Lección 10

Quemado y reactividad.

Si un reactor estuviera cargado estrictamente con la masa crítica, tras las primeras fisiones dejaría de ser crítico. Es necesario disponer de un exceso de masa crítica en el núcleo para compensar el quemado. El exceso de masa crítica hay que convertirlo en reactividad para ejercer el control sobre el mismo.

Cuando se ha consumido el exceso de masa se termina el ciclo del combustible. La duración del ciclo puede estimarse fácilmente a partir del exceso de reactividad. El cálculo preciso es bastante complejo, por lo que los resultados aquí son sólo orientativos.

Una hipótesis simplificadora es operar a potencia constante.

$$P = E_R \Sigma_f \phi V_R \Rightarrow \boxed{\Sigma_f(t)\phi(t) = \Sigma_f(0)\phi(0)}$$

Si P es constante y Σ_f disminuye como consecuencia del quemado, entonces $\phi(t)$ debe aumentar progresivamente. Sea N_F el número de núcleos por unidad de volumen del combustible. Por cada ~~fisión~~ absorción desaparece uno de estos núcleos, luego

$$N_F(t) = N_F(0) - N_F(0)\,\sigma_{aF}\,\cancel{(t)}\,\phi(0)\,t = N_{F0}\left(1 - \frac{t}{T_v}\right)$$

donde $\boxed{T_v = \dfrac{1}{\sigma_{aF}\phi(0)}}$. Aquí T es el tiempo necesario para quemar 'todo' el combustible, pero ello es imposible, pues no se podría mantener la potencia constante. A partir de $\Sigma_f(t)\phi(t) = \Sigma_f(0)\phi(0)$, resulta

$$N_F(t)\phi(t) = N_F(0)\phi(0) \Rightarrow \phi(t) = \phi(0)\left(\frac{1}{1 - t/T_v}\right)$$

Leccion 10

Cálculo preliminar de la duración del ciclo

El exceso de masa significa que:

$$\nu \Sigma_f(t) \geq \Sigma_{aF}(t) + \Sigma_{aM}^{*} \; ; \quad 0 \leq t \leq t_c$$

donde Σ_{aM}^{*} se refiere a todas las pérdidas (y fugas) de los neutrones con los materiales distintos del combustible; t_c es la duración del ciclo. Al cabo del tiempo t_c, la desigualdad pasa a ser igualdad.

$$\nu \Sigma_f(t_c) = \Sigma_{aF}(t_c) + \Sigma_{aM}^{*}$$

por las consideraciones anteriores:

$$\nu \Sigma_f(0) \left[1 - \frac{t_c}{T_V}\right] = \Sigma_{aF}(0) \left[1 - \frac{t_c}{T_V}\right] + \Sigma_{aM}^{*}$$

Agrupando los términos de t_c en un miembro

$$\nu \Sigma_f(0) - \left[\Sigma_{aF}(0) + \Sigma_{aM}^{*}\right] = \frac{t_c}{T_V}\left[\nu \Sigma_f(0) - \Sigma_{aF}(0)\right]$$

al dividir miembro a miembro por $\nu\Sigma_f(0)$, se obtiene ρ_{exc}:

$$\boxed{\rho_{exc} = \frac{t_c}{T_V}\left[1 - \frac{\Sigma_{aF}(0)}{\nu \Sigma_f(0)}\right]}$$

recordando que $\eta = \nu \Sigma_f / \Sigma_{aF}$, resulta:

Lección 10

$$\frac{t_c}{T_V} = \frac{\rho_{exc}}{1-\frac{1}{\eta}}$$

de donde:
$$\boxed{t_c = \frac{\rho_{exc}}{\sigma_{aF}}\left(\frac{\eta}{\eta-1}\right)\frac{1}{\phi(c)}}$$

Valores indicativos: $\eta = 2.2$, $\sigma_{aF} = 550\,b$, $\rho_{exc} \simeq 0.20$, $\phi(c) = 5\times10^{13}\,\frac{n}{cm^2 s}$

se obtiene $t_c \simeq 144$ días. Para aumentar el ciclo hay que disminuir la potencia o incrementar ρ_{exc}. Para un flujo de $3\times10^{13}\,n/cm^2 s$, la duración es del orden de 8 meses.

La presencia de Xe^{135} y otros venenos de fisión, hacen disminuir ρ_{exc} por lo que acortan el ciclo.

La escala temporal viene definida por el ritmo de quemado y el coeficiente de reactividad por unidad de masa del combustible. Por ejemplo, si se pierden 1.2 pcm / gr(U^{235}); entonces, para consumir un exceso de reactividad del 20% hacen falta $0.2/1.2\times10^{-5} \rightarrow 16$ Kg de U^{235}. Como el U^{235} se quema al ritmo de 1.24 gr(U^{235}) / MWD, se puede obtener la duración aproximada del ciclo para una potencia dada.

La vida del ciclo se alarga por la aparición del Pu-239. Es necesario calcular la cantidad de plutonio que aparece como consecuencia de la absorción neutrónica en el uranio 238. Es costumbre usar las siguientes

25 → U-235 ; 49 → Pu-239

28 → U-238

Leccion 10

Ecuaciones para el quemado de Pu-239

Para el U^{25} la pérdida de masa viene dada por

$$N^{25}(t) = N^{25}(0)\exp[-\sigma_a^{25}\phi_0 t] \simeq N^{25}(0)[1-\sigma_a^{25}\phi_0 t]$$

pero para el Plutonio 239, la ecuación es algo más compleja:

$$\frac{dN^{49}}{dt} = \sigma_a^{28}N_0^{28}\phi_0 - \sigma_a^{49}N^{49}\phi_0 \quad ; \quad N^{49}(0)=0$$

de donde $N^{49}(t) = \dfrac{\sigma_a^{28}N_0^{28}}{\sigma_a^{49}}[1-\exp[-\sigma_a^{49}\phi_0]]$

El Pu-239 va creciendo paulatinamente hasta alcanzar el estado estacionario.

$$\boxed{N_\infty^{49} = \frac{\sigma_a^{28}N_0^{28}}{\sigma_a^{49}}}$$

datos orientativos.

$\sigma_a^{49} \simeq 1036\ b$, $\sigma_a^{25} \simeq 344\ b$, $\sigma_a^{28} \simeq 1.5\ b$, $\sigma_f^{49} = 782\ b$, $\sigma_f^{25} = 233\ b$

$N_0^{25} \simeq 0.00017$ (bar-atom), $N^{28} \simeq 0.0067$ (barns-atom)

A lo largo del tiempo, la presencia de Pu^{239} equivale a aumentar la Σ_f, por lo que aumenta ρ_{exc} y la duración del ciclo.