

POLITECNICO DI TORINO

ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
I SESSIONE - ANNO 2006 - Vecchio ordinamento

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto il dimensionamento di massima del nocciolo di un reattore nucleare modulare a gas ad alta temperatura HTGR (High Temperature Gas Reactor) della potenza termica di 200 MW.

Il nocciolo deve essere realizzato con elementi di combustibile simili a quelli di un reattore HTGR di riferimento di potenza più elevata, i cui dati geometrici e operativi sono riportati in tabella 1. Dal reattore di riferimento vengono inoltre tratti i parametri operativi del refrigerante (elio in pressione).

Nel reattore HTGR di riferimento il nocciolo e i componenti del circuito primario sono alloggiati in un recipiente in pressione realizzato in calcestruzzo armato precompresso; il nocciolo è posizionato nella parte alta, mentre nella parte inferiore sono collocati i generatori di vapore e le soffianti per la circolazione dell'elio.

L'elio refrigerante defluisce dall'alto verso il basso, attraversando il nocciolo in moto discendente.

Il nocciolo è costituito da un insieme di prismi di grafite a sezione esagonale, che svolgono le funzioni sia di elemento di combustibile che di moderatore. I prismi di grafite hanno un'altezza di 79,2 cm e l'altezza del nocciolo, pari a 4,75 m, è determinata da sei prismi impilati l'uno sopra l'altro. Il nocciolo comprende un numero totale di 1482 prismi disposti in sei strati orizzontali, ciascuno dei quali è costituito da 247 prismi.

I blocchi di grafite sono attraversati verticalmente da fori di differente diametro disposti secondo un reticolo triangolare: 108 fori per ciascun prisma realizzano i canali per il passaggio del fluido termovettore, mentre in 210 fori (non passanti) è inserito il combustibile. Nei prismi sono inoltre presenti un foro centrale destinato al maneggio del combustibile e tre canali per le barre di controllo.

Poiché nella generica sezione retta del nocciolo del reattore di riferimento sono presenti 247 prismi, nella sezione retta del nocciolo si hanno complessivamente 51870 fori in cui è inserito il combustibile e 26676 canali per il passaggio del refrigerante.

Nel reattore di riferimento l'impilaggio dei prismi di grafite ha la sezione retta approssimativamente esagonale, ed è circondato da blocchi di grafite opportunamente sagomati aventi la funzione di riflettore, che realizzano un contorno esterno cilindrico. Il dimensionamento richiesto, da effettuarsi con le modalità specificate nel seguito, riguarda la sola parte del nocciolo costituita dai prismi esagonali.

Il combustibile è costituito da barrette cilindriche che vengono inserite nei 210 fori realizzati in ciascun prisma. Le barrette sono realizzate con una matrice di grafite in cui sono inserite sferette fissili di carburo di uranio e torio (U,Th)C₂ del diametro di 0,2 mm, e sferette fertili di ThC₂ del diametro di 0,4 mm; l'arricchimento è del 93 %. Il carburo delle sferette è rivestito da più strati di carbonio pirolitico e carburo di silicio.

Con riferimento ai dati di tabella 1, il dimensionamento di massima del nocciolo del reattore modulare da 200 MW deve essere effettuato con prismi di grafite uguali a quelli del reattore di riferimento, per quanto riguarda sia la sezione retta, che il numero e il diametro dei fori; può invece essere modificata l'altezza dei prismi.

Debbono essere inoltre mantenuti uguali a quelli del reattore di riferimento i seguenti parametri:

- *densità di potenza media del nocciolo riferita al volume dei prismi (a meno delle variazioni richieste per ottenere un numero di prismi intero e compatibile con una regolare conformazione geometrica del nocciolo)*
- *pressione dell'elio refrigerante all'ingresso del nocciolo*
- *temperatura dell'elio all'ingresso e all'uscita del nocciolo*

Nel definire la sezione retta del nocciolo si richiede di mantenere un rapporto tra l'altezza e la larghezza per quanto possibile prossimo a quello del reattore di riferimento.

Tabella 1 - Parametri operativi e geometrici del reattore HTGR di riferimento	
Portata dell'elio che attraversa la sezione retta del nocciolo costituita da 247 prismi	1430 t/h
Pressione dell'elio all'ingresso del nocciolo	48,5 bar
Temperatura dell'elio all'ingresso del nocciolo	450 °C
Temperatura dell'elio all'uscita del nocciolo	780 °C
Altezza del singolo prisma di grafite	79,2 cm
Distanza tra due lati opposti del prisma di grafite	35,5 cm
Numero di fori del prisma per l'inserimento del combustibile	210
Numero di canali del prisma per il passaggio dell'elio	108
Diametro dei fori in cui è inserito il combustibile	1,27 cm
Diametro dei canali per il passaggio dell'elio	1,71 cm

Per il dimensionamento di massima si richiede in particolare lo sviluppo dei punti seguenti:

- *calcolo della potenza termica del nocciolo del reattore di riferimento*
- *calcolo della densità di potenza del nocciolo del reattore di riferimento riferita ai prismi*
- *scelta della conformazione geometrica del nocciolo del reattore da 200 MW*
- *determinazione del numero di prismi di grafite del reattore da 200 MW, con eventuale aggiustamento della densità di potenza in relazione alla conformazione geometrica scelta*
- *calcolo della portata di elio refrigerante e della portata specifica media dell'elio nei canali del fluido termovettore, per il nocciolo da 200 MW*
- *calcolo della potenza volumetrica media generata dall'unità di volume delle barrette di combustibile (si assuma un gioco radiale di 0,1 mm tra le barrette e i fori in cui sono inserite e una lunghezza attiva del combustibile pari a quella dei blocchi di grafite)*
- *assunzione di un opportuno rapporto tra la potenza volumetrica massima delle barrette di combustibile e quella media delle barrette di combustibile dell'intero nocciolo*
- *calcolo dei flussi termici medio e massimo alla superficie delle barrette di combustibile*
- *calcolo della differenza di temperatura tra la parete dei canali di refrigerazione e l'elio refrigerante, per una temperatura dell'elio pari a quella media tra l'ingresso e l'uscita, con i flussi termici medio e massimo precedentemente calcolati*
- *calcolo della caduta di pressione subita dall'elio nell'attraversamento dei canali*

Per le proprietà fisiche dell'elio si può fare riferimento ai dati di tabella 2.

Il Candidato proponga infine un procedimento di calcolo per la determinazione dell'andamento della temperatura nelle barrette di combustibile, tenendo conto della particolare conformazione geometrica caratterizzata dalla presenza delle sferette di materiale combustibile e fertile. Il Candidato può allo scopo proporre metodi di calcolo sia semplificati che rigorosi, con riferimento anche all'eventuale impiego di codici di calcolo commerciali.

Il Candidato discuta infine le potenzialità dei reattori nucleari a gas ad alta temperatura, illustrando soluzioni alternative all'uso di un ciclo a vapore, e il loro possibile impiego per finalità diverse dalla produzione di energia elettrica.

Tabella 2 — Proprietà termofisiche dell'elio a 48.5 bar					
Temperatura [°C]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico a pressione costante [kJ/(kg °Q)]	Entalpia [kJ/kg]	Viscosità dinamica [kg/(ms)]	Conducibilità termica [W/(m °C)]
400	3,438	5,190	3525	0,0000342	0,266
500	2,998	5,190	4044	0,0000374	0,292
600	2,657	5,190	4563	0,0000406	0,316
700	2,386	5,191	5082	0,0000436	0,340
800	2,165	5,191	5601	0,0000465	0,363