Tema n. 2

POLITECNICO DI TORINO
ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
RAMO NUCLEARE
VECCHIO ORDINAMENTO

II SESSIONE 2011

Prova scritta del 23 novembre 2011

Con riferimento alla piscina per lo stoccaggio del combustibile di un reattore nucleare del tipo BWR (Boiling Water Reactor) si richiede lo sviluppo dei punti seguenti:

1. dimensionamento di massima degli scambiatori di calore del circuito di raffreddamento dell'acqua della piscina;
2. calcolo della massima temperatura del combustibile stoccato in condizioni operative nominali;
3. studio di una condizione operativa incidentale conseguente ad un fuori servizio del circuito di raffreddamento dell'acqua della piscina.

Il reattore nucleare di riferimento, gli elementi di combustibile e la piscina per lo stoccaggio del combustibile sono caratterizzati dai dati riportati nelle tabelle 1 e 2.

Per lo svolgimento del punto n° 1 si faccia riferimento alle ipotesi seguenti:

- il sistema di raffreddamento della piscina è dotato di n° 2 scambiatori di calore uguali;
- la potenza di riferimento per il dimensionamento degli scambiatori è quella erogata dai 548 fasci di barre del nocciolo dopo 15 giorni dallo spegnimento del reattore;
- dopo 15 giorni dallo spegnimento del reattore i due scambiatori di calore operano entrambi, in parallelo, mantenendo la temperatura della piscina al valore di 40 °C riportato in tabella 2 (ciascuno scambiatore deve quindi asportare la potenza generata da 274 fasci di barre);
- gli scambiatori di calore sono del tipo a tubi e mantello;
- il lato secondario degli scambiatori è alimentato da acqua che entra nei tubi alla pressione di 5 bar, alla temperatura di 30 °C e alla velocità di 1.5 m/s;
- l'acqua del lato secondario esce dai tubi dello scambiatore alla temperatura di 35 °C.

Per la potenza di decadimento dei prodotti di fissione si può utilizzare la seguente formulazione approssimata, nella quale P_{dec} è la potenza di decadimento, P_{nom} è la potenza nominale del reattore e t è il tempo dallo spegnimento espresso in secondi:

$$P_{dec} = P_{nom}\ 0.06\ t^{-0.2}$$

Per il dimensionamento degli scambiatori di calore occorre calcolare preliminarmente la portata dell'acqua lato secondario; si può quindi fissare un adeguato valore della temperatura di uscita dell'acqua lato primario e determinare la corrispondente portata.

Per il calcolo delle portate si può fare riferimento al calore specifico riportato in tabella 3.

Si può quindi procedere al calcolo della superficie di scambio termico utilizzando, in prima approssimazione, un valore del coefficiente globale di scambio termico compreso tra i 850 $W/(m^2 °C)$ e 1700 $W/(m^2 °C)$ (tipico intervallo di variazione per scambiatori di calore con acqua lato primario e lato secondario).

Nell'ambito del dimensionamento occorre scegliere la disposizione dei tubi (ad esempio con reticolo triangolare o quadrato), i diametri interno ed esterno dei tubi e i parametri geometrici del reticolo. Il numero di tubi e la loro lunghezza si determinano in base alla velocità dell'acqua all'ingresso dei tubi e alla superficie di scambio termico.

Per lo svolgimento del punto n° 2 si faccia riferimento alle seguenti ipotesi:

- la temperatura dell'acqua a contatto con le barre è quella nominale, pari a 40 °C;
- le barre cedono all'acqua della piscina la potenza di decadimento in regime di convezione naturale;
- la potenza termica di riferimento è, come nel punto n° 1, quella generata dopo 15 giorni dallo spegnimento del reattore;
- per il calcolo della massima temperatura del combustibile occorre considerare il valore massimo della potenza lineare delle barre;
- si assume che il rapporto tra le potenze lineari massima e media delle barre nella piscina sia uguale al corrispondente rapporto nel reattore.

Per il calcolo del coefficiente di scambio termico in regime di convezione naturale si può utilizzare in via approssimata, la correlazione seguente:

$$h = \frac{k}{L} C \left(Gr\, Pr\right)^a$$

nella precedente correlazione, si ha $Pr = \frac{c_p\, \mu}{k}$ e $Gr = \frac{g\, \beta \left(T_w - T_\infty\right) L^3}{\left(\mu/\rho\right)^2}$; le proprietà fisiche c_p (calore specifico a pressione costante), μ (viscosità dinamica), k (conducibilità termica) e ρ (densità) devono essere valutate alla temperatura media tra le temperature di parete e di massa T_w e T_∞; g è l'accelerazione di gravità e $\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$ è il coefficiente di dilatazione termica a pressione costante. Per la lunghezza L si può assumere la lunghezza attiva delle barrette, ottenendo così un valore del coefficiente di scambio termico h mediato su tutta la lunghezza attiva. Per le proprietà fisiche dell'acqua si può fare riferimento ai dati di tabella 3. I coefficienti C ed a dipendono dal prodotto Gr Pr: per $Gr\, Pr < 10^9$, C = 0.59, a = 1/4; per $Gr\, Pr \geq 10^9$, C = 0.13, a = 1/3.

Per lo scambio termico nel *gap* tra la superficie interna della guaina e la superficie della pastiglia di combustibile e per le conducibilità termiche delle guaine e del combustibile, si possono utilizzare i dati della tabella 4.

Per lo svolgimento del punto n° 3 si fa riferimento ad una condizione incidentale caratterizzata dalla completa assenza di raffreddamento della piscina, conseguente all'annullamento della portata dell'acqua secondaria degli scambiatori di calore.

La potenza di riferimento è ancora quella generata dai 548 fasci di barre, a partire da 15 giorni dopo lo spegnimento del reattore.

Con riferimento alle proprietà dell'acqua riportate in tabella 3, si determini l'intervallo di tempo dopo il quale l'acqua della piscina raggiunge la temperatura di saturazione corrispondente alla pressione del pelo libero.

Si calcoli inoltre l'ulteriore intervallo di tempo dopo il quale, a seguito dell'evaporazione dell'acqua della piscina, il livello dell'acqua si riduce a soli 5 m.

Tabella 1 – Dati relativi al reattore e agli elementi di combustibile		
Potenza termica nominale	2381	MW
Numero di fasci di barre del nocciolo	548	
Tipo di reticolo dei fasci di barre	9 x 9	
Numero di barre di combustibile per ciascun fascio di barre	72	
Lunghezza attiva delle barre di combustibile	3.71	m
Lunghezza totale delle barre di combustibile	4.47	m
Diametro esterno delle barre	10.34	mm
Spessore della guaina delle barre	0.72	mm
Diametro delle pastiglie di combustibile	8.70	mm
Potenza lineare massima nelle condizioni nominali	440	W/cm

Tabella 2 – Dati relativi alla piscina		
Volume nominale dell'acqua contenuta nella piscina	1425	m^3
Livello nominale dell'acqua nella piscina	11.37	m
Temperatura media nominale dell'acqua nella piscina	40	°C
Pressione dell'aria sul pelo libero della piscina	1.013	bar

Tabella 3 - Proprietà fisiche dell'acqua

pressione	temperatura	densità	calore specifico a pressione costante	conducibilità termica	viscosità dinamica
bar	°C	kg/m^3	J/(kg °C)	W/(m °C)	kg/(m s)
1,013	30	995,65	4180,0	0,6155	0,00079735
1,013	40	992,22	4178,6	0,6306	0,00065298
1,013	50	988,05	4179,6	0,6436	0,00054685
1,013	60	983,21	4182,8	0,6544	0,00046640
1,013	70	977,78	4188,1	0,6631	0,00040390
1,013	80	971,80	4195,5	0,6700	0,00035436
1,013	90	965,32	4205,0	0,6753	0,00031441
1,013	99	959,07	4215,4	0,6788	0,00028474
2,000	30	995,70	4179,8	0,6155	0,00079734
2,000	40	992,27	4178,3	0,6307	0,00065299
2,000	50	988,09	4179,3	0,6437	0,00054687
2,000	60	983,25	4182,5	0,6544	0,00046642
2,000	70	977,82	4187,9	0,6632	0,00040393
2,000	80	971,85	4195,3	0,6701	0,00035438
2,000	90	965,36	4204,8	0,6753	0,00031444
2,000	99	959,12	4215,2	0,6788	0,00028476
5,000	30	995,83	4178,9	0,6157	0,00079731
5,000	40	992,40	4177,6	0,6308	0,00065301
5,000	50	988,22	4178,6	0,6438	0,00054692
5,000	60	983,38	4181,9	0,6546	0,00046649
5,000	70	977,95	4187,2	0,6633	0,00040400
5,000	80	971,98	4194,6	0,6702	0,00035446
5,000	90	965,50	4204,1	0,6755	0,00031452
5,000	99	959,26	4214,5	0,6790	0,00028484

pressione	temperatura di saturazione	calore di evaporazione
bar	°C	J/kg
1,013	99,97	2,2566 10^6
2	120,21	2,2016 10^6

Tabella 4 – Conducibilità termiche e conduttanza del gap		
Conducibilità termica media dello zircaloy delle guaine	17	W/(m °C)
Conducibilità termica media dell'ossido di uranio	3.0	W/(m °C)
h_{gap} = 6000 W/(m^2 °C) , con $\Delta T_{gap} = q_i / h_{gap}$ q_i flusso termico medio nel gap ΔT_{gap} differenza di temperatura nel gap tra la superficie della pastiglia e la superficie interna della guaina		