POLITECNICO DI TORINO

ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
II SESSIONE - ANNO 1997

Ramo Nucleare TEMA N. 2

Il reattore nucleare moderato e refrigerato ad acqua pressurizzata di Loviisa, in Finlandia, eroga in condizioni nominali una potenza termica di 1375 MW e una potenza elettrica lorda di 465 MW. Il refrigerante primario, acqua leggera, entra nei canali del reattore alla pressione assoluta di 123 bar e alla temperatura di 267 °C ed esce dal vessel alla temperatura di 296 °C.

Il reattore differisce notevolmente dai reattori ad acqua pressurizzata costruiti negli altri stati: il sistema primario è infatti dotato di sei circuiti e sei generatori di vapore che producono vapore saturo con umidità dello 0.25% alla pressione di 44 bar; la temperatura dell'acqua di alimento all'ingresso dei generatori di vapore è di 225 °C.

Il nocciolo contiene 349 elementi di combustibile, completamente diversi dalla tipologia PWR e caratterizzati da:

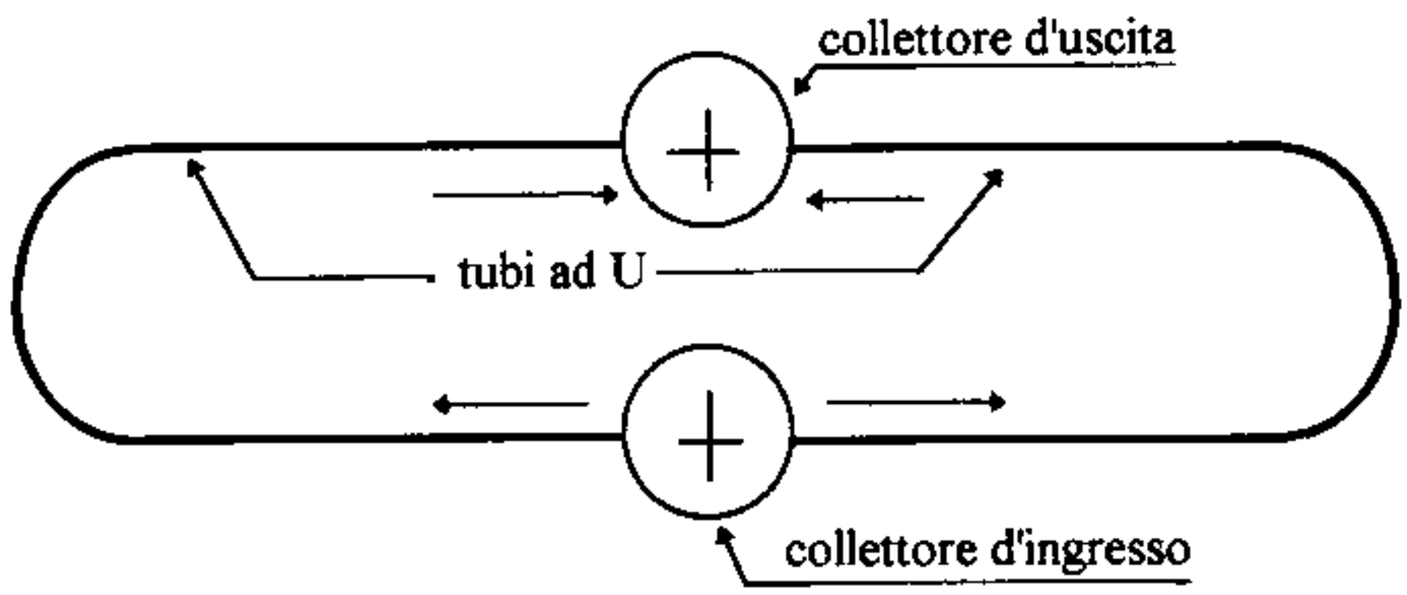
- assemblaggi esagonali chiusi;
- reticolo delle barre di combustibile: triangolare equilatero;
- passo del reticolo: 12.8 mm;
- n° barre di combustibile per assemblaggio: 126;
- lunghezza attiva delle barre: 2400 mm;
- diametro interno delle guaine: 7.8 mm;
- diametro esterno delle guaine : 9.1 mm;
- diametro delle pastiglie: 7.5 mm;
- lato della scatola esagonale di contenimento: 0.0852 m.

Per calcolare la sezione retta di passaggio del refrigerante primario si tenga presente che l'assemblaggio contiene, oltre alle 126 barre di combustibile, una barra avente funzione di supporto e strumentazione, di diametro uguale a quello delle barre di combustibile.

Le pastiglie di combustibile sono realizzate in ossido di uranio arricchito e le guaine in lega di Zirconio.

I generatori di vapore sono del tipo a ricircolazione, con separatori di vapore ed essicatori; il titolo medio della miscela bifase all'ingresso dei separatori è del 30 %. Il fascio tubiero è costituito da tubi ad U con giacitura orizzontale, che fanno capo a due collettori verticali; il fluido primario defluisce all'interno dei tubi.

Il fascio tubiero è suddiviso in due parti, disposte simmetricamente rispetto ai collettori come indicato nello schema seguente:



Il condensatore opera alla pressione di 0.036 bar ed è raffreddato con acqua di mare, la cui portata entra alla temperatura di 10 °C ed esce alla temperatura di 20 °C.

Con riferimento ai dati precedenti, il candidato sviluppi i punti seguenti:

1. calcolo della portata in massa di refrigerante primario.

2. Calcolo della portata in massa totale di vapore saturo prodotta nei sei generatori di vapore.

3. Calcolo della portata di acqua di mare che attraversa il condensatore (per le proprietà fisiche dell'acqua di mare si faccia riferimento, in via approssimata, alle proprietà fisiche dell'acqua pura riportate in appendice).

4. Calcolo della temperatura media del refrigerante primario all'uscita degli assemblaggi di combustibile, nell'ipotesi che la portata totale di refrigerante primario si ripartisca nel modo seguente:

   – il 90 % della portata primaria totale defluisce all'interno dei 349 assemblaggi di combustibile;

   – il 10 % della portata (portata di *by - pass*) defluisce nelle intercapedini delimitate dagli assemblaggi e dal contenitore esterno del nocciolo;

   si trascuri la potenza asportata dalla portata di *by - pass*.

5. Calcolo della temperatura di centro barra a metà altezza del nocciolo, nella barra più sollecitata termicamente, con le ipotesi seguenti:

   – andamento simmetrico del flusso neutronico assiale;

   – equiripartizione della portata tra tutti gli assemblaggi del nocciolo;

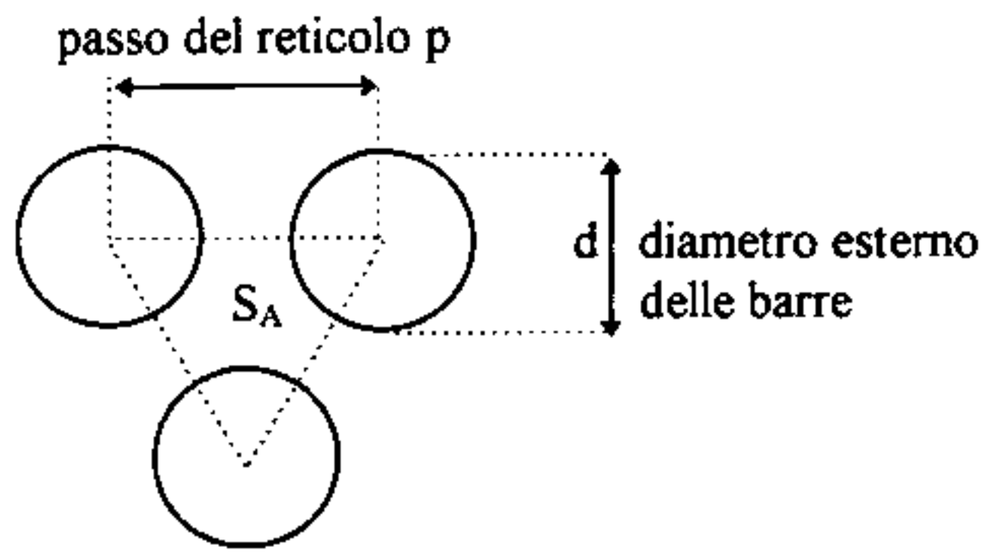
- portata specifica uniforme nella sezione retta di deflusso degli assemblaggi;
- rapporto tra il flusso termico medio nel nocciolo alla superficie delle barre $\bar{q}$ e quello massimo q_{max} pari a $\frac{\bar{q}}{q_{max}} = 0.432$;

per il calcolo del coefficiente di scambio termico si utilizzi la correlazione di Weisman, valida per fasci di barre con reticolo triangolare equilatero:

$$h = \left(0.026\frac{p}{d} - 0.006\right)\frac{k}{d_e}\left(\frac{d_e G}{\mu}\right)^{0.8}\left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{0.4}$$ 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, considerando l'area di passaggio S_A indicata in figura e il perimetro bagnato Pb = $\pi d/2$;



per il calcolo della differenza di temperatura ΔT_g nell'intercapedine tra la superficie della pastiglia e la superficie interna della guaina si utilizzi la relazione seguente: $\Delta T_g = \frac{q_i}{h_{gap}}$, dove q_i è il flusso termico medio nell'intercapedine ed h_{gap} è pari a 6000 W/(m^2 °C);

per la conducibilità termica della lega di zirconio k_{zr} e dell'ossido di uranio k_{UO2} si utilizzino i seguenti valori medi: k_{zr} = 17 W/(m °C) e k_{UO2} = 3.0 W/(m °C).

6. Dimensionamento di massima del generatore di vapore; si determini:

   – la superficie di scambio termico;

   – il numero e la lunghezza media dei tubi ad U;

   si suppongono trascurabili tutte le dispersioni di potenza verso l'esterno che si verificano nel circuito primario;

   nello svolgimento di questo punto il candidato deve assumere adeguati valori dei diametri interno ed esterno dei tubi, scelti tra quelli riportati nella tabella dell'appendice, verificando la resistenza a pressione; i tubi sono realizzati in Inconel, per il quale si assume una tensione ammissibile di 140 N/mm^2;

   per il calcolo della superficie di scambio termico si adotti un coefficiente globale di scambio termico di 4000 $W/(m^2\ °C)$ e si trascuri il sottoraffreddamento dell'acqua secondaria all'imbocco del fascio tubiero; in tale ipotesi la temperatura del fluido primario può essere ritenuta costante e pari a quella di saturazione.

7. Dimensionamento di massima del condensatore, nell'ipotesi che il fascio tubiero sia realizzato con tubi diritti. Si assuma un coefficiente di scambio termico globale di 3500 $W/(m^2\ °C)$ e si calcoli:

   – la superficie di scambio termico;

   – il numero di tubi e la loro lunghezza, assumendo adeguati valori dei diametri interno ed esterno, tratti dalla tabella riportata in appendice.

   Si calcoli quindi l'effettivo coefficiente di scambio termico globale corrispondente ai parametri geometrici precedentemente determinati; si assumano allo scopo un coefficiente di scambio termico di 15000 $W/(m^2\ °C)$ per il vapore condensante e una conducibilità termica dei tubi, realizzati in bronzo di alluminio, di 80 W/(m °C); si aggiorni quindi il dimensionamento in base al coefficiente globale di scambio termico calcolato.

APPENDICE - Dimensioni dei tubi unificati e proprietà fisiche dell'acqua e del vapore

Diametri esterni commerciali D e spessori s dei tubi usati nella costruzione di scambiatori di calore (NUOVO COLOMBO, Manuale dell'Ingegnere pg. B-169)

D (mm)	10	14	20	25	30	44.5
s (mm)	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5

Proprietà fisiche dell'acqua in funzione della temperatura alle pressioni di 120 bar e 130 bar: entalpia h, calore specifico a pressione costante c_p, viscosità dinamica μ, conducibilità termica k, volume specifico v; *i valori del volume specifico e della conducibilità termica debbono essere divisi per 10^3; i valori della viscosità debbono essere divisi per 10^6.*
(Da P. Gregorio - Fisica Tecnica - Esercizi svolti - Tabelle)

	p = 120 bar				p=130 bar			
T (°C)	260	280	300	320	260	280	300	320
h (kJ/kg)	1133.5	1233.4	1340.2	1459.5	1133.5	1232.9	1339.2	1457.2
c_p (kJ/(kg °C))	4.861	5.140	5.586	6.461	4.847	5.118	5.546	6.358
μ (kg/m/s)	103.6	95.24	87.21	78.74	103.9	95.55	87.59	79.26
k (W/m/°C)	619.5	591.1	555.4	511.6	620.9	592.7	557.6	514.6
v (m^3/kg)	1.2611	1.3168	1.3892	1.4930	1.2593	1.3142	1.3852	1.4858

Proprietà fisiche dell'acqua in funzione della temperatura alle pressioni di 40 bar e 45 bar: entalpia h, calore specifico a pressione costante c_p , viscosità dinamica μ, conducibilità termica k, volume specifico v; *i valori del volume specifico e della conducibilità termica debbono essere divisi per 10^3; i valori della viscosità debbono essere divisi per 10^6.*
(Da P. Gregorio - Fisica Tecnica - Esercizi svolti - Tabelle)

	p = 40 bar		p = 45 bar	
T (°C)	220	240	220	240
h (kJ/kg)	944.0	1037.3	944.1	1037.3
c_p (kJ/(kg °C))	4.590	4.751	4.587	4.746
μ (kg/m/s)	121.4	110.6	121.5	110.8
k (W/m/°C)	651.5	632.8	651.9	633.4
v (m^3/kg)	1.1879	1.2282	1.1873	1.2274

Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore in condizioni di saturazione alle pressioni di 44 bar e 123 bar a cui corrisponde la temperatura di saturazione T_{sat}: entalpia h, calore specifico a pressione costante c_p , viscosità dinamica μ, conducibilità termica k, volume specifico v; *i valori del volume specifico e della conducibilità termica debbono essere divisi per 10^3; i valori della viscosità debbono essere divisi per 10^6.*
(Da P. Gregorio - Fisica Tecnica - Esercizi svolti - Tabelle e da programma SATTEST)

	p = 44 bar		p = 123 bar	
T_{sat} (°C)	256.11		326.60	
	liquido	vapore	liquido	vapore
h (kJ/kg)	1115.2	2798.3	1502.8	2677.9
c_p (kJ/(kg °C))	4.925	3.948	6.947	8.859
μ (kg/m/s)	103.1	17.8	75.8	21.4
k (W/m/°C)	614.2	52.9	496.1	90.3
v (m^3/kg)	1.2660	45.096	1.5357	13.794

Proprietà fisiche dell'acqua in funzione della temperatura alle pressioni di 1 bar e 5 bar: entalpia h, calore specifico a pressione costante c_p , viscosità dinamica μ, conducibilità termica k, volume specifico v; *i valori del volume specifico e della conducibilità termica debbono essere divisi per 10^3; i valori della viscosità debbono essere divisi per 10^6.*
(Da P. Gregorio - Fisica Tecnica - Esercizi svolti - Tabelle)

	p = 1 bar		p = 5 bar	
T (°C)	10	20	10	20
h (kJ/kg)	42.1	83.9	42.5	84.3
c_p (kJ/(kg °C))	4.188	4.183	4.186	4.182
μ (kg/m/s)	1308	1003	1307	1003
k (W/m/°C)	580.1	598.5	580.3	598.6
v (m^3/kg)	1.0003	1.0018	1.0001	1.0016

Temperatura di saturazione T_{sat} corrispondente alle pressioni di 0.035 bar e 0.040 bar.
(Da P. Gregorio - Fisica Tecnica - Esercizi svolti - Tabelle)

	p = 0.035 bar	p = 0.040 bar
T_{sat} (°C)	26.68	28.97