

## POLITECNICO DI TORINO

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

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto il dimensionamento di massima di alcuni componenti del *Safety Core Cooling System* (SCCS) di un reattore nucleare innovativo ad acqua in pressione. Il reattore è del tipo PWR, moderato e refrigerato ad acqua leggera in pressione ed eroga una potenza termica di 600 MW; è dotato di un unico circuito di refrigerazione, nel quale sono inseriti il generatore di vapore e la pompa di circolazione.

Il sistema SCCS è adibito alla rimozione della potenza di decadimento dei prodotti di fissione in condizioni di emergenza e trasferisce la potenza di decadimento all'ambiente esterno, con modalità di funzionamento completamente passive, basate sulla circolazione naturale dei fluidi termovettori.

Il sistema SCCS, rappresentato schematicamente in fig. 1, è costituito da più circuiti in cascata, che forniscono barriere ridondanti tra il refrigerante primario e l'ambiente esterno.

Esso comprende un circuito primario di sicurezza (*Primary Safety Cooling Loop* - PSC), un circuito intermedio (*Intermediate Safety Cooling Loop* - ISC) e un terzo circuito (*Third Safety Cooling Loop* - TSC), che dissipa la potenza mediante una torre di raffreddamento a secco raffreddata ad aria in circolazione naturale. La circolazione dell'acqua nei tre circuiti avviene in assenza di pompe, per il solo effetto delle differenze di densità.

Il circuito primario PSC trasferisce la potenza termica di decadimento dal reattore al circuito intermedio ISC attraverso lo scambiatore di calore a tubi e mantello con tubi ad U ad asse orizzontale rappresentato in figura 1, in cui l'acqua primaria defluisce lato tubi.

Il circuito intermedio ISC, operante con acqua in pressione, trasferisce a sua volta la potenza alla piscina contenente acqua a pressione ambiente (assunta pari a 1.013 bar), attraverso lo scambiatore di calore a tubi orizzontali indicato in figura 1. Nella fase iniziale del funzionamento dei circuiti SCCS la temperatura dell'acqua aumenta fino a raggiungere quella di saturazione; raggiunto tale valore, inizia l'evaporazione di una portata di acqua corrispondente alla potenza ceduta. Per il dimensionamento richiesto nel seguito si assumono condizioni stazionarie con l'acqua in saturazione alla pressione ambiente e una produzione di vapore corrispondente alla potenza di progetto.

La pressione nel circuito intermedio ISC è mantenuta da un apposito pressurizzatore ad un valore di poco inferiore a quella del nocciolo; nel seguito si fa

l'assunzione che la pressione media nel circuito intermedio sia uguale a quella del circuito primario.

La potenza termica viene infine trasferita attraverso il circuito TSC alla torre di raffreddamento, dove la portata di vapore viene condensata nel condensatore indicato in figura; il condensato ritorna nella piscina in regime di circolazione naturale, sempre attraverso la tubazione del circuito TSC.

Nelle condizioni di funzionamento operative normali del reattore la circolazione dell'acqua nel circuito PSC è impedita da apposite valvole, che si aprono automaticamente quando è richiesto l'intervento del sistema SCCS; l'apertura delle valvole rende possibile la circolazione dei fluidi precedentemente descritta.

Nello studio del PSC si suppone che la pompa di circolazione del reattore sia ferma e che non circoli portata nel generatore di vapore. Con queste ipotesi, la portata di refrigerante primario che percorre il nocciolo coincide con quella del circuito PSC.

Il sistema SCCS deve essere dimensionato per rimuovere una potenza termica di progetto di 20 MW, in una condizione di funzionamento stazionaria.

Oltre alla potenza di progetto sono assegnati i seguenti altri dati (in parte anche indicati in fig. 1):

temperatura dell'acqua primaria all'ingresso del nocciolo: 215 °C

temperatura dell'acqua primaria all'uscita del nocciolo: 230 °C

pressione media nel nocciolo: 75 bar

dislivello tra il bocchello di uscita dal vessel del circuito PSC e l'ingresso nello scambiatore di calore con tubi ad U: 7 m

dislivello tra i bocchelli del vessel di ingresso e uscita del circuito PSC: 1.8 m

altezza del nocciolo: 3 m

dislivello tra la sommità del nocciolo e il bocchello di ingresso della tubazione PSC nel vessel: 0.4 m

distanza tra il vessel e lo scambiatore con tubi ad U: 15 m.

Con riferimento agli elementi precedentemente indicati si sviluppino in particolare i punti seguenti:

1. calcolo della portata circolante nel circuito PSC;
2. scelta di opportuni valori delle temperature dell'acqua del circuito ISC all'ingresso e all'uscita dello scambiatore con tubi ad U;

3. calcolo della portata circolante nel circuito ISC;
4. determinazione della portata di vapore prodotta nella piscina, nell'ipotesi che il condensato proveniente dalla torre di raffreddamento sia liquido saturo;
5. scelta di un opportuno valore della temperatura dell'aria all'uscita della torre di raffreddamento;
6. determinazione della portata di aria circolante nella torre, nell'ipotesi che la temperatura dell'aria ambiente sia pari a 20 °C;
7. dimensionamento dello scambiatore di calore con tubi ad U;
8. scelta del diametro della tubazione PSC, nell'ipotesi che il suo percorso giaccia in un piano verticale e sia del tipo rappresentato in figura 1; per il calcolo delle cadute di pressione per attrito e localizzate nel nocciolo e nel *downcomer* si utilizzi la formulazione seguente:  $\Delta p_{\text{nocciolo}} = 2.077 \cdot 10^{-8} W^2$ , dove  $\Delta p_{\text{nocciolo}}$  è espressa in bar e la portata  $W$  in kg/s;
9. dimensionamento dello scambiatore di calore a tubi orizzontali inserito nella piscina, nell'ipotesi che il coefficiente di scambio termico lato acqua in evaporazione alla pressione  $p$  sia dato dalla relazione seguente (Mostinski, 1963):

$$h = 0.106 p_c^{0.69} \phi^{0.7} (1.8 p_R^{0.17} + 4 p_R^{1.2} + 10 p_R^{10}) \quad \text{con:}$$

$$h \quad \text{coefficiente di scambio termico} \quad \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$\phi \quad \text{flusso termico} \quad \frac{W}{m^2}$$

$$p_c \quad \text{pressione critica} \quad \text{bar}$$

$$p_R \quad \text{pressione ridotta} \quad \frac{p}{p_c}$$

Si individuino e si discutano infine le problematiche legate al progetto e al funzionamento del sistema SCCS.

Quale materiale per la realizzazione degli scambiatori di calore e delle tubazioni di collegamento si scelga l'acciaio inossidabile, facendo riferimento alle proprietà fisiche e meccaniche riportate più oltre.

Nelle tabelle seguenti sono riportati ulteriori dati utili nello svolgimento dei calcoli.

Proprietà fisiche dell'acqua a 75 bar					
temperatura °C	massa volumica kg/m <sup>3</sup>	entalpia kJ/kg	conducibilità termica W/(m °C)	viscosità dinamica kg/(m s)	calore specifico a pressione costante kJ/(kg °C)
105	958.2	445.6	0.6847	270.0 10 <sup>-6</sup>	4.207
110	954.5	466.7	0.6859	257.0 10 <sup>-6</sup>	4.215
115	950.7	487.8	0.6869	245.1 10 <sup>-6</sup>	4.222
120	946.8	508.9	0.6875	234.1 10 <sup>-6</sup>	4.230
125	942.7	530.1	0.6880	224.0 10 <sup>-6</sup>	4.239
130	938.6	551.3	0.6882	214.7 10 <sup>-6</sup>	4.248
135	934.4	572.6	0.6882	206.1 10 <sup>-6</sup>	4.258
140	930.0	593.9	0.6879	198.1 10 <sup>-6</sup>	4.268
145	925.6	615.3	0.6875	190.7 10 <sup>-6</sup>	4.279
150	921.0	636.7	0.6868	183.8 10 <sup>-6</sup>	4.290
155	916.3	658.2	0.6859	177.4 10 <sup>-6</sup>	4.302
160	911.6	679.7	0.6849	171.4 10 <sup>-6</sup>	4.315
165	906.7	701.3	0.6836	165.8 10 <sup>-6</sup>	4.328
170	901.7	723.0	0.6821	160.5 10 <sup>-6</sup>	4.343
175	896.6	744.7	0.6804	155.6 10 <sup>-6</sup>	4.359
180	891.3	766.6	0.6784	151.0 10 <sup>-6</sup>	4.375
185	886.0	788.5	0.6763	146.7 10 <sup>-6</sup>	4.393
190	880.5	810.5	0.6740	142.6 10 <sup>-6</sup>	4.413
195	874.9	832.6	0.6714	138.7 10 <sup>-6</sup>	4.433
200	869.2	854.8	0.6686	135.1 10 <sup>-6</sup>	4.456
205	863.3	877.2	0.6655	131.6 10 <sup>-6</sup>	4.480
210	857.3	899.6	0.6622	128.3 10 <sup>-6</sup>	4.506
215	851.2	922.2	0.6587	125.2 10 <sup>-6</sup>	4.534
220	844.9	945.0	0.6549	122.3 10 <sup>-6</sup>	4.564
225	838.4	967.9	0.6508	119.4 10 <sup>-6</sup>	4.597
230	831.7	991.0	0.6465	116.7 10 <sup>-6</sup>	4.633

Entalpia dell'acqua e del vapore in saturazione a 1.013 bar		
temperatura di saturazione °C	entalpia del liquido kJ/kg	entalpia del vapore kJ/kg
99.99	419.0	2675.7

Valori tipici dei diametri esterni commerciali e spessori dei tubi usati nella costruzione degli scambiatori di calore						
diametro esterno (mm)	10	14	20	25	30	44.5
spessore (mm)	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5

Valori tipici del coefficiente di scambio termico globale per scambiatori di calore acqua - acqua:	
850-1700 W/(m <sup>2</sup> °C)	

Conducibilità termica degli acciai austenitici $W/(m\ ^\circ C)$				
temperatura ( $^\circ C$ )	0	100	200	300
conducibilità termica ( $W/(m\ ^\circ C)$ )	16.3	17	17	19

Valore tipico della resistenza termica di fouling (da utilizzare sia con acqua monofase che in ebollizione):

$0.00020\ m^2\ ^\circ C / W$

Calore specifico a pressione costante dell'aria in funzione della temperatura alla pressione di 1.013 bar

temperatura (K)	250	300	350	400
calore specifico ( $J/(kg\ K)$ )	1005.3	1005.7	1009.0	1014.0

Tensione ammissibile per acciai inossidabili austenitici (tubi e lamiere per componenti in pressione), valore tipico da impiegare nel campo di temperatura del presente dimensionamento:  $110\ N/mm^2$

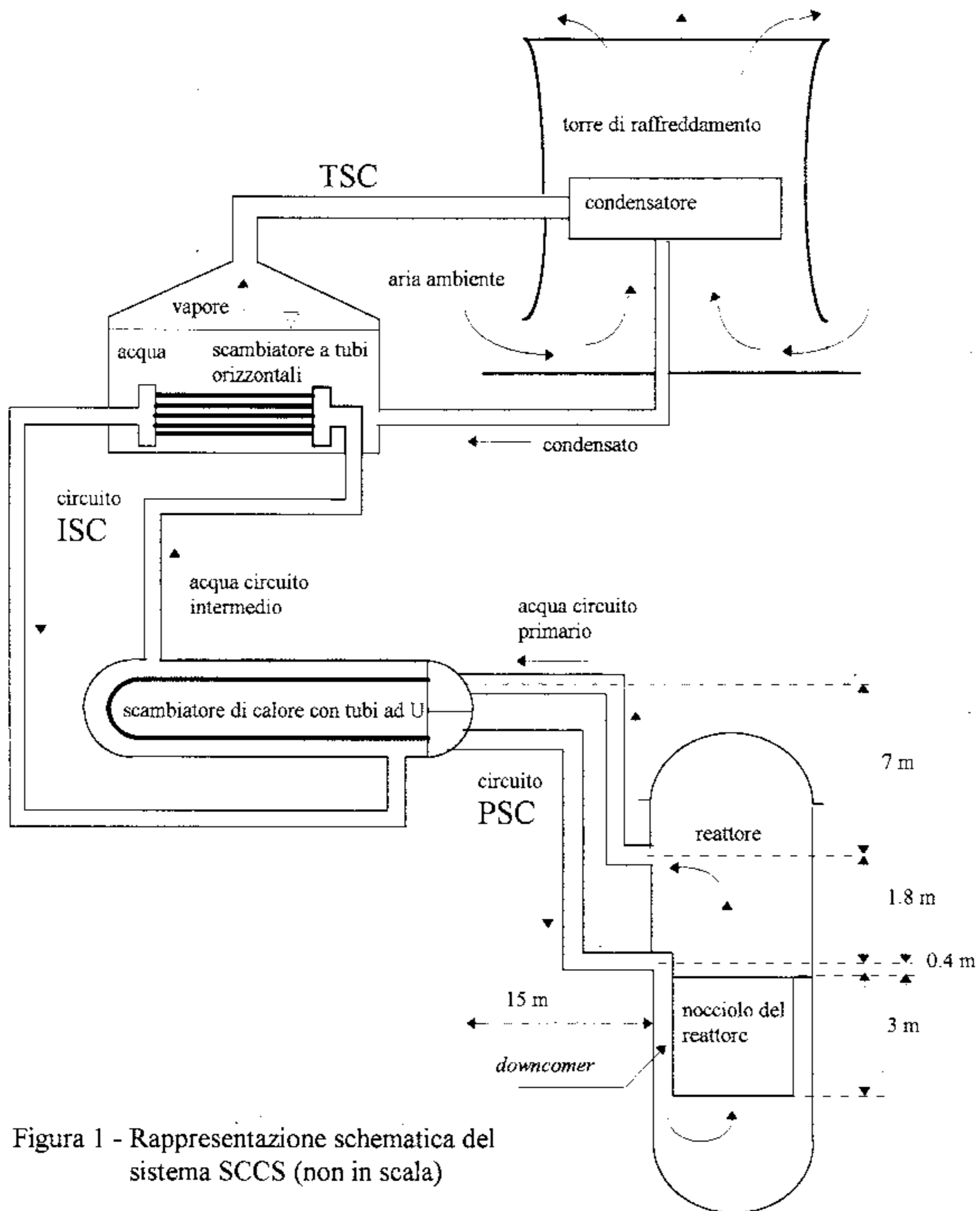


Figura 1 - Rappresentazione schematica del sistema SCCS (non in scala)