I reattori CANDU ad uranio naturale e ad acqua pesante

Negli Stati Uniti, i reattori nucleari termici di potenza sono per lo più alimentati ad uranio arricchito, e raffreddati con acqua naturale (o acqua leggera). Il sistema canadese "CANDU" impiega invece uranio non arricchito e acqua pesante e offre interessanti alternative. Questi reattori, infatti, pur non essendo di nuovissima concezione (i più antichi appartengono addirittura alla seconda generazione), hanno sempre funzionato molto bene, offrendo ottime prestazioni sia dal punto di vista della produzione di energia che da quello della sicurezza. Inoltre, come spesso evidenziano gli oppositori dell'energia nucleare statunitense, l'uranio nazionale viene inviato agli impianti di arricchimento, ad un ritmo tale che minaccia di far rimanere entro pochi decenni gli USA senza risorse uranifere economicamente sfruttabili. A ciò potrebbero sopperire questi reattori di concezione canadese che tra gli altri pregi hanno proprio quello di sfruttare uranio non arricchito.

Carlo Di Leo

Introduzione

Negli Stati Uniti, l'industria dell'energia nucleare, che ha dominato il mercato mondiale con i reattori ad acqua naturale alimentati da uranio arricchito, si è venuto a trovare in un periodo di incertezza crescente. Nonostante la palese necessità di sorgenti energetiche in alternativa al petrolio, la scarsità di stanziamenti, nonché le obiezioni di ambientalisti sui siti prescelti per l'installazione di centrali nucleari, hanno praticamente frenato lo sviluppo nucleare negli Stati Uniti. Intanto, l'uranio nazionale viene inviato agli impianti di arricchimento, ad un ritmo tale, che minaccia di far rimanere gli Stati Uniti (e non solo) in breve tempo privi di risorse del metallo economicamente sfruttabili. La US Atomic Energy Commission (AEC, Commissione per l'energia atomica) oggi non più in attività, propose a suo tempo, di risolvere il problema di approvvigionamento di uranio, a lungo termine, in parte con lo sviluppo dei reattori veloci autofertilizzanti, che producono più combustibile nucleare di quello che consumano, ed in parte con reattori che non consumino uranio arricchito. Un'idea molto valida, che ha acquistato un certo interesse, è appunto quella relativa reattori CANDU (CANadian Deuterium Uranium) PHWHW, di concezione e fabbricazione canadese, già commercialmente affermati. Si progettano oggi impianti commerciali di diversa taglia, da 200 a 900 MWe. Per questi reattori il fabbisogno di uranio è minore del 20% rispetto ai più tradizionali reattori ad acqua in pressione (PWR) e reattori ad acqua bollente (BWR). Un chilogrammo di uranio, introdotto in un reattore di questo tipo, produce oltre il 20% in più di energia che se fosse avviato ad un impianto di arricchimento e quindi impiegato in un tradizionale reattore ad acqua leggera. Diversi cicli di combustibile possono essere adottati in questo reattore, impiegando come combustibili, in alternativa:

- Uranio naturale;
- Uranio debolmente arricchito;
- Plutonio;
- Torio e plutonio;
- Torio e uranio-235;
- Torio in un ciclo che si autosostiene (near-breeder).

I reattori CANDU, come già detto, impiegano ossido di deuterio (acqua pesante) come moderatore (tanto è vero che sono noti anche con l'appellativo di "reattori ad acqua pesante") e per lo più uranio non arricchito, cioè naturale come combustibile. Questi reattori hanno ormai più di mezzo secolo, ma la storia dei primi 30 anni del loro sviluppo non è molto nota al di fuori del Canada. Il primo prototipo di questo tipo, fu portato in condizioni di criticità nel giugno 1962. Il secondo reattore CANDU, il primo per impieghi commerciali, nel 1967 iniziò ad erogare 200 megawatt elettrici (MWe) alla rete di trasmissione dell'Ontario. Il secondo impianto commerciale, un complesso di quattro reattori a Pickering (Ontario) entrò in funzione nel 1971: con una potenza nominale installata complessiva di 2 160 MWe fu per quasi due anni la più grande centrale nucleare dell'America settentrionale (fino al completamento della centrale Commonwealth Edison Zion 2 nell'Illinois che ha una potenza installata superiore di 40 MWe). Il reattore CANDU è oggi disponibile in modelli "off the shelf" (cioè in unità standardizzate) con capacità che, come già detto, vanno da 200 a 900 MWe. Ormai le centrali nucleari CANDU hanno varcato i confini canadesi, tanto da essere costruite anche in paesi in via di sviluppo come l'Argentina, l'India, il Pakistan e la Corea del Sud.

Sviluppo e funzionamento dei reattori CANDU

In confronto all'attuale stato di incertezza dell'industria nucleare degli Stati Uniti, la storia dei reattori CANDU sembrerebbe quasi tranquilla. In Canada non si sono avute grosse discussioni sul sito ove installare gli impianti elettronucleari. La centrale di Pickering, per esempio, è posta all'interno dell'area di Toronto, che conta 2,5 milioni di abitanti. Benché anche negli impianti CANDU si siano verificati incidenti ed avarie, finora nessun danno o contaminazione radioattiva, si è avuto all'esterno dell'edificio che contiene il reattore né in ormai più di mezzo secolo vi sono state interruzioni nell'erogazione di energia elettrica.

L'impiego dell'uranio naturale come combustibile e dell'acqua pesante come refrigerante e moderatore, è derivato dalla necessità di poter beneficiare di reattori il cui combustibile non ha bisogno di essere arricchito. Le centrali nucleari statunitensi che producono il 20,2%, cioè circa 1/5 dell'energia totale di cui ha bisogno la nazione, funzionano con uranio arricchito in uno dei tre giganteschi impianti a diffusione gassosa che portano il tenore dell'uranio 235 fra l'1 e il 4%. Nell'uranio naturale il tenore di uranio 235 è soltanto dello 0,72%. Per mantenere una reazione nucleare in un reattore alimentato con uranio, naturale o arricchito, è necessario usare un moderatore cioè una sostanza che rallenti i neutroni veloci liberati nella fissione dell'uranio 235, in modo che questi si trovino nelle migliori condizioni per la fissione di altri nuclei di uranio 235. Dalla fissione di un nucleo di uranio 235, si liberano in genere due o tre neutroni (in media 2,5) secondari. Lo scopo da raggiungere nel progetto di un reattore è quello di limitare la perdita di neutroni nei processi parassiti, in modo che ad ogni fissione sopravviva esattamente un solo neutrone destinato a scindere un altro nucleo di uranio 235, mantenendo così una reazione a catena. Il numero dei neutroni sopravvissuti è espresso con il fattore di moltiplicazione K. Quando K<1 la reazione a catena si spegne, quando K>1 la reazione a catena procede esponenzialmente. La maggior parte dei reattori sono equipaggiati con barre di controllo realizzate con materiali che sono forti assorbitori di neutroni, come cadmio, afnio, boro o berillio, che vengono inserite o estratte automaticamente nel nocciolo in modo da mantenere sempre K esattamente uguale a 1. Tutti i nuclei assorbono neutroni in maggiore o minore misura. Il progettista del reattore deve quindi scegliere con cura tutti i componenti, dalle guaine del combustibile ai moderatori, dai fluidi refrigeranti ai materiali strutturali, per evitare la perdita di neutroni. Inoltre, certi prodotti di fissione, come lo xeno 135, hanno una "sezione di cattura parassita" per i neutroni talmente grande che agiscono come "veleni del reattore". Il grande pregio dell'acqua pesante come moderatore è quello una sezione di cattura parassita per i neutroni pari ad appena 1/600 dell'acqua naturale (nei reattori CANDU l'impurità di acqua naturale contenuta nell'acqua pesante, che è solo dello 0,2%, cattura quasi tanti neutroni quanti ne cattura l'intero volume di acqua pesante). Se in un reattore di potenza dove viene usata, come moderatore, acqua naturale, è necessario che il combustibile sia uranio arricchito dell'isotopo 235, allo scopo di aumentare la probabilità che almeno un neutrone per ogni fissione incontri un altro nucleo di uranio 235, prima di essere assorbito o perduto nel reattore, quando come moderatore viene usata acqua pesante, la concentrazione dell'uranio 235 nell'uranio naturale è sufficiente per mantenere la reazione a catena. L'inconveniente principale dell'acqua pesante è il suo elevato costo, inconveniente compensato dal vantaggio che l'uso dell'acqua pesante evita, o almeno riduce la necessità di mantenere i costosi impianti di arricchimento del materiale, oppure (il che è equivalente) di comprare l'uranio arricchito da chi possiede tali impianti. L'intero problema economico connesso con il reattore è, come si può facilmente immaginare, ricco di controversie. Le aziende elettriche, nel fare il confronto tra i sistemi concorrenti, cercano di ridurre tutto ad un unico aspetto: il "costo complessivo" unitario dell'energia (in inglese TUEC, acronimo di Total Unit Energy Cost). Purtroppo è difficile fare confronti fra nazioni diverse a causa di aliquote di interessi del combustibile e di metodi di esercizio molto differenti. Facendo riferimento all'esperienza canadese, si è constatato che la centrale nucleare di Pickering produce energia a meno della metà del costo di una centrale a carbone di analoghe dimensioni installata nello stesso periodo a Lambton, nell'Ontario (senza contare l'enorme

Figura 1

Impianto di Pickering (Ontario).

tasso di inquinamento atmosferico in più che una centrale a carbone produce rispetto ad una centrale nucleare). In Figura 1 è mostrata una foto della centrale di Pickering, nell'Ontario, dotata di quattro reattori CANDU con una potenza complessiva di oltre 500 MWe.

Il sistema CANDU ha altri due punti in suo favore. A differenza dei reattori ad acqua naturale, nei quali l'intero nocciolo (core) del reattore è racchiuso da un solo grande recipiente a pressione, con una parete dello spessore di 30 cm, nel sistema CANDU ogni elemento di combustibile è racchiuso in un tubo in pressione. A questo punto si osservi il disegno assonometrico della Tavola 1 nel quale è mostrato uno spaccato di un reattore CANDU. Il reattore CANDU differisce dai reattori nucleari di potenza ad acqua in pressione o ad acqua bollente, non solo per l'impiego di uranio naturale e di acqua pesante, ma anche perché il refrigerante fluisce attraverso alcune centinaia di tubi in pressione contenenti il combustibile. Nei sistemi ad acqua leggera, gli elementi di combustibile sono contenuti in un unico massiccio recipiente a pressione attraverso il quale scorre il fluido refrigerante. Come mostra il disegno riportato in Tavola 1, nel reattore CANDU i tubi in pressione sono sistemati orizzontalmente. L'involucro esterno di un reattore capace di generare 750 MWe, ha un diametro di 8,5 m, una lunghezza di 6 m ed uno spessore di 32 mm. I tubi sono realizzati in una lega di zirconio dello spessore di 4 millimetri. L'acqua pesante refrigerante, mantenuta ad alta pressione e ad una temperatura di 310 °C è inviata in un generatore di vapore (non illustrato) dove l'acqua naturale convertita in vapore, aziona il complesso turbina-alternatore che genera l'elettricità. In un reattore CANDU, gli spezzoni di combustibile possono essere sostituiti, nei singoli tubi in pressione, anche quando il reattore sta funzionando a piena potenza.

Sebbene i recipienti a pressione statunitensi siano noti per la buona progettazione e l'estrema sicurezza, è evidente che in un reattore CANDU l'avaria di uno o anche di più tubi in pressione avrebbe conseguenze meno gravi della rottura di un grande recipiente sotto pressione. Nel caso in cui uno dei tubi che forniscono l'acqua di raffreddamento ad un reattore USA si fessurasse, il nocciolo dovrebbe essere immediatamente raffreddato con l'acqua di un sistema di raffreddamento di emergenza. I reattori CANDU hanno un analogo sistema di raffreddamento di emergenza, ma hanno in più un grande volume di acqua pesante, usata come moderatore, separata da quella impiegata nel ciclo di raffreddamento, che è costantemente disponibile per assorbire calore nel caso di un recipiente che provochi la perdita del liquido refrigerante. Un ultimo vantaggio di sicurezza del sistema CANDU è costituito dal rifornimento di combustile in potenza il che vuol dire che in uguali intervalli di tempo viene immagazzinata nel reattore CANDU una quantità di calore generata dai prodotti di fissione in decadimento minore di quella immagazzinata nei reattori statunitensi; in questi ultimi i prodotti di fissione si accumulano per nove o dieci mesi, ossia per il periodo intercorrente fra due rifornimenti di combustibile. Il rifornimento di combustibile in potenza aumenta anche la disponibilità complessiva dei reattori CANDU per l'azienda elettrica esercente. Nessuna di queste particolarità è stata scelta singolarmente per esaltare le caratteristiche del sistema: ciascuna di esse deriva piuttosto in modo logico dalla situazione politica, economica e tecnologica del Canada durante il decennio 1954-1964 nel quale venne sviluppato il reattore CANDU.

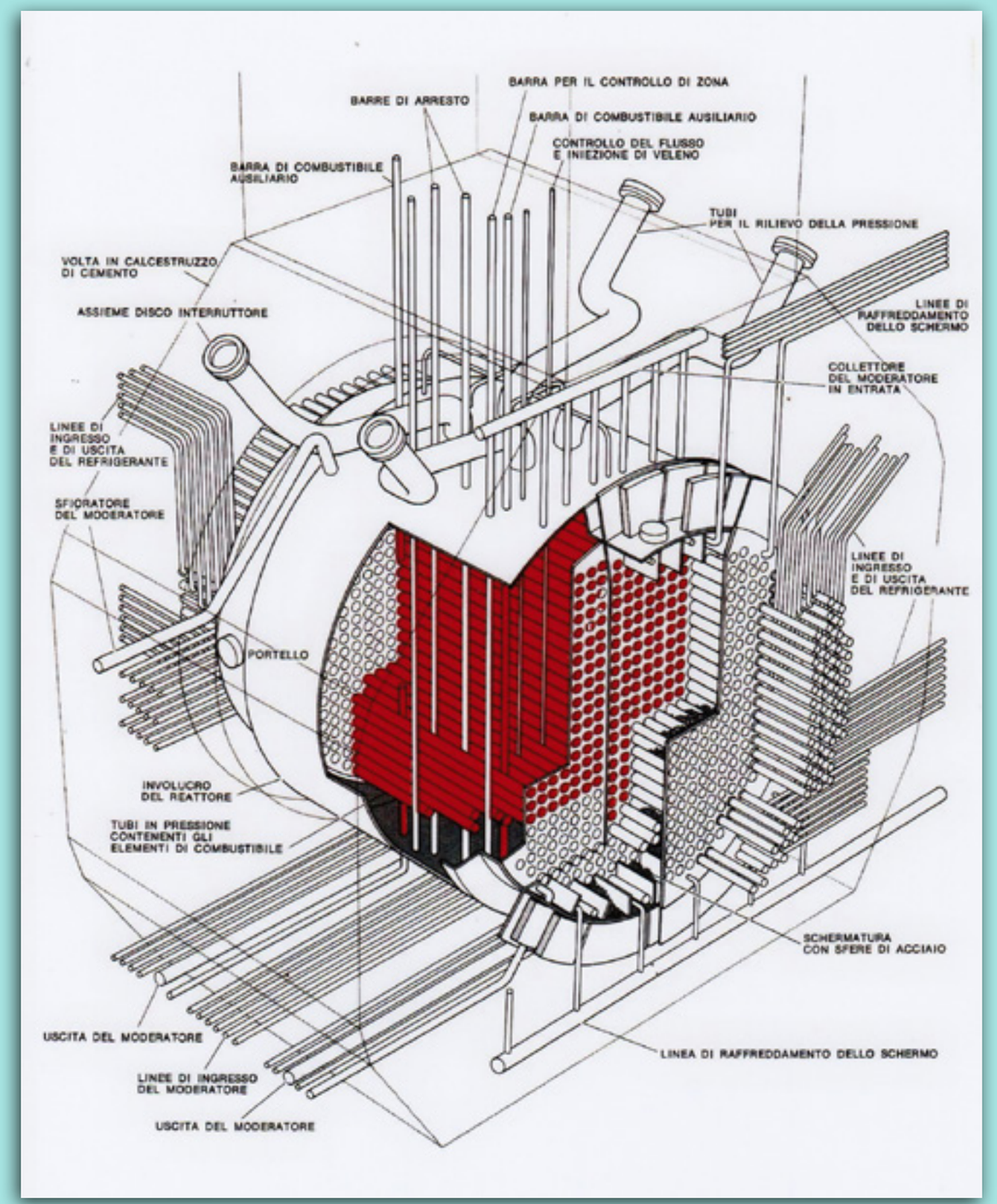

Tavola 1

Spaccato assonometrico di un reattore nucleare di potenza tipo CANDU.

Nascita e sviluppo del reattore CANDU classificazione e prototipi

Benché non sia semplice assegnare la paternità di qualsiasi progetto tecnico complesso, al quale hanno contribuito con le loro idee numerosissime persone, è generalmente riconosciuto che il merito principale dell'invenzione di questo straordinario reattore, è da attribuire a W. Bennett Lewis, che nel 1946 fu nominato direttore dei laboratori nucleari di Chalk River, dopo una brillante carriera sullo sviluppo dei radar svolta durante la guerra sul fronte britannico. Quando Lewis giunse a Chalk River, una piccola comunità a 200 chilometri ad ovest di Ottawa, trovò una parte isolata del progetto Manhattan, lasciata in sospeso dal tempo della seconda guerra mondiale. Il principale lavoro tecnico di Chalk River era consistito nel progettare e costruire lo ZEEP-1 (Zero-Energy Experimental Pile n.1), un reattore moderato ad acqua pesante in cui l'assorbimento di neutroni nell'uranio 238 portava alla sintesi del plutonio. In realtà lo ZEEP non raggiunse condizioni di criticità se non dopo il lancio della prima bomba atomica su Hiroshima. Tuttavia, nel 1947 venne completato un reattore di ricerca ad acqua pesante molto più grande chiamato NRX e ne fu programmato uno ancora più grande che fu terminato nel 1957. Il progetto ed il funzionamento di questi reattori servì ad addestrare un gruppo di specialisti in fisica, chimica e ingegneria dei reattori che acquisirono una particolare esperienza nella tecnologia sull'acqua pesante. Lewis capì forse meglio di tutti che questa disponibilità di personale specializzato poteva essere utilizzata per sviluppare un reattore di potenza alimentato con uranio naturale e moderato ad acqua pesante. Questa soluzione avrebbe messo il Canada in grado di sfruttare le proprie grandi risorse di uranio senza bisogno di arricchirlo con uranio 235, procedimento che all'epoca costituiva un segreto tecnologico. In questo modo il Canada e altre nazioni che lo avessero desiderato, avrebbero goduto dei benefici dell'energia nucleare senza dover intraprendere per forza un'attività strettamente legata con la tecnologia militare.

Nell'agosto 1951 Lewis presentò a Mackenzie, allora presidente del Consiglio nazionale delle ricerche del Canada, un rapporto intitolato "Una proposta di energia atomica". Mackenzie "girò" quindi la proposta ad Howe che allora ricopriva la carica di Ministro dell'industria e del commercio, il quale l'approvò. Il documento, a cui fu tolta la qualifica di "segreto di stato" solo nel 1955, elencava tre scoperte fatte a Chalk River che indicavano la fattibilità di un reattore di potenza ad uranio naturale. La prima di queste scoperte riguardava il funzionamento dell'NRX e dimostrava che l'energia poteva essere ottenuta dall'uranio naturale con un costo oscillante fra un terzo ed un quarto di quello di un'equivalente quantità di energia termica ottenuta dal petrolio e dal carbone ai prezzi correnti (senza contare il migliore impatto ecologico e ambientale che avrebbe avuto una centrale atomica rispetto ad una centrale a petrolio o a carbone).

La seconda scoperta consisteva nel fatto che si poteva presumere che 15 t (147 090 newton) di uranio naturale, sotto forma di ossido di uranio, avrebbero fornito 400 000 chilowatt termici, equivalenti, dopo la conversione a 120 000 kWe. La terza ed ultima scoperta era che il sistema sembrava in grado di produrre vapore a 288 °C ad una pressione di 105 bar. Benché questi valori fossero di molto inferiori alle temperature ed alle pressioni raggiunte nelle moderne centrali termoelettriche alimentate da combustibile fossile, erano favorevolmente paragonabili con le temperature e le pressioni raggiunte nei reattori ad acqua naturale con combustibile arricchito. Il "segreto" della buona riuscita, secondo le parole di Lewis era nell' "economia dei neutroni". Allo scopo di mantenere il molto più debole flusso di neutroni dell'uranio non arricchito, doveva essere fatto ogni sforzo affinché i neutroni termici (cioè rallentati) provocassero nuove fissioni nel combustibile prima di essere assorbiti. Seguendo la proposta di Lewis, venne avviato lo studio per realizzare un reattore di potenza "made in Canada". Nel 1952 una società della Corona, l'Atomic Energy of Canada Limited (AECL), veniva autorizzata a sfruttare le possibilità commerciali dell'energia nucleare. Del primo comitato direttivo faceva parte Richard L. Hearn, direttore dell'Ontario Hydro che è la più importante azienda elettrica del Canada. A questa veniva affidata la costruzione di un crescente numero di centrali termoelettriche, perché si stava già riscontrando una scarsità di siti ove installare nuove centrali idroelettriche. Precisiamo che PHWHW, BLWHW e OCHW significano rispettivamente Pressurized Heavy Water (cooled), Heavy Water (moderated) Boiling Light Water (moderated) Heavy Water (moderated) e Organic Cooled Heavy Water (moderated), mentre come già detto, con la generica sigla HWR si intende reattore moderato ad acqua pesante o, più semplicemente, reattore ad acqua pesante. E così, nel gennaio 1954 un gruppo di ingegneri, distaccati dalle aziende pubbliche canadesi, venne riunito a Chalk River sotto la guida di Harold A. Smith, dove seguì un corso accelerato di fisica dei reattori, tenuto dal personale dell'AECL. Fu in tal modo che ebbe origine l'idea di costruire i reattori ad acqua pesante. Il primo prototipo di tale tipo di reattore, fu il canadese (PHWHW) Nuclear Power Demonstration (NPD), da 22 MWe che entrò in criticità nel 1960. Nel 1966 un impianto simile al NPD ma da 200 MWe fu messo in funzione a Douglas Point (Canada). Quattro unità commerciali di questo tipo, da 500 MWe l'una, furono realizzate a Pickering, presso Toronto e illustrate in Figura 1, e quattro unità da 750 MWe, ciascuna alla Bruce Generating Station, presso Douglas Point (Figura 2). Sono altresì PHWHW un impianto da 125 MWe, presso Karachi, Pakistan e due impianti da 200 MWe, a Rajasthan, in India.

Ancora in Canada, a Gentilly (Hydro Quebec), è stato sperimentato un reattore da 250 MWe, refrigerato ad acqua leggera bollente (BLWHW), con immissione diretta del vapore prodotto in turbina. In Inghilterra, a Winfrith, ha funzionato dal 1968 il reattore SGHWR (Steam Generating Heavy Water Reactor) da 100 MWe, del tipo BLWHW, che impiegava però uranio leggermente arricchito. In Italia, per diversi anni è stato studiato il reattore prototipo CIRENE, da circa 40 MWe, del tipo BLWHW, costruendolo a Latina senza poi metterlo in funzione. Il resto è ormai storia dei nostri giorni, ed anche se il paese leader nella costruzione di questi reattori resta il Canada essi stanno prendendo piede anche in altre nazioni.

Nella TAVOLA 2 è riportata un'indicazione schematica di tre versioni proposte per i reattori ad acqua pesante con le condizioni di vapore raggiungibili. In alto, indicato con la lettera a) vi è il concetto originale CANDU-PHWHW, al centro b) è schematizzata la versione BLWHW ed in basso c) è riportata la versione OCHW. Nella TAVOLA 2, appunto, il concetto originale CANDU schematizzato nel disegno a) in alto è messo a confronto con due varianti in avanzata fase di sviluppo. Nella prima delle due varianti b) al centro, l'acqua naturale sostituisce l'acqua pesante nella funzione di refrigerate e viene fatta bollire dentro il reattore, producendo così direttamente il vapore che aziona la turbina. Nella seconda variante, c) in basso, il refrigerante è terfenile, un liquido organico, con un punto di ebollizione molto più alto di quello dell'acqua. Usando terfenile come mezzo di trasporto del calore dovrebbe essere possibile generare il vapore per la turbina ad una temperatura di almeno 315 °C, aumentando quindi il rendimento termico complessivo di un impianto nucleare di potenza dal valore del 30% al 35%.

Un reattore HWR, presentando un'ottima economia neutronica, con fattori di conversione medi dell'ordine di 0,7-0,8 a fronte dello 0,5-0,6 dei reattori ad acqua leggera, è strutturato in modo da produrre circa 0,5 chilogrammi di plutonio per MWe rispetto ai 0,25 chilogrammi prodotti dai reattori ad acqua in pressione e ad acqua bollente. Le diverse filiere di reattori HWR, di cui almeno un prototipo è stato messo in costruzione sono costituite da:

- Reattori moderati ad acqua pesante e raffreddati ad acqua pesante in pressione (a tubi) (PHWHW, di concezione e costruzione canadesi);
- Reattori moderati ad acqua pesante e raffreddati ad acqua leggera in ebollizione (BLWHW), (Canada, Inghilterra, Italia);
- Reattori moderati ad acqua pesante e raffreddati a gas (a tubi), OCHW, costruiti solo in Canada;
- Reattori moderati ad acqua pesante e raffreddati con liquido organico (a tubi), OCHW anch'essi costruiti in Canada;
- Reattori moderati e raffreddati ad acqua pesante in pressione e recipiente in pressione (PHW);
- Reattori moderati e raffreddati ad acqua pesante bollente e recipiente in pressione BHW, di costruzione svedese.

In Figura 2 è riportata una foto storica, scattata intorno alla metà degli anni Settanta.

Figura 2

Impianto di acqua pesante di Bruce.

Le torri, dietro il fumaiolo al centro di questa fotografia, costituivano l'impianto di acqua pesante di Bruce sulle rive del lago Huron nell'Ontario. Oltre le torri sorgeva la centrale di potenza di Bruce, ancora in costruzione. L'edificio a cupola in primo piano a sinistra era la centrale nucleare di Douglas Point. L'impianto di acqua pesante di Bruce, il cui completamento è avvenuto nei primi anni Ottanta presenta quattro unità con una capacità produttiva annua totale di 3 200 t (31 379 200 newton) e all'epoca in cui fu scattata questa foto era in servizio una sola unità. Un campione tipico dell'acqua del lago Huron, che alimenta l'impianto di Bruce, contiene da 145 a 148 molecole di ossido di deuterio in ogni milione di molecole di acqua. La separazione dell'ossido di deuterio dall'acqua naturale viene eseguita mediante un processo di distillazione modificato sfruttante il fatto che l'ossido di deuterio ha un punto di ebollizione leggermente superiore a quello dell'acqua naturale: 101,52 °C
contro i 100 °C a pressione atmosferica normale. Il processo di distillazione produce ossido di deuterio con una purezza minima del 99.5%.

Morfologia, caratteristiche e prestazioni dei reattori tipo CANDU

Si è già detto che l'ossido di deuterio D_2O o acqua pesante, è un moderatore migliore dell'acqua leggera, in quanto assorbe molti meno neutroni e li lascia viaggiare più a lungo prima di raggiungere energie termiche. Di conseguenza gli elementi di combustibile possono essere posti a qualche centimetro l'uno dall'altro, invece che a qualche millimetro, come nei reattori ad acqua leggera ed il nocciolo è quindi meno compatto. Vi sono due modi diversi di costruire reattori ad acqua pesante: il primo usa un contenitore a pressione, l'altro dei tubi a pressione. In quest'ultimo, il moderatore ad acqua pesante è separato dal refrigerante in una calandria (o calandra), che è un grande recipiente attraversato da tubi. I tubi a pressio-

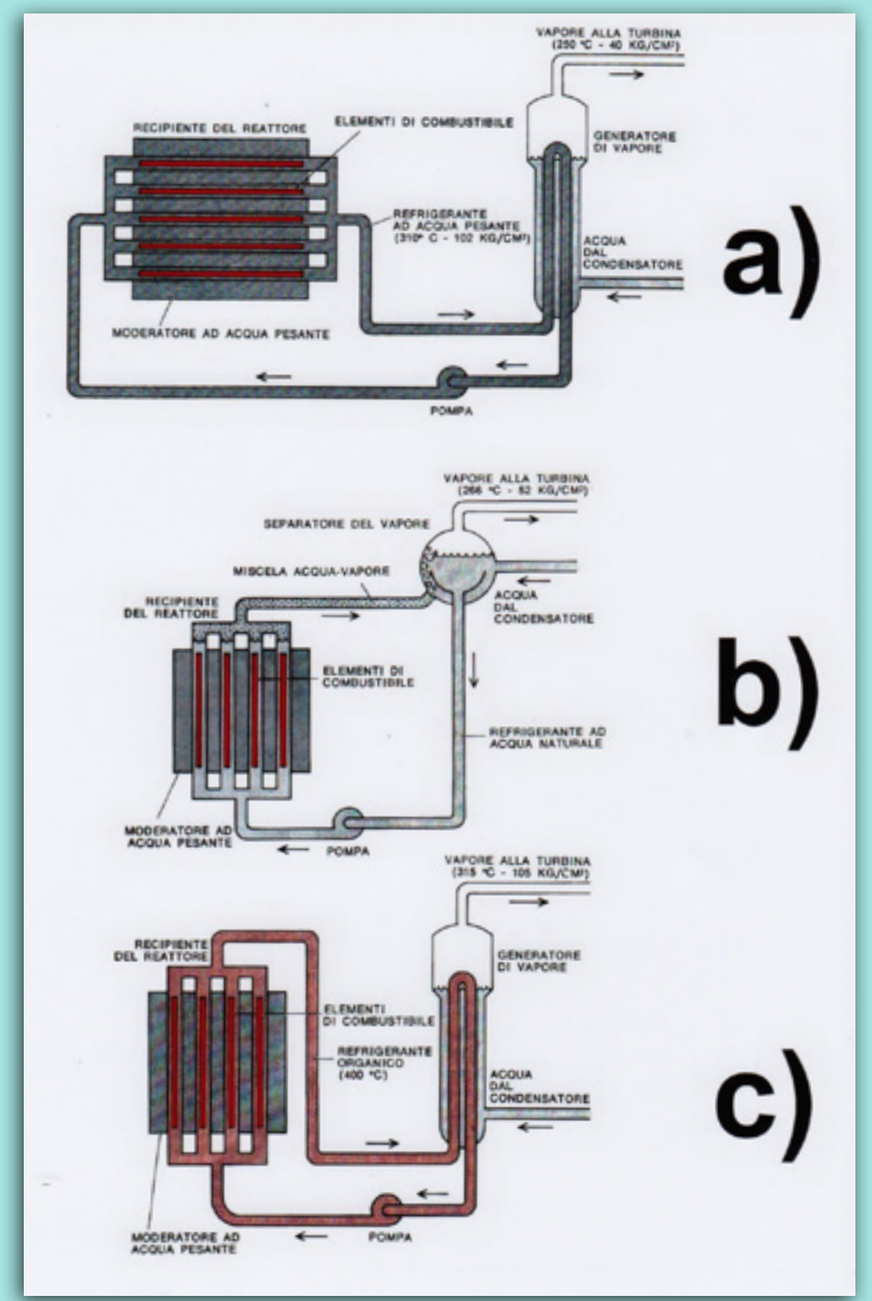

Tavola 2

Tre versioni proposte per i reattori ad acqua pesante.

Lascia il tuo commento a questo link:

https://www.editorialedelfino.it/i-reattori-candu-ad-uranio-naturale-ad-acqua-pensate.html

ne che sono inseriti nei tubi della calandria, contengono il combustibile ed il refrigerante che può essere acqua pesante, acqua leggera, gas o vapore, che passa attraverso i tubi a pressione. Il Canada, come già detto si è concentrato su questo tipo di reattori, ed il CANDU è del tipo a tubi in pressione, con acqua pesante come moderatore ed acqua pesante sotto pressione come refrigerante. Il refrigerante è usato per far bollire acqua leggera in uno scambiatore di calore. Il reattore è regolato dal livello del moderatore nella calandria.

La disposizione dei tubi in pressione nella calandria può essere verticale od orizzontale. La disposizione verticale facilita lo scarico del combustibile che può essere effettuato dal basso per mezzo di una sola macchina. Nella disposizione orizzontale, gli elementi strutturali necessari per sostenere il reattore non interferiscono con le centinaia di immissioni sulla superficie frontale del reattore, necessarie per il fluido refrigerante, il combustibile e la strumentazione. Il tubo in pressione o canale di combustibile ha tappi schermanti terminali a scanalature elicoidali che imprimono al refrigerante un moto vorticoso ed evitano lo "streaming" di radiazioni (cioè l'incanalamento di radiazioni non schermate verso l'esterno). Una valvola sferica permette un facile accesso al canale, per la ricarica e assicura un'ottima tenuta durante l'esercizio. Analogamente al CIRENE, gli elementi di combustibile dei reattori tipo CANDU sono costituiti da fasce di barre, della lunghezza di 500 mm. I tappi di estremità delle singole barrette sono saldati a sottili piastre terminali di Zircalloy forate (lo Zircalloy è una lega di zirconio sviluppata per il programma di reattori per sommergibili degli Stati Uniti). La corona esterna di barrette ha distanziatori (pattini) più grandi per scivolare sul tubo in pressione durante il caricamento. La guaina è del tipo "collassabile" in quanto, alla pressione di esercizio si schiaccia sulla colonna interna di pastiglie; così facendo si possono impiegare spessori di Zircalloy minimi (dell'ordine del mezzo millimetro) con migliore economia neutronica e risparmio di materiale. Ciò è reso possibile dal relativamente basso irraggiamento possibile, con elementi ad uranio naturale rispetto all'uranio arricchito. A questi reattori si attribuisce la qualifica di "convertitori avanzati" in quanto oltre a produrre plutonio, una notevole aliquota di energia (circa la metà) è ottenuta dal bruciamento "in situ". Il circuito di refrigerazione è percorso da acqua pesante ad una pressione intorno ai 100 bar, la quale viene fatta circolare da pompe nel nocciolo e negli scambiatori principali di calore (generatori di vapore). I tubi che portano il refrigerante ai singoli "tubi in pressione" vengono raggruppati in un numero opportuno di collettori. Le temperature dell'acqua pesante all'ingresso e all'uscita del reattore, sono circa di 250-300 °C e la temperatura massima sulle guaine delle barrette è poco superiore ai 300 °C, con un flusso termico superficiale medio di circa 60 W/cm^2. In questo circuito è localizzata la quasi totalità delle perdite di acqua pesante, sia perché il fluido (contrariamente al moderatore all'esterno dei tubi) è in pressione, sia perché nel circuito vi sono giunzioni che presentano problemi di tenuta. Il recupero dei vapori di ossido di deuterio fuoriuscenti dai punti di perdita è importante anche per prevenire problemi di contaminazione dell'edificio reattore per effetto del trizio. Il trizio si forma dal deuterio esposto a flusso neutronico, ed è soggetto ad un decadimento beta con una vita media dell'ordine di 12 anni. Anche per questo problema devono essere accuratamente controllate le perdite dai circuiti dell'acqua pesante. Come già si è avuto modo di accennare, per una filiera di reattori HWR acquistano particolare importanza gli impianti di produzione di D_2O. Taglie commerciali di questi impianti devono corrispondere almeno ad una produzione di 400 t (3 922 400 newton) di D_2O l'anno. L'acqua pesante per uso nucleare non deve contenere più dello 0,14% di H_2O. Con riferimento ad un reattore tipo CANDU da 600 MWe, tenuto conto del necessario immobilizzo iniziale di D_2O e del tasso di perdite (leggermente inferiore al 2% soprattutto per perdite in forma di vapore attraverso cricche nei

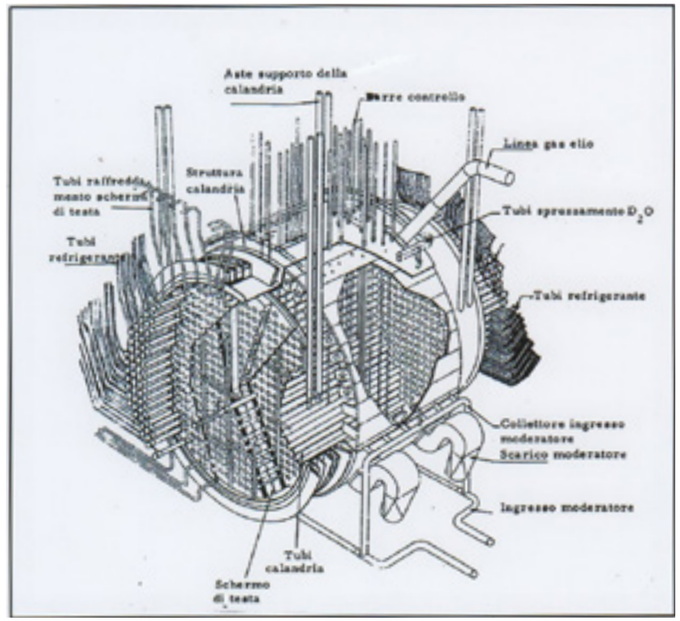

Figura 3

Spaccato dell'impianto di Pickering.

tubi di generatore di vapore), l'installazione di un impianto commerciale per la produzione di D_2O è condizionata ad un ritmo di crescita della filiera di almeno un reattore HWR per anno. Per il sistema CANDU è necessaria 1 t (9 806 newton) di D_2O per ogni MW di potenza installata. Il circuito vapore comprende gli scambiatori di calore principali, la turbina, i separatori di umidità, un surriscaldatore, il condensatore ed i preriscaldatori dell'acqua di alimento. Il vapore misto ad acqua viene inviato ad un corpo cilindrico ove avviene la separazione del vapore mentre l'acqua separata ricircola. Il vapore, saturo, viene prodotto a circa 40 bar e 250 °C. Il "consumo specifico" di vapore è di 5,5 kg/kWh. In Figura 3 è riportato uno spaccato di un CANDU (si tratta in particolare dell'impianto di Pickering).

Secondo l'usuale schema dei reattori HWR a tubi in pressione, il recipiente del reattore (che ormai sappiamo che si chiama calandria o calandra) è costituito da un cilindro di acciaio, non in pressione, attraversato da tubi di contenimento (neanche essi in pressione) mandrinati sulle piastre terminali della calandria. All'interno dei tubi di contenimento sono installati i "tubi in pressione", in Zircalloy, isolati termicamente dai tubi della calandria, mediante un'intercapedine in cui circola della CO_2, che limita le dispersioni di calore dal fluido refrigerante al moderatore, che si intende mantenere a basse temperature. Gli elementi di combustibile, posizionati all'interno dei tubi in pressione in cui circola l'acqua pesante di raffreddamento che lambisce le barrette, sono in numero variabile con la potenza del nocciolo.

Se i tubi di contenimento toccano i tubi in pressione, data la ridottissima spaziatura, possono aversi nei secondi dei pericolosi effetti di "macchia fredda", per la perdita dell'isolamento termico, con effetti di fragilizzazione spinta che possono portare ad una loro rottura per un meccanismo di idrurazione. Ciò è accaduto a Pickering 2, in tubi in pressione di Zircaolly 2, ma lo si ritiene non possibile per i nuovi tubi in pressione di zirconio-niobio.

Alle estremità dei tubi in pressione sono posizionate chiusure a tappo rimovibile per la ricarica; il progetto di questi tappi è importante perché essi potrebbero essere delle possibili vie di perdita della D_2O. Nei reattori più recenti il tappo è stato sostituito con una valvola a sfera per facilitare l'accesso al combustibile durante la carica del reattore. L'operazione di carico e scarico del combustibile avviene con reattore a potenza, mediante l'impiego di macchine sistemate su appositi carrelli e comandate a distanza. Esse devono fra l'altro, mantenere la portata del fluido termovettore all'interno del canale, durante le operazioni di ricambio. Gli elementi scaricati sono successivamente trasferiti nella piscina di decadimento. Il combustibile irradiato, così accumulato, rappresenta una riserva strategica di materiale fissile, previo opportuno ritrattamento a tempo debito. Il circuito del moderatore a bassa temperatura e bassa pressione, comprende la calandria, il serbatoio di scarico, le pompe di circolazione, gli scambiatori di calore ausiliari per mantenere sufficientemente bassa la temperatura del moderatore, i filtri di purificazione nonché le valvole di regolazione e di scarico. Il controllo grossolano di potenza viene realizzato, come detto variando il livello del moderatore nella calandria. Nelle unità CANDU da 750 MWe il controllo non viene più effettuato per variazione dei livelli del moderatore nella calandria. Questo perché occorre troppo tempo agendo tramite l'elio, a pompare la D_2O dalla cisterna ("dump") in calandria. Nelle nuove unità si è adottato un sistema di controllo con barre orizzontali per variare il livello di potenza, con barre verticali per lo spegnimento rapito (scram) e con un dispositivo di iniezione di "veleno" solubile nella calandria come riserva di spegnimento. (back up).

La variazione di livello dell'acqua pesante nel nocciolo è ottenuta mediante un circuito ausiliario a gas (elio). Nella parte inferiore della calandria lo scarico del moderatore nel serbatoio inferiore è realizzato con un sistema tipo sifone. Il gas elio in pressione agisce sulla parte libera del sifone in modo da compensare la pressione idrostatica del moderatore. La variazione del livello dell'acqua pesante nella calandria si ottiene pertanto variando semplicemente la pressione dell'elio che agisce sul sifone. Il circuito a gas è realizzato con un adeguato sistema di soffianti e di valvole di regolazione. L'impiego di D_2O comporta una semplificazione della strumentazione neutronica, perché si ha una produzione di fotoneutroni per assorbimento nel deuterio dei raggi gamma generati dal decadimento dei prodotti di fissione. La potenza del reattore viene misurata mediante rivelatori di flusso neutronico, installati in un apposito vano ricavato nel serbatoio di scarico del moderatore a contatto con la calandria. La regolazione della potenza viene ottenuta mediante i movimenti delle barre di controllo o di barre di uranio arricchito. Nella calandria, tra un canale e l'altro, vi è lo spazio per inserire le barre di controllo (orizzontali, a sinistra), le barre di sicurezza (verticali, in alto) e gli ugelli per iniettare il veleno solubile, per lo spegnimento di emergenza. In Figura 4 è riportato un altro disegno schematico del nocciolo del reattore.

Tutto l'ambiente che sta intorno alla calandria, in calcestruzzo foderato in acciaio, è riempito di acqua leggera, che funge da schermo e da refrigerante di emergenza in caso di LOCA (grave incidente che possa riempire l'edificio stesso di vapore radioattivo ad alta pressione). I quattro grossi tubi che partono dalla calandria sono destinati, sempre in caso di LOCA a scaricare nel contenimento il vapore prodotto.

Nell'acqua pesante della calandria e nell'acqua esterna si produce potenza dovuta all'energia dei raggi gamma e dei neutroni. Questa viene scaricata con dei piccoli circuiti ausiliari che mantengono il liquido a bassa temperatura.

In Figura 5 possiamo vedere l'immagine di un elemento di combustibile e di una macchina di carico e scarico.

Le barrette sono sostanzialmente uguali a quelle dei reattori ad acqua, ma sono montate in maniera più semplice. Infatti l'elemento CANDU deve durare meno di un anno, invece dei 3-4 anni dei reattori ad acqua. Le barrette sono 36, mentre quella centrale funge da supporto meccanico. Sono distanziate una dall'altra da spaziatori di zirconio, mentre altri spaziatori, i cosiddetti pattini, visibili in Figura, separano le barrette dalla parete del canale. In alto è rappresentato lo schema di funzionamento della macchina di carico e scarico. Trattasi di un meccanismo a revolver, lungo più di 6 m, che risucchia l'intero contenuto del canale, sostituisce gli spezzoni che devono essere scaricati e reinserisce gli spezzoni e lo schermo. Dato che il reattore è a potenza e gli elementi devono essere continuamente refrigerati, (almeno per eliminare il calore dei prodotti di fissione), tutta la macchina deve reggere la pressione di 100 bar.

Infine in Figura 6 è riportato uno spaccato dell'edificio del reattore.

L'edificio non è sostanzialmente diverso da quello di un PWR e difatti il CANDU può essere considerato un reattore ad acqua pesante pressurizzata. La differenza più importante è la mancanza del pentolone, che viene sostituito dalla calandria e dai tubi in pressione. Si vedono chiaramente le quattro pompe ed i quattro generatori di vapore e sotto il tetto vi è un grande serbatoio di acqua fredda e la ragnatela per refrigerare l'edificio a doccia in caso di LOCA. Indubbiamente, il sistema dei canali in pressione è meccanicamente più debole rispetto al siste-

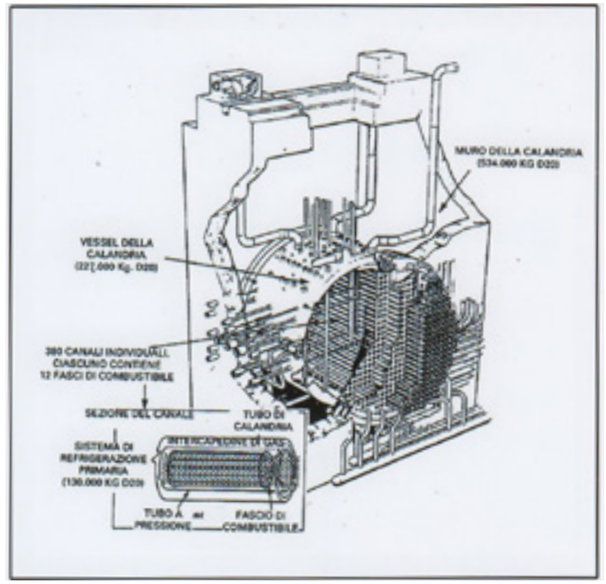

Figura 4

Altro disegno schematico del nocciolo del reattore.

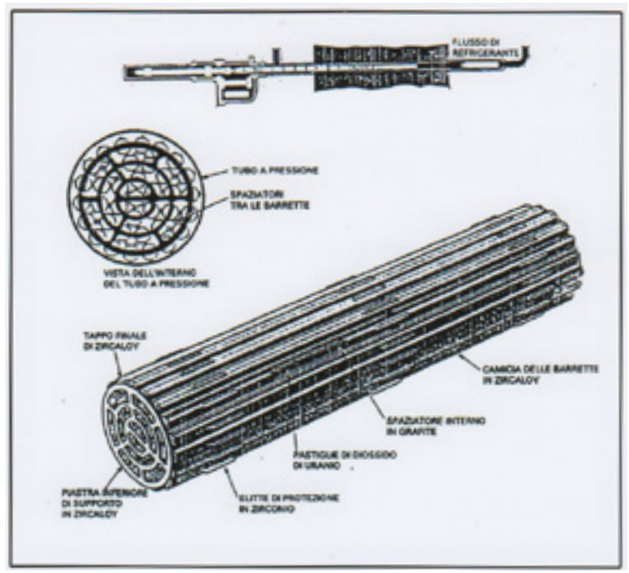

Figura 5

Elemento di combustibile.

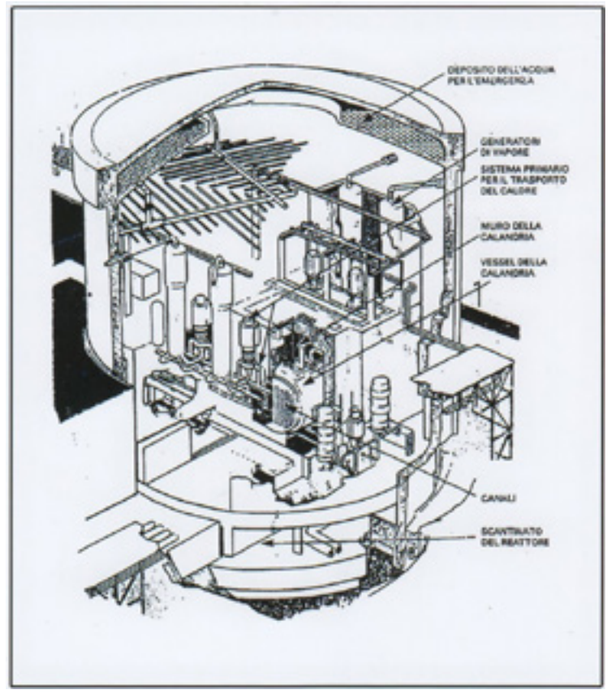

Figura 6

Spaccato dell'edificio del reattore.

ma del pentolone, usato nei reattori ad acqua. Secondo la teoria dei progettisti canadesi, confermata da innumerevoli esperienze di prova e da decenni di funzionamento del reattore, i canali non si rompono mai per "rottura fragile". I canali, infatti si possono rompere durante l'operazione, però mai improvvisamente e senza avviso. Vi saranno prima di tutto delle lesioni e delle piccole perdite di acqua (che verranno rilevate nell'intercapedine tra le due pareti) e provocheranno lo spegnimento del reattore. Il reattore CANDU è progettato per una vita di cento anni. Naturalmente i singoli componenti vanno cambiati molto prima, con programmi di manutenzione straordinaria. Per esempio i canali sono progettati per una vita di 24 anni e per cambiarli tutti occorre un lavoro di tre mesi.
Accanto agli indiscussi pregi dei reattori CANDU, occorre ricordare alcune loro limitazioni. Una di queste consiste per esempio nella scarsa flessibilità del reattore nel seguire il carico. Se si riducesse alla metà la potenza erogata, a causa dell'avvelenamento da xeno-135, il reattore si riavvierebbe solo dopo 40 ore. Un altro limite dei reattori CANDU è che essi, per il rifornimento di combustibile senza riciclo, sono dei "dissipatori" di uranio.
Concludendo si può dire che ormai, lo sviluppo dei reattori ad acqua pesante rappresenta solo un perfezionamento in quanto l'affidabilità e le prestazioni di questi reattori sono già state ampiamente dimostrate. Negli ultimi modelli elaborati per la filiera canadese, denotati dalle sigle ACR700 e ACR1000, l'impiego di acqua pesante è limitato alla sola funzione di moderatore (riducendone la quantità e quindi i costi) ed impiegando acqua leggera come termovettore. Il ridotto livello della loro penetrazione commerciale rispetto ai reattori ad acqua leggera, è dovuto al fatto che il costo dell'energia prodotta è tuttora leggermente superiore. Ciò è dovuto soprattutto al loro più ridotto sviluppo industriale.

Bibliografia

Per quanto riguarda i libri si segnalano le seguenti opere:

Ameglio Paolo, Introduzione ai principi di ingegneria nucleare ed all'analisi dei reattori nucleari, E.C.I.G. editore, 1981, Genova.
Bandini Buti Alberto, Teoria e funzionamento dei reattori nucleari, Sandit, Albino (BG), 2007.
Boffi Vinicio, Fisica del reattore nucleare, voll.1 e 2, Patron, Bologna, 1974.
Cumo Maurizio, Impianti nucleari, Casa editrice Università La Sapienza, Roma, 2012.
Leonardi Renzo, L'ABC dell'energia nucleare, Lantana editore, aprile 2011.
Loizzo Paolo, Le centrali nucleari, ovvero il diavolo che non c'è, Monteleone, Vibo Valentia, 1994.
Lombardi Carlo, Impianti nucleari, Polipress, Milano, 2012.
Mainardi Enrico, Impieghi dell'energia nucleare, Editoriale Delfino, Milano, 2008.
Maizza Vito, Centrali elettronucleari, macchine ed impianti, Laterza, Bari, 1984.
Mazzoleni Francesco, Introduzione all'ingegneria nucleare, Liguori, Napoli, 1988.
Novelli Antonio, Elementi di controllo dei reattori nucleari, Clup, Milano 1988.
Paci Sandro, Introduzione ai sistemi nucleari, Edizioni Università di Pisa, dicembre 2002.
Sani Luciano, Centrali elettronucleari, Edizioni Sistema, Roma, 1984.

Per quanto concerne lavori scientifici specialistici sui CANDU, si consiglia quanto segue:

McIntyre C. Hugh, Reattori a uranio naturale e acqua pesante, Le Scienze, numero 89, Gennaio 1976.
Brooks G.L., The Standardized CANDU 600, Atomic Energy of Canada Limited, Ottawa, 1974.
Nuclear Power in Canada: Questions and Answers, Canadian Nuclear Association, Toronto, 1975.
Woodhead L.W., Performance of CANDU Commercial Units, Ontario Hydro, 1975.

Editoriale Delfino

Automation week
September 14 - 20, 2020
Milan, Italy

Automation Instrumentation

For any information contact us:

welcome@delta-ie.it

2020 MILANO 16-17 SETTEMBRE

ISA 75 · ISA Italy Section · ISA District Communication EMEA D12 · DELTA Events · dmg events · DELTA

"Improve your business with Automation Instrumentation Summit"