviluppo e l'installazione di reattori e processi di ritrattamento fortemente innovativi.

Oltre l' ^{235}U , altri due importanti materiali fissili sono un isotopo del plutonio, il ^{239}Pu , ottenibile come già detto mediante bombardamento neutronico dell' ^{238}U , ed un isotopo del torio, l' ^{233}U , ottenibile mediante bombardamento neutronico del ^{232}Th . Il torio, in particolare, è tre volte più abbondante dell'uranio, ed inoltre il suo prodotto fissile, l' ^{233}U , è molto più difficile da separare per eventuali usi bellici rispetto al plutonio.

Una possibilità è allora quella di accelerare la produzione di ^{233}U mediante un sistema ibrido fissione-fusione. Ad esempio, la fusione D-T produce una particella alfa da 3,4 MeV ed un neutrone da 14 MeV. Il neutrone può essere usato nel rivestimento del *tokamak* per produrre ^{233}U dal torio, oltre che trizio dal litio. Come per l' ^{235}U , ogni fissione di ^{233}U produce circa 200 MeV di energia. La fissione, quindi, si presenta ricca di energia e povera di neutroni, mentre il viceversa vale per la fusione. Un singolo fertilizzatore a fusione potrebbe quindi sostenere fino a 10 bruciatori satelliti a fissione, mentre un fertilizzatore a fissione ne sosterebbe forse uno. Per fare assegnamento su tutto ciò, però, occorrerebbe che fossero già disponibili i reattori a fusione.

Una alternativa già attuabile è invece quella del sistema ibrido "acceleratore di particelle - reattore a fissione" (*Accelerator-Driven System: ADS*): ad esempio, da ogni protone accelerato a 1000 MeV che impatta in piombo liquido si generano 30 neutroni da 3 MeV, che possono essere iniettati in una struttura moltiplicante sottocritica, dove possono fertilizzare ^{238}U e/o ^{232}Th , ed inoltre generare energia in misura rilevante anche distruggendo nuclidi ad altissima radioattività (gli attinidi) provenienti da altri reattori o da arsenali nucleari. L'acceleratore è senz'altro una macchina costosa, ma la sua alimentazione dovrebbe richiedere non più del 10% della potenza elettrica della centrale.

Una efficiente tecnologia per la separazione e la trasmutazione degli attinidi transuranici permetterebbe di ridurre drasticamente le problematiche relative allo smaltimento definitivo dei residui ad altissima radioattività. Anzi gli esperti dell'ente atomico russo (che possiede una vasta esperienza di ritrattamento di materiali nucleari, anche a fini militari) hanno tra l'altro dimostrato che in un sistema energetico nucleare su larga scala e con

tipologie diversificate di reattori, una gestione dei residui adeguatamente coordinata e pianificata permetterebbe di mantenere intatto il bilancio globale di radioattività del Pianeta Terra (in effetti, il minerale originario di uranio e torio presenta una sensibile radioattività naturale, rilevante sorgente della radioattività di fondo presente in territori vulcanici o granitici: concentrando e riciclando a sufficienza in reattori ad alto flusso neutronico questi materiali, si può arrivare ad una radioattività residua inferiore a quella di partenza!) (12).

Recentemente, un gruppo di esperti della Agenzia per l'Energia Nucleare dell'OECD ha condotto una ampia analisi comparata tra una serie di diverse strategie di trasmutazione, scegliendo diversi "cicli del combustibile" comprendenti sia reattori ad acqua leggera (LWR), sia reattori innovativi a spettro neutronico veloce di tipo critico e/o sottocritico (ADS) (13).

Sono stati considerati tre cicli-base: quello "ad un passaggio" negli LWR (senza ritrattamento), il riciclo del solo plutonio ed il riciclo di tutti gli attinidi. Per quest'ultimo caso, sono poi stati considerati 4 differenti schemi di trasmutazione, di cui tre comprendenti gli LWR e l'ultimo corrispondente ad una strategia a lungo termine basata completamente sui reattori veloci.

Il solo riciclo del plutonio permette di ridurre la quantità anche di 175 volte rispetto al caso "ad un passaggio", ma produce molti altri transuranici che vanno nei residui, con una riduzione globale dei transuranici di sole 4,4 volte. Chiudendo invece il ciclo anche per gli attinidi minori, si ottiene per tutti i transuranici una riduzione di almeno 175 volte. In una prospettiva poi da 1000 a 100.000 anni, tutte le 4 strategie di trasmutazione considerate permettono agevolmente di ottenere una riduzione di 100 volte nella radiotossicità residua rispetto al caso di riferimento "ad un passaggio".

Per quanto riguarda il grado di utilizzo dell'uranio naturale, tutti gli schemi che prevedono LWR non ne fissionano più dell'1%. Inoltre, producono grandi flussi di uranio depleto e irradiato, che alla lunga (100.000 anni) diventerebbero la principale causa di radiotossicità da attinidi residui. Soltanto la strategia di tutti reattori veloci permette una riduzione di 180 volte nel fabbisogno di uranio e non produce uranio residuo.

Per tutti gli schemi di trasmutazione considerati, l'immobilizzazione di transuranici è quattro ordini di grandezza maggiore rispetto alla quantità scaricata annualmente nei residui. Ciò significa che, anche per un sistema nucleare a trasmutazione da lungo tempo a regime, una eventuale uscita dal nucleare richiederebbe di continuare l'"incenerimento" dei transuranici in "bruciatori" a spettro veloce (ADS o reattori veloci) per molte decine di anni dopo la fermata dei reattori convenzionali, pena una pratica vanificazione dell'intero sforzo inteso a ridurre la radiotossicità degli attinidi!

Come abbiamo visto, oltre 400 reattori convenzionali sono oggi in funzione nel mondo, altri sono in disuso ma non smantellati, e molti altri sono in costruzione o in programma. Inoltre, vi sono, e vi saranno in misura crescente, ingenti quantitativi di materiale fissile e fertile proveniente dallo smantellamento delle armi nucleari. Qualunque sia l'atteggiamento dei singoli paesi riguardo al "problema nucleare" (anche di quelli, come l'Italia, che vorrebbero "chiudere gli occhi e mettere la testa sotto la sabbia"), l'umanità nel suo insieme si trova di fronte al dovere inderogabile di affrontare con razionalità e lungimiranza, ed in forma attiva e non passiva, tutta la problematica relativa alla gestione del "complesso nucleare" per un futuro anche di secoli.

LA RADIOATTIVITÀ: DOSI E RISCHI

Occorre innanzi tutto avere ben chiaro che, contrariamente al pensiero di alcuni ecologisti, le reazioni nucleari, e la conseguente generazione di materiali anche altamente radioattivi, non costituiscono un prodotto peculiare dell'invenzione e dell'attivismo umano, ma sono da sempre largamente presenti in natura.

Mentre infatti, dopo l'esperimento di Enrico Fermi del 1942, si riteneva che il reattore nucleare a fissione fosse una creatura, per alcuni "diabolica", dell'ingegno umano, nel 1972 in una miniera di uranio di Oklo, nella Repubblica del Gabon in Africa Occidentale, vennero scoperti i segni inequivocabili di un lungo funzionamento di reattori nucleari naturali (e cioè, si rinvennero circa 5000 kg di prodotti di fissione radioattivi, perfettamente identificabili e misurabili). Si stima che in quel luogo la reazione a catena, innescata spontaneamente da un minerale naturale ricco di uranio ed

autoregolatasi grazie a retroazioni spontanee stabilizzanti, sia durata ininterrottamente per più di 500.000 anni, in un periodo di oltre 2 miliardi di anni fa: a quanto risulta, la scorie radioattive sono rimaste per tutto questo tempo sostanzialmente sul posto dove erano state prodotte.

Anche per quanto riguarda il fondo di radioattività naturale, nel quale tutti viviamo, è opportuno fornire un quadro quantitativo che permetta poi di valutare per confronto l'effettiva rilevanza delle conseguenze delle attività umane, in particolare quelle dovute ad incidenti (14).

Le radiazioni nucleari da sempre sono presenti in tutto l'universo e sul pianeta Terra. La vita sulla Terra si è evoluta in presenza di radiazioni, e probabilmente anche a causa di esse. Attualmente in media l'esposizione della popolazione alle radiazioni è dovuta per circa l'82% a cause naturali (gas radon; elementi radioattivi dello stesso corpo umano; raggi cosmici dallo spazio esterno; rocce e suolo); il rimanente 18% circa, sempre in media, è dovuto a cause "antropiche", soprattutto le radiografie e le radioscopie per cure mediche e dentali.

La esposizione umana alle radiazioni nucleari è ora misurata in sievert (Sv), che, come il precedente rem (1 sievert = 100 rem), tiene conto degli effetti dei vari tipi di radiazioni sugli organismi viventi. In media, siamo sottoposti ad una dose annuale di 3,6 mSv (360 mrem), di cui circa 3 mSv provengono da fonti naturali. Queste ultime, però, sono molto variabili da un luogo all'altro (come effetto da rocce e suolo, si va da 1 a 0,2 mSv passando dall'altopiano del Colorado alla costa est degli Stati Uniti, oppure dalle aree vulcaniche del Viterbese ai bacini dell'Appennino calcareo; se poi si stazionasse per un anno in Piazza San Pietro a Roma, si sarebbe sottoposti a ben 7 mSv a causa del selciato di cubetti di porfido, roccia vulcanica che contiene torio naturalmente radioattivo). Si tenga presente che la radioattività dal suolo nell'area proibita di 30 km intorno alla centrale di Chernobyl è oggi mediamente di 5 mSv/anno.

Le dosi assorbite in caso esplosioni o incidenti nucleari sono naturalmente molto maggiori: 1 Sv può causare "malattia da radiazioni"; 5 Sv ucciderebbero circa la metà dei colpiti; 10 Sv sarebbero fatali praticamente per tutti. Le 28 vittime da radiazioni nell'incidente di Chernobyl (Ucraina, 1986) si ritiene che abbiano ricevuto oltre 5 Sv in pochi giorni.

Nel caso dell'incidente di Three Mile Island (l'unico grave incidente avvenuto in un reattore di tipo "occidentale", verificatosi in USA nel 1979), nonostante la fusione di un terzo del combustibile irraggiato, la radioattività rilasciata dall'impianto fu molto limitata e non pericolosa: la dose di radiazione media ricevuta dalla popolazione nel raggio di 10 miglia dall'impianto fu di 0,08 mSv, mentre nessun individuo superò la dose di 1 mSv. Ciò fu dovuto essenzialmente alla efficacia del contenitore esterno del reattore, già allora caratteristica tipica dei reattori "occidentali".

In condizioni di funzionamento normale, poi, una centrale nucleare può accrescere la dose assorbita di chi vive entro 50 miglia dall'impianto in misura limitatissima, stimabile in 0,00009 mSv/anno (meno di un decimo di microsievert /anno). Si tenga presente che una normale centrale a carbone, a causa della radioattività degli elementi pesanti contenuti nelle ceneri e nel polverino emesso dalle ciminiere, sottoporrebbe chi vive entro 50 miglia dall'impianto ad una dose di 0,0003 mSv/anno (cioè 0,3 microsievert/anno, oltre tre volte la dose dovuta alla centrale nucleare).

Nel caso di incidenti gravi come quello di Chernobyl, occorre poi tenere conto degli effetti a lungo termine, per i quali continua ad essere in atto una vasta indagine epidemiologica (che affianca e complementa quelle condotte sui superstiti delle esplosioni nucleari di Hiroshima e Nagasaki) (15). A Chernobyl, le vittime dirette furono 31 (che comprendono quelle prima citate, dovute alle radiazioni, più alcune altre per effetti traumatici); altri 14 decessi si verificarono nei dieci anni successivi. Nei primi giorni vi fu un forte rilascio di iodio radioattivo, che a distanza di 4 anni provocò in Ucraina e Bielorussia un notevole aumento dei tumori alla tiroide, specie nei bambini (circa 1800, peraltro nella massima parte curati con successo). Invece, i danni paventati per l'esposizione durevole a radionuclidi a lunga vita (come il cesio 137) fortunatamente non sono divenuti realtà: infatti, non si sono ad oggi verificati aumenti nei tassi di tumori, neanche nelle leucemie dei bambini.

Al momento, quindi, sembra di poter affermare che il pur gravissimo incidente di Chernobyl non eccede i danni di altri ben noti, ma spesso dimenticati, incidenti provocati da altri tipi di impianti per l'energia (si possono ricordare: il disastro dell'impianto idroelettrico del Vajont, Italia

1963, con quasi 2000 morti; l'esplosione di serbatoi di gas liquido a Ixhuatepec, Messico 1984, con 550 morti, 7000 feriti e ben 300.000 evacuati).

LE NUOVE GENERAZIONI DI REATTORI

La prima generazione è quella degli anni '50 e '60 dello scorso secolo, che vide la costruzione e la sperimentazione di molti prototipi delle più varie concezioni, tra cui alcune anche ottimizzate per produrre non solo energia elettrica, ma anche plutonio per armi nucleari.

La seconda generazione, nei successivi anni '70 e '80, vide la costruzione di un gran numero di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio arricchito ed acqua naturale (pressurizzata o bollente).

La terza generazione è considerata quella dei reattori avanzati ad acqua naturale, come il già citato *European Pressurized Reactor* (EPR), e gli impianti sviluppati e certificati negli Stati Uniti nel corso degli anni 1990.

Per restare agli Stati Uniti, questa successione di generazioni si può ritenere un successo, che ha portato ai seguenti risultati (16):

- l'energia nucleare fornisce oltre il 20% dell'energia elettrica negli USA, ed il 16% in ambito mondiale;
- nel 2002 i 103 impianti elettronucleari operanti negli USA hanno fornito 790 miliardi di kWh di elettricità per un valore di 50 miliardi di dollari;
- grazie all'energia nucleare, gli USA dal 1970 hanno evitato di immettere nell'atmosfera tre miliardi di tonnellate di gas di combustione;
- gli impianti nucleari USA hanno dimostrato negli ultimi anni una crescente affidabilità e disponibilità, pervenendo nel 2001 a fornire energia elettrica ad un costo di 1,68 cents/kWh (superiore soltanto alla fonte idroelettrica, tra le opzioni per il carico di base).

Restano tuttavia i ben noti problemi relativi all'accettabilità dell'energia nucleare da parte del pubblico, fortemente minata dagli incidenti di Three Mile Island e di Chernobyl; agli alti costi d'investimento, anche dovuti alla lunghezza dei tempi di costruzione ed alla incertezza dei regolamenti; alla destinazione del combustibile irraggiato (che per ora in USA non viene ritrattato, e che come tale in breve

renderebbe insufficiente anche il deposito geologico di Yucca Mountain, recentemente approvato dal Congresso); al rischio della proliferazione delle armi nucleari e del terrorismo nei confronti sia delle centrali che degli impianti di ritrattamento e deposito di materiali fissili.

Nonostante tutto ciò, nel corso degli anni 1990 l'energia nucleare in USA ha visto un recupero regolamentare ed economico, con un rilevante incremento di producibilità degli impianti esistenti ed un crescente contributo al bilancio energetico del Paese. Tenuto conto dell'affidabilità e dell'efficienza dimostrata dalla maggior parte degli impianti, alcuni di essi hanno già ottenuto dagli organi di controllo un prolungamento di vent'anni della licenza di operazione, e si pensa che quasi tutti seguiranno questa strada. Ciò ovviamente renderà ancora più fruttuoso l'investimento a suo tempo fatto dal Paese, e praticamente annullerà i costi di ammortamento per gli attuali gestori delle centrali. La "sostenibilità" dell'energia nucleare a lungo termine, tuttavia, richiede una risposta efficace e convincente alle problematiche prima elencate, tuttora non risolte.

L'esigenza di mantenere, ed anzi incrementare, il contributo dell'energia nucleare al bilancio energetico USA deriva da semplici considerazioni: nell'ipotesi di un incremento del consumo energetico totale dell'1,5% annuo dal 2001 al 2025, esso passerebbe da 103 a 147 Exajoules (oltre il 40% in più). Poiché le risorse nazionali, in gran parte carbone e gas naturale, non potranno crescere più dello 0,9% annuo, la dipendenza dalle importazioni di fonti fossili crescerebbe dal 27% al 35%. Vi è quindi una forte motivazione ad accrescere l'apporto di energia elettronucleare al di sopra dell'attuale 20%, sia attivando a breve ordinativi per impianti avanzati ad acqua leggera (III generazione), sia procedendo rapidamente coi progetti di IV generazione, che, come vedremo, dovranno assicurare una sostenibilità dell'energia nucleare anche a lunghissimo termine.

In proposito, è importante notare che l'Amministrazione USA fa assegnamento sull'energia nucleare anche per ruoli strategici in settori energetici diversi dall'elettricità. Essa prevede infatti che, nello stesso periodo prima considerato (2001-2025), nel settore dei trasporti l'incremento del consumo energetico sarà del 2% annuo, da 29 a 47 Exajoules (circa il 60% in più): questo

consumo è oggi quasi esclusivamente basato sul petrolio. Orbene, dopo tanti allarmi rientrati sul prossimo esaurimento delle riserve di petrolio, oggi molti esperti ritengono che, così come negli Stati Uniti il picco di produzione del petrolio si è veramente verificato negli anni 1970, analogamente a livello mondiale si potrà assistere a tale picco di produzione entro pochi decenni: dagli attuali 80 milioni di barili di greggio consumati al giorno nel mondo, si potrà salire a 85 intorno al 2010 per poi scendere gradualmente a 30 nel 2025-2030, ed a 15 nel 2035-2050 (10)(17). In tutta questa fase di transizione il prezzo non farà che salire (come già sta facendo da qualche anno), e gradualmente il petrolio diverrà una materia prima preziosa da utilizzare soltanto per usi pregiati (chimica, farmaceutica, ecc.).

L'alternativa che appare sempre più seria per i trasporti è l'uso dell'idrogeno, ovviamente non ricavato da petrolio o gas naturale (il carbone presenta riserve più durature, ma resta il problema dell'effetto-serra). L'idrogeno usato in celle a combustibile, poi, offrirebbe emissione di solo vapor d'acqua (neanche quindi gli ossidi di azoto, pur sempre presenti nei motori a combustione interna, anche a idrogeno). In questa prospettiva, la "National Hydrogen Energy Roadmap" raccomanda uno sforzo di ricerca finalizzata ed a lungo termine su "processes such as nuclear thermochemical water-splitting" (18).

Con una iniziativa avviata nel Gennaio 2000, quindi, 10 paesi si sono uniti per formare il "Generation IV International Forum" (GIF) col fine di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, cioè i sistemi che potranno divenire operativi fra 15 o 20 anni, subentrando alla attuale ed alla prossima generazione dei reattori "termici" ad acqua, e che dovranno assicurare:

- a) il più elevato livello di sicurezza a fronte sia di incidenti tecnico-operativi, sia di atti di terrorismo;
- b) la massima riduzione dei residui radioattivi, in particolare di quelli a lunga vita;
- c) un molto maggior sfruttamento delle risorse minerarie in materiali fissili e fertili;
- d) la capacità di produrre direttamente idrogeno (senza passare attraverso l'energia elettrica), al fine di coprire senza emissione di gas-serra il crescente fabbisogno di energia "non elettrica" (per trasporti ed altro).

I paesicostituenti il GIF sono: Argentina, Brasile, Canada, Francia, Giappone, Gran

Bretagna, Repubblica di Corea, Repubblica del Sud Africa, Svizzera, e Stati Uniti; anche l'Euratom, per l'Unione Europea, aderisce al Forum. Spiccano le assenze di Italia e Germania, ma è bene tener presente che comunque l'industria tedesca collabora strettamente con quella francese nello sviluppo dell'*European Pressurized Reactor* (che può essere considerato un reattore di III generazione) e, come detto, si appresta a costruirne il primo esemplare per la Finlandia.

Oltre 100 esperti dei 10 paesi GIF hanno lavorato per due anni all'esame di un centinaio di alternative tecnologiche, e sono pervenuti a definire i 6 concetti più promettenti per la IV Generazione di reattori nucleari, intorno a cui organizzare il programma di ricerca e sviluppo. Ogni paese partecipante si concentrerà su quei sistemi e su quelle linee di ricerca che rivestono il maggior interesse per sé stesso.

Dei 6 concetti prescelti, due adottano uno spettro di neutroni termici con refrigeranti e temperature che permettono la produzione con alta efficienza sia di idrogeno che di elettricità. Tre concetti adottano uno spettro di neutroni veloci per ottenere una gestione più efficace degli attinidi mediante la chiusura del ciclo del combustibile. Un concetto, infine, impiega un combustibile sotto forma di miscela liquida circolante, che offre una grande flessibilità nella gestione degli attinidi e può costituire una alternativa agli *Accelerator-Driven Systems* (ADS).

Viene ora fornita una breve descrizione dei 6 concetti prescelti:

Sistemi a spettro neutronico termico

Very High Temperature Reactor System (VHTR)

Utilizza neutroni "termici" ed un ciclo del combustibile "ad un passaggio". E' destinato a fornire a breve termine con alta efficienza elettricità e/o produzione termochimica di idrogeno senza emissioni di anidride carbonica: ciò grazie ad una temperatura del refrigerante in uscita dal nocciolo superiore a 1000°C. Può naturalmente anche produrre idrogeno mediante elettrolisi del vapore ad alta temperatura, se questo processo risulterà più conveniente. Il sistema di riferimento è un reattore con un nocciolo da 600 MWth raffreddato da elio e costituito da combustibile in blocchi prismatici o in forma di sfere (*pebble bed*). Operando ad un'efficienza del 50%, questo reattore, pur di piccola taglia, potrebbe produrre oltre 200

tonnellate di idrogeno al giorno, equivalenti a quasi un milione di litri di benzina, evitando così l'importazione di 3 milioni di barili di greggio all'anno. Il Sud Africa è già impegnato nello sviluppo di un prototipo su questa linea.

Supercritical-Water-Cooled Reactor System (SCWR)

Anche questo reattore utilizza neutroni "termici" ed un ciclo del combustibile "ad un passaggio". Il sistema adotta un reattore raffreddato da acqua ad alta temperatura ed alta pressione, che opera al di sopra del "punto critico" dell'acqua per ottenere un'efficienza termica del 44%. L'impianto di riferimento prevede una potenza di ben 1700 MWe ed una temperatura del refrigerante in uscita dal nocciolo di 550°C. E' rivolto principalmente alla produzione a basso costo di energia elettrica, grazie all'alto rendimento ed alla semplificazione dell'impianto.

Sistemi a spettro neutronico veloce

Gas-Cooled Fast Reactor System (GFR)

Utilizza neutroni "veloci" ed un ciclo del combustibile chiuso, così da ottenere una efficiente gestione degli attinidi e conversione in fissile dell'uranio fertile. Il nocciolo è costituito da combustibile in forma di barre o piastre, o anche prismatico, con una potenza di riferimento di circa 300 MWe. E' rivolto principalmente alla produzione di elettricità ed alla gestione degli attinidi, benché possa anche produrre economicamente idrogeno.

Lead-Cooled Fast Reactor System (LFR)

Utilizza neutroni "veloci" ed un ciclo del combustibile chiuso, così da ottenere una efficiente gestione degli attinidi e conversione in fissile dell'uranio fertile. Il sistema è basato su un reattore refrigerato da metallo liquido (piombo o eutettico piombo/bismuto), che circola per convezione. Il reattore può avere potenze che variano tra 50 e 1200 MWe, ed una temperatura del refrigerante in uscita dal nocciolo da 550°C a 800°C. E' rivolto principalmente, oltre che alla produzione di energia elettrica ed idrogeno, alla gestione "sostenibile" degli attinidi, con peculiari caratteristiche di resistenza alla proliferazione e di protezione fisica, grazie ad un nocciolo che può essere anche a lunghissima vita (fino a 30 anni).

Sodium-Cooled Fast Reactor System (SFR)

Utilizza neutroni "veloci" ed un ciclo del combustibile chiuso, così da ottenere una efficiente gestione degli attinidi e conversione in fissile dell'uranio fertile. E' previsto un ciclo del combustibile con riciclo completo degli attinidi, con due principali opzioni: un reattore di dimensioni intermedie (da 150 a 500 MWe), refrigerato da sodio liquido, con un combustibile a lega metallica composta da zirconio, uranio, plutonio ed attinidi minori, e connesso nello stesso sito con l'impianto per il ritrattamento pirometallurgico del combustibile; la seconda opzione è invece un reattore di dimensioni medio-grandi (da 500 a 1500 MWe), refrigerato da sodio liquido e con un combustibile a ossidi misti di uranio e plutonio, il quale viene trattato in soluzione acquosa in un grande impianto centralizzato che serve più reattori. In ambedue i casi la temperatura del refrigerante in uscita dal nocciolo è circa 550°C. Anche questo impianto è rivolto, oltre che alla produzione di energia elettrica, alla gestione "sostenibile" degli attinidi.

Liquid-Fuel System

Molten Salt Reactor System (MSR)

Adotta un flusso neutronico da "epitermico" a "termico" ed un ciclo del combustibile chiuso, idoneo ad un efficiente utilizzo del plutonio e degli attinidi minori. Il combustibile è una miscela liquida circolante di fluoruri di sodio, zirconio ed uranio. L'impianto di riferimento prevede una potenza di 1000 MWe. Il sistema opera a bassa pressione (circa 5 atmosfere) e la temperatura del refrigerante in uscita dal nocciolo supera i 700°C. Anche questo impianto è rivolto, oltre che alla produzione di energia elettrica, alla gestione "sostenibile" degli attinidi, per la quale offre la massima flessibilità (a fronte però di notevoli complicazioni e costi dei sottosistemi per la manutenzione del combustibile e del refrigerante).

LA VARIETÀ DELLE STRATEGIE ENERGETICHE

Negli Stati Uniti la "Generation IV Technology Roadmap" sopra descritta affianca e complementa una "Near-Term Deployment Roadmap", specificamente rivolta alla promozione dei sistemi nucleari di III generazione. Il relativo programma "Nuclear Power 2010" venne annunciato nel Febbraio

2002 del Segretario per l'Energia Abraham, ed è rivolto alla riduzione delle incertezze di carattere normativo, economico e tecnico connesse con l'ottenimento delle licenze e la costruzione di nuovi impianti nucleari (19).

Su questo scenario di III generazione, si innesta poi il *Generation IV Program*, con le seguenti priorità:

Priorità 1: *Sviluppare un impianto nucleare per ottenere a medio termine prodotti energetici economicamente competitivi (elettricità, idrogeno). Il sistema candidato è il già descritto VHTR del GIF, reattore a neutroni "termici" refrigerato a gas. La ricerca e sviluppo dovrebbe essere completata nel 2010 ed il prototipo a 15 anni da oggi. Anche lo SCWR del GIF viene preso in considerazione.*

Priorità 2: *Sviluppare un reattore veloce che permetta la massima resistenza alla proliferazione e la sostenibilità per il lungo termine. Tra i vari concetti del GIF, il Dipartimento dell'Energia USA è orientato al GFR refrigerato a gas. Il tempo per lo sviluppo di questo prototipo è previsto in 20-25 anni.*

Per quanto riguarda gli altri paesi, senz'altro l'opzione nucleare, ed in particolare la *"Generation IV Technology Roadmap"*, riveste un ruolo strategico per il futuro energetico dei paesi del Sud-Est Asiatico: basti pensare a quanti sono gli impianti nucleari in costruzione o programmati in quell'area (15 in Giappone, 10 in Corea del Sud, 9 in India, 9 nelle due Cine).

Il Giappone poi mostra di avere una coerenza di visione che si estende all'importantissimo settore dei trasporti. Il numero uno di Toyota, Fujio Cho, nel Gennaio 2001 a Detroit affermò: *"L'auto deve cambiare e diventare amica dell'ambiente, o non sopravviverà a questo secolo"*. E non solo la Toyota, ma anche la Honda proseguono con crescente impegno sulla strada delle auto "ibride", che al motore a combustione interna, piccolo ed efficiente, affiancano motori elettrici e batterie tampone: queste auto ormai circolano nel mondo a centinaia di migliaia, fornendo ai costruttori una inestimabile esperienza operativa. E' importante notare che il "complesso elettrico" di queste auto è sostanzialmente lo stesso che per l'auto a idrogeno, dove le celle a combustibile sostituiscono il motore a combustione interna. Le case giapponesi sono quindi all'avanguardia per la grande trasformazione verso l'auto ad idrogeno, di cui alcuni prototipi già circolano nell'area di Tokyo, ma anche a Los Angeles. Nel

momento in cui l'auto ad idrogeno diverrà competitiva, vi sarà una crescita rapidissima della domanda di idrogeno, la quale, a parte gli impianti dimostrativi a pannelli solari, realisticamente non potrà che essere soddisfatta da impianti come quelli descritti nella *"Generation IV Technology Roadmap"*.

L'Unione Europea, invece, anche nel settore energetico non sembra avere una strategia unitaria, convincente e lungimirante. Il Libro Verde sull'Energia della Commissione Europea (peraltro risalente come impostazione a prima della crisi petrolifera del 1999/2000), a fronte di un aumento del fabbisogno energetico globale del 40-50% tra il 2000 ed il 2020, riteneva di farvi fronte con il risparmio (anche ottenuto con l'imposizione fiscale), con le energie rinnovabili e con un forte aumento delle importazioni di gas naturale dall'Algeria e dalla Siberia; ciononostante, la dipendenza dal petrolio resterebbe come ora al 40% circa, salvo il fatto che il Libro Verde ipotizzava un prezzo del barile crescente nel periodo da 21 a 27 Euro, mentre negli ultimi anni tale prezzo ha già superato quei limiti.

Inoltre la Commissione Europea, pur promuovendo da un lato l'uso dell'idrogeno per i trasporti, dall'altro lato, anche sotto la spinta delle case automobilistiche europee che non hanno finora ritenuto di investire sull'auto ibrida, emette normative che tendono ancora a favorire il motore a combustione interna, in particolare il diesel. In questo modo però quelle stesse case automobilistiche rischiano di essere spiazzate dai competitori giapponesi nella grande transizione verso l'auto all'idrogeno.

In realtà, ogni paese europeo segue una sua strada. Come visto, la Finlandia ha appena ordinato la sua quinta centrale nucleare, di costruzione franco-tedesca e con una potenza di ben 1600 MWe. La Svezia (che a suo tempo con un referendum aveva stabilito di chiudere gradualmente in questi anni le sue 12 centrali nucleari) di fatto ha chiuso (anche se perfettamente funzionante) solo la centrale più vicina alla "verde" Danimarca. In cambio questa le fornisce altrettanta energia, ma, non disponendo né di centrali nucleari né di idroelettriche, genera questa energia in gran parte con centrali a carbone: è stato quindi facile per i servizi sanitari svedesi stimare il numero di tumori al polmone e di malattie asmatiche da polveri sottili che ogni anno si aggiungono a causa della chiusura di quella centrale nucleare.

In Germania la maggioranza rosso-verde, al governo da due legislature, ha approvato una legge per l'uscita graduale dal nucleare, concedendo però ad ogni centrale una vita utile equivalente a 32 anni a pieno regime. Nel frattempo i pianificatori studiano come sostituire i 20.000 MWe attualmente forniti dalle centrali nucleari, evitando l'uso di fonti fossili. La prima ipotesi è stata quella eolica, particolarmente conveniente sulle coste del Mare del Nord. Tuttavia, considerando aerogeneratori di almeno 1 MWe di potenza di picco, tenuto conto che per l'incostanza del vento anche sul Mare del Nord la potenza media si deve ritenere limitata a circa un terzo di quella di picco, per sopperire alle attuali centrali nucleari occorrerebbe costruire almeno 50.000 torri alte un centinaio di metri e con pale rotanti di decine di metri. Poiché nessun Land accetterebbe mai di ospitarle, si è considerata l'ipotesi di costruirle su lunghe isole artificiali realizzate sui bassi fondali del Mare del Nord: a questo punto si è levata l'opposizione degli ecologisti e degli animalisti... E' probabile che il problema verrà risolto da una diversa maggioranza al governo.

In Gran Bretagna, Spagna e Francia, anche se non si sono prese decisioni definitive, è prevedibile che alla fine della vita delle attuali centrali nucleari (in molti casi prolungabile rispetto a quanto originariamente previsto) si riprenderà a costruirne di nuove. Ciò vale in particolare per la Francia, che grazie anche alla sua determinata scelta nucleare è divenuta il bastione energetico dell'Europa: ad esempio, nella torrida estate del 2003 essa è dovuta andare in soccorso non solo dell'Italia, ma anche della Germania, quando un anticiclone stabile sul Mare del Nord aveva fermato le schiere di generatori eolici tedeschi.

Infine vi è l'Italia, di fatto priva di una strategia energetica convincente a lungo termine: essa si dichiara antinucleare, ma importa dai paesi vicini una quantità crescente di energia elettrica, in gran parte di origine nucleare; essa è entusiasta del Protocollo di Kyoto, ma rispetto al 1990 ha già aumentato notevolmente le sue emissioni di "gas serra", invece di diminuirle come dovrebbe fare ormai nel giro di pochissimi anni.

IL CASO DELL'ITALIA

L'Italia, tra i paesi privi di armi nucleari, dopo la seconda guerra mondiale fu probabilmente il più pronto e vivace a muoversi in direzione dell'energia nucleare. Negli anni 1950 e 1960 vennero costruiti diversi reattori di ricerca e tre piccole centrali nucleari, di tre tecnologie diversi (essendovi più competitori sul mercato dell'energia elettrica). Con la nazionalizzazione dell'energia elettrica, nonostante i piani energetici favorevoli al nucleare, l'avvio di nuove iniziative rallentò e si dovettero attendere gli anni 1980 per vedere l'entrata in funzione della centrale di Caorso, presso Piacenza, da 800 MWe. Intanto era stata avviata la costruzione della grande centrale di Montalto di Castro, a Nord di Roma, con due reattori da 1000 MWe ciascuno.

A questo punto avvenne l'incidente di Chernobyl, che, sotto l'azione dei mass media, generò una vasta psicosi antinucleare. Sull'onda di tale psicosi, alcune parti politiche promossero nel 1987 un referendum che, non potendo essere un sì o un no al nucleare (a causa degli impegni presi dall'Italia col Trattato di Roma), venne impostato su aspetti tecnico-economici relativi alla localizzazione degli impianti nucleari. L'esito fu ovviamente sfavorevole a facilitare la costruzione di tali impianti, e l'interpretazione estensiva datagli dai successivi governi portò al fermo delle centrali in operazione ed all'interruzione dei lavori per quelle in costruzione. Gli investimenti che così andarono perduti per il Paese, in costruzioni, impianti, organizzazioni, competenze specialistiche, sono stati stimati dell'ordine delle decine di migliaia di miliardi di Lire.

Di conseguenza, oggi l'Italia produce energia elettrica in gran parte da combustibili fossili importati, ed inoltre ne importa una frazione, che si avvicina al 20% e quasi tutta di origine nucleare, dai paesi vicini come Francia, Svizzera e Slovenia. In questo modo anche l'Italia alimenta la propria rete elettrica con quasi il 20% di energia nucleare, ponendosi nella media mondiale, ma questa energia la deve comprare nei tempi ed ai costi imposti dai venditori, ed inoltre ha perso tutta l'attività scientifica ed industriale ad essa correlata.

Gli Enti e le imprese coinvolte nella chiusura del nucleare seppero adeguatamente salvaguardarsi sotto l'aspetto economico, scaricando gli oneri sostenuti ed i danni emergenti sulle tariffe elettriche. Queste risultano in Italia le più alte d'Europa:

il doppio rispetto alla Francia, il triplo rispetto alla Svezia ed il 60% in più rispetto alla media europea. Si può stimare che l'uscita dal nucleare sia costata nell'ultimo quindicennio ad ogni famiglia italiana diversi milioni di Lire, e continuerà a costare per un futuro indefinito (anche perché l'Italia non potrà comunque evitare le difficoltà e gli oneri inerenti alla dismissione degli impianti nucleari ed alla sistemazione dei residui radioattivi: anzi, per molti aspetti la chiusura degli impianti nucleari complica tali problematiche). Ovviamente, tutte queste preoccupanti conseguenze non erano menzionate nella scheda referendaria del 1987...(20).

A rigore, il Parlamento italiano, a seguito dell'esito del referendum, con la mozione del 18 dicembre 1987 riconfermava l'impegno a sviluppare l'industria nucleare che l'Italia aveva assunto col Trattato di Roma, e si limitava a stabilire una moratoria di 5 anni per la costruzione di nuovi impianti nucleari. Inoltre, l'ultimo Piano Energetico Nazionale approvato (PEN '88) prevedeva *"lo sviluppo, nel quadro di un'ampia collaborazione internazionale, di soluzioni impiantistiche basate su largo impiego di sicurezze intrinseche o passive"*.

Queste prese di posizione, non smentite nel seguito ed anzi più volte riconfermate, anche nella recente riforma della legge istitutiva dell'ENEA, potevano essere considerate una precisa apertura a programmi internazionali di grande portata, come l'ampiamente descritta *"Generation IV Technology Roadmap"*. Invece l'Italia non fa parte del *"Generation IV International Forum"* (GIF): anche se potrebbe approfittare del fatto che il *"GIF charter"* prevede la procedura per l'ammissione di nuovi membri, il nostro Paese non avrebbe comunque partecipato alla fase fondamentale già svoltasi negli scorsi anni, la quale, tramite un'indagine a tutto campo delle soluzioni concepibili, è pervenuta a selezionare i sei progetti su cui distribuirsi il lavoro di ricerca e sviluppo. Anche per quanto riguarda la ricerca sui nuovi reattori e cicli a fissione, l'Italia appare quindi sempre più estraniata rispetto alle grandi tendenze in ambito mondiale. Resta da citare la linea di ricerca sugli *Accelerator Driven Systems* (ADS), condotta dall'ENEA in collaborazione con l'INFN ed altri enti di ricerca ed industrie: come discusso in precedenza, si tratta di una alternativa di grande interesse per la riduzione della radiotossicità a lungo termine dei residui

degli impianti nucleari, ma il suo eventuale impatto industriale ed economico, se vi sarà, non può che essere previsto a molti decenni nel futuro.

La nuova direzione ENEL si dichiara nuovamente interessata al nucleare, sia pure nei limiti dei mandati ricevuti dalla Amministrazione competente. In pratica, ciò significa che potrebbe partecipare, anche come comproprietario, alla costruzione (all'estero!) di nuovi impianti nucleari, ad esempio dello *European Pressurized Reactor* (EPR). Evidentemente, le competenze e le attività che l'ENEL potrebbe acquisire riguarderebbero essenzialmente la gestione degli impianti, più che la progettazione e la fabbricazione. Tuttavia, la partecipazione italiana agli investimenti per nuovi impianti nucleari potrebbe essere la premessa per portare aziende italiane a collaborare alla loro costruzione, così come avviene per le aziende finlandesi che saranno impegnate (al 40%) nella costruzione del nuovo EPR. Si noti che alcune aziende italiane hanno mantenuto pervicacemente una loro aggiornata competenza ed incisiva presenza sul mercato dell'impiantistica nucleare, sia nell'ambito di vecchie collaborazioni, come con la Romania, sia partecipando ai programmi di manutenzione e ricondizionamento di molti impianti da lungo tempo in funzione in altri paesi.

In una prospettiva più ampia, si può ritenere che la crescente debolezza dell'Italia nelle tecnologie energetiche, la sua crescente dipendenza dalle importazioni di fonti fossili (anche da paesi non privi di rischi politici), l'alto livello dei prezzi dell'energia e la loro volatilità rispetto ad ogni incidente internazionale, la mancanza di alternative realistiche per far fronte al "picco del petrolio" da molti previsto per questo secolo, costituiscano una delle cause principali del cosiddetto "rischio Italia" e del declino relativo del Paese, rispetto ad altri paesi di paragonabili dimensioni e potenzialità, nei settori dell'alta tecnologia, dell'industria innovativa e più in generale della competitività e del commercio internazionale.

CONCLUSIONI

L'"*homo sapiens*" è tale in quanto "animale" dotato di un particolare grado di curiosità e coraggio. Già l'Antica Grecia tuttavia aveva chiaro che alla conquista del fuoco da parte di Prometeo sarebbe seguita

l'apertura del vaso da parte di Pandora, e che quanto ne era uscito non avrebbe più potuto esservi rinchiuso. Frugando poi meglio nel vaso, Pandora vi avrebbe trovato la speranza.

La vicenda dell'energia nucleare ripete perfettamente quel paradigma: l'umanità è ormai costretta a gestire per un futuro indefinito gli esiti di quella scoperta. Ma allora appare del tutto ragionevole ed opportuno affrontare la sfida in modo da trarne i massimi vantaggi e da delimitarne al meglio i rischi.

(Un'altra vicenda analoga, ma con implicazioni probabilmente anche più ampie e profonde a livello sia dei singoli individui che del futuro dell'umanità, è quella che ha avuto inizio nel 1953 con la scoperta della doppia elica del DNA, e che prosegue con i successi della genomica, della proteomica e dell'ingegneria genetica: ancora una volta, allarmi e psicosi su questi temi si sono diffusi al massimo grado in Italia, paese che evidentemente si sta dimostrando impreparato ad affrontare le grandi sfide del futuro).

Ritornando allo scenario energetico delineato nel primo paragrafo di questo lavoro, deve infine essere tenuto ben presente che neanche un ampio sfruttamento dell'energia nucleare, come neppure delle energie rinnovabili, può realisticamente fare fronte all'effetto-serra: se questo esiste, infatti, esso è già "decollato" con un andamento che è correlato all'"integrale" dell'incremento di concentrazioni di "gas serra" avvenuto rispetto ai tempi pre-industriali. Questo incremento è già molto sensibile (per l'anidride carbonica, da circa 275 a circa 370 ppm: oltre il 30%), e provocherà un aumento della temperatura dell'atmosfera non solo finché venisse bloccato, ma finché non fosse del tutto eliminato con il ritorno alle concentrazioni preindustriali. A quel punto, resterebbe comunque da raffreddare l'atmosfera e soprattutto gli oceani (evento quest'ultimo molto più arduo e lento, dato il loro enorme contenuto entalpico) (23).

In realtà, le cose potrebbero andare molto peggio, in quanto non solo le concentrazioni, ma anche le emissioni (che determinano la "derivata" delle concentrazioni) continueranno a crescere alacremente: basta considerare cosa sta avvenendo in paesi in via di rapido sviluppo come Cina ed India (ciascuno dei quali "pesa" come popolazione

circa venti volte l'Italia), dove, a parte il volonteroso impegno nel nucleare, la quasi totalità delle nuove centrali elettriche è alimentata a carbone, e dove stanno per esplodere i trasporti privati su strada.

In una simile prospettiva, i paesi più evoluti dal punto di vista scientifico e tecnologico dovrebbero porre la massima priorità nello studio e nella sperimentazione di tutti i mezzi in grado di fronteggiare le conseguenze dell'effetto-serra. In realtà, diversi centri di studio hanno già preso in seria considerazione queste problematiche, che si possono ritenere oggetto di una nuova disciplina denominata "Geoengineering" (un capitolo della quale è la "Climate Engineering"). In proposito, si rimanda all'ultimo paragrafo di (6) ed a (21) e (22). In sostanza, si tratta di considerare il "globo terracqueo", costituente il Pianeta Terra, come un "ambiente" da "climatizzare" con le più evolute ed efficienti tecnologie dell'ingegneria termofluidodinamica (in fondo, il pianeta Terra può essere considerato come il veicolo spaziale su cui l'umanità si ritrova a viaggiare verso l'ignoto...).

In questo scenario, l'energia nucleare rappresenterà una delle risorse fondamentali a disposizione dei progettisti. Anche se ormai non farà più in tempo ad eliminare l'effetto-serra, essa sarà a breve utile per ridurre la portata, ed in seguito si rivelerà indispensabile per far fronte alle crescenti richieste di energia da parte dell'umanità. Le alternative non appaiono infatti realisticamente sostenibili come soluzioni risolutive: per le energie fossili più diffuse (petrolio, gas) vi è il problema della disponibilità futura a costi accettabili, per tutte (compreso il carbone), vi è la emissione dei prodotti di combustione; per le energie rinnovabili (sole, vento, biomasse), se dovessero essere utilizzate su larga scala, sorgerebbero difficoltà insuperabili per l'occupazione di immensi territori e l'impiego di enormi quantità di materiali (anche pregiati) e di energia per la realizzazione e la gestione delle infrastrutture e degli apparati collettori.

Un particolare ringraziamento, per una serie di preziose considerazioni ed informazioni, deve essere rivolto all'Ing. Paolo Fornaciari (E-mail paolo_fornaciari@libero.it).

RIFERIMENTI E NOTE

1. W. F. Ruddiman, "Orbital insolation, ice volume, and greenhouse gases" – *Quaternary Science Reviews* – Vol. 22, Issues 15-17, Pag. 1597-1629, Lug.-Aug. 2003. In questo articolo viene presentata una rivisitazione, alla luce della storia climatica ottenuta dai carotaggi delle calotte glaciali effettuati negli ultimi anni, della affidabilità di classici modelli climatologici come CLIMAP e SPECMAP: le loro prestazioni vengono ottimizzate introducendo, con opportune costanti di tempo, le forzanti costituite da sorgenti e pozzi "naturali" dei due più importanti gas-serra (anidride carbonica e metano). I modelli così ottimizzati vengono poi estrapolati agli ultimi 10.000 anni, e qui si constata che i soli effetti "naturali" avrebbero ad oggi già provocato, a partire da circa 8.000 anni fa, una sensibile riduzione dei gas-serra, ed un incremento misurabile del volume dei ghiacci: se ciò non è avvenuto, l'anomalia non può che essere dovuta a qualche forzante estranea al contesto "naturale", ad esempio all'azione, più o meno cosciente, dell'"*homo sapiens*", che da almeno 8.000 anni disbosca e incendia, e da almeno 5.000 anni coltiva, irriga ed alleva su larga scala. Alcune stime quantitative di Ruddiman sembrano convalidare queste tesi.
2. M. I. Hoffert *et al.*, *Nature* **395**, 881 (1998).
3. Q. Schiermeier, "Climate study highlights inadequacy of emissions cuts", *Nature* **426**, 486 (2003).
4. Q. Schiermeier, "Climate change: the long road from Kyoto", *Nature* **426**, 756 (2003).
5. B. Metz *et al.*, Eds., *Climate Change 2001: Mitigation* (Cambridge Univ. Press, New York, 2001), p.8.
6. Autori Vari, "Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet" – *Science* **298**, 981 - 1 Nov. 2002. Si tratta di uno scenario oggettivo e spietato, tutto basato su stime quantitative, delle non agevoli alternative che si offrono per il futuro energetico dell'umanità, e di quelle che potranno esserne le conseguenze sul clima. Lo scenario giunge anche a considerare alcuni interventi ingegneristici che potrebbe essere necessario attivare sulla macchina del clima, se, come è probabile, nessuno nei prossimi decenni riuscirà ad impedire il raddoppio, ed oltre, delle concentrazioni di gas-serra (si veda in proposito il penultimo paragrafo: "Geoengineering").
7. L. Turow, *USA Today*, 11 January 2001.
8. N. Nakicenovic, A. Gruebler, A. McDonald, *Global Energy Perspectives* (Cambridge Univ. Press, New York, 1998), p.52.
9. W. C. Sailor, D. Bodansky, C. Braun, S. Fetter, B. van der Zwaan, *Science* **288**, 1177 (2000).
10. G. T. T. Molitor, *Technological Forecasting & Social Change* **70** (2003) 473-487.
11. D. Malakoff, A. Cho, *Science* **302**, 1126 (2003).
12. Y. Adamov, *Nuclear Europe Worldscan* 11-12/1998.
13. M. Cometto, P. Wydler, R. Chawla, *Annals of Nuclear Energy* **31** (2004) 413-429.
14. Si veda la documentazione del U. S. National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP) e della U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
15. A. M. Kellerer, "Beyond Chernobyl: the new Russian studies in perspective", *Radiat. Environ. Biophys.*, (2002) 41:1-4.
16. "The U.S. Generation IV Implementation Strategy" prepared by the U.S. Department of Energy, September 2003.
17. K.S. Deffeyes, "Hubbert Peak: The Impending World Oil Shortage", *Princeton University Press*, September 20, 2001.
18. "National Hydrogen Energy Roadmap", page 9, November 2002, available at the Web site: <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national>.
19. "A Roadmap to Deploy New Nuclear Power Plants in the United States by 2010, Volume I, Summary Report", U.S. Department of Energy, available at the Web site: <http://nuclear.gov/nerac/ntdroadmapvolume1.pdf>.
20. Paul-Ambroise Valéry nel suo volume "Sguardi sul mondo attuale", 1931, scriveva: "La politica fu in primo luogo l'arte di impedire alla gente di immischiarsi in ciò che la riguarda. In un'epoca successiva si aggiunse l'arte di costringerla a decidere su ciò che non capisce".
21. S. H. Schneider, *Nature* **409**, 417 (2001).
22. D. W. Keith, *Nature* **409**, 420 (2001).
23. Per ragionare nei termini dei "controlli automatici", si può ritenere che la "funzione di trasferimento" tra la variabile "emissioni" e la variabile "temperatura dell'atmosfera" contenga almeno due "poli", con costanti di tempo anche molto lunghe: allora, anche se da oggi, magari grazie all'energia nucleare ed alle energie rinnovabili usate per **tutte** le applicazioni energetiche in **tutto** il mondo, cessassero **completamente** le emissioni antropiche di gas-serra, la temperatura atmosferica continuerebbe a crescere per decenni e forse per secoli, a causa delle attuali concentrazioni di gas-serra già notevolmente superiori a quelle pre-industriali, provocate dalle emissioni degli scorsi decenni.

AGOSTINO MATHIS

Dal 1958 al 1960 è stato impegnato nella costruzione e nell'operazione del reattore nucleare Ispra-1. Ha poi svolto attività di ricerca e progetto nel campo dei sistemi di controllo e sicurezza degli impianti nucleari.

È libero docente in "Controlli automatici" presso l'Università di Roma "La Sapienza", dove dal 1975 al 1985 è stato professore incaricato di "Controlli automatici II – Nucleari". Attualmente, è docente presso la "Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione" della medesima Università. Nell'ENEA ha progettato ed impostato il sistema informativo gestionale, ed in seguito è stato responsabile del progetto per lo sviluppo del calcolo e delle reti ad alte prestazioni.

È Consigliere Scientifico del Centro di Progettazione, Design & Tecnologie dei Materiali (CETMA – Brindisi), e fa parte come Esperto di diversi organi del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.

Contatti:

ENEA Casaccia
Tel 06-3048.1

Via Anguillarese 301
Email: mathis@enea.it

00060 S.Maria di Galeria (RM)