

CONSULTA LA SCHEDA DEL LIBRO

Aldo Brondi ~ Riccardo Levizzari
Giancarlo Ventura ~ Francesco Zarlenga



Dario Flaccovio Editore

Smaltimento dei rifiuti radioattivi

Problematiche e soluzioni geologico-ambientali



- Produzione energetica nucleare nel mondo, classificazione, norme e gestione ✓
- Deposito superficiale per lo stoccaggio di rifiuti a bassa e media attività ✓
- Deposito geologico per lo smaltimento di rifiuti ad alta attività e lunga vita ✓
- Comunicazione ambientale, il problema dell'informazione e del consenso ✓

Aldo Brondi Riccardo Levizzari
Giancarlo Ventura Francesco Zarlunga

SMALTIMENTO DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

PROBLEMATICHE E SOLUZIONI GEOLOGICO-AMBIENTALI



Dario Flaccovio Editore

Aldo Brondi - Riccardo Levizzari - Giancarlo Ventura - Francesco Zarlenga

SMALTIMENTO DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

ISBN 978-88-579-0102-2

© 2011 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2011

Smaltimento dei rifiuti radioattivi : problematiche e soluzioni geologico-ambientali / Aldo

Brondi ... [et. al.]. - Palermo : D. Flaccovio, 2011.

ISBN 978-88-579-0102-2

1. Rifiuti radioattivi – Eliminazione. I. Brondi, Aldo <1933->.

363.7289 CDD-22

SBN Pal0235479

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Officine Grafiche Riunite, Palermo, settembre 2011

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Presentazione	pag.	9
Prefazione	»	11
Introduzione	»	15
1. Produzione energetica nucleare e le riserve di uranio		
1.1. Introduzione ai problemi indotti dall'uso pacifico dell'energia nucleare	»	17
1.2. Organizzazioni internazionali per la promozione dell'uso pacifico dell'energia nucleare.....	»	17
1.3. Reattori nucleari nel contesto della produzione energetica	»	18
1.4. Contributo del nucleare alla produzione di energia elettrica	»	22
1.5. Uranio e combustibile nucleare	»	27
1.5.1. Produzione di energia elettrica dalle reazioni nucleari.....	»	27
1.5.2. Sfruttamento minerario per la produzione di uranio	»	28
1.5.3. Certezze e le incertezze sulle riserve mondiali di uranio	»	33
1.6. Ciclo del combustibile nucleare	»	36
2. Classificazione, norme e attività di prima gestione dei rifiuti radioattivi		
2.1. Rifiuti radioattivi.....	»	39
2.2. Classificazione dei rifiuti radioattivi.....	»	40
2.2.1. Elementi utili per la classificazione	»	40
2.2.2. Classificazione italiana	»	45
2.2.3. Classificazioni adottate in altri Paesi.....	»	47
2.3. Produzione mondiale	»	49
2.4. Analisi riassuntiva delle attività di caratterizzazione, trattamento e condizionamento dei rifiuti radioattivi	»	53
2.4.1. Trattamento dei rifiuti liquidi a bassa e media attività	»	55
2.4.2. Trattamento e il condizionamento dei rifiuti liquidi ad alta attività	»	55
2.4.3. Trattamento dei rifiuti aeriformi	»	56
2.4.4. Trattamento e condizionamento dei rifiuti solidi.....	»	56
2.5. Normativa per la gestione dei rifiuti radioattivi.....	»	57
2.5.1. Quadro internazionale ed europeo.....	»	57
2.5.2. Normativa italiana	»	61
3. Esperienze di smaltimento dei rifiuti radioattivi ed evoluzione nel contesto italiano		
3.1. Introduzione al problema dello smaltimento dei rifiuti radioattivi.....	»	65
3.2. Prime applicazioni del concetto di smaltimento e problemi attuali.....	»	67
3.3. Evoluzione del concetto di smaltimento e valutazioni sulla sicurezza dei depositi	»	68
3.4. Tipologie ed esempi di deposito per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa attività	»	70
3.4.1. Depositi superficiali.....	»	71
3.4.2. Depositi sotterranei.....	»	72
3.5. Depositi definitivi di rifiuti radioattivi realizzati o in corso di realizzazione nei Paesi membri della iaea	»	74
3.6. Iniziative per lo smaltimento dei rifiuti ad alta attività e/o a vita lunga	»	75
3.7. Iniziative delle istituzioni italiane per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività	»	76
4. Deposito superficiale per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività		
4.1. Criteri e modalità per la selezione dei siti di smaltimento	»	81
4.1.1. Criteri dettati dagli aspetti idrogeologici, di pericolosità sismo-tettonica e vulcanica	»	84
4.1.2. Pericolosità geologica, geotecnica e quadro meteo-climatico.....	»	87
4.1.3. Influenza delle attività antropiche	»	88

4.1.4.	Sistemi gis a supporto dell'attività di selezione dei siti	»	90
4.2.	Impatto dell'opera sull'ambiente	»	90
4.2.1.	Contesto idrogeologico, idrologico e acque di transizione	»	91
4.2.2.	Comparto atmosferico e suolo	»	95
4.2.3.	Componente antropica	»	96
4.2.4.	Fondo di radioattività naturale	»	97
4.3.	Contesto progettuale e realizzativo del deposito superficiale	»	98
4.3.1.	Criteri di base per la progettazione del deposito e suo ciclo di vita	»	98
4.3.2.	Struttura del deposito	»	101
4.3.3.	Concetto multi barriera e analisi di sicurezza	»	103
4.3.4.	Analoghi archeologici per l'efficacia delle barriere ingegneristiche	»	105
4.4.	Quadro internazionale dei depositi di rifiuti radioattivi a bassa e media attività	»	107
5. Deposito geologico per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita			
5.1.	Quadro esplicativo sullo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi più pericolosi	»	111
5.2.	Attuale sviluppo delle attività di siting in alcuni Paesi europei	»	113
5.3.	Proposte alternative allo smaltimento geologico	»	114
5.4.	Attività di studio condotte per lo smaltimento dei rifiuti ad alta attività	»	115
5.5.	Analoghi naturali come dimostrazione della capacità di barriera delle formazioni geologiche	»	117
5.5.1.	Introduzione agli analoghi naturali	»	117
5.5.2.	Basi teoriche e studio degli analoghi naturali nel mondo	»	119
5.5.2.1.	Migrazione e cattura di radionuclidi in mezzi geologici	»	121
5.5.2.2.	Migrazione dei prodotti di fissione e degli attinidi in ambiente naturale	»	122
5.5.3.	Analoghi naturali studiati in Italia	»	127
5.5.3.1.	Diminuzione del potere riducente e significato idrologico di faglie e fratture nelle argille	»	128
5.5.3.2.	Serie degli isotopi radioattivi per gli studi sulla mobilità nelle argille e le evidenze offerte dagli analoghi naturali	»	130
5.5.3.3.	Evidenza dell'impermeabilità di massa delle argille soggette a riscaldamento naturale	»	133
5.5.3.4.	Impermeabilità di massa dell'argilla rilevata dalla distribuzione dell'elio	»	136
5.5.3.5.	Osservazione in superficie sulla permeabilità secondaria delle argille	»	137
5.5.3.6.	Evidenze dell'impermeabilità di massa delle argille in corrispondenza di campi geotermici	»	137
5.6.	Evidenze sperimentali a scala reale della capacità di barriera dell'argilla: il caso Krasnoyarsk	»	139
5.7.	Le formazioni geologiche studiate per il confinamento delle scorie radioattive	»	141
5.7.1.	Formazioni granitiche	»	143
5.7.2.	Depositi salini	»	145
5.7.3.	Formazioni argillose	»	146
5.7.3.1.	Proprietà geochimiche delle argille	»	149
5.7.3.2.	Capacità di scambio	»	150
5.7.3.3.	Proprietà di superficie	»	150
5.7.3.4.	Interazioni acqua-argilla	»	151
5.7.3.5.	Potenziale di ossido-riduzione	»	151
5.7.3.6.	Mobilità dei radionuclidi di riferimento	»	153
5.8.	Gli studi condotti sulle argille italiane	»	154
5.8.1.	Argille italiane	»	156
5.8.2.	Assetto strutturale dei bacini sedimentari italiani	»	157
5.8.2.1.	Avanfossa padano-adriatica	»	158
5.8.2.2.	Margine ligure-tirrenico	»	159
5.8.3.	Caratteri mineralogici e geochimici delle argille italiane	»	160
5.9.	Principi generali in fase di progettazione e analisi sitologica	»	163
5.9.1.	Specifiche progettuali	»	164
5.9.2.	Requisiti e finalità di studio in un contesto geologico locale	»	166

5.9.2.1.	Idoneità geologica dei siti	»	166
5.9.2.2.	Caratterizzazione locale del sito	»	167
5.9.3.	Architettura generale del deposito	»	172
5.9.3.1.	Concetto multi barriera nel deposito geologico	»	174
5.9.3.2.	Barriera ingegneristica	»	175
5.9.3.3.	Barriera geologica	»	177
5.9.4.	Reversibilità del deposito	»	177
6. Problema dell'informazione e del consenso			
6.1.	Comunicazione ambientale.....	»	179
6.1.1.	Sindrome nimby	»	182
6.1.2.	Ricerche nel campo della comunicazione di altre problematiche ambientali sensibili	»	183
6.1.3.	Problema dell'informazione geologica.....	»	184
6.1.4.	Tentativo di comunicazione ambientale calibrato nelle scuole elementari	»	184
6.2.	Comunicazione relativa ai siti per lo stoccaggio di scorie radioattive	»	186
6.3.	Fattori di ritardo o di rinvio nella realizzazione dei depositi geologici di rifiuti radioattivi ad alta attività.....	»	187
6.3.1.	Idea di recuperabilità	»	188
6.3.2.	Idea di trasmutazione.....	»	188
6.3.3.	Distorsioni dell'inflazione modellistica in contrapposizione alla logica degli analoghi naturali	»	189
6.3.4.	Approfondimenti inutili e peso politico di una scelta	»	190
6.4.	Erronea percezione pubblica del problema	»	190
BIBLIOGRAFIA			» 193

Presentazione

Nel panorama editoriale italiano mancava un volume di sintesi, in grado di affrontare in modo scientifico il problema dello smaltimento dei rifiuti radioattivi. Per troppi anni le attività condotte dall'ENEA e da altre agenzie ed enti di ricerca sull'argomento sono rimaste circoscritte al contesto scientifico e accademico di riferimento. Non è pertanto un caso che gli autori dell'opera siano o siano stati dipendenti dell'ENEA, che per oltre quarant'anni ha sviluppato la ricerca nel campo energetico nucleare, al servizio del Paese.

La diffusione di conoscenze scientifiche corrette, rivolte a un pubblico più vasto, oltre a rappresentare un indubbio passo in avanti verso la popolarizzazione di un argomento così complesso, rappresenta anche un valido strumento di sintesi che descrive lo stato dell'arte sul problema. Ma la corretta comunicazione di questi argomenti costituisce anche la condizione fondamentale per costruire un clima di fattiva collaborazione e di condivisione delle scelte tra le autorità, il mondo scientifico e i cittadini su temi così complessi, che hanno un innegabile impatto sull'ambiente. Un clima che sicuramente potrebbe favorire il processo di risoluzione dell'annosa questione dei rifiuti radioattivi presenti sul nostro territorio. Tutte le informazioni raccolte nel volume derivano da anni di ricerca, sia in campo nazionale che internazionale; un patrimonio di conoscenze che, qualora non sintetizzato, correrebbe peraltro il rischio di essere disperso.

La pubblicazione del volume, soprattutto in un momento così delicato per lo sviluppo del nucleare, svolge un'altra funzione importante: sottrarre lo spazio che negli anni si è conquistata la disinformazione, su un argomento delicato come lo smaltimento dei rifiuti radioattivi.

Ing. Giovanni Lelli

COMMISSARIO DELL'ENEA

Prefazione

L'idea di dare alle stampe un volume dedicato allo smaltimento dei rifiuti radioattivi si è concretizzata in un momento confuso per il settore energetico nucleare, visto il recente evento che ha coinvolto la centrale atomica giapponese di Fukushima e le conseguenti dichiarazioni e azioni contraddittorie, attuate sia a livello internazionale che nazionale. Ma questo impegno è nato dalla consapevolezza che il problema dello smaltimento dei rifiuti radioattivi può essere scientificamente e ingegneristicamente risolto, senza recare danni alla salute delle popolazioni e all'ambiente.

In Italia, per molto tempo dopo il referendum sul nucleare del 1987, si è preferito non parlare, o parlare male, del problema dei rifiuti radioattivi custoditi presso gli impianti nucleari italiani. Spesso la collettività non dispone degli strumenti per valutare criticamente le opinioni che giungono attraverso i media, e viene trattata maggiormente, per ovvie ragioni, dalle posizioni più prudentiali e opposte all'uso pacifico della tecnologia nucleare.

Negli ultimi tre decenni questa ostinata disinformazione ha interessato gran parte del dibattito sul nucleare italiano, mentre in altri Paesi si è pensato di affrontare al meglio il problema, svolgendo attività avanzate di ricerca e sviluppo, accumulando esperienze che oggi costituiscono un bagaglio di risorse utili per proporre una soluzione costruttiva. Al contrario in Italia le competenze e le conoscenze di un'intera classe di scienziati sono state trascurate, quando non addirittura osteggiate, con l'unico risvolto di aver buttato all'aria anni di impegno serio e produttivo nel mondo della scienza; la cultura tecnica accumulata in questo ambito deriva dalla partecipazione entusiastica a un gran numero di iniziative di ricerca e sviluppo, i cui risultati figurano ancor oggi nella letteratura scientifica mondiale. Tra breve però, gli ultimissimi depositari di queste conoscenze non potranno più fornire un contributo a queste ricerche, per ovvi motivi anagrafici. Ne consegue che il vero pericolo rappresentato dai rifiuti radioattivi non risiede tanto nella loro esistenza, quanto nel venir meno della cultura necessaria per dare esito alla loro sistemazione definitiva.

La consapevolezza che il problema dello smaltimento di questi materiali è risolvibile, unitamente alla volontà di lasciare al grande pubblico, al di fuori del contesto scientifico di riferimento, una traccia delle conoscenze acquisite sull'argomento, ha determinato la scelta di affrontare un lavoro così impegnativo. Il testo riporta in sintesi quanto di più significativo si è fatto nel mondo in termini tecnici, normativi e comunicativi, per dare soluzione alle problematiche citate. Si è cercato di fornire un quadro ampio ed esaustivo delle soluzioni tecniche e

scientifiche allo smaltimento dei rifiuti radioattivi, partendo proprio da una breve disamina dell'attuale produzione di energia elettrica da fonte nucleare. L'analisi obiettiva dei recenti dati sullo stato dello sfruttamento del nucleare nel mondo, nonché della sua evoluzione nei tempi recenti, fornisce un elemento di riflessione e giudizio per chi voglia seriamente documentarsi su questo tema, esprimendo poi una scelta seria e motivata. L'impiego dell'energia nucleare così come lo smaltimento dei relativi rifiuti sono ampiamente inquadrati in un contesto normativo e regolamentare internazionale, che offre una piattaforma cui si ispirano i principali Paesi nella redazione dei relativi regolamenti nazionali. Proprio la concretezza di questo quadro regolamentare, la sua condivisione e accettabilità a livello internazionale rendono lo sfruttamento pacifico dell'energia nucleare uno dei settori di sviluppo più controllati al mondo.

Oggi lo smaltimento dei rifiuti radioattivi è riferibile a due ambiti tecnici differenti, determinati dalle loro caratteristiche: rifiuti a bassa e ad alta attività. Per i primi viene presentata la soluzione dei depositi superficiali, ormai accettata e perseguita nei principali Paesi dotati di un programma energetico nucleare. Per quanto riguarda invece i rifiuti ad alta attività e/o a lunga vita, si fa invece riferimento al loro smaltimento geologico, con un'ampia illustrazione delle ricerche condotte in numerose nazioni. È ormai provato in ambito scientifico che certe formazioni geologiche, in associazione con particolari strutture ingegneristiche, offrono le condizioni ideali per l'isolamento dei rifiuti dalla biosfera, per periodi di tempo dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni. Un ordine di grandezza temporale che si scontra con la normale esperienza umana ed è per questo di difficile comprensione per i non addetti ai lavori, ma che costituisce un periodo comunque ridotto, se confrontato con la scala dei tempi geologici che governa l'evoluzione del pianeta.

Ampio spazio è stato riservato alla problematica specifica della situazione italiana, illustrando anche il ruolo svolto dall'Italia nel contesto internazionale e le possibilità offerte dal territorio italiano per una soluzione locale del problema. Questo nonostante la condivisa – ma falsa – ipotesi, espressa da più parti, che la mancanza di un deposito geologico in esercizio nel mondo dimostri l'impossibilità di smaltire in modo sicuro i rifiuti radioattivi ad alta attività; argomento inconsistente, visto che solo oggi cominciano a essere maturi i tempi per la realizzazione dei depositi definitivi dei primi rifiuti nucleari ad alta attività e lunga vita derivanti dall'elettroproduzione, dopo il periodo di stoccaggio temporaneo di alcuni decenni, per consentire il decadimento dell'elevata radioattività e temperatura iniziali e garantirne una più agevole gestione. Nel frattempo sono maturati anche i tempi, in ambito scientifico e tecnico, per ricorrere allo smaltimento geologico, mediante la sistemazione in particolari formazioni rocciose profonde, capaci di confinamento e isolamento a lungo termine. Oggi si stanno attuando

le ultime considerazioni circa la realizzazione di depositi geologici definitivi in tre Paesi europei: la Francia nelle argille, la Germania nelle formazioni saline, la Finlandia nei graniti. Le argille sono risultate, soprattutto in Italia, la formazione barriera principe, in virtù della loro permeabilità estremamente bassa; ma anche grazie alla loro capacità di cattura nei confronti degli inquinanti, inclusi quelli radioattivi, fondamento per la sicurezza nel lungo termine dei depositi di rifiuti. Le argille possono quindi costituire un contenitore geologico diretto di questi materiali, rendendo ridondante qualsiasi altra barriera.

Infine si è cercato di fornire al lettore un quadro sommario delle problematiche relative alla comunicazione ambientale, disciplina da cui dipende la comprensione dello specifico problema, attuando paragoni con altri contesti ambientali in cui è necessario esprimere al pubblico, in modo chiaro ed esaustivo, quali siano i caratteri di un problema e le sue eventuali soluzioni. Viene anche evidenziato come in Italia, ma non solo, manchi una cultura di base scientifica per una gran parte della popolazione. Sono però evidenziati anche dei casi esemplari internazionali di fattiva collaborazione, tra la cittadinanza e le autorità, nella scelta di un'area per l'ubicazione di un sito per lo smaltimento di rifiuti radioattivi.

Nella stesura di questo libro un ringraziamento va a tutti i colleghi e gli amici che in qualche modo hanno fornito suggerimenti ed elementi critici su cui discutere; argomenti che hanno offerto motivi di riflessione, sprono e aiuto per gli autori. Un ringraziamento anche a tutti i tecnici e a tutte le persone che nel tempo hanno lavorato per la diffusione dell'uso pacifico dell'energia nucleare, nel pieno rispetto dell'ambiente e della salute delle persone, e a tutti coloro che con i fatti e con le parole hanno aiutato la diffusione delle verità tecniche e scientifiche alla base di questa tecnologia.

Roma, maggio 2011

INTRODUZIONE

Lo sfruttamento pacifico dell'energia nucleare rappresenta oggi uno dei principali strumenti con cui i Paesi cercano di soddisfare la sempre crescente domanda di energia. I cambiamenti climatici in atto, dovuti in gran parte alle ingenti quantità di anidride carbonica immessa in atmosfera, impongono scelte drastiche per il futuro energetico del pianeta. Sulla base delle risultanze di recenti ricerche e in un ambito di semplice ragionevolezza, si possono individuare quattro sistemi che nei prossimi decenni potrebbero plausibilmente ridurre la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera: aumento dell'efficienza energetica, aumento dell'impiego di fonti rinnovabili, utilizzo di combustibili a bassa emissione di CO₂ o il suo sequestro a lungo termine, potenziamento dell'utilizzo dell'energia nucleare. Le quattro opzioni possono essere considerate sinergiche nel raggiungimento dell'obiettivo di ridurre il riscaldamento globale in atto; ma a oggi il nucleare rappresenta l'opzione che può fornire il maggior contributo in questo senso e sarebbe controproducente abbandonare questa soluzione, così come sarebbe deleterio non contribuire allo sviluppo delle tre restanti opzioni.

In Italia da alcuni anni si parla di rilanciare la produzione energetica da fonte nucleare. Le attuali ipotesi di ripresa sarebbero formalmente legittimate, in quanto non in contraddizione con gli esiti del referendum del 1987, orientato a una moratoria e non alla rinuncia definitiva dell'uso di questa fonte di energia. Nei fatti, l'opposizione latente a qualsiasi programma di questo tipo e il recente evento incidentale avvenuto in Giappone non permettono di prevedere i tempi e la riuscita del programma. Risulta però evidente che il problema dello smaltimento dei rifiuti radioattivi in Italia non può essere ulteriormente procrastinato e che la sua soluzione è indipendente dal riavvio di un programma nucleare. Per tale ragione il mondo accademico, industriale e della ricerca in Italia sta cercando nuovamente di creare competenze nel settore, sebbene faticosamente e per certi versi senza un coordinamento efficace.

La chiusura di un programma nucleare si realizza nella realtà con lo smantellamento degli impianti produttivi e di tutti quelli afferenti al cosiddetto ciclo del combustibile, con la conseguente sistemazione definitiva dei rifiuti prodotti e ac-

cumulati nei periodi di esercizio e di smantellamento; quest'ultima è una condizione necessaria per evitare che si tramandino alle generazioni future tali problemi ambientali. L'esperienza italiana ha dimostrato in modo incontrovertibile che questi problemi tendono a essere accantonati, sia dall'*establishment* politico sia dai cittadini, per mancanza di una stringente coerenza da parte degli oppositori, ormai pienamente appagati dalla cessazione del programma nucleare, ma anche per una fiera opposizione da parte di una larga parte dell'opinione pubblica disinformata. D'altra parte però, anche a livello politico e istituzionale, il problema dello smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi è di importanza critica per ciò che riguarda il consenso. Ciò è ancora più vero quando si tratta di popolazioni in cui è diffusa l'idea che persino la realizzazione di infrastrutture ordinarie possa portare a deturpazioni ambientali. Questo fa sì che tale problema venga spesso accantonato della classe politica, e lasciato in eredità a generazioni successive ma mai risolto.

Il quadro non è stato certamente agevolato dalle inspiegabili incertezze tecniche, nonché dai contrasti fra le amministrazioni di vario livello e da una mancanza di cultura diffusa nel settore, che purtroppo ha caratterizzato anche alcuni ambiti accademici.

Nell'accezione comune i rifiuti radioattivi sono etichettati con l'inquietante termine di *scorie*, mentre i depositi con l'epiteto di *pattumiera nucleare*; al contrario essi possono rappresentare, come dimostrato per i depositi superficiali di rifiuti a bassa attività già esistenti, strutture di alta tecnologia, in cui sviluppare ulteriori programmi di ricerca e sviluppo anche in campo ambientale. In alcuni contesti, come quello francese, questi parchi tecnologici sono diventati meta turistica, in cui anche i non addetti ai lavori possono toccare con mano la gestione in tutta sicurezza dei rifiuti radioattivi e le innovazioni tecnologiche applicate. I termini che sono spesso utilizzati per qualificare questi materiali nucleari, nonché la disinformazione, suscitano nei cittadini un notevole senso di inquietudine, pienamente giustificata dal punto di vista emotivo, ma dovuta quasi esclusivamente a una grave mancanza di vera informazione sull'argomento. Problema che ovviamente non interessa solo l'Italia, ma anche altri Paesi in cui sono stati sviluppati programmi per lo sfruttamento pacifico dell'energia nucleare.

1. PRODUZIONE ENERGETICA NUCLEARE E LE RISERVE DI URANIO

1.1. Introduzione ai problemi indotti dall'uso pacifico dell'energia nucleare

Per comprendere l'annosa questione dello smaltimento dei rifiuti radioattivi è opportuno disporre di un quadro informativo generale sull'attuale impiego del nucleare nella produzione energetica, dalla cui attività derivano gran parte dei rifiuti da custodire e smaltire. Oggi le applicazioni civili dell'energia nucleare sono una realtà importante in diversi Paesi, come testimoniano i dati ufficiali periodicamente pubblicati dai principali organismi internazionali. Molte nazioni stanno perseguendo o hanno già rilanciato l'opzione nucleare nella produzione di energia elettrica, per soddisfare le pressanti necessità di sviluppo economico e contemporaneamente per ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera. Il Comitato Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC) dell'ONU ha sottolineato più volte l'importanza di ridurre entro il 2050 i gas serra presenti in atmosfera, fino a concentrazioni inferiori di almeno il 50% rispetto a quelle dei primi anni 2000, per contenere il surriscaldamento globale del pianeta tra i 2 e i 2,4 °C. Un'informazione esaustiva sull'argomento non può prescindere da una breve disamina sulle riserve di uranio per la produzione del combustibile; cioè un argomento di cui troppo spesso si abusa per effettuare previsioni, a volte intenzionalmente scorrette, sul potenziale sviluppo di questa fonte energetica.

1.2. Organizzazioni internazionali per la promozione dell'uso pacifico dell'energia nucleare

I dati raccolti e pubblicati dalle diverse organizzazioni nazionali e internazionali che monitorano il settore energetico nucleare possono fornire la base per una sua corretta comprensione. OECD/NEA, IAEA, EURATOM e altri organismi di rilevanza nazionale e internazionale operano, tra le altre cose, per promuovere l'uso pacifico dell'energia nucleare secondo precise politiche di sicurezza, seguendone gli sviluppi diretti o indiretti in ogni Paese del mondo, con particolare attenzione alla non proliferazione per fini militari.

L'OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) raggruppa 32 Paesi democratici che operano comunemente per affrontare le sfide sociali, economiche e ambientali, presenti e future, nel quadro della globalizzazione. Nell'ambito dell'OECD è presente da più di cinquant'anni la Nuclear Energy Agency (NEA), che raggruppa 28 dei 34 Paesi membri della stessa organizzazione e che opera per l'utilizzo pacifico dell'energia nucleare, promuovendo politiche per il suo sfruttamento in condizioni di sicurezza e assistendo i diversi Paesi per il mantenimento e lo sviluppo delle relative attività tecnico scientifiche.

Nel 1957, nell'ambito delle Nazioni Unite, è nata la International Atomic Energy Agency (IAEA), l'organizzazione più importante a livello mondiale per la cooperazione nel campo dello sfruttamento pacifico dell'energia nucleare, mediante lo sviluppo delle relative tecnologie secondo criteri di sicurezza e rispetto dell'ambiente.

In ambito più strettamente europeo è invece attiva la European Atomic Energy Community (EURATOM), creata originariamente per coordinare le attività promosse dagli stati membri dell'allora Comunità Economica Europea, nel quadro dello sviluppo pacifico dell'energia nucleare.

1.3. Reattori nucleari nel contesto della produzione energetica

Grazie alle attività di studio condotte da queste ed altre organizzazioni e ai dati forniti dai singoli stati membri o dalle aziende che operano nel settore, è possibile desumere un quadro riassuntivo sulla produzione di energia elettrica da fonte nucleare e su altri aspetti che ne hanno caratterizzato lo sviluppo negli ultimi decenni.

Ad aprile 2011 erano attivi nel mondo 443 reattori nucleari per produzione energetica, distribuiti in 29 diversi Paesi, per una potenza netta installata di 375.374 GWe (fonte: IAEA, Power Reactor Information System, PRIS database). Da questo numero si escludono quelli dedicati alle attività di ricerca e quelli non operativi per attività di manutenzione a lungo termine o definitivamente disattivati. L'ultimo reattore entrato in funzione è quello della centrale pakistana di Chasnupp, connesso alla rete elettrica il 14 marzo 2011.

Sui 443 reattori attivi, 31 hanno meno di dieci anni di operatività e 174 hanno almeno trent'anni di attività alle spalle. L'età media dei reattori ad oggi operativi è di circa 27 anni.

Dal grafico di figura 1.1 è possibile individuare due periodi di espansione nella realizzazione di impianti nucleari per la produzione energetica, rispettivamente a cavallo degli anni Settanta e Ottanta del Novecento.

L'andamento si è poi stabilizzato a partire dagli anni Novanta, anche se la quan-

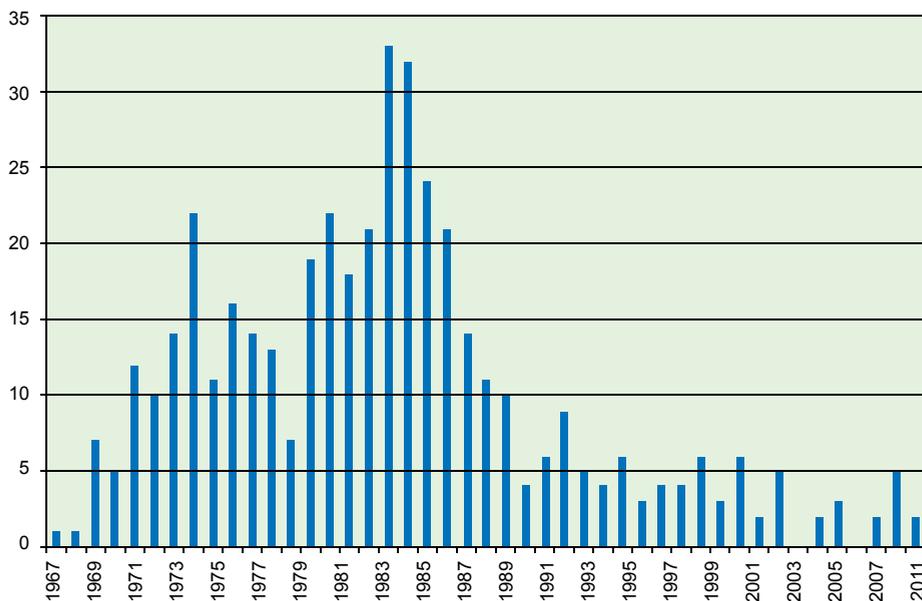


Figura 1.1

Numero di reattori nucleari di potenza entrati in funzione ogni anno dal 1967 a oggi (fonte: IAEA)

tità di energia elettrica prodotta mediante il nucleare è continuata ad aumentare, vista la maggiore potenza dei singoli reattori installati e le efficienze raggiunte presso le centrali.

Gli USA detengono il maggior numero di reattori attualmente operativi (104), seguiti dalla Francia (58) e dal Giappone (54). Nonostante l'elevato numero di reattori, attualmente gli USA producono circa il 20% della loro energia elettrica mediante l'impiego del nucleare, nettamente inferiore ad esempio a quanto prodotto dalla Francia, che si attesta sul 74% del totale, ma comunque una frazione consistente se confrontata con la percentuale prodotta dalla Cina, pari al 2%. Nel continente europeo diciassette nazioni ricorrono alla produzione energetica nucleare. Di queste, solo tre non appartengono all'Unione Europea: Svizzera, Ucraina e Russia.

Un'ulteriore informazione utile alla comprensione delle prospettive del nucleare come fonte energetica consiste nell'analisi dei nuovi reattori attualmente in corso di realizzazione e progettazione.

Oltre ai 443 operativi ad aprile 2011, altri 64 reattori nucleari sono attualmente in costruzione, per una potenza nominale complessiva di 62.562 MWe; da sottolineare che, in base a quanto stabilito dalla IAEA, un reattore è in costruzione se sono almeno iniziate le opere civili per la sua realizzazione o per l'edificazione della

Paesi	Totale della produzione energetica nazionale (GWhe)	Produzione energetica da fonte nucleare (GWhe)	% da nucleare sul totale	Reattori operativi	Potenza complessiva installata (MW _e)	Reattori in costruzione	Potenza complessiva prevista (MW _e)
Argentina	113.267,6	6.691,6	5,9	2	935	1	692
Armenia	5.946,0	2.344,0	39,4	1	375	-	-
Belgio	89.377,0	45.728,5	51,2	7	5.926	-	-
Brasile	474.860,0	14.543,8	3,1	2	1.884	1	1.245
Bulgaria	46.023,0	15.249,0	33,1	2	1.906	2	1.906
Canada	565.519,8	85.219,8	15,1	18	12.569	-	-
Cina	4.228.015,0	76.816,7	1,8	13	10.058	27	27.230
Corea del sud	440.874,0	141.894,3	32,2	21	18.698	5	5.560
Finlandia	76.964,0	21.884,0	28,4	4	2.716	1	1.600
Francia	550.300,0	407.900,0	74,1	58	63.130	1	1.600
Germania	488.000,0	133.012,1	27,3	17	20.490	-	-
Giappone	955.848,9	279.229,5	29,2	54	46.821	2	2.650
Iran	-	-	-	-	-	1	915
India	718.973,5	20.480,6	2,8	20	4.391	5	3.564
Messico	155.892,1	5.595,8	3,6	2	1.300	-	-
Olanda	111.025,0	3.754,9	3,4	1	482	-	-
Pakistan	98.564,5	2.560,3	2,6	3	725	-	-
Regno Unito	350.700,0	62.859,6	17,9	19	10.137	-	-
Repubblica Ceca	75.990,0	25.664,9	33,8	6	3.678	-	-
Repubblica Slovacca	26.122,0	13.533,7	51,8	4	1.816	2	782
Romania	52.476,8	10.819,9	20,6	2	1.300	-	-
Russia	907.400,0	155.107,6	17,1	32	22.693	11	9.153
Slovenia	14.424,3	5.380,7	37,3	1	666	-	-
Spagna	294.918,0	59.256,0	20,1	8	7.514	-	-
Sud Africa	249.254,6	12.899,9	5,2	2	1.800	-	-
Svezia	144.500,0	55.100,0	38,1	10	9.298	-	-
Svizzera	66.300,0	25.200,0	38,0	5	3.263	-	-
Taiwan (Cina)	-	-	-	6	4.982	2	2.600
Ucraina	174.200,0	83.800,0	48,1	15	13.107	2	1.900
Ungheria	35.164,0	14.802,5	42,1	4	1.889	-	-
USA	4.120.028,0	806.968,0	19,6	104	100.747	1	1.165

Tabella 1.1. Quadro riassuntivo della produzione di energia elettrica da fonte nucleare in alcuni Paesi del mondo; dati aggiornati ad aprile 2011 (fonte: IAEA)

centrale che dovrà ospitarlo. Di questi, 14 sono i progetti avviati nel solo 2010: 9 in Cina, 2 in Russia e i rimanenti in Brasile, India e Giappone; nessuno nell'Unione Europea e negli USA. In particolare nell'Unione Europea sono attualmente in corso di realizzazione due nuovi reattori: nel 2005 è stata avviata la costruzione di un reattore da 1600 MWe in Finlandia, presso l'impianto di Olkiluoto, mentre la costruzione di un reattore simile al precedente è stata avviata nel 2007 presso l'impianto di Flamanville, nel nord della Francia; entrambi sono di terza generazione.

A tal riguardo è opportuna una piccola disamina; i reattori di prima generazione sono quelli concepiti e realizzati per varie finalità prima degli anni '70 del Novecento, con una potenza generalmente inferiore a 300 MWe; in Italia le centrali di Latina, Trino Vercellese e Garigliano, in fase di smantellamento, disponevano di reattori classificabili in questa categoria. La seconda generazione comprende reattori realizzati tra gli anni Settanta e Ottanta dello scorso secolo, generalmente ad acqua leggera, alcuni ancora pienamente operativi; in Italia la centrale nucleare di Caorso, in fase di smantellamento, rientra in questa categoria. I reattori di terza generazione, come *EPR* di Framatome-KWU/Siemens, *AP1000* di Westinghouse e *ABWR* di Toshiba-Hitachi, hanno potenze più elevate rispetto alle generazioni precedenti (in genere più di 1000 MWe) e maggiori sistemi di sicurezza. Con la quarta generazione verranno prodotti reattori altamente sicuri (vista la passività di numerosi sistemi di protezione), economici, in grado di ottimizzare il consumo del combustibile e ridurre la produzione di rifiuti, soprattutto di quelli a lunga vita; offriranno anche un ottimo margine di sicurezza contro attacchi terroristici e contro il rischio di proliferazione.

La loro entrata in funzione è prevista non prima del 2030. Presso il sito di Flamanville, se verranno rispettate le tempistiche di progetto, verrà dunque installato il primo reattore di terza generazione al mondo, la cui realizzazione ha visto anche la partecipazione dell'ENEL.

La Cina detiene il primato per il maggiore investimento nel nucleare civile, con 27 nuovi reattori attualmente in corso di realizzazione, per una potenza netta prevista di circa 27.230 MWe e 13 già operativi, seguita dalla Russia, con 11 nuovi reattori per una potenza totale di 9.153 MWe, dalla Corea del Sud e dall'India. Quest'ultima sta realizzando 5 nuovi reattori per una potenza totale di 3.564 MWe e dispone già di 20 reattori operativi.

Le nuove centrali saranno dotate in massima parte di reattori di tipo *PWR* (*Pressurized Water Reactor*), che caratterizzano 54 dei 64 progetti in corso di realizzazione. Questa tipologia di reattori è anche quella attualmente impiegata in gran parte delle centrali nucleari di tutto il mondo.

Tipologia di reattore	Unità in corso di realizzazione	Potenza complessiva prevista (MWe)	Unità operative	Potenza complessiva installata (MWe)
PWR	54	53.171	270	248.723
BWR	4	5.250	92	83.881
PHWR	3	1.952	47	23.042
FBR	2	1.274	1	560
LWGR	1	915	15	10.219
GCR	-	-	18	8.949
Totale	64	62.562	443	375.374

Tabella 1.2. Tipologia e numero di reattori nucleari di potenza, operativi o in corso di realizzazione; dati aggiornati ad aprile 2011 (fonte: IAEA). PWR: *Pressurized Water Reactor*; BWR: *Boiling Water Reactor*; PHWR: *Pressurized Heavy Water Reactor*; FBR: *Fast Breeder Reactor*; LWGR: *Light Water cooled Graphite moderated Reactor*; GCR: *Gas Cooled Reactor*

Gli impianti nucleari ormai a fine vita sono gradualmente disattivati e posti in quiescenza, in attesa delle attività di smantellamento; a fine 2009 erano 122 le centrali in corso di *decommissioning* nel mondo e 14 quelle già completamente smantellate. Attualmente in Italia vi sono 4 impianti nucleari di potenza in corso di *decommissioning*: Caorso, Garigliano, Latina e Trino Vercellese. Da queste cifre esulano gli impianti sperimentali e di ricerca, o altri impianti non di potenza ma comunque afferenti al ciclo del combustibile, quali gli impianti di arricchimento e ritrattamento.

1.4. Contributo del nucleare alla produzione di energia elettrica

La produzione totale di energia elettrica da fonte nucleare ha seguito uno sviluppo che è il risultato di diversi fattori concomitanti. Si possono effettuare due tipi di considerazioni su questo tema. La prima di ordine assoluto, che considera l'entità della produzione e ne segue gli sviluppi temporali; la seconda riferita invece al confronto con altre fonti energetiche e con la produzione totale netta.

La produzione di energia elettrica da fonte nucleare fino alla metà degli anni Ottanta del Novecento ha registrato un trend in continuo e marcato aumento per poi subire un rallentamento nei successivi anni Novanta e stabilizzarsi nei primi anni del nuovo secolo (figura 1.2). L'attenuazione della crescita è stata consistente, fino a interrompersi e parzialmente a invertirsi. Le analisi condotte dalla IEA (International Energy Agency) indicano per il 2009 una produzione di energia elettrica netta da fonte nucleare pari a 2.558 TWh, inferiore ai 2.731 TWh dell'anno precedente, prodotta per più dell'80% da Paesi membri dell'OECD; i dati provvisori per il 2010 indicano una stabilizzazione nella produzione, che dovrebbe aggirarsi sui 2.560 TWh, quindi circa il 14% del totale prodotto.

I dati di dettaglio per il 2008 indicano che l'energia elettrica da fonte nucleare è

Produzione energetica nucleare e le riserve di uranio ■ cap. 1

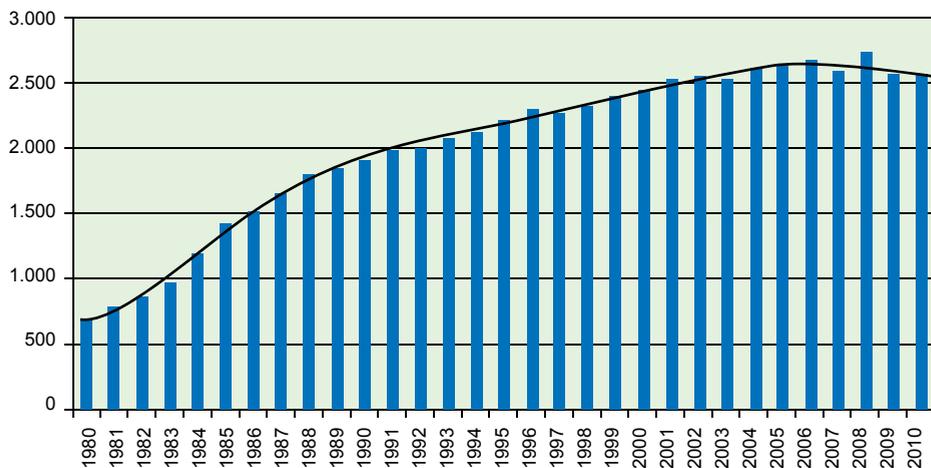


Figura 1.2
Produzione netta mondiale di energia elettrica (TWh) da fonte nucleare negli ultimi tre decenni
(fonte: EIA, U.S. Energy Information Administration)

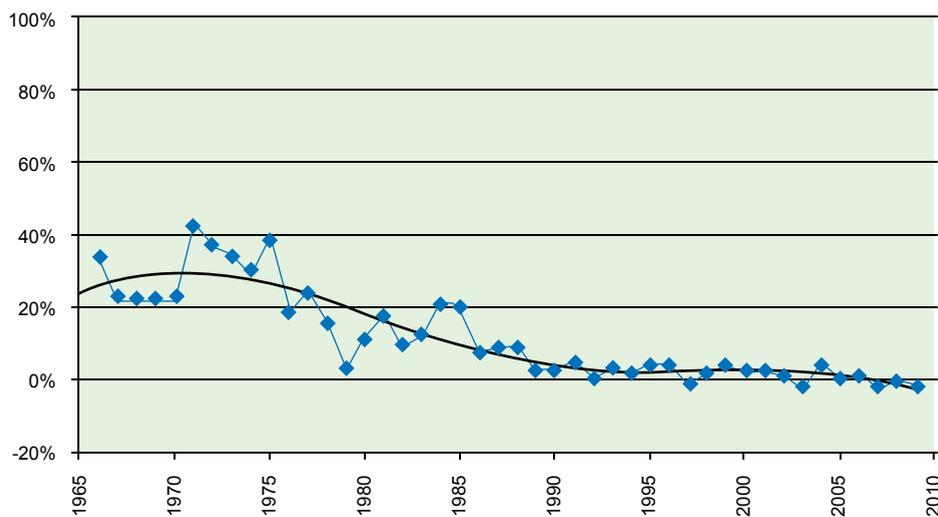


Figura 1.3
Variazioni percentuali annuali della produzione di energia elettrica da nucleare per il periodo 1965-2010 (fonte: BP)

stata prodotta per il 30,7% dagli USA (838 TWh), per il 16,1% dalla Francia (439 TWh) e per il 9,4% dal Giappone (258 TWh). Negli anni Settanta del Novecento, il nucleare incideva per il poco più del 3,3% sui 6.116 TWh del totale mondiale

(dato riferito al 1973), mentre nel 2008 questa percentuale è salita fino al 13,5% sui 20.181 TWh totali prodotti (IEA, 2009). Un ulteriore dettaglio di questa evoluzione si desume dal grafico di figura 1.2, dove sono riportati i valori della produzione energetica netta da fonte nucleare per gli ultimi tre decenni.

Le variazioni nell'andamento produttivo possono essere anche illustrate considerando i differenziali di produzione annuale, cioè la differenza tra la produzione corrente e quella dell'anno precedente, espressa in percentuale; in questo modo è possibile capire l'entità del tasso di crescita annuale. Si può apprezzare (figura 1.3) che l'andamento costantemente positivo, a partire dagli anni Sessanta del Novecento, è tipico di un settore energetico ancora in pieno sviluppo, con tassi di incremento compresi tra il 20% e il 40%. Questo trend, già in parziale diminuzione, ha subito una brusca variazione nella prima metà degli anni ottanta, con un tasso di crescita che si è attestato su un valore prossimo allo zero per poi assumere valori negativi dal 2007 al 2009 compresi. È opportuno evidenziare, nel grafico di figura 1.3, che solo i valori al di sotto dello zero indicano una diminuzione nella produzione di energia elettrica da fonte nucleare rispetto all'anno precedente; tutti i valori al di sopra dello zero indicano pur sempre un aumento annuale della produzione, anche se limitato in alcuni casi.

Un'ulteriore considerazione può essere fatta per la produzione di energia elettrica netta da fonte nucleare nelle diverse aree geografiche del pianeta. Fino alla prima metà degli anni Ottanta l'aumento nella produzione è stato approssimativamente simile per le diverse regioni, sebbene più pronunciato in Europa; la successiva

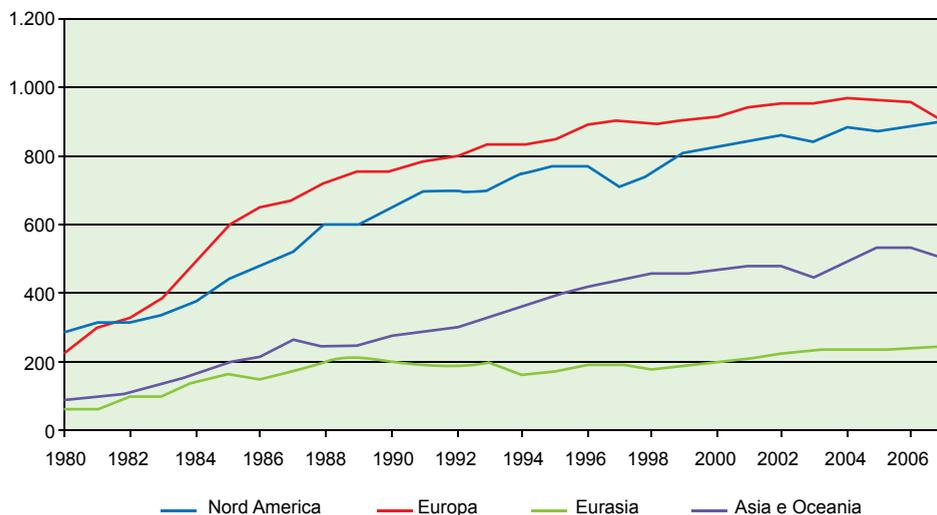


Figura 1.4
Andamento della produzione di energia elettrica da nucleare (TWh) per il periodo 1980-2007
in diverse regioni del mondo (fonte: IEA)

diminuzione è stata meno pronunciata in Nord America e regioni asiatico-occeane (figura 1.4). Nell'ultimo ventennio le regioni euroasiatiche hanno invece subito un aumento di intensità inferiore rispetto alle restanti aree geografiche.

Le fonti rinnovabili e il nucleare possono essere due fonti complementari nella produzione di energia elettrica in un Paese, nonostante spesso vengano erroneamente messe in competizione. I dati riportati nella tabella 1.3, il cui dettaglio è limitato al 2008, derivano dalle elaborazioni condotte dalla IEA per gli ultimi trent'anni circa; più che i dati assoluti della produzione energetica, che si possono in parte discostare da quelli già riportati e afferenti ad altre agenzie internazionali, è opportuno esaminare le variazioni percentuali della produzione da diverse fonti rispetto al totale.

Anno	Totale	Nucleare	Rinnovabili	Termoeletr.	% Nucleare	% Rinnovabili	% Termoeletr.
1980	8.017,4	684,4	1.753,7	5.589,1	8,5	21,9	69,7
1981	8.072,8	778,6	1.753,7	5.589,1	9,2	21,7	69,2
1982	8.254,9	866,4	1.832,8	5.563,6	10,5	22,2	67,4
1983	8.593,1	981,7	1.918,1	5.703,0	11,4	22,3	66,4
1984	9.084,0	1.196,9	1.985,4	5.913,0	13,2	21,9	65,1
1985	9.460,2	1.425,5	2.006,5	6.040,9	15,1	21,2	63,9
1986	9.656,4	1.517,7	2.051,4	6.101,3	15,7	21,2	63,2
1987	10.096,1	1.654,0	2.061,5	6.396,2	16,4	20,4	63,4
1988	10.528,9	1.794,8	2.140,7	6.609,7	17,0	20,3	62,8
1989	11.057,9	1.843,4	2.177,2	7.051,7	16,7	19,7	63,8
1990	11.294,6	1.908,8	2.269,5	7.136,3	16,9	20,1	63,2
1991	11.531,7	1.996,1	2.316,5	7.238,2	17,3	20,1	62,8
1992	11.615,5	2.015,6	2.336,5	7.281,3	17,4	20,1	62,7
1993	11.888,0	2.081,6	2.466,9	7.359,4	17,5	20,8	61,9
1994	12.164,6	2.125,2	2.498,0	7.560,9	17,5	20,5	62,2
1995	12.598,2	2.210,0	2.622,3	7.787,5	17,5	20,8	61,8
1996	12.981,9	2.291,5	2.665,6	8.048,0	17,7	20,5	62,0
1997	13.310,4	2.271,3	2.738,2	8.326,8	17,1	20,6	62,6
1998	13.663,7	2.316,0	2.755,5	8.617,1	17,0	20,2	63,1
1999	14.002,8	2.393,1	2.811,3	8.824,7	17,1	20,1	63,0
2000	14.565,8	2.449,9	2.859,4	9.283,6	16,8	19,6	63,7
2001	14.849,9	2.516,7	2.817,6	9.544,8	16,9	19,0	64,3
2002	15.357,0	2.545,3	2.885,1	9.958,3	16,6	18,8	64,8
2003	15.884,3	2.517,8	2.919,3	10.476,6	15,9	18,4	66,0
2004	16.651,0	2.617,3	3.121,8	10.940,4	15,7	18,7	65,7
2005	17.343,9	2.639,2	3.271,3	11.460,7	15,2	18,9	66,1
2006	18.020,8	2.659,8	3.416,4	11.970,6	14,8	19,0	66,4
2007	18.794,8	2.597,7	3.465,6	12.759,0	13,8	18,4	67,9
2008	19.103,2	2.731,0	3.654,1	12.871,5	13,6	19,1	67,4

Tabella 1.3. Produzione netta di energia elettrica mondiale da diverse fonti per il periodo 1980-2008 in TWh (fonte: EIA e OECD/NEA)

SMALTIMENTO DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

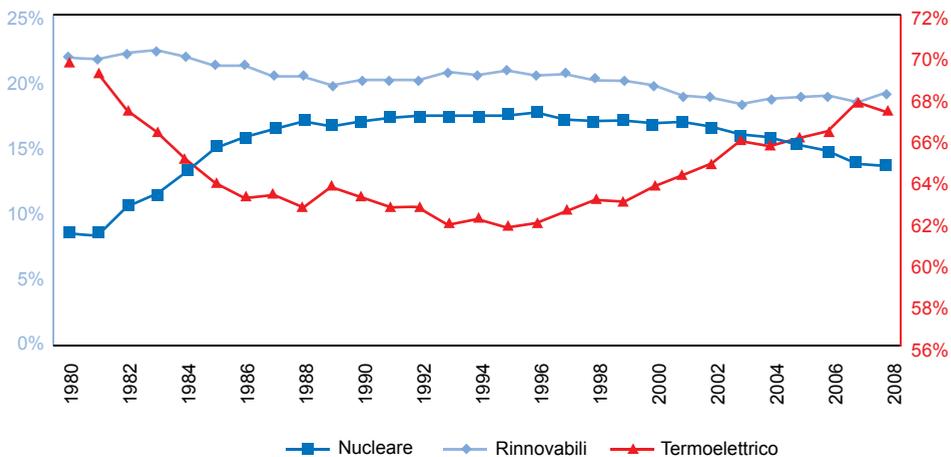


Figura 1.5

Variazione delle percentuali di energia elettrica prodotta nel mondo da fonte termoelettrica (in rosso, asse destro per il lettore) da fonti rinnovabili e nucleare (in azzurro e blu, asse sinistro per il lettore) nel periodo 1980-2008 (fonte: EIA)

Risulta abbastanza evidente per il nucleare un trend crescente per tutti gli anni Ottanta, che si attesta sommariamente al di sopra del 15% fino ai primi anni Duemila, cui è seguita un'inversione di tendenza (figura 1.5). Al contrario la componente di energetica elettrica netta prodotta da fonti rinnovabili, rispetto al totale, è costantemente diminuita fino alla fine degli anni Novanta, per poi stabilizzarsi e invertire leggermente il suo trend nell'ultimo decennio.

In Italia la produzione di energia elettrica, nel 2010 pari a circa 298 TWh, è affidata a un mix di fonti, in cui domina il termoelettrico (73,8%), cui seguono l'idroelettrico (18,1%) e le altre fonti rinnovabili (8,1%); è stata scorporata la produzione idroelettrica dalle altre fonti rinnovabili, per evidenziarne la notevole incidenza sulla produzione totale in Italia. Secondo le analisi dell'agenzia EIA, l'Italia è tra i maggiori importatori netti di energia elettrica; ad esempio nel 2009 la quantità netta importata dalle frontiere è stata pari a quasi 45 TWh, per più del 54% importata dalla Svizzera, per il 24,5% dalla Francia e per la restante quota parte da Slovenia, Austria e Grecia.

L'importazione è necessaria per colmare il divario tra la produzione e la richiesta energetica. È opportuno anche evidenziare la dipendenza italiana non solo dall'importazione di energia elettrica, ma anche dall'importazione dei combustibili con cui il Paese produce parte del proprio fabbisogno energetico; in particolare la dipendenza dal gas naturale e dal petrolio, che rappresentano rispettivamente il 66% e il 16% del totale, cui si affianca il carbone con il 18%. In generale si stima che per il 78% del proprio fabbisogno elettrico, l'Italia dipenda dall'estero (ENEL e EDF, 2009).

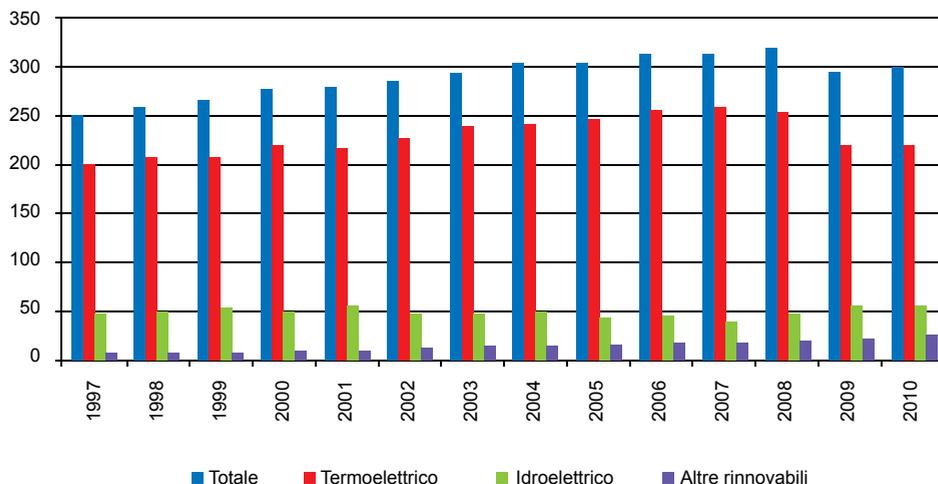


Figura 1.6

Produzione lorda di energia elettrica (TWh) da diverse fonti per il periodo 1997-2009 in Italia, escludendo l'energia elettrica importata dai fornitori esteri (fonte: Autorità per l'energia elettrica e per il gas)

1.5. Uranio e combustibile nucleare

1.5.1. Produzione di energia elettrica dalle reazioni nucleari

La produzione di energia nucleare avviene mediante due tipi di reazione: la fissione e la fusione nucleare. Nella prima, nuclei di atomi pesanti come l'uranio, colpiti da particelle, quali neutroni o protoni, si scindono emettendo grandi quantità di energia. Nella seconda invece si verifica la fusione di due nuclei di atomi leggeri, ad esempio idrogeno, con relativa emissione di energia. In entrambi i casi la quantità di energia emessa è enorme per unità di massa impiegata. Attualmente i reattori nucleari sfruttano la prima reazione, cioè la fissione nucleare, mentre è ancora in fase di ricerca la realizzazione di reattori a fusione nucleare, per i quali non si può ancora stimare la tempistica di realizzazione, comunque pluridecennale. Per poter dare seguito a una fissione nucleare è necessaria una certa quantità di materiale fissile; l'uranio, nei suoi isotopi ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , è presente in natura in quantità apprezzabili e quindi si presta come materiale adatto allo scopo. L'energia emessa sotto forma di calore nelle reazioni di fissione, che si propagano a catena, in presenza di acqua produce vapore, con il quale, mediante specifiche turbine, l'energia viene convertita in energia elettrica.

Per il funzionamento dei 443 reattori oggi operativi, con una potenza installata di circa 375.374 MWe, sono necessarie circa 70 mila tonnellate annue di uranio, pari a più di 81 mila tonnellate di U_3O_8 , che per quasi l'80% deriva dall'estrazione mineraria. La percentuale restante proviene dal ritrattamento del combu-

stibile esaurito, dallo smantellamento dell'arsenale militare atomico americano e dell'ex URSS, dall'utilizzo di riserve strategiche e da processi di ri-arricchimento dell'uranio impoverito. Lo smantellamento degli arsenali nucleari USA e dell'ex blocco sovietico, in seguito ai vari trattati congiunti sul disarmo, ha generato un quantitativo di materiale fissile che può essere impiegato nel nucleare civile, in particolare uranio altamente arricchito e ^{239}Pu (per il combustibile a ossidi misti di uranio e plutonio, definito MOX). A metà 2009 erano state prodotte in questo modo circa 367 tonnellate di uranio altamente arricchito (HEU), trasformato poi in circa 10.600 tonnellate di uranio da utilizzare nel combustibile nucleare.

1.5.2. Sfruttamento minerario per la produzione di uranio

L'uranio è l'elemento naturale con numero atomico pari a 92; è presente nella crosta terrestre con una concentrazione media di circa 2,5 ppm (parti per milione), decisamente superiore a quella di altri metalli quali oro, argento e platino, inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quella di rame, nichel e zinco, ma comparabile con quella di afnio, utilizzato in elettronica e come costituente delle barre di controllo dei reattori, e molibdeno, impiegato nella produzione di acciai e nell'industria nucleare. Elevate concentrazioni medie di uranio si trovano nei graniti (~ 4 ppm), mentre concentrazioni inferiori si trovano nei depositi sedimentari (~ 2 ppm). Il 99% dell'uranio oggi presente nella crosta terrestre è costituito dall'isotopo ^{238}U , meno del 1% dall'isotopo fissile ^{235}U e in quantità quasi trascurabili dall'isotopo ^{234}U . La sua concentrazione, in particolari contesti geologici, è tale da renderne lo sfruttamento un'opzione economicamente accettabile. In teoria l'uranio, come altri elementi, può essere estratto da qualunque matrice ambientale, compresa l'acqua di mare, anche se al momento il processo non è economicamente e tecnicamente vantaggioso. Per quanto riguarda la sua estrazione dall'acqua di mare, dove la concentrazione media è di circa 3 ppb, le ricerche e i tentativi di realizzare un processo efficace sono iniziati già negli anni Sessanta dello scorso secolo, anche in Italia a cura dei ricercatori dell'allora CNEN (Dall'Aglio e Casentini, 1970), ma fino a ora non si è ottenuta una ricaduta economicamente ed efficacemente applicabile in campo industriale.

Le riserve minerarie di uranio nel mondo sono suddivise in funzione di vari parametri; la classificazione più utilizzata riguarda la certezza del quantitativo di minerale estraibile da un giacimento, da cui derivano i nomi identificativi dati a ciascuna categoria.

Le riserve certe, anche conosciute con l'acronimo RAR (*Reasonably Assured Resources*), rappresentano quelle risorse rinvenute nei giacimenti uraniferi di cui si conosce la dimensione, il grado e la configurazione; da questi depositi è quindi

possibile estrarre una quantità di minerale che è stimata con un buon grado di precisione, mediante indagini dirette, prelievo di campioni, ecc., impiegando le tecnologie oggi disponibili. Le riserve stimata, anche conosciute come EAR I (*Estimated Additional Resources I*), costituiscono la quantità di risorse uranifere che, sulla base della conoscenza geologica di un deposito o delle attinenze con altri contesti geologici o con altri giacimenti adiacenti o contigui, può essere estratta, con buona probabilità, utilizzando le tecnologie attuali. La somma delle riserve RAR e EAR I costituisce le cosiddette *riserve conosciute (Identified Resources)*. A queste due si associano le riserve incerte (*Prognosticated Resources*) o EAR II, non ancora comprovate da indagini dirette, ma solo ipotizzate in taluni contesti geologici conosciuti, e le riserve speculative (*Speculative Resources*), cioè le risorse che si ritiene possano esistere ed essere sfruttabili sulla base di estrapolazioni e della conoscenza dei contesti geologici in cui il minerale può essere rinvenuto.

L'esplorazione per la ricerca dei giacimenti di uranio avviene mediante la combinazione di diverse tecniche di studio, quali le immagini satellitari, la geofisica, la geochemica e la radiometria. I giacimenti di uranio si trovano in diversi contesti geologici, di cui almeno 14 sono quelli oggi sfruttati, dove l'uranio si presenta normalmente in forma di ossido (U_3O_8), ma non solo. Ad esempio negli USA alcuni importanti giacimenti sono associati ai depositi di fosforiti, rocce sedimentarie con concentrazioni dell'elemento che oscillano mediamente tra i 70 e i 200 ppm, ma che possono arrivare anche a 800 ppm; in questo caso l'uranio è un co-prodotto della lavorazione dei minerali fosforitici. Il processo di lavorazione delle fosforiti per la produzione di concimi e per la contestuale separazione dell'uranio dalla roccia madre avviene mediante l'impiego di acido solforico in quello che viene definito il *Wet Process Phosphoric Acid* o WPPA (Bock e Valint, 1982). Il sistema è diventato anti-economico a partire dai primi anni Novanta del Novecento, per poi tornare sulla scena negli anni Duemila con l'aumento dei prezzi di mercato dell'uranio stesso.

Lo sfruttamento di un deposito è ovviamente funzione del contesto geologico, dei prezzi di mercato dell'elemento e di altri fattori; in particolare la tabella 1.4 illustra la classificazione dei giacimenti in funzione della concentrazione del minerale, il cosiddetto *grado del giacimento*, da cui dipende l'economicità dello sfruttamento e quindi la decisione di perseguirne l'estrazione.

Grado	Concentrazione uranio
Molto alto (VHG)	20% (200.000 ppm)
Alto (HG)	2% (20.000 ppm)
Basso (LG)	0,1% (1.000 ppm)
Molto basso (VLG)	0,01% (100 ppm)

Tabella 1.4. Grado dei giacimenti di uranio e relative concentrazioni dell'elemento