

de 41

POLITECNICO DI TORINO

**ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
II SESSIONE - ANNO 2004**

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto lo studio di fattibilità del contenitore primario di un reattore nucleare innovativo ad acqua in pressione.

Il reattore innovativo eroga una potenza termica nominale di 1000 MW ed è caratterizzato da una configurazione compatta, con i generatori di vapore e le pompe di circolazione del circuito primario poste all'interno di un vessel cilindrico con fondi emisferici. 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.

Poiché i componenti del circuito primario sono posizionati all'interno del vessel, mancano le grandi tubazioni del circuito primario e quindi il LOCA ("Loss of Coolant Accident") dovuto a grandi rotture è escluso in sede di progetto; vengono però considerati gli incidenti di LOCA dovuti a piccole rotture e alla rottura delle tubazioni del vapore e dell'acqua di alimento dei generatori di vapore.

A pari potenza termica erogata dal reattore, il contenitore del reattore innovativo potrà avere dimensioni minori rispetto a quelle del contenitore di un reattore PWR attuale; la configurazione compatta, con l'assenza delle tubazioni primarie e la collocazione dei componenti all'interno del vessel, consente infatti di realizzare un contenitore compatto, le cui dimensioni sono essenzialmente condizionate dal volume del vessel.

La riduzione delle dimensioni del contenitore e quindi del suo volume libero comporta però un aumento della pressione massima che potrebbe instaurarsi nel contenitore in caso di LOCA.

E' pertanto opportuno uno studio parametrico della massima pressione raggiunta dal contenitore in caso di LOCA, al variare del volume.

I risultati dello studio parametrico possono dare indicazioni sulla fattibilità del sistema di contenimento e in particolare mettere in evidenza l'eventuale necessità di dispositivi atti a ridurre l'aumento della pressione.

Si riportano in tabella 1 i parametri geometrici e operativi del reattore utili ai fini dello studio richiesto.

Tabella 1	
pressione media del refrigerante primario	150 bar
temperatura del refrigerante primario all'ingresso del nocciolo	290 °C
temperatura del refrigerante primario all'uscita del nocciolo	325 °C
altezza della parte cilindrica del vessel	15 m
raggio interno della parte cilindrica del vessel e dei fondi emisferici	3 m
volume delle strutture presenti nel fondo emisferico superiore	10 % del volume del fondo emisferico
volume del vessel occupato dalla fase vapore	90 % del volume del fondo emisferico superiore
volume della parte cilindrica del vessel occupata dal nocciolo, dai generatori di vapore, dalle pompe e da strutture varie	30 % del volume della parte cilindrica
volume del fondo emisferico inferiore occupato dal nocciolo e da strutture di supporto	25 % del volume del fondo emisferico inferiore

Si richiede in particolare di sviluppare i punti seguenti:

- a) calcolo dell'energia del fluido primario, valutata con riferimento ai volumi occupati dalle fasi vapore e liquido presenti nel vessel, nelle condizioni di pressione e temperatura di tabella 1;
- b) calcolo dell'andamento della massima pressione raggiunta nel contenitore a seguito di un incidente di LOCA, al variare del volume libero del contenitore nell'ipotesi che questo sia del tipo "a piena pressione" (senza "soppressione" del vapore); si assuma che l'aria presente nel contenitore prima del LOCA si trovi a pressione atmosferica e alla temperatura di 30 °C;
- e) eventuale adozione di dispositivi atti a ridurre la pressione del contenitore conseguente ad un LOCA, rispetto a quella calcolata al punto precedente;
- d) scelta del volume del contenitore, della pressione e della temperatura di progetto;
- e) definizione della configurazione geometrica del contenitore e sua rappresentazione schematica; scelta del materiale delle pareti e calcolo dello spessore;
- f) confronto tra il contenitore proposto per il reattore innovativo e i contenitori dei PWR attuali.

Si richiede infine al Candidato di commentare le assunzioni e le semplificazioni adottate.

Nello svolgimento dei punti precedenti, il Candidato può fare riferimento alle tabelle che seguono, relative alle proprietà dell'acqua, del vapore e dell'aria e alla resistenza meccanica di alcuni acciai.

Il calcolo dell'energia della parte liquida del fluido primario (punto a) può essere svolto con riferimento a condizioni medie.

Il calcolo del picco di pressione può essere svolto in modo approssimato, supponendo che l'energia del fluido primario si conservi dopo il LOCA, trascurando cioè lo scambio termico dell'acqua e del vapore con le pareti del contenitore e con le strutture in esso presenti. Si può assumere in particolare che il fluido primario dopo l'espansione nel contenitore si separi in due regioni alla stessa temperatura,

rispettivamente occupate dalla fase liquida e dalla miscela del vapore e dell'aria presente nel contenitore prima del LOCA.

L'eventuale adozione di dispositivi atti a ridurre il picco di pressione conseguente ad un LOCA è subordinata a valori eccessivamente elevati della massima pressione raggiunta in un contenitore del tipo "a piena pressione".

Tabella 2 - Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore in condizioni di saturazione a 150 bar		
temperatura di saturazione	342.2	°C
densità del liquido	603.5	kg/m ³
densità del vapore	96.72	kg/m ³
entalpia del liquido	1609.8	kJ/kg
entalpia del vapore	2610.1	kJ/kg
energia interna del liquido	1585.0	kJ/kg
energia interna del vapore	2455.0	kJ/kg

Tabella 3 - Proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata a 150 bar e 290 °C		
densità	745.7	kg/m ³
entalpia	1283.8	kJ/kg
energia interna	1263.7	kJ/kg

Tabella 4 - Proprietà fisiche dell'acqua sottoraffreddata a 150 bar e 325 °C		
densità	665.2	kg/m ³
entalpia	1484.6	kJ/kg
energia interna	1462.1	kJ/kg

Handwritten signature

Tabella 5 - Proprietà fisiche dell'acqua e del vapore in condizioni di saturazione a varie pressioni

pressione	temperatura di saturazione	densità liquido	densità vapore	entalpia liquido	energia interna liquido	entalpia vapore	energia interna vapore
bar	°C	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
1	99.6	958.6	0.5902	417.5	417.4	2675.1	2505.7
2	120.2	943.0	1.129	504.8	504.6	2706.5	2529.4
3	133.6	931.8	1.651	561.6	561.3	2725.3	2543.5
5	151.9	915.3	2.668	640.4	639.8	2748.6	2561.2
10	179.9	887.2	5.144	762.9	761.8	2777.7	2583.3
15	198.3	866.7	7.592	844.9	843.1	2791.5	2593.9
20	212.4	849.9	10.04	908.7	906.3	2798.7	2599.5
25	223.0	835.2	12.51	962.0	959.0	2802.2	2602.3
30	233.9	822.0	15.00	1008.3	1004.6	2803.3	2603.3
35	242.6	809.8	17.53	1049.6	1045.3	2802.6	2602.9
40	250.4	798.5	20.09	1087.2	1082.2	2800.6	2601.5
45	257.5	787.8	22.70	1121.9	1116.2	2797.6	2599.4
50	264.0	777.5	25.36	1154.2	1147.8	2793.7	2596.5

Tabella 6 - Proprietà fisiche dell'aria a pressione atmosferica

temperatura K	densità kg/m ³	calore specifico a pressione costante kJ/(kg °C)
300	1.1774	1.0057
350	0.9980	1.0090
400	0.8826	1.0140
450	0.7833	1.0207
500	0.7048	1.0295
550	0.6423	1.0392
600	0.5879	1.0551

Kur / f_s

Tabella 7 - Tipici valori della resistenza meccanica di acciai al carbonio

carico di snervamento a temperatura ambiente							32.0 ksi / 220.6 MPa
carico di rottura a temperatura ambiente							60.0 ksi/413.7 MPa
temperatura °F/°C	100/37.8	200/93.3	300/ 148.9	400/ 204.4	500/260	600/ 315.6	
tensione ammissibile ksi/MPa	20.0/ 137.9	19.5/ 134.4	18.9/ 130.3	18.3/ 126.2	17.3/ 119.3	15.8/ 108.9	

Tabella 8 - Tipici valori della resistenza meccanica di acciai inossidabili austenitici

carico di snervamento a temperatura ambiente							30.0 ksi /206.8 MPa
carico di rottura a temperatura ambiente							75.0 ksi/517.1
temperatura °F/°C	100/37.8	200/93.3	300/ 148.9	400/ 204.4	500/260	600/ 315.6	
tensione ammissibile ksi/MPa	20.0/ 137.9	20.0/ 137.9	20.0/ 137.9	18.7/ 128.9	17.4/ 120.0	16.4/ 113.1	