

V-1. FINALITÀ DEI REATTORI NUCLEARI

V-1.1. Stadi di sviluppo e affermazione

Tra le varie classificazioni dei reattori esaminate nel paragrafo III-4 è interessante richiamare quella che assume come parametro discriminante la finalità di impiego degli impianti. Sotto questo profilo è possibile distinguere tra «reattori di ricerca» destinati a scopi di studio e ricerca vuoi per lo sviluppo di speciali concetti di reattore, vuoi per altri scopi del tutto particolari (v. oltre), «reattori di prova», il cui fine è dimostrare la realizzabilità fisica e la validità di determinati tipi di impianto prima di un loro impiego su larga scala, e «reattori di potenza», destinati a scopi industriali specifici, quali la produzione di energia elettrica, quella di calore industriale, quella di vapore o acqua calda per usi speciali, come la dissalazione dell'acqua di mare o il teleriscaldamento urbano. Talvolta i suddetti scopi possono essere combinati in uno stesso impianto (reattori cogeneratori).

I reattori di potenza di qualsiasi tipo prima di poter essere realizzati su scala industriale devono essere preceduti da realizzazioni di taglia minore, che dimostrino prima la fattibilità, poi la validità industriale e la competitività economica. Sotto questo profilo, il primo stadio dell' «iter» ideale per la realizzazione di un certo concetto di reattore è la costruzione dell' «insieme critico», un particolare tipo di reattore di ricerca destinato a studi di fisica del reattore ed eventualmente di tecnologia. Lo scopo è dimostrare la validità concettuale di quel certo tipo di reattori. Superata questa prova ed appurata la mancanza di eventuali gravi ostacoli inibitori per la realizzazione dell'impianto (incompatibilità di materiali, ecc.), viene realizzato un reattore di piccola potenza, ma con le caratteristiche nucleari¹ di quello che dovrà essere l'impianto di potenza; tale reattore viene definito «sperimentale». Un ulteriore passo consiste nella realizzazione di un reattore «prototipo», in tutto identico al futuro impianto di tipo industriale, ma la cui potenza è - generalmente - ridotta a valori del 10÷20 % della potenza di quest'ultimo. Finalmente, si ha la costruzione di un esem-

¹ Stesso reticolo, stesso materiale combustibile e strutturale, stesso rapporto combustibile/moderatore. ecc.

plare a piena scala, “First Of A Kind” (FOAK), definito «dimostrativo», le cui caratteristiche di esercizio costituiranno la base per una penetrazione commerciale di siffatto tipo di reattore in una filiera.

In altri termini la progressione delineata può essere sintetizzata da questa scala:

1. “Facility” a potenza zero (per studi della fisica di base);
2. Reattore a bassa potenza (per esperienze tecnologiche di base);
3. “Dimostratore” (per studio del funzionamento d’insieme e della tecnologia);
4. Prototipo (reattore a potenza intermedia, in configurazione già ottimizzata);
5. FOAK (prima realizzazione del reattore di filiera).

Nuovi tipi di reattori si dividono, usualmente, nelle due tipologie di reattori evolutivi e reattori innovativi a seconda che possano configurarsi come evoluzione di concetti provati o che abbiano caratteristiche marcatamente nuove. Questi secondi, generalmente, necessitano, prima della loro affermazione, di prove su prototipi.

Sorvolando sulle caratteristiche e i particolari di impianto, più ampiamente trattati nel Cap. IV, esaminiamo, sia pur superficialmente, alcuni tipi particolari di reattori, destinati alla ricerca o di particolare interesse nella evoluzione storica delle «pile nucleari».

V-1.2. Reattori di ricerca

Sebbene la produzione di energia rappresenti lo scopo primario nella progettazione e realizzazione dei reattori, esistono numerosi impianti, in diverse parti del mondo, destinati alla ricerca o ad altri scopi sperimentali. In tali impianti il reattore è usato fondamentalmente come sorgente di neutroni. Nel 2007 esistevano nel mondo 129 reattori di ricerca funzionanti con uranio altamente arricchito (HEU, High Enriched Uranium, 93%) impiegati in un programma di riconversione per abbassare l’arricchimento al di sotto del 20%, limite fissato da una convenzione internazionale (INFCE) al di là del quale l’uranio è considerato come proliferante.

Le principali attività associate a reattori di questo tipo hanno per oggetto: a) la tecnologia del reattore, soprattutto per ciò che afferisce

al comportamento, sotto irraggiamento, dei diversi materiali e componenti dei reattori; b) la ricerca di base nella fisica e in quelle scienze biologiche in cui siano studiati gli effetti dei neutroni; c) la conduzione di esperimenti per lo più per scopi didattici e di addestramento.

Poiché i reattori di questo tipo vanno visti come sorgenti neutroniche, è giustificato l'uso di classificarli in base all'intensità del loro flusso neutronico²: si distingueranno, così, reattori ad alto, a medio e a basso flusso.

È uso corrente chiamare «reattori per prove tecnologiche» (Engineering Test Reactor) i reattori con flussi di neutroni veloci dell'ordine di 10^{15} n/cm²s o maggiori; «reattori per prova materiali» (Material Test Reactor) quelli con flussi veloci dell'ordine di 10^{14} n/cm²s e «reattori per addestramento del personale» (Training Reactor) quelli con flussi inferiori. Naturalmente un solo reattore può anche servire a più scopi.

Un altro parametro importante è il volume disponibile per i provini che devono essere irraggiati. Di norma sono disponibili diversi canali sia nel «core» che nel riflettore, per avere una gamma di scelta sulla energia ed intensità dei neutroni incidenti. Non tutti gli esperimenti richiedono il flusso massimo: è importante che le dimensioni e la disposizione degli spazi per l'irraggiamento siano adeguate all'uso richiesto. Reattori ad alto flusso sono talvolta impiegati per la prova di intere configurazioni elemento di combustibile-refrigerante e possono richiedere un circuito di refrigerazione dedicato.

In questo caso sono richiesti canali di dimensioni considerevoli nelle zone in cui il flusso è più alto.

I reattori ad alto flusso, con flussi dell'ordine dei 10^{15} n/cm²s, sono di interesse per un notevole spettro di applicazioni. Possono essere utilizzati per studiare il danno da radiazione su vari materiali in uso o destinati ai reattori, per analizzare il comportamento di diversi sistemi combustibile-refrigerante sottoposti a condizioni di irraggiamento molto gravose, oppure per la produzione di radioisotopi artificiali, in particolare gli isotopi di elementi transplutonici la cui formazione (partendo da isotopi del plutonio) richiede flussi

² Normalmente ci si riferisce al flusso mediato nel nocciolo. Tali reattori sono anche caratterizzati dalla sigla ZPR (Zero Power Reactor).

termici assai elevati, per consentire delle sequenze di cattura neutronica e decadimento β assai rapide, soprattutto negli stati intermedi che sono generalmente molto instabili per decadimento radioattivo o fissione spontanea. Sorgenti piuttosto intense di neutroni sono anche necessarie in diversi esperimenti di fisica. Appartengono ai reattori di ricerca ad alto flusso i reattori prova materiali MTR, i reattori prova combustibili e molti dei reattori per la produzione di radioisotopi; per questi impianti si veda più avanti.

Appartengono ai reattori ad alto flusso, ancora, i reattori pulsati, progettati per produrre flussi neutronici estremamente intensi per tempi assai brevi. Non si hanno, in tal modo, problemi per lo smaltimento del calore prodotto, dato il basso contenuto energetico associato ai singoli picchi. Un impianto di questo tipo, il TREAT, fu costruito per studiare il rischio di fusione degli elementi di combustibile ed altri componenti alle temperature che potrebbero sorgere in seguito ad improvvise escursioni di reattività. La durata degli impulsi di neutroni era di 50 ms.

I reattori di ricerca a flusso medio ($\sim 10^{13}$ n/cm²s) sono costruiti in numerosi esemplari e vi vengono condotte molteplici prove di irraggiamento. Mentre i primi impianti facevano uso di uranio naturale, successivamente sono stati costruiti reattori con combustibile fortemente arricchito e raffreddati ad acqua.

Questi ultimi si distinguono in due categorie: se la potenza non supera il MW, il «core» è sospeso vicino al fondo di una piscina profonda diversi metri la cui acqua funge da moderatore, riflettore, refrigerante e schermo superiore, e si ha un impianto a «piscina». Se la potenza supera i 5 MW circa, risulta conveniente ricorrere ad uno schermo solido ed il «core» è, così, immerso in una tanca e raffreddato con acqua in circolazione forzata (configurazione a tanca). In entrambi i casi il «core» è assai compatto e consiste di piastre a «sandwich» di uranio arricchito, in lega con alluminio, le quali sono curve o piane ed opportunamente accostate tra loro. Al posto dell'alluminio può aversi zirconio. Tra i reattori di ricerca a medio flusso da ricordare sono quelli tipo TRIGA: un impianto di questo tipo (RC 1) è stato costruito al centro Casaccia dell'ENEA, ha una potenza di 1 MW ed un flusso massimo di $1,12 \cdot 10^{13}$ n/cm² s.

I reattori di ricerca a basso flusso (da 10^6 a 10^{12} n/cm²s) sono in genere utilizzati per scopi didattici, di addestramento, ma anche per la ricerca. Nel caso di spettro termico, la configurazione è per lo più quella a piscina.

A titolo di esempio, ricordiamo un particolare reattore di ricerca progettato dall'Ing. Bruno Musso e costruito nel Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA: il TAPIRO (fig. V-1.1), reattore sorgente

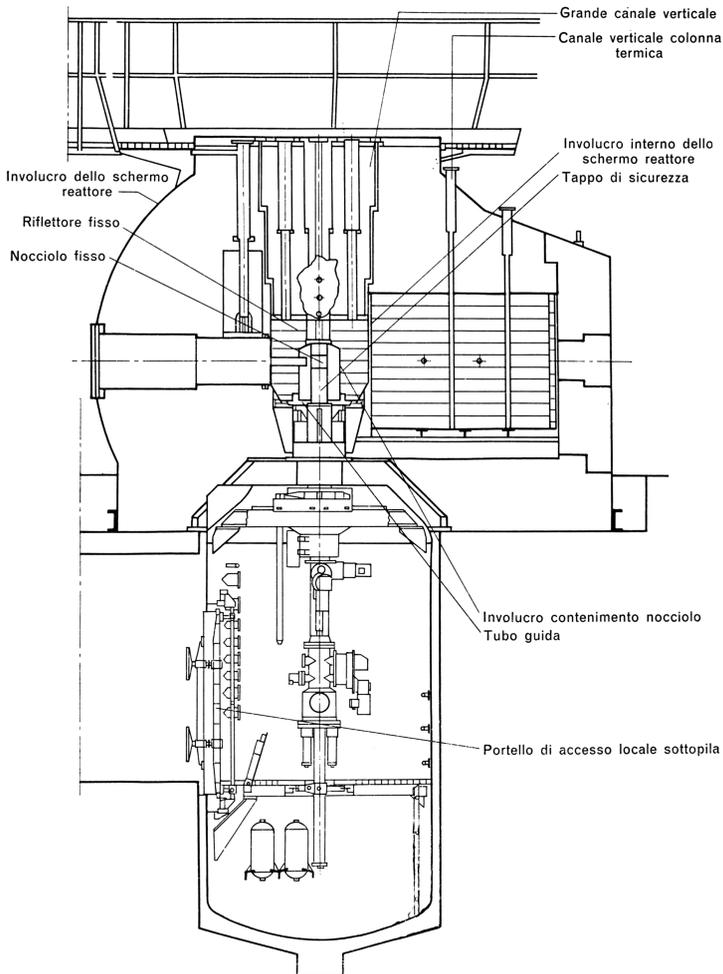


Fig. V-1.1 Sezione verticale del reattore veloce di ricerca TAPIRO dell'ENEA.

veloce, refrigerato a elio, destinato ad alimentare esperienze di neutronica connesse con lo studio dei reattori veloci (sezioni d'urto, ecc.), esperienze nel campo dello schermaggio, oltre che attività nel campo della biologia e della genetica vegetale (5 kW; $4 \cdot 10^{12}$ n/cm²s). Ad oggi (2010) è l'unico reattore veloce in funzione presente nell'intera Unione Europea a 27 Paesi.

Reattori «prova materiali».

Sono così definiti quegli impianti di ricerca, di norma ad alto flusso, costruiti per esperienze di irraggiamento su materiali in genere destinati all'impiego in campo nucleare. Il primo reattore prova materiali (MTR) fu costruito negli Stati Uniti alla National Reactor Testing Station, con il precipuo scopo di studiare gli effetti delle radiazioni nucleari su materiali richiesti per la costruzione dei reattori. Gli elementi di combustibile constano di piastre leggermente curve di una lega di uranio (20% in peso) fortemente arricchito ed alluminio, dotate di una sottile incamicatura d'alluminio su entrambi i lati (struttura a «sandwich»).

Il reattore MTR ha operato ad una potenza di 40 MW termici e, per le ridotte dimensioni del nocciolo, la densità di potenza ed il flusso neutronico erano assai elevati.

Il flusso medio era di $3 \cdot 10^{14}$ n/cm²s, mentre quello massimo raggiungeva i $4,5 \cdot 10^{14}$ n/cm² s. Erano predisposti numerosi spazi da destinare agli esperimenti: alcuni penetravano dentro i riflettori fino a raggiungere il «core», mentre altri si estendevano solo in una zona di grafite. Lo schermo era realizzato con calcestruzzo baritico che in un lato era attraversato da una «colonna termica» di blocchi di grafite, il cui scopo era fornire neutroni a bassa energia (termici) per fini sperimentali.

Un nuovo reattore molto interessante che la Francia propone come strumento di ricerca e sviluppo per l'intera Unione Europea ai fini dei nuovi reattori di potenza dell'iniziativa internazionale "Generation Fourth" è chiamato con il nome dello scienziato Jules Horowitz. In esso il flusso neutronico è doppio rispetto a quelli degli MTR europei, ormai giunti a fine vita. Ha una potenza di 100 MWt e può ospitare una ventina di circuiti sperimentali attorno a un nocciolo refrigerato e moderato ad acqua, alto 600 mm, con elementi di combustibile costituiti da piastre circolari concentriche di U e 8% di

Mo, ad elevato arricchimento, e circondato da un riflettore di berillio che alloggia i circuiti di prova (v. Fig. V-1.2).

Reattori «prova-combustibile».

Sono impianti di piccola potenza progettati appositamente per l'esecuzione di studi ed esperienze su elementi di combustibile. Una delle realizzazioni più importanti in questo settore sarebbe stato il reattore PEC (Prova Elementi Combustibile) dell'ENEA, sulle rive del lago Brasimone (Fig. V-1.3).

Si trattava di un reattore veloce da circa 120 MW_t per la prova di elementi di combustibile refrigerati a sodio, e si presentava come uno strumento insostituibile per prove integrali ai limiti di rottura, le sole che permettano di stabilire effettivi margini di sicurezza per elementi di combustibile delle centrali veloci. Nel PEC sarebbe stato inoltre possibile effettuare prove in condizioni di transitorio controllato di portata su elementi altamente strumentati, simulando scenari incidentali.

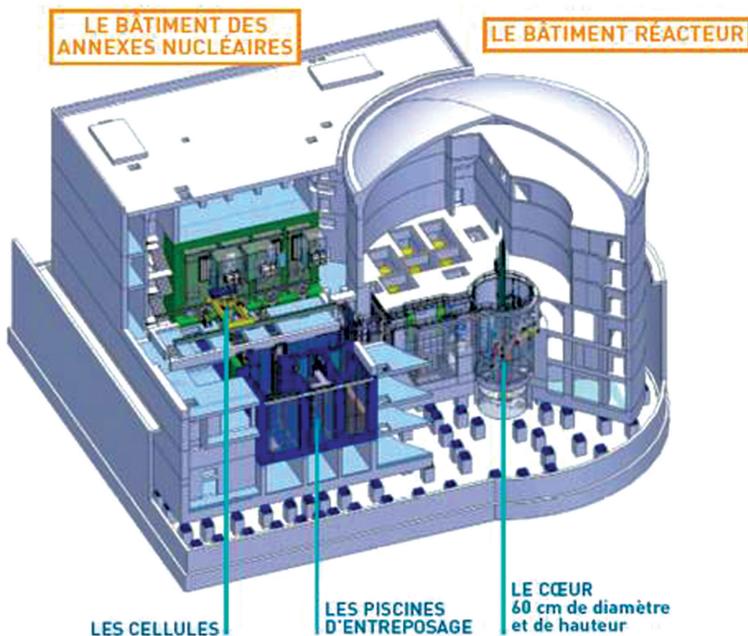


Fig. V-1.2 Spaccato del reattore Jules Horowitz (CEA).

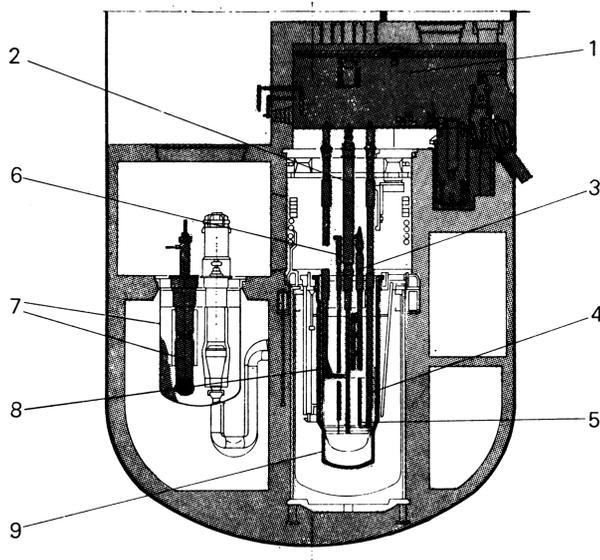


Fig. V-1.3 Schema del reattore sperimentale italiano PEC dell'ENEA. 1) Cella di trasferimento e sue attrezzature; 2) Canale di prova; 3) Macchina carico e scarico; 4) Canale di transito; 5) Elemento di combustibile; 6) Meccanismo azionamento barre di controllo; 7) Vasca componenti e scambiatore intermedio; 8) Dispositivo bloccaggio nocciolo; 9) Tanca e strutture interne.

Esperienze di questo tipo per saggiare le condizioni di degrado di elementi di combustibile per reattori PWR sono state condotte nell'ambito del progetto PHEBUS-CSD (Coeurs Sévèrement Déggradés) nel reattore sperimentale francese PHEBUS del centro di Cadarache. In tali esperienze si è simulata la perdita di refrigerazione con incidenti tipo LOCA (v. Cap. X), raggiungendo temperature massime di 2800 K, in un apposito circuito inserito nel reattore e dotato di adeguati dispositivi di sicurezza per non danneggiare il reattore stesso. Le condizioni di degrado verificatesi nelle barre di combustibile sono state poi analizzate in celle calde e confrontate con i risultati ottenuti mediante appositi codici di calcolo. Questi confronti hanno consentito di meglio comprendere l'evoluzione dei fenomeni fisici e, successivamente, di modificare e validare i codici di calcolo da impiegare nelle analisi di sicurezza.

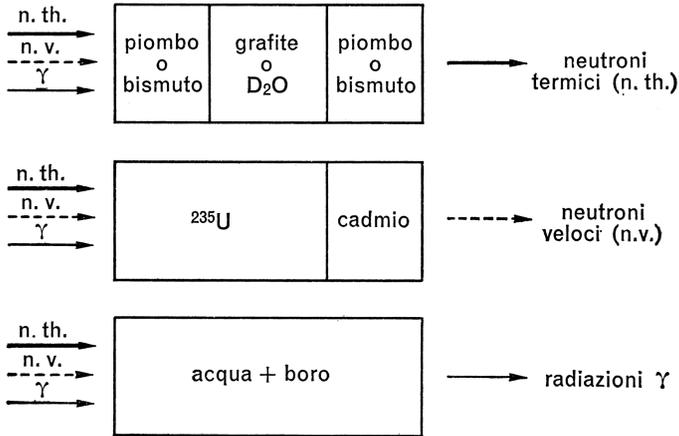


Fig. V-1.4 Tre sistemi possibili per selezionare le principali sorgenti di radiazioni in un reattore.

Reattori per la produzione di radioisotopi

Le applicazioni dei radioisotopi sono vastissime ed investono svariati settori delle attività umane. Sorgenti radioattive sono richieste dall'industria alimentare per la conservazione degli alimenti, dall'industria petrolifera per la esplorazione e perforazione dei pozzi nonché per i processi di raffinazione, lavorazione ed analisi dei prodotti, dall'industria tessile per il controllo delle lavorazioni mediante marcatura e lo studio della crescita delle fibre naturali, dall'industria meccanica e metallurgica per misure di livello, di spessore, di densità, nonché per controlli di usura, dall'idrologia, dalla sedimentologia, dalla geologia applicata, come noto dalla medicina (diagnostica e radioterapia) e dalla biologia, infine dall'industria dei piccoli e medi generatori di potenza per applicazioni spaziali. Quelle citate sono alcune delle innumerevoli applicazioni dei radioisotopi il cui mercato è in continua espansione.

Gli atomi instabili artificiali sono prodotti facendo interagire opportuni isotopi stabili o instabili con apposite particelle.

I reattori nucleari, nei quali vengono generati intensi flussi di radiazioni di vario tipo (soprattutto neutroni veloci, neutroni ter-

mici, raggi γ), rappresentano la sorgente ideale per la produzione di radioisotopi.

Attualmente, oltre duemila radionuclidi, prodotti per irraggiamento neutronico di opportuni materiali disposti nell'interno dei reattori nucleari, vengono impiegati correntemente in diversi settori industriali.

Vengono utilizzati, allo scopo, sia reattori di potenza, nei quali i materiali da irraggiare sono inseriti, generalmente sotto forma di barre, in appositi canali entro il nocciolo, sia reattori di ricerca, in certi casi costruiti all'uopo. In generale, si può affermare che il reattore ideale per la produzione di radioisotopi dovrebbe possedere le seguenti caratteristiche: a) elevato flusso neutronico; b) elevato fattore di utilizzazione neutronica; c) disponibilità di spazi adatti per l'irraggiamento dei materiali; d) facilità di carico e scarico del materiale da irraggiare.

Per la maggior parte dei radioisotopi prodotti nei reattori il volume richiesto per lo spazio di irradiazione non è elevato, mentre il requisito più importante è un elevato flusso neutronico in modo da realizzare la massima attività specifica possibile. Ancora, estendere il tempo di irradiazione al di là di qualche vita media del radioisotopo desiderato non reca nessun vantaggio apprezzabile, per cui può essere necessario inserire e rimuovere materiali-bersaglio ad intervalli brevi.

Si comprende come le condizioni più idonee per la produzione di questi radioisotopi possono essere più facilmente trovate in reattori di ricerca o prova materiali piuttosto che in impianti di potenza. È solo per la produzione di radioisotopi che richiedono l'irraggiamento di campioni di volume rilevante per periodi lunghi e in flussi moderati che appaiono più adatti i reattori di potenza. Ad es. per il cobalto 60 e il carbonio 14, tra i radioisotopi più importanti per vastità di applicazioni, la produzione nelle centrali di potenza è indiscutibilmente più idonea.

Notevoli quantità di materiali radioattivi si ottengono pure, come sottoprodotti, dai reattori di potenza: sono in fase di studio ed applicazione processi di separazione di prodotti di fissione quali lo ^{90}Sr , il ^{137}Cs , il ^{144}Ce , il ^{147}Pm .

Altri isotopi impiegati industrialmente sono lo ^{131}I , l' ^{198}Au , il ^{32}P , l' ^{192}Ir , il ^{51}Cr , lo ^{125}I , l' ^{197}Hg , l' ^{203}Hg , l' ^3H , il ^{170}Tm , il ^{242}Cm , il ^{210}Po .

Materiali radioattivi sono oggi utilizzati anche per produrre oggetti di uso comune come cosmetici, prodotti per capelli, solu-

zioni per rilevatori di fumo, fotocopiatrici, ecc. Più in generale, con riferimento agli impieghi delle radiazioni, è noto che la decomposizione di generi alimentari consegue all'attività di batteri, lieviti e muffe spesso già presenti nel cibo stesso. È scientificamente provato che irradiando i prodotti alimentari prima della vendita si previene la riproduzione di microorganismi patogeni, riducendo notevolmente la decomposizione del cibo senza il minimo danno per la salute.

Nel controllo dei parassiti in agricoltura è nota la tecnica dell'«insetto sterile» (SIT). Nel settore sanitario radionuclidi molto richiesti sono lo ^{124}Xe , lo ^{125}I , il ^{99}Mo ed il suo prodotto di decadimento $^{99\text{m}}\text{Tc}$, il più usato nel mondo (attualmente 30 milioni di applicazioni all'anno). Tali radionuclidi sono prodotti in reattori di ricerca e persino utilizzando l'impianto URENCO di arricchimento a centrifughe di Almelo in Olanda, che attualmente (2011) ha più di 1.000 addetti.

Va infine ricordata, nei reattori, la produzione dei radioisotopi transuranici come il ^{240}Pu , il ^{242}Pu , o il Cf, di prevalente interesse come sorgenti per applicazioni speciali.

V-1.3. Produzione di calore industriale

È stato visto, nel Capitolo I, che tra gli impieghi industriali nei quali l'energia nucleare risulta competitiva è la produzione di calore ad alta o bassa temperatura.

In un'epoca in cui i problemi dell'inquinamento vanno assumendo una dimensione sempre più rilevante, specie nelle zone ad alta concentrazione di attività industriali, l'utilizzazione del calore «scaricato» a media temperatura sotto forma di vapore o ceduto mediante scambiatori ad un fluido opportuno per scopi di riscaldamento urbano o produzione di acqua dissalata appare sempre più come un obiettivo da perseguirsi, anche per elevare i rendimenti globali.

L'utilizzazione di calore nucleare per scopi industriali può aversi o con impianti a più scopi, destinati ad esempio alla produzione di energia elettrica e di vapore a bassa temperatura, o con impianti costruiti appositamente quali sorgenti di calore industriale. Come

esempio di impianto pluriscopo citiamo una realizzazione di avanguardia, il complesso nucleare di Shevchenko, sulle rive del Mar Caspio, dotato di un reattore veloce raffreddato a sodio (BN-350) da 1000 MWt. Il BN-350 è stato capace di produrre contemporaneamente 150 MW di potenza elettrica e 100.000 t/giorno di acqua dissalata, indispensabile per la vita e la economia della città di Shevchenko e dell'area limitrofa, ricca di giacimenti di petrolio, di gas e minerali diversi, ma priva di acqua dolce.

Negli impianti pluriscopo può disporsi l'interruzione dell'espansione del vapore alle pressioni e temperature richieste dal processo industriale: il vapore, scaricato dalla turbina elettromotrice, è convogliato nella rete di utilizzazione (impianti a contropressione); in alternativa, possono essere utilizzati due circuiti totalmente distinti. In questo caso il circuito per la produzione elettrica utilizza il vapore nella prima fase di espansione, e cede calore al secondo circuito per mezzo di appositi scambiatori.

V-2. CONCETTI DIVERSI DI REATTORI NUCLEARI

V-2.1. Reattori a combustibile fluido

Nei cosiddetti «reattori a combustibile fluido» il combustibile è al tempo stesso il mezzo generante il calore di fissione ed il mezzo termovettore circolante nel circuito primario. La maggior parte dell'energia di fissione è generata nel combustibile quando questo attraversa il nocciolo, ove sono raggiunte le condizioni di criticità (vedi schema di fig. V-2.1); ovviamente la cosiddetta «energia di decadimento» dei prodotti radioattivi continua ad essere generata in tutto il circuito primario. Il combustibile fluido cede il suo calore ad un fluido circolante in un circuito intermedio, che deve essere necessariamente interposto fra il circuito primario (ad alto livello di radioattività) ed il circuito terziario con il generatore di vapore ad alta pressione, per prevenire, fra l'altro, introduzioni accidentali di acqua nel circuito primario e nel nocciolo.

Il fluido termovettore del circuito secondario è costituito da un metallo liquido (bismuto, sodio, ecc.). Un tale concetto di reattore