

POLITECNICO DI TORINO

**ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
II SESSIONE - ANNO 1999**

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto lo studio di massima dei principali componenti del circuito primario di un reattore nucleare innovativo refrigerato e moderato ad acqua in pressione. Con riferimento alle caratteristiche del nocciolo riportate più oltre, debbono in particolare essere sviluppati i punti seguenti:

1. calcolo della potenza estraibile dal nocciolo e della portata di refrigerante primario;
2. dimensionamento della tubazione del circuito primario;
3. dimensionamento di massima del generatore di vapore;
4. analisi della condizione incidentale conseguente ad una rottura nel circuito primario.

Al testo sono allegate alcune tabelle di dati.

1. Calcolo della potenza estraibile dal nocciolo e della portata di refrigerante primario.

Il nocciolo è costituito da elementi di combustibile con barrette disposte secondo un reticolo quadrato, simili a quelli tipici dei reattori PWR, ma di lunghezza minore; i principali parametri geometrici del nocciolo sono riportati nella tabella seguente:

numero di elementi di combustibile	89
disposizione delle barrette di combustibile nell'elemento	17 x 17
dimensioni dell'elemento di combustibile	21.4 x 21.4 cm
numero di barrette di combustibile per elemento	264
diametro esterno delle barrette di combustibile	0.95 cm
lunghezza attiva delle barrette di combustibile	260 cm
spessore della guaina delle barrette di combustibile	0.63 mm
diametro delle pastiglie di combustibile	0.82 cm
passo delle barrette	1.26 cm

Come indicato in tabella, nel reticolo sono presenti $17 \times 17 = 289$ barrette, di cui solo 264 di combustibile. Si suppone, per semplicità, che il diametro delle restanti 25 barrette sia uguale a quello del combustibile.

Vengono inoltre assegnati i seguenti dati relativi all'andamento del flusso termico erogato dall'unità di superficie delle barrette di combustibile:

rapporto tra il flusso termico medio della barretta più sollecitata e quello medio dell'intero nocciolo	1.33
rapporto tra il flusso termico massimo e quello medio della barretta più sollecitata	1.71

Nello svolgimento del calcolo si facciano le seguenti ipotesi:

- la portata di refrigerante primario è distribuita uniformemente sulla sezione dell'intero nocciolo e la portata specifica è pertanto costante per tutti i sottocanali;
- la distribuzione assiale della potenza è simmetrica rispetto alla mezzeria del nocciolo e pertanto il massimo flusso termico e la massima temperatura di centro barra vengano raggiunte al centro del nocciolo;
- la pressione media dell'acqua primaria è di 75 bar;
- la temperatura di ingresso dell'acqua nel nocciolo è di 214 °C;
- la temperatura media di uscita dell'acqua dal nocciolo è di 254 °C.

Con riferimento ai precedenti dati ed assunzioni, si determini:

- la potenza estraibile dal nocciolo nell'ipotesi che la massima temperatura di centro barra sia pari a 1050 °C;
- la portata di refrigerante primario.

Il Candidato può fare riferimento ai seguenti elementi:

- correlazione di Weisman per il calcolo del coefficiente di scambio termico per barrette disposte secondo un reticolo quadrato:

$$h = \left(0.042 \frac{P}{d} - 0.024 \right) \frac{k}{d_e} \left(\frac{d_e G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{0.4} \quad \text{dove:}$$

c_p	calore specifico a pressione costante	h	coefficiente di scambio termico
d	diametro esterno delle barre	k	conducibilità termica del refrigerante
d_e	diametro idraulico del sottocanale	μ	viscosità dinamica
G	portata specifica		

le proprietà fisiche del refrigerante sono calcolate alla temperatura di massa; il diametro idraulico del sottocanale è calcolato secondo l'usuale definizione, con riferimento all'area di passaggio e al perimetro bagnato di un sottocanale;

- valore medio della conducibilità termica della lega di Zirconio di cui sono costituite le barrette: 17 W/(m °C);
- valore medio della conducibilità termica dell'ossido di uranio: 3.0 W/(m °C) (in alternativa può essere utilizzata un'espressione dell'andamento della conducibilità in funzione della temperatura, per ossido di uranio con una densità pari al 95 % di quella teorica);
- differenza di temperatura ΔT_g nell'intercapedine tra la superficie della pastiglia e la superficie interna della guaina: $\Delta T_g = \frac{q_i}{h_{gap}}$, dove q_i è il flusso termico medio nell'intercapedine ed h_{gap} è pari a 6000 W/(m² °C).

Per il calcolo del coefficiente di scambio termico occorre assumere un valore di tentativo della portata specifica, da verificare sulla base della portata successivamente calcolata.

Nello svolgimento del calcolo si facciano le seguenti ipotesi:

- la portata di refrigerante primario è distribuita uniformemente sulla sezione dell'intero nocciolo e la portata specifica è pertanto costante per tutti i sottocanali;
- la distribuzione assiale della potenza è simmetrica rispetto alla mezzeria del nocciolo e pertanto il massimo flusso termico e la massima temperatura di centro barra vengano raggiunte al centro del nocciolo;
- la pressione media dell'acqua primaria è di 75 bar;
- la temperatura di ingresso dell'acqua nel nocciolo è di 214 °C;
- la temperatura media di uscita dell'acqua dal nocciolo è di 254 °C.

Con riferimento ai precedenti dati ed assunzioni, si determini:

- la potenza estraibile dal nocciolo nell'ipotesi che la massima temperatura di centro barra sia pari a 1050 °C;
- la portata di refrigerante primario.

Il Candidato può fare riferimento ai seguenti elementi:

- correlazione di Weisman per il calcolo del coefficiente di scambio termico per barrette disposte secondo un reticolo quadrato:

$$h = \left(0.042 \frac{P}{d} - 0.024\right) \frac{k}{d_e} \left(\frac{d_e G}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{0.4} \quad \text{dove:}$$

c_p	calore specifico a pressione costante	h	coefficiente di scambio termico
d	diametro esterno delle barre	k	conducibilità termica del refrigerante
d_e	diametro idraulico del sottocanale	μ	viscosità dinamica
G	portata specifica		

le proprietà fisiche del refrigerante sono calcolate alla temperatura di massa; il diametro idraulico del sottocanale è calcolato secondo l'usuale definizione, con riferimento all'area di passaggio e al perimetro bagnato di un sottocanale;

- valore medio della conducibilità termica della lega di Zirconio di cui sono costituite le barrette: 17 W/(m °C);
- valore medio della conducibilità termica dell'ossido di uranio: 3.0 W/(m °C) (in alternativa può essere utilizzata un'espressione dell'andamento della conducibilità in funzione della temperatura, per ossido di uranio con una densità pari al 95 % di quella teorica);
- differenza di temperatura ΔT_g nell'intercapedine tra la superficie della pastiglia e la superficie interna della guaina: $\Delta T_g = \frac{q_i}{h_{gap}}$, dove q_i è il flusso termico medio nell'intercapedine ed h_{gap} è pari a 6000 W/(m² °C).

Per il calcolo del coefficiente di scambio termico occorre assumere un valore di tentativo della portata specifica, da verificare sulla base della portata successivamente calcolata.

Tabella 4 - Dati geometrici per i tubi del fascio tubiero del generatore di vapore (misure in pollici)

diametro nominale (in)	diametro interno (in)	spessore della parete (in)	diametro nominale (in)	diametro interno (in)	spessore della parete (in)
1/2	0.282	0.109	1	0.902	0.049
1/2	0.334	0.083	1 1/4	0.920	0.165
1/2	0.370	0.065	1 1/4	0.954	0.148
1/2	0.402	0.049	1 1/4	0.982	0.134
1/2	0.430	0.035	1 1/4	1.01	0.120
3/4	0.482	0.134	1 1/4	1.03	0.109
3/4	0.510	0.120	1 1/4	1.06	0.095
3/4	0.532	0.109	1 1/4	1.08	0.083
3/4	0.560	0.095	1 1/4	1.11	0.072
3/4	0.584	0.083	1 1/4	1.12	0.065
3/4	0.606	0.072	1 1/4	1.13	0.058
3/4	0.620	0.065	1 1/4	1.15	0.049
3/4	0.634	0.058	1 1/2	1.17	0.165
3/4	0.652	0.049	1 1/2	1.20	0.148
1	0.67	0.165	1 1/2	1.23	0.134
1	0.704	0.148	1 1/2	1.26	0.120
1	0.732	0.134	1 1/2	1.28	0.109
1	0.760	0.120	1 1/2	1.31	0.095
1	0.782	0.109	1 1/2	1.33	0.083
1	0.810	0.095	1 1/2	1.36	0.072
1	0.834	0.083	1 1/2	1.37	0.065
1	0.856	0.072	1 1/2	1.38	0.058
1	0.870	0.065	1 1/2	1.40	0.049
1	0.884	0.058			

Tabella 5 - Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore saturi a 18.8 bar (temperatura 209.3 °C)

liquido			vapore		
densità	853.7	kg/m ³	densità	9.452	kg/m ³
entalpia	894.5	kJ/kg	entalpia	2797.4	kJ/kg
calore specifico a pressione costante	4.538	kJ/(kg °C)	calore specifico a pressione costante	2.932	kJ/(kg °C)
viscosità	127.4 10 ⁻⁶	kg/(m s)	viscosità	16.10 10 ⁻⁶	kg/(m s)
conducibilità termica	0.6575	W/(m °C)	conducibilità termica	0.0419	W/(m °C)

Tabella 6 - Proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata 18.8 bar e 150 °C

densità	917.9	kg/m ³
entalpia	633.2	kJ/kg
calore specifico a pressione costante	4.307	kJ/(kg °C)
viscosità	182.4 10 ⁻⁶	kg/(m s)
conducibilità termica	0.6830	W/(m °C)

Tabella 7 - Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore saturi a 75 bar (temperatura 290.6 °C)

liquido			vapore		
densità	731.1	kg/m ³	densità	39.49	kg/m ³
entalpia	1292.2	kJ/kg	entalpia	2765.0	kJ/kg
calore specifico a pressione costante	5.499	kJ/(kg °C)	calore specifico a pressione costante	5.377	kJ/(kg °C)
viscosità	89.38 10 ⁻⁶	kg/(m s)	viscosità	19.28 10 ⁻⁶	kg/(m s)
conducibilità termica	0.5642	W/(m °C)	conducibilità termica	0.0648	W/(m °C)

Tabella 8 - Proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata 75 bar e temperature da 214 °C a 290 °C

temperatura (°C)	densità (kg/m ³)	entalpia kJ/(kg °C)	calore specifico a pressione costante kJ/(kg °C)	viscosità kg/(m s)	conducibilità termica W/(m°C)
214	852.4	917.7	4.528	125.9 10 ⁻⁶	0.6594
220	844.9	945.0	4.564	122.3 10 ⁻⁶	0.6549
230	831.7	991.0	4.633	116.7 10 ⁻⁶	0.6464
240	817.8	1037.7	4.714	111.6 10 ⁻⁶	0.6368
250	803.1	1085.3	4.811	106.8 10 ⁻⁶	0.6259
254	797.0	1104.6	4.854	105.0 10 ⁻⁶	0.6211
260	787.4	1134.0	4.927	102.3 10 ⁻⁶	0.6134
270	770.6	1183.9	5.070	97.97 10 ⁻⁶	0.5993
280	752.3	1235.5	5.249	93.78 10 ⁻⁶	0.5833
290	732.3	1289.1	5.483	89.62 10 ⁻⁶	0.5653

Tabella 9 - Tipici valori della tensione ammissibile di alcuni materiali in funzione della temperatura

materiale	temperatura		tensione ammissibile	
	(F)	(°C)	(psi)	N/mm ²
acciaio al carbonio	100	38	20000	137.9
acciaio al carbonio	600	316	17300	119.3
acciaio al cromo - molibdeno	100	38	23300	160.6
acciaio al cromo - molibdeno	600	316	20800	143.4
acciaio inossidabile tipo 304	100	38	20000	137.9
acciaio inossidabile tipo 304	600	316	16400	113.1
inconel	100	38	23300	160.6
inconel	600	316	23300	160.6