

# POLITECNICO DI TORINO

## ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE I SESSIONE - ANNO 2004

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

Con riferimento allo stoccaggio in piscina e al trasporto degli elementi di combustibile esaurito provenienti da un reattore nucleare di tipo PWR, è richiesto lo svolgimento dei punti seguenti:

1. calcolo della temperatura di centro barra durante lo stoccaggio del combustibile irraggiato in piscina;
2. calcolo della superficie del contenitore adibito al trasporto del combustibile irraggiato, in relazione allo scambio termico con l'aria ambiente.

Come noto, l'elemento di combustibile scaricato dal reattore deve essere depositato per alcuni mesi in una piscina sotto battente d'acqua; può quindi essere immagazzinato in appositi depositi o trasportato all'impianto di trattamento; il trasporto deve essere effettuato con contenitori capaci di smaltire la potenza generata e atti a resistere a differenti tipi di incidenti potenziali.

I parametri geometrici e operativi degli elementi di combustibile per la valutazione della potenza termica erogata nelle condizioni nominali di esercizio all'interno del reattore sono riportati in tabella 1.

Tab. 1 - Parametri geometrici e operativi degli elementi di combustibile del reattore PWR

Tipologia del fascio	17x17
Dimensione trasversale del fascio di barre (cm)	21.4 x 21.4
Numero di barrette di combustibile per fascio	264
Passo tra le barrette (cm)	1.26
Diametro esterno delle barrette di combustibile a freddo (mm)	9.14
Spessore dell'incamiciatura delle barrette di combustibile a freddo (mm)	0.57
Diametro delle pastiglie di combustibile (mm)	7.84
Altezza del plenum delle barrette (cm)	16.4
Altezza attiva delle barrette (m)	3.66
Potenza termica lineare media delle barrette (kW/m)	12.6
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

### Punto 1

Si calcoli la temperatura di centro barra nella mezzeria della lunghezza attiva della barretta più sollecitata, supponendo che sia trascorso un mese dalla conclusione delle operazioni di spegnimento del reattore; si faccia riferimento ai dati di tabella 2.

Tab. 2 - Dati per lo svolgimento del punto 1

disposizione degli elementi di combustibile nella piscina sotto battente d'acqua:	verticale
temperatura dell'acqua della piscina	30 °C
pressione sul pelo libero della piscina:	in depressione, prossima a quella atmosferica
condizioni dell'acqua nella piscina:	stagnante
conducibilità termica della guaina delle barrette di combustibile	17 W/m°C
conducibilità termica del combustibile	3.0 W/m°C

Per il calcolo della potenza termica rilasciata dalle barrette di combustibile dopo lo spegnimento del reattore può essere utilizzata la formulazione seguente, che fornisce il rapporto tra la potenza di decadimento dei prodotti di fissione e quella nominale:

$$\frac{P(t)}{P_0} = 0.066 \left[ t^{-0.2} - (t+t_0)^{-0.2} \right] \quad (1)$$

dove  $P_0$  e  $P(t)$  rappresentano rispettivamente la potenza nelle condizioni nominali e quella residua di decadimento,  $t$  rappresenta il tempo dopo lo spegnimento e  $t_0$  il tempo in cui il reattore ha operato al livello di potenza  $P_0$ ; i tempi  $t$  e  $t_0$  sono espressi in secondi. Si assuma un valore di  $t_0$  corrispondente a tre anni di funzionamento.

Nel calcolo della differenza di temperatura tra la superficie esterna della guaina delle barrette e l'acqua della piscina si può assumere un regime di convezione naturale. Per un calcolo di massima del coefficiente di scambio termico tra la superficie delle barrette e l'acqua della piscina, possono essere utilizzate le formulazioni seguenti, che forniscono il numero di Nusselt locale alla quota  $y$  lungo una piastra verticale soggetta a flusso termico costante in condizioni di moto laminare e turbolento.

$$Nu_y = \frac{h y}{k} = 0.600 (Ra_y^*)^{1/5} \quad (2)$$

Se  $Ra_y^* > 10^{13}$  il deflusso diventa turbolento e il numero di Nusselt è fornito dalla formulazione (3):

$$Nu_y = \frac{h y}{k} = 0.568 (Ra_y^*)^{0.22} \quad (3)$$

i simboli hanno il significato seguente:

$g$	accelerazione di gravità
$h$	coefficiente di scambio termico
$k$	conducibilità termica dell'acqua alla temperatura $T_f$
$Ra_y^* = \frac{g \beta q_w'' y^4}{\alpha \nu k}$	numero di Rayleigh per flusso termico costante
$T_f$	temperatura di film $(T_w + T_\infty)/2$
$T_w$	temperatura di parete
$T_\infty$	temperatura dell'acqua della piscina
$y$	coordinata verticale lungo la piastra
$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$	diffusività termica
$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$	coefficiente di espansione termica dell'acqua alla temperatura $T_f$
$\rho$	densità dell'acqua alla temperatura $T_f$
$\mu$	viscosità dinamica dell'acqua alla temperatura $T_f$
$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	viscosità cinematica dell'acqua alla temperatura $T_f$

Nel calcolo del coefficiente di scambio termico della barretta si utilizza, quale valore della quota  $y$ , la metà della lunghezza attiva.

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:

$$\Delta T_g = q_i / h_{gap} \quad (4)$$

Nella precedente relazione  $q_i$  è il flusso termico medio nell'intercapedine ed  $h_{gap}$  è pari a 6000 W/(m<sup>2</sup> °C).

Per le proprietà fisiche dell'acqua si possono assumere i valori relativi alla pressione ambiente riportati nella tabella seguente:

temperatura °C	densità kg/m <sup>3</sup>	viscosità kg/(ms)	conducibilità termica W/(m°C)	calore specifico a pressione costante J/(kg°C)
30	995.7	797.8 · 10 <sup>-6</sup>	0.6155	4183.1
50	988.0	547.1 · 10 <sup>-6</sup>	0.6436	4181.5
70	977.8	404.5 · 10 <sup>-6</sup> *	0.6631	4186.8
90	965.3	313.110*	0.6753	4204.3

## Punto 2

Per lo svolgimento del punto 2, si calcoli la superficie del contenitore per il trasporto del combustibile esaurito occorrente per lo smaltimento della potenza data dalla (1) in condizioni di convezione naturale con aria stagnante, nell'ipotesi che il combustibile venga inserito nel contenitore sei mesi dopo lo spegnimento del reattore.

Si assuma, per tutte le barrette dei fasci inseriti nel contenitore, una potenza termica generata pari a quella della barretta più sollecitata.

Il contenitore è cilindrico, contiene sette fasci di barre e viene trasportato in posizione orizzontale. Si consideri utile ai fini dello scambio termico la superficie laterale, per una lunghezza pari alla lunghezza delle barrette di combustibile.

La temperatura della parete cilindrica, supposta uniforme, non deve superare il valore massimo di 80 °C, quando l'aria ambiente si trova alla temperatura di 30 °C e alla pressione di 1.013 bar.

Si effettui il calcolo della superficie sia nell'ipotesi di superficie liscia che in quella di superficie alettata determinando, nei due casi, il diametro del cilindro.

Per quanto riguarda la superficie alettata, si scelga il tipo di alettatura, assumendo inoltre adeguati valori del rapporto tra la superficie delle alette e quella del cilindro e dell'efficienza delle alette.

Per un calcolo di massima del coefficiente di scambio termico del cilindro orizzontale in convezione naturale, si può utilizzare la correlazione seguente, che fornisce il coefficiente di scambio termico medio  $h_m$  relativo alla superficie cilindrica non alettata:

$$\frac{h_m D}{k} = C(Gr_D Pr)^n \quad (5)$$

I simboli hanno il significato seguente:

D	diámetro del cilindro
$Gr_D = \frac{g \beta (T_w - T_\infty) D^3}{\nu^2}$	Numero di Grashof
$h_m$	coefficiente di scambio termico medio dell'intera superficie cilindrica
Pr	numero di Prandtl
$T_\infty$	temperatura dell'aria stagnante
$T_w$	temperatura di parete

Gli altri simboli hanno il significato già specificato per le (2) e (3).

La costante C e l'esponente n sono forniti dalla tabella seguente:

$Gr_D Pr$	C	n
$10^4 \div 10^9$	0.53	1/4
$10^9 \div 10^{12}$	0.13	1/3

In prima approssimazione, si utilizzi la (5) anche per la superficie alettata.

Per le proprietà fisiche dell'aria, da valutare alla temperatura di film, si può fare riferimento alla tabella seguente:

temperatura °C	densità kg/m <sup>3</sup>	viscosità cinematica m <sup>2</sup> /s	conducibilità termica W/(m °C)	calore specifico a pressione costante J/(kg °C)
30	1.165	16.00 10 <sup>-6</sup>	0.0267	1005
50	1.092	17.95 10 <sup>-6</sup>	0.0283	1005
70	1.029	20.02 10 <sup>-6</sup>	0.0296	1009
90	0.972	22.10 10 <sup>-6</sup>	0.0313	1009

In Candidato illustri infine i differenti aspetti del progetto del contenitore per il trasporto del combustibile esaurito e gli incidenti di riferimento che debbono essere considerati nel progetto.