

LE CENTRALI ELETTRONUCLEARI NEL REGNO UNITO NEI LORO ASPETTI GEOGRAFICO-ECONOMICI

1. *Magnox, la prima generazione di reattori.* — L'esperienza britannica nel campo dell'utilizzazione a scopo pacifico dell'energia atomica è di grande interesse, non solo per essere stata la prima in ordine cronologico, ma perché difficilmente altrove chi chiede informazioni può ottenerle con altrettanta facilità (vorrei dire, naturalezza) (1).

Fu nei primi anni '50 che il Regno Unito, a causa dei crescenti costi del carbone locale sempre meno competitivo con il petrolio del Medio Oriente, si trovò di fronte alla prospettiva, assolutamente nuova, di diventare in breve termine uno Stato prevalentemente importatore di energia. Ed il futuro, basato su un sempre crescente uso degli idrocarburi, si presentava via via più sfavorevole. La soluzione ipotizzata dal governo fu assolutamente innovatrice: investire forti capitali nella ricerca relativa all'uso pacifico dell'energia atomica, in modo da guadagnare in questo campo un primato nel mondo. In tal modo, nel futuro l'esportazione del cosiddetto « know how » (la competenza specifica) avrebbe permesso di coprire largamente le importazioni di materia prima. La scelta era infatti rischiosa proprio perché nel campo dei minerali radioattivi il Regno Unito era ancora meno fornito che in quello degli idrocarburi.

(1) Durante una mia permanenza in Gran Bretagna mi sono recato presso la centrale elettronucleare gallese di Trawsfynydd (in funzione) e quella di Hartlepool nello Yorkshire (in costruzione avanzata). In entrambi i casi mi sono presentato, senza preavviso, agli uffici di direzione dove, in breve tempo, hanno incaricato un tecnico di accompagnarmi a visitare tutti gli impianti. Nessuna difficoltà è stata mossa per il fatto di aver con me un figlio di otto anni. Questo risponde ad una politica mirante a dimostrare a tutti la non pericolosità di queste installazioni.

Ma la tecnologia aveva ormai ottenuto quasi la resa massima dai combustibili tradizionali, senza più possibilità di miglioramenti sostanziali, mentre nel campo dell'energia atomica si era praticamente a zero; infatti, Stati Uniti ed Unione Sovietica si interessavano dell'utilizzazione dell'energia atomica quasi esclusivamente per fini bellici. Per dare un'idea di quali fossero le relazioni internazionali del momento, si tenga presente che il Regno Unito, pur aderendo alle alleanze militari facenti capo agli Stati Uniti, non poteva ottenere da questi neanche gli allora indispensabili elio ed acqua pesante, considerati materiali strategici. Tutto questo imponeva di trovare nuovi sistemi per utilizzare l'energia sprigionata dalla fissione nucleare (2).

Nel 1953 entrarono in funzione a Calder Hall (Cumberland) due reattori sperimentali (3) i cui risultati furono notevolmente soddisfacenti, tanto che nel febbraio 1955 il governo pubblicava

(2) La reazione utilizzata è quella per la quale un atomo di uranio a peso atomico 235 e fissile (capace cioè di scindersi anche spontaneamente) collidendo con un neutrone «lento» (circa 3000 km orari) si scinde in atomi più leggeri (prodotti di fissione) liberando una notevole quantità di energia (radiazioni, calore) e proiettando due o tre neutroni a velocità prossima alla metà di quella della luce, e detti «veloci». I neutroni veloci hanno tendenza a collidere con l'uranio a peso atomico 238, non fissile, formando plutonio, elemento radioattivo non esistente in natura. Se si riesce a rallentare i neutroni veloci, facendoli collidere con l' ^{235}U si instaura una reazione a catena, che si mantiene da sola, finché l' ^{235}U è presente in quantità superiore ad un minimo, detto massa critica. Nell'uranio naturale l'isotopo fissile è presente in ragione (mediamente) di 7 atomi ogni 1000 (0,7%). Tutti i valori in queste reazioni sono medie, e la reazione di fissione si schematizza come segue: da sei fissioni si liberano (oltre all'energia) sedici neutroni; sei di questi (opportunamente rallentati) provocano altre sei fissioni, mantenendo la catena di reazioni; altri cinque neutroni collidono, formando plutonio, con l' ^{239}U (che viene infatti detto «fertile»); gli altri cinque neutroni sfuggono.

(3) Gli elementi fondamentali di un reattore nucleare sono tre: a) il combustibile, nel quale avviene la fissione che genera calore (e che in realtà con la combustione non ha nulla a che vedere); b) il «moderatore», che ha la funzione di moderare la velocità dei neutroni; c) un circuito nel quale un fluido, detto «scambiatore di calore», trasporta il calore da utilizzare fuori dal reattore. Naturalmente tutto va avvolto in uno schermo che arresti i neutroni che sfuggono (v. nota 2). I primi reattori inglesi avevano vari *handicap* riguardo alle centrali tradizionali. Il maggiore inconveniente tecnico constava nel fatto che, per trasferire il calore dal reattore all'acqua da vaporizzare per azionare le turbine, si doveva adoperare un gas e non un liquido, che avrebbe permesso rese termiche più elevate. Il gas scelto come scambiatore di calore fu l'anidride carbonica, il meno caro e più disponibile, aria esclusa. Un secondo inconveniente derivava dal fatto che il migliore ciclo termico avviene quando lo scambiatore ha temperature dell'ordine di 500-550°, mentre nei primi reattori la temperatura della CO_2 non giungeva a 400°, ed il vapor d'acqua entrava nelle turbine a 315°.

un Libro Bianco (*A programme for nuclear Power, Cmnd 9389*) esponendo per la prima volta nel mondo un piano nazionale per l'utilizzazione pacifica dell'energia atomica. Si sarebbe costruito un certo numero di centrali, ben sapendo che l'energia sarebbe stata prodotta a costi superiori a quelli ottenibili con il carbone o gli idrocarburi, ma contando di accumulare sufficiente esperienza per realizzare in seguito una seconda generazione di centrali, nelle quali i costi sarebbero risultati competitivi con quelli delle centrali tradizionali.

Non disponendo di impianti di produzione di acqua pesante e non essendo gli Stati Uniti disposti a cederne, si dovette adottare un altro moderatore, e venne scelta la grafite, che, pur se poco collaudata, era facilmente reperibile a prezzi non elevati. Il combustibile constava di barre di uranio metallico naturale, avvolte in un contenitore di lega di magnesio, detta « Magnox ». Il nome di questa lega metallica è entrato in uso per definire i reattori del primo programma elettronucleare, che più tecnicamente vengono chiamati reattori a gas-grafite (essendo lo scambiatore allo stato gassoso).

E' importante rilevare che nell'uranio naturale l'isotopo fissile è presente solo nella misura di 7 atomi ogni 1000, cioè che meno dell'1% del combustibile introdotto nei reattori « Magnox » viene effettivamente utilizzato. Con tutto ciò, e nonostante la bassa resa del ciclo termico, da 1 t di uranio si ricava la stessa elettricità che da oltre 15.000 t di carbone. Ciò è di estrema importanza geografica, dato che si può immediatamente comprendere come nella localizzazione delle centrali elettronucleari si è solo minimamente influenzati (economicamente parlando) dall'ubicazione del combustibile: in pratica, la voce « trasporto » non entra nei calcoli economici (4).

Alla fine del 1956 si ebbe la prima chiusura del Canale di Suez, ed il libro bianco inglese dell'anno precedente venne modificato, nel senso di preventivare un ancor maggiore impegno nel settore atomico, triplicando gli obiettivi fissati precedentemente:

(4) Nella letteratura geografica italiana lo ha segnalato per primo A. MORI, *Geografia dell'energia nucleare*, in « Boll. Soc. Geogr. Ital. », Roma, 1959, pp. 265-292.

installare per il 1965 non più 2000 MWe (5) atomici, ma addirittura 6000. Si trattava di un traguardo non realistico, indubbiamente dettato dall'emozione per gli avvenimenti del Canale, che avevano coinvolto anche militarmente il Regno Unito. Il realismo si fece in breve nuovamente strada, e le linee definitive del primo programma elettronucleare vennero infine fissate nel 1960, programmando l'installazione di 5000 MWe atomici per il 1969.

Nel frattempo il prezzo del petrolio aveva dimostrato di esser strettamente dipendente da fattori politici poco controllabili e si cominciava a profilare una strategicità degli idrocarburi analoga a quella dei minerali radioattivi.

La potenza dei reattori, 50 MWe a Calder Hall e Chapel Cross, venne costantemente aumentata nelle varie centrali costruite per la produzione. A Berkeley se ne installarono due da 138 MWe ciascuno, a Bradwell due da 150 MWe; nell'ultima centrale « Magnox » entrata in funzione, a Wylfa (isola di Anglesey), sono installati due reattori da 590 MWe.

Il progresso tecnico ha permesso continui aggiornamenti e miglioramenti in questa serie di reattori, ma ha anche influenzato i costi dell'intero programma: ogni centrale ha, infatti, numerose innovazioni rispetto alle precedenti, il che ha comportato nuovi finanziamenti. D'altro canto, i progressi hanno consentito non solo una sempre maggiore sicurezza, ma anche insperati e sostanziali risparmi nelle spese di esercizio. Ad es., nelle due ultime centrali della serie, Oldbury e Wylfa, i reattori erogano una potenza doppia rispetto a quelli di Berkeley, adoperando solo un 30% di combustibile in più (6).

(5) L'unità di potenza è il Watt, abbreviato in W; negli usi pratici si adopera il chilowatt, abbreviato in kW, equivalente a 1000 W. Nelle centrali odierne l'unità è il milione di W, o megawatt, abbreviato in MW. La sigla MWe indica i MW elettrici, dato che la potenza di una centrale non viene necessariamente trasformata totalmente in elettricità, ed alcuni MW possono venir utilizzati come energia termica.

(6) Tra i vari miglioramenti si segnalano i più sostanziali. Ad Oldbury, l'anidride carbonica giunge alle turbine a temperatura di circa 100° superiore che a Berkeley, e di conseguenza la resa termica è salita dal 22 al 30%. Con Oldbury si è adottata la tecnica di avvolgere il reattore in uno schermo di cemento precompresso tale da rendere poco plausibile ogni timore di incidente, riducendo il bisogno di acciaio per le schermature. Questo è un fattore positivo, anche perché nei primi anni di funzionamento si erano verificati fenomeni di ossidazione in alcune parti metalliche, fenomeni che naturalmente si accrescevano aumentando le temperature di esercizio. Per trasferire a Wylfa le cognizioni man mano acquisite, la sua inaugurazione (che com-

La distribuzione di queste centrali sul territorio nazionale mostra alcune peculiarità rispetto a quella delle centrali a combustibile tradizionale. Nel Regno Unito le centrali alimentate a carbone sono ubicate, naturalmente, sui giacimenti, ma anche quelle ad idrocarburi sono nettamente influenzate dalla disponibilità del combustibile. Dato che questo è praticamente assente nell'isola, dove giunge via mare, le raffinerie sono quasi esclusivamente costiere, ed attirano pertanto sulle coste anche le centrali. Nelle centrali elettronucleari, che funzionano con piccole quantità di combustibile, e non hanno problemi di costo per il trasporto di questo, altri sono, quindi, i fattori che orientano la localizzazione.

La non dipendenza dal combustibile permette che tali centrali siano localizzate secondo il mercato, nelle aree dove si manifesta una richiesta di energia. Nell'ambito delle zone prescelte, però, la scelta della località è soggetta a talune limitazioni, alcune delle quali peculiari di questa forma di energia. La principale tra queste limitazioni deriva dal fatto che l'umanità non ha ancora totalmente assorbito, dopo trent'anni, la scossa riportata dai primi traumatici contatti con essa, a Hiroshima ed a Nagasaky. Si può, quindi, agevolmente immaginare quale sia stata l'avversione manifestata, quindici o venti anni fa, dall'opinione pubblica britannica. Il libro bianco del 1955 si rendeva interprete di questo sentimento, stabilendo di non edificare centrali di questo tipo in aree già molto abitate. Tutte vennero infatti progettate ad almeno 5 miglia da centri con più di 10.000 abitanti e ad almeno 10 miglia da centri con più di 100.000 abitanti (7).

pletava il programma «Magnar» venne ritardata di tre anni. Il primo reattore doveva esser allacciato alla rete a fine 1968, il secondo tre mesi dopo; tutto slittò, invece, al maggio 1972. Per timore di fenomeni di corrosione, per un lungo periodo i reattori hanno funzionato a 500 MWe (anziché a 590), mantenendo lo scambiatore a temperatura di 360° (anziché a 405°). Dal 1973, però, Wylfa funziona a piena potenza, ed è tuttora la maggiore centrale elettronucleare del mondo. Il costo è risultato di 130.000.000 di sterline, 14 milioni più del previsto. Secondo il Central Electricity Generating Board (CEGB), solo 4 di questi sono realmente costi aggiuntivi, mentre 10 sono dovuti alla svalutazione. Il capitale investito è risultato di 103 sterline per kW, rispetto ai 185 di Berkeley (a prezzi costanti). I reattori sono posti in sfere di cemento di oltre 29 m di diametro e spesse oltre 3,5 m; complessivamente sono stati utilizzati 46.000 m³ di cemento e 500 t di cavi di acciaio. La sicurezza della centrale è basata su un sistema elettronico automatico di regolazione e controllo.

(7) Tale limitazione può apparire molto rilevante in un'isola densamente popo-

Un elemento naturale che ha esercitato un'influenza sulla localizzazione è stata l'acqua. Infatti le basse temperature alle quali, in queste centrali, si svolge il ciclo del vapore richiedono una quantità di acqua di raffreddamento doppia rispetto a quella necessaria in una centrale tradizionale. Questo aspetto non era stato compiutamente valutato nell'installazione di Calder Hall, il che rese necessaria la costruzione di due grandi torri di raffreddamento, non solo costose, ma anche appariscenti. Data l'assoluta mancanza di convenienza di trasportare a distanza l'acqua, tutte le centrali del programma Magnox sono state ubicate sulla costa, possibilmente su un estuario; i fiumi della Gran Bretagna non hanno, infatti, masse d'acqua tali da poter servire allo scopo. L'unica centrale elettronucleare sorta nell'interno è quella gallese di Trawsfynydd, che sorge però sulla riva di un lago artificiale.

La localizzazione costiera è conveniente anche ai fini del problema prima indicato, quello della popolazione. Infatti, il cerchio di salvaguardia, in caso di ubicazione costiera, comprende per metà superficie acqua.

La superficie necessaria per le installazioni è di 50-100 ha, molto inferiore a quella richiesta dalle centrali tradizionali. Non serve tutto l'enorme spazio destinato a deposito di combustibile ed accumulo di rifiuti; mancano, inoltre, tutte le installazioni ferroviarie necessarie al trasporto del combustibile. Per dare un esempio pratico, una centrale a carbone da 500 MW ha bisogno giornalmente di 5000 t di carbone, mentre una « Magnox » di pari potenza viene alimentata con soli 5 q di combustibile.

Per la costruzione delle centrali della prima generazione vennero occupate da 2 a 3 mila persone per un periodo di 3-4 anni; pur se le centrali vennero costruite in luoghi un po' appartati, in nessuna parte del Regno Unito si sono avuti problemi di mano-

lata come la Gran Bretagna, ma è meno drastica di quel che sembri, dato il carattere fortemente accentrato dell'insediamento britannico. Più di metà della popolazione è concentrata in città di oltre 100.000 abitanti, occupando meno del 5% della superficie totale, ed un ulteriore 30% della popolazione occupa il 9% dell'isola. Pertanto, sull'85% della superficie la densità della popolazione supera di poco i 50 ab./km², secondo i dati del 1972, ed era ben inferiore nel 1955.

dopera, né si può dire che alcune località siano state scelte per la disponibilità di essa. Una centrale in funzione impiega, poi, 300-400 persone, per circa metà altamente qualificate dal punto di vista tecnico.

Un fattore che ha avuto una certa influenza nella localizzazione è stata invece l'esistente rete delle linee ad altissima tensione e le diramazioni che all'epoca si prevedeva di realizzare. Attorno al 1958 l'allacciamento alla rete da 275.000 V costava circa 25.000 sterline per miglio.

Molto sensibile si rivelò l'opinione pubblica nei riguardi del turbamento dell'amenità dei luoghi nei quali si dovevano edificare le centrali, il che era prevedibile in uno Stato dove un terzo del territorio è parco nazionale od è soggetto a particolari vincoli paesaggistici. Le centrali elettronucleari sono, in effetti, molto meno appariscenti di quelle convenzionali, ma, dato che per ragioni di sicurezza andavano poste lontano dai centri, di fatto venivano ad inserirsi in ambienti antropizzati in misura minima e, senza dubbio, erano inserimenti piuttosto pesanti.

Da tutto quanto finora esposto risulta quindi che, nonostante alcune limitazioni, per la localizzazione di queste centrali si ha una possibilità di scelta molto ampia, e che le si può molto convenientemente disporre secondo le necessità locali.

Nella Gran Bretagna, al tempo in cui si approntava il programma « Magnox », le aree nelle quali si manifestava un *deficit* nella produzione di carbone per alimentare le centrali erano: a) tutta la parte a sud del Canale di Bristol e di una linea ideale tra Gloucester, Bedford e Norwich; b) una fascia affacciata al mare dalla Baia di Cardigan alla Baia di Morecambe, e ampia fino a 100 km. Inoltre era previsto a breve termine un *deficit* nell'area di Glasgow. Tutte le centrali del programma « Magnox » sono state, quindi, pianificate nell'ambito di queste aree deficitarie.

Sizewell e Bradwell sono in posizione intermedia tra due aree di forte richiesta di energia, l'area urbana londinese e l'East Anglia. Dungeness provvede alle esigenze del Sud-est, ed è in posizione favorevole per l'allacciamento con la rete continentale

(cavi sottomarini nella Manica). Berkeley, Oldbury e Hinkley Point, sulla costa meridionale del Canale di Bristol, erano in ottima posizione per alimentare il tronco a 275.000 V che si era deciso di costruire verso il Devon e la Cornovaglia.

Calder Hall e Chapel Cross si trovano al limite settentrionale della seconda area nella quale la produzione carbonifera si dimostra sempre più insufficiente per i forti consumi delle industrie di Cheshire e Lancashire e delle aree urbane di Liverpool e di Manchester; nell'ambito di questa zona operano anche le centrali di Trawsfynydd e di Wylfa. Tutte le centrali inglesi e gallesi sono state realizzate per conto del CEBG (v. nota 6).

La centrale di Hunterston, destinata al fabbisogno dell'area industriale di Glasgow ed inaugurata nel 1964, è stata invece realizzata per iniziativa del SSEB (South Scotland Electricity Board). Va rilevato che la scelta di questa località è stata preceduta da molte incertezze, dato che l'area del non più utilizzato aeroporto militare di Turnberry Point offriva tutti i requisiti necessari; anzi, per alcuni versi la posizione era addirittura preferibile a quella di Hunterston. Ma per la decisione finale è stata determinante la distanza dalle linee ad alta tensione, che avrebbe comportato per Turnberry Point un costo aggiuntivo di circa un milione e mezzo di sterline.

Il continuo insorgere di nuovi problemi ha ritardato di circa tre anni la realizzazione del programma. Però, se nelle prime centrali si verificarono ritardi in ogni fase, a partire dalla centrale di Trawsfynydd il ritardo al momento di inizio della carica venne in parte recuperato nelle fasi occorrenti per raggiungere la criticità (cioè l'instaurarsi della reazione a catena) e la piena potenza. Inoltre, in tutte le centrali dotate di due reattori, il secondo ha sempre determinato ritardi minori di quelli del primo.

Ma il bilancio complessivo dei « Magnox » è stato fortemente positivo, in quanto si sono avute anche sorprese gradite. Ad es., la sorprendente capacità di funzionare a pieno carico per lunghi periodi; infatti, mentre le centrali tradizionali erogano nell'arco di un semestre dal 40 al 50% della potenza massima teorica, quelle

elettronucleari scendono solo eccezionalmente al di sotto dell'80%, mantenendosi regolarmente attorno al 90% (8).

Grazie a ciò il successo economico del programma « Magnox » ha largamente superato le attese in quanto da questi reattori non si è avuta, come ci si attendeva, la base di esperienza per produrre successivamente elettricità a prezzi competitivi, ma si è addirittura giunti a produrre l'elettricità meno cara del Regno Unito (9). Va rimarcato che le centrali a combustibile tradizionale confrontate con quelle elettronucleari sono localizzate su giacimenti carboniferi o presso raffinerie di idrocarburi: l'elettricità prodotta per via nucleare è risultata la meno cara, e non di poco, in un paese largamente fornito di risorse carbonifere.

La centrale, detta sperimentale, di Calder Hall ha stabilito dei *record* difficilmente superabili: in funzione da oltre 18 anni, con un fattore di utilizzazione superiore al 90%, è considerata la migliore centrale elettrica del mondo. Inoltre è sperimentale fino ad un certo punto, dato che la sua potenza, 200.000 kW, è superiore, ad es., a quella delle centrali termoelettriche installate nel 1972 in Valle d'Aosta, Trentino-Alto Adige, Marche, Abruzzi, Molise e Basilicata.

(8) Questa caratteristica ha più importanza di quanto ne avrebbe in una centrale tradizionale, data la forte differenza nell'incidenza dei costi di impianto e di esercizio, nei due casi. Infatti, sul computo del costo unitario dei kW prodotti, i costi di esercizio gravano per il 23% in quelle nucleari e per il 60% in quelle a carbone (dati forniti dal CEBG). Se la centrale funziona a mezzo carico, il costo unitario aumenta di circa un quarto se è alimentata a carbone; se è elettronucleare, il costo risulta invece più che raddoppiato, dato il rilevante capitale immobilizzato negli impianti. I reattori « Magnox », per la loro attitudine a lavorare a lungo, sono stati definiti dal presidente del CEBG, A. E. Hawkins, « nuclear workhorses » (cavalli da tiro nucleari), nel corso di una conferenza dell'European Nuclear Society (Parigi, 21-4-1975).

(9) Già nel 1971 la centrale di Dungeness A produceva a costi unitari pari a quelli della migliore centrale ad idrocarburi; gravando però su questi una tassa governativa di 0,05 pence per kWh, i costi di Dungeness A (0,31 penny/kWh) e di Sizewell (0,32) erano i migliori. Alla fine del 1973, Dungeness A, con 0,33 penny/kWh, precedeva le centrali ad idrocarburi meno costose (Pembroke e Fawley, con 0,39), e le avrebbe precedute anche se su queste non avesse gravato la tassa. Ferribridge era la migliore a carbone, con 0,40. Si prevedevano per l'anno successivo, a causa della crisi energetica, aumenti molto differenziati: 0,35 per Dungeness A, di fronte a 0,65 per le migliori centrali a carbone e 0,88 per le migliori ad idrocarburi. Non occorrerà ricordare che, in seguito, l'aumento dei prezzi degli idrocarburi ha superato tutte le previsioni più pessimistiche.

CENTRALI « MAGNOX »

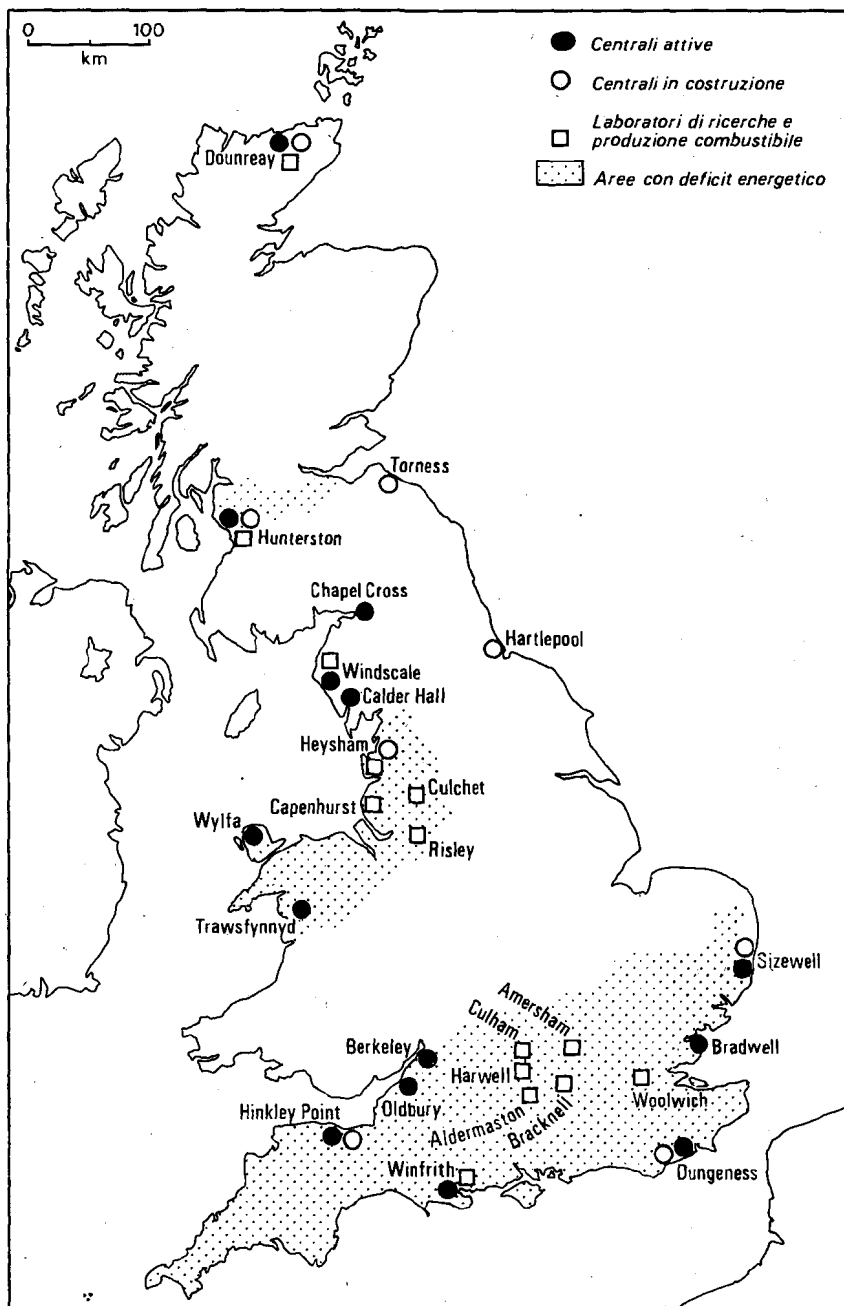
CENTRALE	MW installati	Inizio produzione	10 ^e kWh prodotti nel 1974	10 ^e kWh prodotti com- plessivamente
Calder Hall . .	198	1956	1.865	28.594
Chapel Cross .	200	1958	1.915	26.183
Berkeley . . .	276	1962	2.339	28.177
Bradwell . . .	300	1962	2.022	27.450
Hunterston A .	320	1964	2.466	26.428
Hinkley Point A	500	1965	3.638	31.276
Trawsfynydd .	500	1965	3.734	29.468
Dungeness A .	550	1965	3.506	32.048
Sizewell A . .	580	1966	3.714	29.858
Oldbury . . .	600	1967	2.812	19.119
Wylfa	1.180	1972	5.163	12.971
<i>Totale. .</i>	<i>5.204 (*)</i>		<i>33.174 (**)</i>	

(*) Meno del 7% della potenza installata in Gran Bretagna.

(**) Quasi l'11% della potenza prodotta nell'anno in Gran Bretagna.

2. *AGR, la seconda generazione di reattori.* — Dopo i primi anni di funzionamento dei reattori di tipo « Magnox » si rendeva necessario realizzare le centrali con reattori più efficienti. Si era progettato, infatti, un Advanced Gas-cooled Reactor (AGR), con progressi sostanziali: ciclo termico con temperature fino a 550°, in grado di alimentare grandi turboalternatori, e rendimento del 40% (quindi meno bisogno di acqua di raffreddamento); barre di combustibile avvolte in acciaio, per sopportare temperature fino ad 800°; struttura molto compatta, in modo che a parità di potenza il nocciolo AGR ingombra meno della metà di un nocciolo « Magnox »; maggiore utilizzazione del combustibile, così che 1 t equivale a 75.000 t di carbone (in una centrale da 500 MWe ne bastano 70 kg al giorno).

Ma, nel frattempo, altri Stati avevano fatto ricerche nel settore, e gli Stati Uniti concorrevano agli appalti con offerte interessanti. La prima centrale sarebbe dovuta sorgere presso quella di Dungeness, con due reattori da 250 MWe; per poter competere



LE CENTRALI ELETTRONUCLEARI IN GRAN BRETAGNA.

con le offerte americane bisognò aumentare la potenza dei reattori AGR fino a 660 MWe. Solo a questi livelli si avevano costi paragonabili a quelli del Boiling Water Reactor (BWR) statunitense. La decisione governativa venne nel settembre 1965: commissionare per Dungeness B un AGR di grandi dimensioni ed adottarlo per tutte le centrali del secondo programma. Questo prevedeva l'installazione, per il 1975, di 8000 MWe, da realizzare in poche grandi centrali. L'esperienza fino allora accumulata era quella del reattore di Windscale, da 34 MWe, in funzione dal 1962 con buoni risultati.

Due fattori avevano orientato la scelta: calcolo dei costi più preciso, in quanto basato su esperienze inglesi; minor necessità di acqua per l'AGR rispetto allo statunitense BWR. Già allora si guardava all'acqua come ad un bene limitato, osservando che ci si poteva permettere il BWR negli Stati Uniti (o in Canada, o in Brasile, o in altri paesi con molte acque correnti), ma non in un'isola densamente popolata.

La centrale AGR può sembrare un soggetto con « geograficità » ancora minore rispetto alla « Magnox »; in realtà non è così, a causa del combustibile adoperato, che è il c.d. « uranio arricchito ». L'arricchimento consiste nel portare la percentuale di ^{235}U da 0,7 a circa 2%; in altri termini da 7 atomi fissili su 1000 a 20. Per effettuare questa operazione, in apparenza semplice, occorrono, però, non solo formidabili immobilizzi di capitale, ma anche laboratori di ricerca ed installazioni operative tali da influire anche fisicamente sul paesaggio di una zona. Una centrale AGR presuppone, quindi, la presenza di una struttura complementare molto ingente.

Fin dall'inizio del programma AGR vennero ordinate quattro centrali analoghe a quella commissionata per Dungeness B, per una potenza complessiva di circa 6500 MWe; per completare il programma (8000 MWe) se ne sarebbe ordinata, in seguito, un'altra. Per la localizzazione di queste nuove centrali i fattori influenti erano gli stessi esposti nel paragrafo precedente, e quindi le stesse erano le regioni verso cui orientarsi. Tuttavia, alcuni cambiamenti si erano verificati; ad es., già esistevano centrali atomiche, in località con spazio a disposizione dove si erano instal-

late *équipes* di tecnici. Per cui, oltre a Dungeness B, altre due centrali vennero commissionate affiancate alle precedenti « Magnox », e cioè Hinkley Point B e Hunterston B.

Alcuni anni di funzionamento senza incidenti erano stati la miglior presentazione possibile per l'atomo « pacifico »; il grado di fiducia della popolazione era tale che non si verificarono opposizioni (come era avvenuto dieci anni prima), e non si dovettero svolgere inchieste per accertare la disponibilità della maggioranza degli abitanti riguardo ad una centrale nucleare. Così, le altre due centrali AGR (anche queste dotate di due reattori per una potenza di circa 1250 MWe) vennero ubicate a Hartlepool, sulla foce del Tees, e a Heysham, poco a nord di Preston, cioè in zone fortemente popolate (e bisognose di energia): si tratta di due centrali suburbane (10).

La serie delle centrali AGR non ha avuto però il successo che ci si attendeva. Probabilmente ciò che più rende tangibile questo insuccesso è che la sesta centrale, che doveva completare il programma, non è stata mai ordinata, dati gli inconvenienti sorti mentre si costruivano le altre e l'aumento dei costi oltre ogni pessimistica previsione. La prima centrale AGR, quella di Dungeness B, che doveva entrare in funzione nel 1971, non è ancora terminata nel 1975; secondo le più recenti informazioni, l'allacciamento alla rete avverrà solo nel 1977. Anche le altre centrali AGR sono in fortissimo ritardo, pur se non nella misura di Dungeness B (11).

(10) Il CEGB ha svolto un'indagine per accertare se la popolazione vivente attorno alle centrali suburbane fosse realmente molto superiore a quella residente attorno alle altre centrali. Ciò si verifica fino a 10 km di distanza, per cerchi di raggio superiore i valori si avvicinano, fino ad esser simili a circa 25 km. In un cerchio di 30 km di raggio risiedono più persone attorno a Berkeley od Hinkley Point che non attorno ad Heysham (P. WILLIAMSON, *The environment of nuclear stations in England and Wales*, comunicazione al XVIII Congresso Nucleare, Roma, marzo 1972).

(11) Pareva che la prima ad entrare in funzione dovesse essere quella di Hinkley Point B, ma, a poche settimane dalla data prevista, un nuovo problema, nel febbraio 1975, ha provocato un ulteriore rimando. Al momento attuale non si sa se una delle centrali AGR (Hinkley Point B o Hunterston B) potrà effettivamente venir connessa alla rete nel corso del 1975. Tutte le nuove difficoltà hanno dilatato i costi al di là delle previsioni più pessimistiche. Inizialmente si era preventivata, per il programma AGR, una spesa di 500 milioni di sterline, con una media di circa 80 sterline per ogni kW installato nelle varie centrali. Alla fine del 1972 si valutava di dover superare

A dieci anni di distanza, la decisione di adottare il reattore nazionale, anziché il BWR statunitense, può esser criticata, ma per completezza di informazione va segnalato che di recente negli Stati Uniti sono stati fermati tutti i BWR, per fenomeni di corrosione che ne mettevano in dubbio la sicurezza.

Tuttavia l'obiettivo che ci si proponeva dalla seconda generazione di reattori, e cioè l'elettricità a basso costo, per ora è mancato. Il fatto che contemporaneamente si sia verificata la crisi del petrolio non deve far mancare di constatare che solo una durata produttiva al di là delle previsioni, ed a forte tasso di utilizzazione, potrà consentire il recupero delle ingentissime spese di installazione, grazie ai bassi costi di esercizio. In campo tecnico nessuno contesta la superiorità inglese nella serie di reattori gas-grafite, ma i continui ritardi degli AGR hanno fatto sì che nessuna ordinazione per tali impianti sia venuta da altri Stati. Fino ad ora, quindi, l'incontestato primato nel *know-how* relativo a questi reattori è rimasto privo di importanza commerciale.

3. *SGHWR, il terzo programma elettronucleare.* — Tutta la pianificazione del settore è stata influenzata dai ritardi del programma AGR. Infatti, la logica prosecuzione delle ricerche tendeva alla realizzazione di reattori gas-grafite che lavorassero a

il preventivo di 250 milioni, ma un anno più tardi la spesa addizionale era valutata 400 milioni. Nel 1974 si è stati costretti a chiedere un prestito alla Banca Europea per gli Investimenti; si dice che la centrale di Dungeness B, una volta completata, sarà venuta a costare da sola una cifra prossima a quella preventivata per tutto il piano AGR. Durante tutti questi anni, però, il prototipo ha continuato a funzionare egregiamente. Pur senza vantare i *record* di Calder Hall, l'AGR di Windscale ha dodici anni di esercizio con un fattore di utilizzazione superiore al 60%, nonostante i rallentamenti fatti per eseguire controlli che aiutassero a capire quanto avveniva negli altri AGR. Probabilmente, il maggior sorgere di imprevisti nel secondo programma nucleare deriva dal fatto che nei « Magnox » si è passati gradualmente dal 50 MW dei reattori di Calder Hall ai 590 di quelli di Wylfa, mentre con gli AGR si è passati direttamente dal 34 di Windscale ai 660 di Dungeness B. Si sono verificati fenomeni di corrosione diversi da quelli constatati nei « Magnox », soprattutto negli acciai al cromo; nei primi reattori la costruzione era già avanzata, e si sono dovuti studiare particolari accorgimenti, negli altri si è evitato di utilizzare acciai al cromo. Inaspettati, in installazioni piuttosto silenziose come le centrali elettronucleari, sono stati i fenomeni di vibrazione acustica. Si è dovuto constatare che, a determinate condizioni di temperatura e di pressione, nell'interno dei reattori si verificano fenomeni di risonanza e vibrazione più forti che in un motore a reazione a pieno regime. Proprio questo fenomeno ha danneggiato i tubi di Hinkley Point B, provocando l'ultimo ritardo a poche settimane dall'inaugurazione.

temperature sempre più elevate. Un prototipo di High Temperature Reactor (HTR) è stato installato a Winfrith (Dorset) nell'ambito di un programma svolto sotto l'egida dell'O.C.S.E., il « Dragon Project » (12). Questo reattore ha erogato 20 MW termici per diversi mesi, ed è in funzione ormai da quindici anni con risultati soddisfacenti.

Un diverso reattore sperimentato dagli inglesi è lo Steam Generating Heavy Water Reactor (SGHWR), che comporta dei rilevanti mutamenti tecnici: la grafite viene sostituita dall'acqua pesante e l'acqua normale (liquida) prende il posto dell'anidride carbonica. I lavori per il prototipo SGHWR cominciarono nel maggio 1963, nello stesso complesso di Winfrith dove si trova l'HTR. Il reattore raggiunse il punto critico nel settembre 1967, tre mesi dopo iniziò a produrre elettricità e nel gennaio 1968 si arrivò alla piena potenza, cioè a 100 MWe, realizzandosi la connessione alla rete nazionale.

La produzione di acqua pesante richiede grandi installazioni, di cui il Regno Unito è attualmente sfornito. I tecnici hanno messo a punto un procedimento per ridurre il più possibile il fabbisogno, e parte della funzione moderatrice (circa il 30%) viene attuata dall'acqua normale che svolge il ciclo termico (13). Ma sono comunque necessarie notevoli quantità di acqua di raffreddamento.

Concepito come reattore di modesta entità, facilmente esportabile anche nel Terzo Mondo, l'SGHWR si è invece rivelato conveniente se realizzato a scala maggiore. In effetti, oggi i 600 MWe costituiscono un livello minimo, al di sotto del quale i reattori

(12) L'HTR adopera uranio arricchito, per il quale si adottano, comunemente, rigorose norme di sicurezza: ogni particella è avvolta in una pellicola di carbonio pirolitico ed una di carburo di silicio, che limita la pericolosità delle scorie. Le barre di combustibile, pure esse avvolte in carburo di silicio, possono sopportare 1400° C. A tale temperatura l'anidride carbonica diviene troppo aggressiva, ed è sostituita dall'elio, gas chimicamente inerte. Vi erano problemi di approvvigionamento, ma ora si sono trovate impurezze di elio nel gas del Mar del Nord, providenziale anche in campi insospettati. L'elio entra nel nocciolo a 300° e giunge alla turbine a 750° C. Nel 1973 in sei mesi di funzionamento si sono perdute solo otto ore (annualmente viene pubblicato un *OECD Dragon High Temperature Reactor Project Annual Report*).

(13) Sotto forte pressione l'acqua viene mantenuta liquida anche a temperature molto superiori ai 100°, ma in ogni caso il ciclo termico si svolge a temperature non elevate. La resa termica è del 30% circa, ma vengono in compenso eliminati quasi totalmente i problemi di corrosione. L'alluminio inizialmente adoperato (supporti, tubazioni) è stato progressivamente sostituito da una lega allo zirconio (zircaloy).

non sono economicamente validi. Pertanto si è adottata una tecnica di costruzione modulare, e, in pratica, un SGHWR da 600 MWe risulta dall'unione di 6 reattori come quello di Winfrith, cioè qualcosa di già collaudato (si ricordi che l'insuccesso degli AGR è in parte dovuto al fatto che da un piccolo prototipo non si può realmente prevedere il comportamento del reattore commerciale).

Il reattore di Winfrith è stato sottoposto a centinaia di esperimenti, saggiandone particolarmente la « flessibilità », cioè la possibilità di variare rapidamente regime. I risultati sono notevoli, dato che l'SGHWR ha dimostrato di sopportare variazioni pari al 30% del carico massimo in un minuto e variazioni dell'80% del carico massimo in venti minuti. In caso di incidenti può venir « spento » in pochi secondi. In circa sette anni di funzionamento esso ha erogato il 48% del massimo teorico possibile, nonostante i numerosi esperimenti; in effetti, si può senz'altro affermare che avrebbe potuto erogare più del 75% del massimo teorico. Nei periodi invernali, quando la domanda è più forte e gli esperimenti vengono limitati, il *curriculum* del reattore SGHWR di Winfrith è stato il seguente:

Inverno	Fattore di carico	Perdita per prove	Perdita di funzionamento
1970-71	83,1	9,8	7,1
1971-72	92,2	5,1	2,7
1972-73	86,5	8,6	4,9
1973-74	97,8	1,0	1,2

Sono tutte prestazioni ottime, e l'ultima è assolutamente sorprendente, in un momento particolarmente delicato. Gli ultimi mesi del 1973 vedevano, infatti, manifestarsi nell'Europa occidentale le conseguenze di un'irrazionale dipendenza dagli idrocarburi. Tutti gli Stati dovettero modificare i loro programmi energetici. Gli idrocarburi del Mare del Nord erano certo un dato favorevole per il Regno Unito, ma era ormai chiaro che solo

l'energia nucleare avrebbe potuto, in futuro, soddisfare la domanda di energia imposta dall'attuale tipo di sviluppo.

Il governo britannico aveva già voluto associare alle ricerche l'industria privata istituendo nel giugno 1973 una National Nuclear Company (NNC), società le cui quote vennero ripartite come segue: allo Stato, tramite la United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), il 15%; alla General Electric Company (GEC), il 50%; ad altre industrie private il rimanente 35%. Nell'agosto fu dato incarico ad un gruppo di esperti (Nuclear Power Advisory Board, NPAB) di stilare un rapporto, dato che si presentavano diverse opzioni.

La situazione era dominata dal fatto che un paese con le disponibilità del Regno Unito è in grado di portare avanti operativamente una sola linea di ricerca; in tutte le altre sono necessarie spese ingenti solo per tenersi al corrente. La scelta di un'opzione comportava quindi il rimanere indietro nelle altre.

Nella linea gas-grafite la Francia, un tempo sostenitrice, aveva abbandonato il campo; le ricerche continuano invece negli Stati Uniti e nella Germania Occidentale; la mancata scelta dell'HTR avrebbe significato la rinuncia ad un primato indiscusso, per il quale si erano sostenute spese fortissime. Il nuovo SGHWR era poco conosciuto quanto a conseguenze ambientali e necessitava di molta acqua. Si ponevano problemi di approvvigionamento d'acqua pesante, ripetendosi l'incognita di fare ancora una volta da pionieri. All'estremo opposto c'era la scelta di un reattore ad acqua naturale (Light Water Reactor, LWR), di cui gli americani offrivano vari tipi: niente rischi di ricerca, ma sudditanza completa, non solo per il combustibile, bensì anche per la tecnologia.

La GEC appoggiò la scelta del reattore americano, per affidarsi a qualcosa di sperimentato, pur rinunciando a dei primati. Ma in seguito al rapporto del NPAB la Camera dei Comuni il 4 febbraio 1974 formulò un voto nettamente contrario ai reattori LWR. Ci si preoccupava dell'inevitabile degradazione ambientale e del fatto che questi reattori non davano sufficienti garanzie di sicurezza (ed in seguito infatti negli Stati Uniti anche tutti gli LWR sono stati fermati per controlli). Il successivo 10 luglio il Segretario di Stato per l'Energia, E. Varley, esponeva il terzo

programma nucleare, adottante l'SGHWB; sono state commissionate due centrali, una affiancata alla « Magnox » di Sizewell ed una a Torness (East Lothian). Sizewell B prende il posto della sesta AGR, che non è stata mai definitivamente ordinata; sarà dotata di 4 reattori da 650 MWe, mentre a Torness se ne installeranno solo 2. Autorizzate nel febbraio 1975, per Sizewell B l'NNC ha già avuto l'incarico di realizzazione, da completare per il 1982. Oltre all'ottimo comportamento del reattore di Winfrih, la scelta è motivata dal fatto che la tecnica di costruzione fa ritenere che non si manifesteranno problemi di crescita. Inoltre un reattore simile, denominato Candu, è in funzione da tempo in Canada con ottimi risultati e con una potenza di 500 MWe. Si è realizzato un accordo col Canada per proseguire congiuntamente le ricerche sui reattori ad acqua pesante; in attesa che il Regno Unito realizzi un impianto per produrne, il Canada si impegna a fornirli per le prime centrali. E' fuor di dubbio che la decisione britannica è stata molto influenzata dal desiderio di avere come *partner* il Canada in luogo degli Stati Uniti.

4. *Ricerca a medio e a lungo termine.* — Nella reazione che avviene negli impianti di cui si è finora detto (v. nota 2), e che vengono chiamati termici, alcuni neutroni si uniscono ad atomi di uranio « fertile », formando plutonio. Questo è totalmente fissile ed utilizzabile nei reattori, tanto che l'uranio adoperato nei reattori termici viene trattato di nuovo in laboratori specializzati per ricavare il plutonio; il maggiore di questi laboratori è a Windscale, ma rilevanti sono anche quelli di Harwell e Amersham.

Unendo plutonio ed uranio naturale si ottengono combustibili a qualunque grado di fissilità, e si è quindi cercato di ottenere la maggiore quantità possibile di plutonio. Si è riusciti a controllare una reazione senza rallentare i neutroni, che hanno quindi maggiore tendenza a formare plutonio, realizzando il Fast Breeder Reactor (FBR, Reattore Veloce Autofertilizzante). Veloce indica la caratteristica di non rallentare i neutroni, autofertilizzante vuol dire che si può regolare la reazione in modo che nella parte

fertile si formi più plutonio di quanto se ne consumi nella parte fissile (14).

Lo sviluppo di questa tecnica ha conseguenze formidabili: nei « Magnox » si utilizzava lo 0,2% del combustibile, negli AGR lo 0,4, con i reattori ad acqua pesante si è saliti allo 0,8: con i reattori veloci si potrà giungere al 70% del massimo teorico, ricavando da 1 t di uranio l'equivalente di 2.000.000 di t di carbone. Parallelamente diminuirà, per i non produttori, la dipendenza dagli Stati fornitori.

Dal punto di vista energetico va però ricordato che il plutonio, fornendo energia, non fa che restituire per un quarto quel che è costato produrlo. Sotto il profilo geografico si nota che la produzione di questi combustibili richiede impianti estremamente specializzati con personale qualificato, e che i laboratori di ricerca e di produzione di elementi transuranici e di ritrattamento del combustibile sono più numerosi delle centrali. Tali materiali sono inoltre estremamente pericolosi da trasportare, ed è necessario che la distanza tra laboratorio e centrali sia la minima possibile.

Anche in questo campo il Regno Unito è stato un pioniere, iniziando un reattore veloce sperimentale nel 1955, critico dal 1959, a piena potenza nel 1963: con 60 MWe il Dounreay Fast Reactor era il più potente reattore veloce del mondo. La sua localizzazione a Dounreay, Caithness, sull'estrema costa settentrionale scozzese, è stata evidentemente dominata dalla prudenza. Fin dal 1962 il DFR ha fornito energia agli impianti di Dounreay ed ha avuto un *surplus* da immettere nella rete (15).

(14) Secondo lo schema, da sei fissioni si liberano diciotto neutroni, sei dei quali mantengono la reazione. Dei dodici in soprannumero, solo quattro sfuggono ed otto si fissano nella parte fertile del combustibile, formando plutonio. Attorno al nocciolo del reattore un rivestimento di uranio già utilizzato (quindi completamente fertile) cattura molti dei neutroni sfuggiti, formando altro plutonio.

(15) La struttura del nucleo dei reattori veloci è molto compatta; uno dei maggiori problemi tecnici è quello di asportare da uno spazio limitato enormi quantità di calore per unità di tempo. I fluidi comuni non potrebbero svolgere efficacemente tale funzione, per cui si adopera come scambiatore un metallo liquido. Le proprietà richieste a tali scambiatori sono basso punto di fusione ed alto punto di ebollizione, di modo che vi sia un ampio intervallo termico nel quale si mantiene lo stato liquido. Inizialmente si adoperò una lega di sodio e potassio (in proporzione 7 a 3), con punto di fusione a soli 40°; infatti, si prevedeva di dover arrestare spesso le operazioni e si voleva evitare che lo scambiatore solidificasse nei circuiti. In se-

L'uranio metallico fortemente arricchito adoperato inizialmente non dava sufficienti garanzie di buon funzionamento con reattori più potenti a temperature più alte; si ricorse, quindi, a miscele di uranio e plutonio, sotto forma di ossidi, ed infine a carburi dei due elementi, realizzando alta concentrazione di materiale fissile e maggiore conduttività termica. Dalla fine degli anni '60 il DFR introita circa un milione di sterline all'anno, per lavori compiuti per conto di altri Stati.

Si è realizzato un reattore di media potenza, il Prototype Fast Reactor (PFR) da 254 MWe; giunto al punto critico nel 1974, non è ancora stato collegato alla rete per ritardi attribuiti alla parte non nucleare. Si è già iniziata, quindi, la realizzazione del primo Commercial Fast Reactor (CFR), con due reattori da 660 MWe. E' interessante notare che il PFR ed il CFR vengono costruiti entrambi a Dounreay, in quanto qui si era formata la maggior *équipe* di tecnici di reattori veloci del mondo occidentale.

L'uranio arricchito ed il plutonio necessari per i reattori veloci consentono di rimarcare come ad una sempre maggior riduzione degli spazi necessari per le centrali corrispondano installazioni sempre più imponenti per produrre il combustibile: attualmente il « ciclo del combustibile » ha un'importanza quanto meno pari a quella del « ciclo del reattore ». La produzione di uranio arricchito avviene principalmente per diffusione o per centrifugazione (16). La diffusione è il sistema più conosciuto e collaudato, ma, secondo

guito si è adoperato sodio puro, con punto di fusione a 98°; il suo punto di ebollizione ad 880° permette di instaurare senza pericoli un ciclo termico a temperature sufficienti per azionare i maggiori turboalternatori odierni. Dato che il sodio reagisce con estrema violenza con l'acqua, lo scambiatore e l'acqua da vaporizzare sono contenuti in due circuiti di tubi diversi; in tal modo il contatto è possibile solo nel caso di una crinatura contemporanea dei due circuiti, evento da considerare all'atto pratico impossibile. Si può quindi riparare una crinatura di un tubo, evento probabile, senza pericoli.

(16) In entrambi i sistemi il primo passo è quello di rendere l'uranio gassoso, il che si realizza facendolo reagire con fluoro, formando esafluoruro di uranio. Facendo attraversare al gas un sistema di migliaia di membrane, la prima frazione di gas che ne esce risulta arricchita dell'isotopo più leggero, cioè il fissile ^{235}U . Posto invece in un'ultracentrifuga ad altissima velocità, nella parte più interna il gas risulterà arricchito dell'isotopo fissile, avendo questo risentito meno della spinta centrifuga.

molti esperti, con la centrifugazione, una volta perfezionata la tecnologia, si avranno costi molto inferiori. Al solito, nessuno Stato europeo è in grado di realizzare un grande impianto per diffusione e contemporaneamente investire capitali nella ricerca sulle ultracentrifughe. Il Regno Unito anche in questo campo riconosce priorità all'aspetto tecnologico: si rimane ancora per qualche anno importatori di uranio arricchito dagli Stati Uniti, spingendo al massimo la ricerca sull'ultracentrifugazione. Se tutto va secondo i piani, tra qualche anno si produrrà l'uranio arricchito per il fabbisogno interno, se ne esporterà e si sarà padroni della tecnologia più avanzata. In questa linea, però, ci si è dovuti comunque associare ad altri Stati, dando vita ad un gruppo, denominato URENCO, con Paesi Bassi e Repubblica Federale di Germania: due centri di ricerca, Almelo (Paesi Bassi) e Capenhurst (Regno Unito), hanno già prodotto uranio arricchito.

Un'idea dell'entità dei problemi posti (e degli interessi coinvolti) dall'arricchimento dell'uranio è data dal fatto che su questo tema si è verificata una scissione nell'EURATOM. La Francia, per sganciarsi il più presto possibile dall'importazione dagli Stati Uniti, ha costituito un gruppo, EURODIF, per realizzare un impianto produttivo di grandi dimensioni, scegliendo ovviamente il collaudato sistema per diffusione. Peraltro la Francia è spinta a questo dal fatto di produrre una certa quantità di uranio e di avere vincoli preferenziali con alcuni produttori africani: può, quindi, non dipendere dagli Stati Uniti per l'uranio naturale da arricchire, a differenza del Regno Unito. All'EURODIF aderiscono Italia, Belgio, Spagna ed Arabia Saudita: non solo spaccatura dell'Euratom, quindi, ma anche associazione con altri Stati. L'impianto di Tricastin, nella valle del Rodano, produrrà l'equivalente di 120.000.000 di t di petrolio all'anno.

Associandosi all'EURODIF, il nuovo membro ottiene tutto il bagaglio di conoscenze acquisite. Geloso del primato tecnologico, il Regno Unito ha invece regolato l'URENCO in modo che solo i fondatori abbiano pieno accesso al *know-how* e collaborino alle ricerche; i nuovi aderenti avranno soltanto un trattamento preferenziale per i loro acquisti.

Il principale argomento inglese contro la diffusione è il bi-

lancio energetico complessivo: se per ottenere uranio arricchito si dovesse fornire più energia di quanta se ne possa ricavare, converrebbe rimanere ai « Magnox ». Con la diffusione, il rapporto tra energia fornita e ricavabile è di circa 1:2; con la centrifugazione si conta di giungere ad 1:10. In questo è la sostanziale economia cui punta l'URENCO. Infatti, secondo alcuni esperti, le quattro centrali nucleari da 900 MWe da costruire nella valle del Rodano serviranno tutte per il fabbisogno del centro di Tricastin.

La ricerca più avveniristica è quella sulla fusione atomica, fenomeno per il quale alcuni atomi leggeri si uniscono tra loro; il prodotto materiale finale pesa meno dei reagenti iniziali, in quanto una parte di massa si è trasformata in energia. Nel settore bellico passare dalla bomba A alla bomba H è stato relativamente facile: difficilissimo è invece riuscire a controllare l'immensa energia che si scatena dalla fusione. Peraltro, la fusione è l'unica soluzione reale che oggi si veda per i problemi energetici. In primo luogo le materie prime sono idrogeno pesante (deuterio, tritio) e litio, molto abbondanti e praticamente ubiquitarie. Inoltre, e di estrema importanza, la fusione non lascia scorie radioattive.

L'investimento a livelli statunitensi e sovietici nelle ricerche di fusione è impensabile per singoli Stati europei. Si svolge un programma comune, il Joint European Torus (JET), che dovrebbe terminare entro il 1975 la fase progettuale, da sottoporre al Parlamento Europeo. Il centro di ricerca è il laboratorio inglese di Culham: per quanto detto finora sul pionierismo britannico nel settore dell'atomo pacifico, è senza dubbio una scelta ben indirizzata.

5. *Diverse implicazioni dell'uso dell'energia nucleare.* — Nell'inverno 1972-73 il governo britannico ebbe un'inaspettata ragione per apprezzare le centrali elettronucleari; durante gli scioperi dei minatori del carbone, che portarono infine alla caduta dei conservatori, gli scioperanti ebbero una certa solidarietà dal personale delle centrali convenzionali. Il personale tecnico specializzato delle centrali elettronucleari si mantenne invece al di fuori della questione. Si ricorderà il formidabile *exploit* del reattore di Winfrith

in quel periodo, mentre va segnalato che la centrale di Wylfa sostenne, nell'inverno 1973-74, il 4% del carico dell'intera rete del CEBG.

Non può, però, sorprendere il fatto che il personale del settore elettronucleare solidarizzi con l'apparato statale, dato che per un ventennio i governi inglesi, di laburisti o di conservatori, hanno sempre dato largo spazio alla ricerca sull'atomo. Sempre costante si è mantenuto l'orientamento di finanziare la ricerca, per ottenere primati tecnologici compensanti le spese per acquistare il combustibile. Agli inizi, pareva che si fosse riusciti a realizzare tutto il programma: nel 1958, infatti, il Giappone e l'Italia acquistavano due completi impianti « Magnox », installati a Tokai Mura (166 MWe) e Latina (160 MWe). Da allora, però, non si è mai più venduto un impianto completo, per una serie di motivi al di fuori delle possibilità di intervento inglese.

Numerosi Stati hanno infatti ritenuto essenziale rendersi autosufficienti, almeno in qualche settore. Contemporaneamente si verificava un altro fenomeno, che svantaggiava il Regno Unito, cioè il miglioramento del combustibile tramite arricchimento. La tecnologia dell'arricchimento è tale che essere all'avanguardia nel saperlo utilizzare, ma senza produrne, non porta più alla preminenza.

Infatti gli esportatori sono in posizione di forza, ed impongono condizioni dure. Le forniture avvengono vari mesi dopo la firma dei contratti e l'acquirente deve impegnarsi ad acquistare per lunghi periodi; inoltre il venditore tende a legare l'acquirente ad una particolare tecnologia, a fornire cioè anche i reattori. Esempio a tale proposito è proprio l'esperienza britannica, dove si è visto come dagli Stati Uniti si abbiano numerose offerte di reattori che, se accettate, porterebbero ad un trattamento preferenziale nelle successive forniture di combustibile.

L'ipotesi che il Regno Unito, pur se fornito solo del combustibile più superato (carbone), si sarebbe potuto mantenere tra gli Stati dirigenti del settore energetico internazionale grazie alle conoscenze tecniche era razionale all'inizio, ma si sta dimostrando sempre più difficilmente realizzabile.

Ma quanto avviene è ben lontano dal confermare una visione

deterministica, per la quale l'effettiva distribuzione dei giacimenti di minerali radioattivi nel mondo configuri già in sé quelli che saranno gli Stati più importanti nel campo energetico. Di grande importanza figura l'elemento umano, e non come essere umano individuale, ma come parte di un corpo sociale organizzato.

Gabon, Niger, Madagascar sono esempi presi a caso di Stati che, pur disponendo di materia prima, non hanno una struttura organizzativa tale da poterla utilizzare convenientemente nell'odierno ambiente internazionale competitivo. Sembrano, pertanto, destinati a mantenere una posizione subordinata, come esportatori di materia prima.

Australia e Canada sono esempi di un'altra situazione come Stati produttori. Il livello tecnico e la preparazione degli esperti qualificati sono molto avanzati; inoltre la situazione sociale non presenta squilibri tali da far presupporre improvvisi cambiamenti traumatici dell'organizzazione statale. La tensione che, alimentata da ingiustizie sociali od addirittura da discriminazioni razziali legalizzate, cova in Brasile o nella Repubblica Sudafricana, non permette di classificare questi produttori insieme con Australia o Canada. Non è affatto da escludere che in Brasile o nella Repubblica Sudafricana un mutamento radicale possa prendere le mosse da un momento all'altro, coinvolgendo naturalmente la gestione delle materie prime radioattive, soprattutto la loro utilizzazione e destinazione. In Canada ed Australia, invece, i fondi per la ricerca possono esser stanziati senza alcuna remora, ma la misura di tali stanziamenti si va rilevando sempre più inadeguata per poter mantenere il passo con Stati Uniti e Unione Sovietica.

Questi due paesi hanno spinto infatti la ricerca in modo tale da renderla, all'atto pratico, un problema di quantità di investimento e per di più riservata a Stati produttori. Evidentemente nessun altro Stato del mondo può competere sul piano degli investimenti, ma è interessante rilevare come solo la diversa organizzazione produttiva consenta all'Unione Sovietica di rimanere in gara. Infatti, sul piano del reddito prodotto e della formazione di capitale gli Stati Uniti sono al primo posto, con forte distacco, ma il fatto che nell'Unione Sovietica tutto il capitale formato

venga gestito collettivamente consente allo Stato, unico imprenditore, di stanziare cifre analoghe a quelle statunitensi. Naturalmente, entrambi hanno interesse a spingere al massimo la velocità del progresso tecnico, in modo da eliminare potenziali concorrenti (sempre che si possa parlare di progresso). Al momento attuale il solo Stato che sembra in grado di mantenere un'autosufficienza, o quanto meno di evitare una dipendenza dagli Stati Uniti o dall'Unione Sovietica, è la Repubblica Popolare Cinese, grazie ad un'organizzazione che razionalizza l'accumulazione di capitale ancor più di quanto avvenga nell'Unione Sovietica stessa.

Le condizioni necessarie per mantenere un'autosufficienza energetica, o, quanto meno, una parità nella bilancia dei pagamenti del settore, includono quindi attualmente un'ingente popolazione produttiva, in grado di alimentare le fortissime spese di ricerca. La permanenza, nel contesto concorrenziale attuale, di Stati soltanto esportatori di minerali radioattivi è stata la base dei programmi di Stati non produttori, miranti a raggiungere il pareggio economico grazie all'esportazione di tecnologia. Ma il porsi nella logica concorrenziale degli Stati anche produttori non ha giovato al Regno Unito, che ha visto considerare superati in brevissimo tempo « Magnox » ed AGR (questi ultimi prima ancora di entrare in produzione).

In breve tempo il Regno Unito ha perso il suo predominio quantitativo. Nel 1965 la potenza elettronucleare installata negli Stati Uniti era un terzo di quella britannica; già nel 1970 gli Stati Uniti erano primi, sia come installazioni che come produzione annua. Dati i numerosi anni durante i quali il Regno Unito era stato il solo produttore, ancora nel 1972 il CEGB poteva affermare che, di tutta l'energia elettronucleare prodotta fino ad allora nel mondo, oltre metà era stata fornita in Gran Bretagna; ma tale primato veniva perduto nell'estate di quell'anno. Infine, col gennaio 1974, gli Stati Uniti diventavano il paese che, dalle origini, aveva prodotto la maggior quantità di elettricità per via nucleare. In base ai programmi attualmente fissati, entro breve tempo il Regno Unito dovrebbe cedere alla Germania Occidentale e alla Francia il primato dell'Europa occidentale.

Può sembrare che il Regno Unito abbia fallito il suo pro-

gramma, ma a medio termine la situazione appare migliore, almeno rispetto a quella degli altri Stati europei. Non si possono infatti, fare previsioni su quella che sarà la situazione quando si potranno controllare le reazioni di fusione, cioè verso i primi decenni del prossimo secolo, secondo le vedute attuali. A quel punto dovrebbe cessare la dipendenza dall'estero per le materie prime, e primeggerà chi potrà impegnare maggiori investimenti nella ricerca.

La fase intermedia sarà coperta dai reattori veloci, ed è in questo periodo che il Regno Unito potrebbe raccogliere il frutto di quanto ha seminato. Infatti, grazie ai numerosi anni di funzionamento dei reattori termici, può disporre di riserve di plutonio in quantità molto superiori a quelle di ogni altro Stato europeo (Unione Sovietica esclusa). Ne dovrebbe avere oltre 30 t, producendone al ritmo di 3 t all'anno. La sua scorta è, quindi, già equivalente ad oltre 50 miliardi di t di carbone, giustificando l'asserzione del Presidente dell'UKAEA: « *There is no long term energy shortage* » (17). Si potrebbe fin d'ora varare un programma di circa 12.000 MWe « veloci », più altri 1000 ogni anno.

Nessun altro Stato europeo può fare altrettanto, il che significa che molti programmi nazionali non hanno possibilità di esser realizzati. Infatti, la produzione di plutonio negli Stati Uniti è tanto inferiore alle richieste che l'Europa si appresta a fare, che il Dipartimento di Stato ha notificato che ridurrà fortemente anche i quantitativi di plutonio che già si era impegnato a fornire. Attualmente una piccola parte del plutonio necessario viene acquistata nell'Unione Sovietica; l'alternativa è, quindi, quella di ridurre i programmi nucleari nazionali o di pianificare una crescente dipendenza energetica dai sovietici. Nell'odierno assetto internazionale la seconda ipotesi non sembra realistica. Permanendo gli attuali equilibri, il Regno Unito sembra aver ottenuto la posizione di Stato meno dipendente dall'estero, nel settore atomico, di tutto il mondo occidentale.

I grandi programmi elettronucleari hanno un'importanza ambientale molto notevole, anche se probabilmente, nel considerarla,

(17) J. HILL, *The energy situation and the role of nuclear power*, conferenza tenuta il 17 ottobre 1974 al Paisley College of Technology a Paisley (Renfrew).

i fattori emotivi portano a dilatare troppo i problemi. Ad un esame obiettivo, il maggiore danno derivante all'ambiente dalle centrali nucleari è l'inquinamento termico (18). Una centrale da 1000 MWe in ogni secondo preleva dall'ambiente 50 m³ d'acqua, e ve li riversa a temperatura di circa 10° superiore. Questo stimola una maggiore domanda di ossigeno disciolto. D'altro canto, per ogni grado di aumento della temperatura dell'acqua un 2% dell'ossigeno disciolto sfugge nell'atmosfera. Il rischio di « asfissiare » un corso d'acqua è elevatissimo. L'ubicazione sulle coste marittime è la preferibile, per quel che si conosce oggi; sotto questo aspetto le centrali in Gran Bretagna sono quindi distribuite secondo la localizzazione ottimale. Un'indagine svolta dal CEGB non ha finora rilevato mutamenti sensibili negli ecosistemi circostanti le centrali.

Un aspetto allarmante è costituito da quel po' di radioattività che, inevitabilmente, sfugge agli schermi, e alle scorie radioattive. In natura esiste una radioattività che si può dire di fondo, dovuta a giacimenti radioattivi, raggi cosmici, ecc. Secondo tutte le misurazioni compiute, finora la radioattività « artificiale » è sempre una frazione minima di quella naturale. Secondo i calcoli probabilistici (19), nei pressi di una centrale atomica l'eventualità di esser colpiti da radiazioni mortali non è maggiore rispetto a quella di esser colpiti da un fulmine (e trascurabile rispetto al rischio di esser investiti da un'automobile).

Quanto alle scorie, queste vengono vetrificate (in un impasto

(18) Secondo J. Belle, già Ministro per l'Ambiente in Francia, « Une centrale nucléaire est d'abord une énorme usine à rechauffer le milieu environnant » (« Le Monde », Parigi, 27 giugno 1974). Un ciclo termico con resa del 30% apparentemente riversa nell'ambiente un 10% di calore in più rispetto ad uno con resa del 40%, ma il calcolo va impostato diversamente. Per ottenere 100 unità termiche da un ciclo con resa 40% se ne devono produrre 250, disperdendone così 150; in un ciclo con resa del 30% se ne devono produrre 330, disperdendone pertanto 230, cioè un 53% in più.

(19) B. A. J. Lister, direttore del settore ambientale del Centro di Ricerche Atomiche di Harwell, ha esposto una serie di dati tranquillizzanti in una conferenza tenuta nel febbraio 1975 a Oxford (v. *Atom*, n. 223, maggio 1975, pp. 68-75). Interessante, geograficamente, l'osservazione che la popolazione della Gran Bretagna è innegabilmente più esposta a pericoli derivanti dalla radioattività oggi che nel 1950. Ma sul complesso della popolazione il risultato sarebbe stato uguale se alcune decine di migliaia di persone non fossero emigrate dal Galles all'Inghilterra, data la maggior radioattività naturale che si riscontra nei massicci gallesi.

di borosilicati) e poste in contenitori doppi di acciaio, ultrasigillati ed a perfetta tenuta. Il vero problema è dove conservare questi per migliaia di anni, non come confezionarli. Anche in tal caso, però, le probabilità che capiti qualcosa che provochi la rottura di un cassone sono irrilevanti.

Un aspetto da non sottovalutare è costituito dalla salinità dell'acqua di raffreddamento, che contiene certamente potassio e probabilmente tracce di stronzio, cesio, rubidio ecc., tutti elementi suscettibili di trasformarsi, per irradiazione, in isotopi radioattivi. Ormai è universalmente noto che un elemento in tracce nell'acqua si concentra sempre più nei vari gradini dell'ecosistema, al più alto dei quali si trova l'uomo. Piuttosto allarmante è, quindi, il fatto che a Hunterston, sfruttando l'aumento di temperatura delle acque, è stato realizzato un allevamento di sogliole di Dover, abituate ad un mare più caldo.

Ma l'evento più temuto dall'opinione pubblica, quel che tuttora condiziona l'installazione delle centrali elettronucleari, è la catastrofica esplosione di una centrale, magari provocata da un incidente nella parte tradizionale. Decenni di funzionamento hanno dato una discreta dimostrazione della sicurezza di queste centrali, ma occorre ricordare che tale sicurezza è un portato delle numerosissime precauzioni che si usano. Finché non verrà meno tale sorveglianza sulle norme di costruzione e funzionamento, non c'è veramente motivo di temere. Le probabilità di esser coinvolti in un incidente mortale causato da un incidente in una centrale elettronucleare sono pari a quelle di morire investiti da un meteorite.

Quel che invece va ricordato è che il vero pericolo cui tutti sono esposti è quello di un incidente con involontaria esplosione atomica di qualche arma. Nelle centrali, il combustibile è misto con un volume quattro volte superiore di moderatore, il che non avviene nelle armi. Se il pericolo è già notevole nel caso delle installazioni missilistiche a terra, dove si scelgono, nei limiti del possibile, zone antisismiche ed isolate, che dire delle migliaia di masse subcritiche che in ogni secondo sono portate per il mondo?

Nel Regno Unito il trasporto del plutonio avviene secondo le direttive del Segretario di Stato per l'Ambiente, e si è già

provveduto a che le distanze tra laboratori di produzione e centrali siano minime. Si tratta di un ulteriore motivo di localizzazione costiera per le installazioni atomiche per gli Stati importatori. Inoltre una centrale può esser alimentata con un solo carico all'anno. Di contro sta il fatto che aerei e sottomarini carichi di testate atomiche costruite per esplodere viaggiano in condizioni di assai minore sicurezza.

Si è detto che con una trentina di tonnellate di plutonio il Regno Unito è in grado di varare un serio programma di reattori veloci: il plutonio già pronto nelle armi nucleari nel mondo supera le 1500 t. In termini probabilistici il pericolo di esser coinvolti in un incidente derivante dalle armi atomiche è migliaia di volte superiore a quello derivante dalle centrali. E non vi sarebbe crisi energetica se le cariche delle armi venissero destinate a scopi pacifici, e questo grazie a conoscenze tecniche ed esperienze pionieristiche dovute in gran parte al Regno Unito.

CENNO BIBLIOGRAFICO

Una bibliografia sull'argomento è impossibile da realizzare, dato l'elevatissimo numero di articoli che quotidianamente vengono pubblicati in merito. Limitandosi alla stampa nel Regno Unito, va segnalato il « Financial Times », soprattutto per la tempestività con cui segue le vicende elettronucleari nazionali (ad opera di D. Fishlock).

Il Dipartimento dell'Energia e gli enti elettrici in Inghilterra, Scozia meridionale e Scozia settentrionale (CEGB, SSEB e NSHB) pubblicano bollettini e annuari statistici indispensabili per i dati quantitativi; inoltre organizzano conferenze e dibattiti, di cui pubblicano i resoconti. Alcune riviste periodiche interamente dedicate a questi problemi sono « Atom » (pubblicata dall'UKAEA), « British Nuclear Forum » e « Nuclear Engineering »; va inoltre consultata, pur se non interamente dedicata all'energia nucleare, la « Electrical Review ».

Congressi e simposi sull'argomento sono di frequente organizzati da numerosi organismi internazionali (ONU, OCSE, EURATOM, FORATOM, CEE, FAO, ecc.) o da associazioni nazionali di fisici, ingegneri o di altre categorie di tecnici.

Per il ricercatore italiano è basilare la consultazione del « Notiziario CNEN », nel quale si segnala la serie di articoli dedicati al Regno Unito, ad opera di P. Fiorentini.

Quel che segue è un elenco dei lavori che ho maggiormente utilizzato e che non figurano compresi nelle pubblicazioni sopra indicate e in quelle citate.

- BEAVER S. H., *Mineral Resources and Power*, cap. 15 (pp. 280-296) del volume *The British Isles, A Systematic Geography*, Nelson, Londra, 1964, pp. 452.
- CHAPMAN J. D., *A Geography of Energy: an emerging field of study*, in « The Canadian Geogr. », Toronto, 1961, I, pp. 10-15.
- CHARDONNET J., *Les sources d'énergie*, Librairie de Médicis, Parigi, 1962, pp. 521.
- DELACROIX P., *Énergie nucléaire et environnement*, in « L'Inform. Géogr. », Parigi, 1974, n. 4, pp. 157-166.
- ESTALL R. C., *The problem of Power in the United Kingdom*, in « Econ. Geogr. », Worcester, 1958, pp. 80-89.
- GEORGE P., *Géographie de l'énergie*, Parigi, Génin, 1950, pp. 469.
- HOFFMAN G. W., *The role of nuclear power in Europe's future energy balance*, in « Ann. of the Ass. of American Geogr. », Washington, 1957, I, pp. 15-40.
- LEBRETON P., *Électronucléaire et environnement dans la vallée du Rhône*, in « Rev. de Géogr. de Lyon », Lione, 1975, I, pp. 19-34.
- MANNERS G., *1970's power game*, in « Geogr. Magazine », Londra, 1970, pp. 442-449.
- MANNERS G., *The geography of energy*, Londra, Hutchison, 1971, pp. 222.
- MARTELLI G., *The siting of atomic plants*, in « Geogr. Magazine », Londra, 1957, pp. 566-574.
- MORI A., *La geografia dell'energia nucleare*, in « Cultura e Scuola », Roma, n. 6, novembre 1962 - gennaio 1963, pp. 190-199.
- MOUNFIELD P. R., *Nuclear Power in the United Kingdom: a new phase*, in « Geogr. », Sheffield, 1967, pp. 310-316.
- Nuclear Power and its development in Britain*, in « Nature », Londra, 1957, pp. 857-860.
- PISTOLESE F., *Energia, economia, ambiente*, Bari, De Donato, 1974, pp. 217.
- Power resources of the future in Britain*, in « Nature », Londra, pp. 1091-1093.
- RAWSTROM E. M., *Changes in the geography of electricity production in Great Britain*, in « Geogr. », Sheffield, 1955, pp. 92-97.
- RAWSTROM E. M., *Electric power in Great Britain*, *ibid.*, 1964, pp. 304-309.

THE ATOMIC PLANTS IN THE U.K. - THEIR GEOGRAPHICAL AND ECONOMIC ASPECTS (*SUMMARY*). — The U.K. was, in 1955, the first country to consider a full scale project about the use of atomic energy for peace purposes (Magnarox Program). In 1965 the U.K. came out with a new program (AGR), followed by a third one in 1974.

We are here mentioning the basic factors concerning the atomic plants siting, which are rather different from the ones affecting traditional fuel plants siting. The running cost of atomic plants is so low that electricity produced by nuclear means is the cheapest in the U.K. This was true in 1973, and is much more so after the world energy crisis.

In the next decades, before the production of electricity by means of nuclear fusion, the U.K. could possibly be rewarded of the expensive and sophisticated researches carried on, as it is now the only country in Western Europe having a good stock of plutonium, bound to be used only for peace purposes.