

# POLITECNICO DI TORINO

## ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE II SESSIONE - ANNO 2002

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto il progetto di massima di un reattore nucleare innovativo a fissione del tipo ad acqua in pressione, moderato e refrigerato ad acqua leggera, con elementi di combustibile simili a quelli dei reattori PWR attualmente in esercizio, ma con un differente numero di barrette e una minore potenza per unità di lunghezza.

Il reattore è caratterizzato da una configurazione compatta, con generatori di vapore e le pompe di circolazione del circuito primario poste all'interno del vessel.

La funzione del pressurizzatore è svolta dalla parte alta del vessel, che è occupata da vapore saturo stagnante a contatto con un pelo libero di liquido stagnante, mantenuto alla temperatura di saturazione da appositi elementi riscaldanti.

Nel nocciolo del reattore sono inserite dall'alto barre di controllo a fascio simili a quelle degli attuali PWR.

Il progetto di massima del reattore si articola nello svolgimento dei punti seguenti, illustrati in dettaglio nel seguito:

1. scelta della posizione del nocciolo e dei generatori di vapore all'interno del vessel;
2. determinazione delle portate primaria e secondaria e della pressione del circuito secondario;
3. dimensionamento di massima del nocciolo;
4. calcolo della temperatura di centro barra nella mezzeria del sottocanale più sollecitato;
5. dimensionamento di massima del vessel;
6. scelta della tipologia dei generatori di vapore e loro dimensionamento di massima;
7. confronto tra il reattore innovativo in esame e i PWR attualmente in esercizio, con riferimento ai principali incidenti considerati nell'ambito dell'analisi di sicurezza.

Nello svolgimento dei punti precedenti si faccia riferimento ai seguenti dati e vincoli:

- > vessel cilindrico con fondo emisferico e coperchio emisferico;
- > altezza del vessel non superiore a 18 m;
- > diametro esterno del vessel non superiore a 4.5 m;
- > potenza termica erogata nel nocciolo: 300 MWt;

- temperatura di ingresso dell'acqua primaria: 292 °C;
- temperatura di uscita dell'acqua primaria: 330 °C;
- 
- temperatura dell'acqua di alimento dei generatori di vapore: 225 °C;
- pressione media assoluta dell'acqua del circuito primario: 155 bar;
- 
- potenza per unità di lunghezza della singola barretta di combustibile, valore medio su tutto il nocciolo: 120 W/cm;
- rapporto tra il flusso termico medio nel nocciolo alla superficie delle barre  $\bar{q}$  e quello massimo  $q_{max}$  pari a  $\frac{\bar{q}}{q_{max}} = 0.432$ .
- diametro esterno delle pastiglie di combustibile: 8.2 mm
- diametro interno delle guaine delle barrette di combustibile: 8.5 mm
- diametro esterno delle guaine delle barrette di combustibile: 9.5 mm
- reticolo degli assemblaggi: quadrato
- rapporto tra il passo del reticolo e il diametro esterno della guaina delle barrette di combustibile: 1.40
- tipo di assemblaggio: 21 x 21; i 441 elementi del reticolo dell'assemblaggio comprendono, oltre alle barrette di combustibile, un singolo tubo per la strumentazione e 48 tubi guida per le barre di controllo;
- lunghezza della parte attiva delle barrette di combustibile: 3 m;
- lunghezza della parte non attiva delle barrette: 0.46 m.

#### Punto (1) - scelta della posizione del nocciolo e dei generatori di vapore all'interno del vessel.

Nello svolgimento di questo punto si tengano presenti l'esigenza di spazio per la movimentazione delle barre di controllo e la necessità di realizzare un regime di circolazione naturale in caso di fuori servizio delle pompe di circolazione del circuito primario.

#### Punto (2) - determinazione delle portate primaria e secondaria e della pressione del circuito secondario.

Ai fini del calcolo delle proprietà fisiche dell'acqua si può assumere, per l'intero circuito primario, la pressione media precedentemente riportata.

La pressione media del circuito secondario nei generatori di vapore non è assegnata e deve essere assunta; tale pressione può essere utilizzata nella determinazione delle proprietà fisiche dell'acqua e del vapore nei generatori di vapore.

Si fa l'ipotesi che il vapore prodotto all'uscita dei generatori di vapore sia saturo.

Le portate del circuito primario e secondario debbono essere determinate sulla base delle temperature precedentemente riportate e della pressione assunta per il circuito secondario.

Per la determinazione delle proprietà fisiche dell'acqua e del vapore possono essere utilizzati i dati riportati in appendice.

Per l'entalpia dell'acqua di alimento si può assumere il valore approssimato di 968 kJ/kg.

### Punto (3) - dimensionamento di massima del nocciolo.

Con riferimento ai dati precedentemente riportati, si calcoli il numero di assemblaggi del nocciolo, nell'ipotesi che in tutti gli assemblaggi siano presenti i tubi guida per le barre di controllo e il tubo della strumentazione. Per lo svolgimento di questo punto può essere necessario determinare una lunghezza attiva delle barrette di combustibile leggermente diversa da quella indicata, al fine di ottenere un numero intero di assemblaggi e una forma adeguata della sezione retta del nocciolo.

Si calcoli quindi la sezione retta dell'assemblaggio assumendo che il lato dell'assemblaggio sia pari a 21 volte il passo del reticolo delle barrette.

Sulla base del numero di assemblaggi ottenuto, si determini l'ingombro radiale del nocciolo.

Si calcoli infine l'area complessiva della sezione retta di passaggio del refrigerante nel nocciolo, nell'ipotesi che i tubi della strumentazione e i tubi guida delle barre di controllo abbiano un diametro esterno pari a quello delle guaine del combustibile.

### Punto (4) - calcolo della temperatura di centro barra nella mezzeria del sottocanale più sollecitato.

Per lo svolgimento di questo punto si facciano le seguenti assunzioni:

- la portata dell'acqua primaria è distribuita in modo uniforme su tutta la sezione retta del nocciolo e pertanto la portata specifica del sottocanale più sollecitato è pari a quella media del nocciolo;
- l'aumento di entalpia tra l'ingresso e l'uscita del sottocanale caldo supera del 35 % quello medio del nocciolo;
- la distribuzione assiale della potenza in tale sottocanale è simmetrica rispetto alla mezzeria del nocciolo e pertanto nella mezzeria del sottocanale l'aumento di entalpia è pari alla metà di quello complessivo che si verifica tra l'ingresso e l'uscita.

Sulla base delle precedenti assunzioni può essere calcolata la temperatura dell'acqua primaria nella mezzeria del sottocanale in esame. Si risale poi alla temperatura di centro barra calcolando la temperatura della superficie esterna della guaina e i successivi aumenti di temperatura che si verificano nella guaina, nell'intercapedine tra la guaina e il combustibile e, infine, nel combustibile stesso.

Per il calcolo della differenza di temperatura  $\Delta T_g$  nell'intercapedine tra la superficie del combustibile e la superficie interna della guaina si può utilizzare la relazione seguente:  $\Delta T_g = q_i / h_{gap}$ , dove  $q_i$  è il flusso termico medio nell'intercapedine ed  $h_{gap}$  è pari a  $6000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ .

La guaina e il combustibile sono rispettivamente realizzati in lega di zirconio e ossido di uranio; per la conducibilità termica si possono assumere i seguenti valori medi:  $k_z = 17 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$  e  $k_{\text{UO}_2} = 3.0 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ .

### Punto (5) - dimensionamento di massima del vessel.

Nello svolgimento di questo punto si scelga l'acciaio con cui deve essere realizzato il vessel; si determinino quindi gli spessori di parete della parte cilindrica e delle parti emisferiche. Per la scelta dell'acciaio e della tensione ammissibile da utilizzare nel calcolo dello spessore si possono utilizzare i dati riportati in appendice.

**Punto (6) - scelta della tipologia dei generatori di vapore e loro dimensionamento di massima.**

Per lo svolgimento di questo punto si effettui una scelta tra le tipologie dei generatore di vapore a ricircolazione e ad attraversamento forzato, valutando l'opportunità di far defluire l'acqua primaria all'interno o all'esterno dei tubi.

Si definisca poi la conformazione geometrica dei tubi del fascio tubiero, scegliendo tra tubi diritti, tubi ad U e tubi avvolti ad elica.

Si scelga quindi il numero dei generatori di vapore, ricordando che il loro ingombro deve essere compatibile con la sistemazione all'interno del vessel.

Per i tubi del generatore di vapore si assuma un diametro esterno di 22 mm e uno spessore di 1.5 mm.

Nel calcolo della superficie di scambio termico si assuma per tutto il generatore di vapore un coefficiente di scambio termico globale di  $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ , riferito alla superficie esterna dei tubi.

Si assuma inoltre la portata specifica nei tubi, da utilizzare per il calcolo del numero di tubi del generatore di vapore.

Si scelga quindi il reticolo del fascio tubiero, considerando le opzioni del reticolo quadrato e del reticolo triangolare equilatero, e adottando un conveniente valore del passo.

Si discutano infine le assunzioni fatte e si illustrino brevemente le modalità di calcolo del coefficiente di scambio termico globale.

**Punto (7) - confronto tra il reattore innovativo in esame e i PWR attualmente in esercizio, con riferimento ai principali incidenti considerati nell'ambito dell'analisi di sicurezza.**

Si discutano possibili incidenti di riferimento da utilizzare nell'analisi di sicurezza del reattore in esame, effettuando un confronto con il caso dei reattori PWR attualmente in esercizio.

**Appendice 1 - Proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata alla pressione di 155 bar**

temperatura °C	densità kg/m <sup>3</sup>	entalpia kJ/kg	viscosità kg/(m s)	conducibilità termica W/(m °C)	calore specifico a pressione costante J/(kg °C)
290	746.5	1283.5	92.40 10 <sup>-6</sup>	0.5807	5263.3
300	726.8	1336.9	88.50 10 <sup>-6</sup>	0.5628	5452.5
310	705.1	1392.8	84.57 10 <sup>-6</sup>	0.5431	5738.6
320	680.5	1452.1	80.49 10 <sup>-6</sup>	0.5216	6140.6
330	651.9	1516.3	76.10 10 <sup>-6</sup>	0.4982	6762.8

**Appendice 2 - Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore in saturazione a differenti temperature**

temperatura °C	pressione bar	entalpia liquido kJ/kg	entalpia vapore kJ/kg	densità liquido kg/m <sup>3</sup>	densità vapore kg/m <sup>3</sup>
225	25.48	966.7	2802.4	833.9	12.75
230	27.95	990.0	2803.1	827.3	13.98
240	33.45	1037.2	2803.0	813.5	16.74
250	39.74	1085.3	2800.7	799.1	19.96
260	46.89	1134.4	2796.2	783.8	23.70
270	55.00	1184.6	2789.1	767.7	28.06
280	64.13	1236.1	2779.2	750.5	33.2
290	74.38	1289.1	2765.9	732.2	39.12
300	85.84	1344.1	2748.7	712.4	46.20
310	98.61	1401.2	2727.0	691.0	54.52
320	112.79	1461.3	2699.7	667.4	64.62
330	128.52	1525.0	2665.3	641.0	77.01

**Appendice 3 - Tipici valori delle proprietà per acciai al carbonio e inossidabili**

acciaio	temp. K	densità kg/m <sup>3</sup>	coefficiente di espansione termica lineare K <sup>-1</sup>	carico di rottura MPa	carico di snervamento MPa	modulo di Young 10 <sup>9</sup> Pa	coefficiente di Poisson -
Acciaio al carbonio (A 533-B)	300	7860	-	550	340	207	0.28
	600	-	10.2 10 <sup>-6</sup>	530	280	182	-
	750	-	10.4 10 <sup>-6</sup>	450	240	172	-
	800	-	10.4 10 <sup>-6</sup>	390	200	169	-
Acciaio inossidabile (tipo 347)	300	7950	-	520	210	-	-
	500	7860	16.9 10 <sup>-6</sup>	420	-	173	0.30
	700	7710	17.4 10 <sup>-6</sup>	400	150	166	0.31
	800	-	18.5 10 <sup>-6</sup>	390	-	157	0.32