

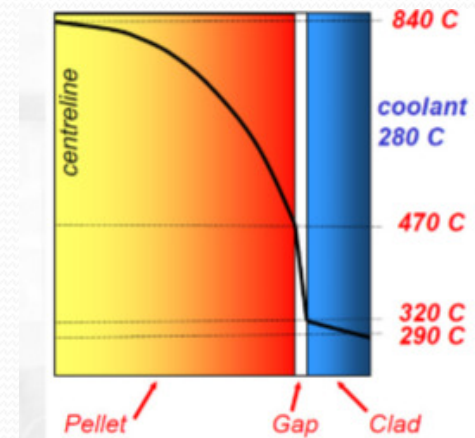
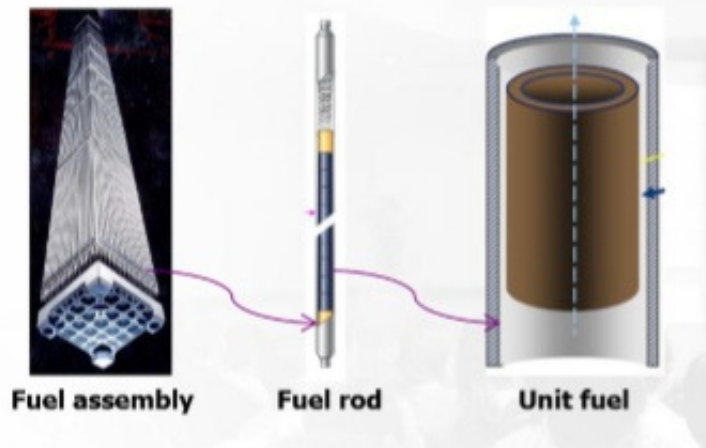
PRENOS TOPLOTE V REŽI GORIVNE PALICE

Avtor: Miha Povšič

Mentor: prof. dr. Iztok Tiselj

Reža

- Lažja vstavitev goriva v palico
- Prostor za izpust fisijskih plinov
- Prostor za povečanje gorivne tabletko med delovanjem
- Širina ob BOL od 75 do 100 μm , ob EOL od 0 do 40 μm
 - Relativna nizka prevodnost povzroči padec temperature



Enačbe prenosa toplote

$$\text{Energijska enačba: } \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = q''' + \nabla(\lambda \nabla T)$$

$$\text{Toplotni tok: } q'' = -\lambda \nabla T = h(T(r_1) - T(r_2))$$

r_0 = radij goriva

r_{ci} = notranji radij srajčke

r_{co} = zunanji radij srajčke

indeks f se nanaša na gorivo

indeks c se nanaša na srajčko

Predpostavke

- Srajčka nima vira toplote
- Gorivo nima azimutalne variacije proizvodne toplote
- Prenos toplote med srajčko in hladilom je po azimutu konstanta
- Prenos toplote med gorivom in srajčko je po azimutu konstanta
 - Toplotni tok teče le v radialni smeri

Stacionarno stanje – robni pogoji

$$-\lambda_c \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_{ci}} = \frac{q'}{2\pi r_{ci}}$$

$$\frac{q'}{2\pi r_o} = h(T(r_o) - T(r_{ci}))$$

Koeficient prenosa toplote h

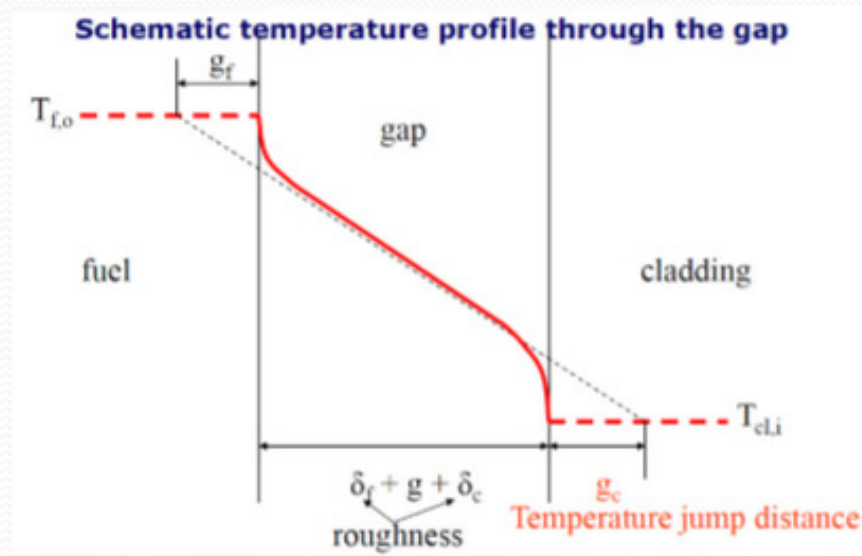
$$h = h_g + h_s + h_r$$

- V reži sestavljen iz treh delov
- Prevajanje toplote v plinu (h_g)
- Prevajanje toplote s stikom med gorivom in srajčko (h_s)
 - Prevajanje toplote s sevanjem (h_r)
 - Konvekcija je v reži zanemarljiva
- Enakomerna porazdelitev plina po aksialni osi

Koeficient prenosa toplote v plinu

- Funkcija širine reže in toplotne prevodnosti mešanice plinov

$$h_g = \frac{k_{gas}}{d} \rightarrow h_g = \frac{k_{gas}}{d + d_{min} + g_f + g_c}$$



Koeficient prenosa toplote v plinu

$$k_{gas} = AT_{gas}^S$$

$$d_{min} = C(\delta_f + \delta_c)$$

$$g = g_f + g_c = g_o \frac{p_o}{p_{gas}} \left(\frac{T_{gas}}{T_o} \right)^{S+0.5}$$

$T_o = 273 \text{ K}$, $p_o = 0,1013 \text{ Mbar}$, k_{gas} = toplotna prevodnost plina

| Gas | Ref. 52 | | Ref. 75 | | Ref. 8 | |
|-----|------------------------|-------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | A | S | A | S | A | S |
| He | 3.366×10^{-3} | 0.668 | 2.836×10^{-3} | 0.7015 | 2.639×10^{-3} | 0.7085 |
| Kr | 4.029×10^{-5} | 0.872 | 1.772×10^{-4} | 0.7124 | 8.247×10^{-5} | 0.8363 |
| Xe | 4.726×10^{-5} | 0.923 | 7.993×10^{-5} | 0.7588 | 4.351×10^{-5} | 0.8616 |

These constants give k in $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ for temperatures in K

Koeficient prenosa toplote v plinu – mešanica plinov

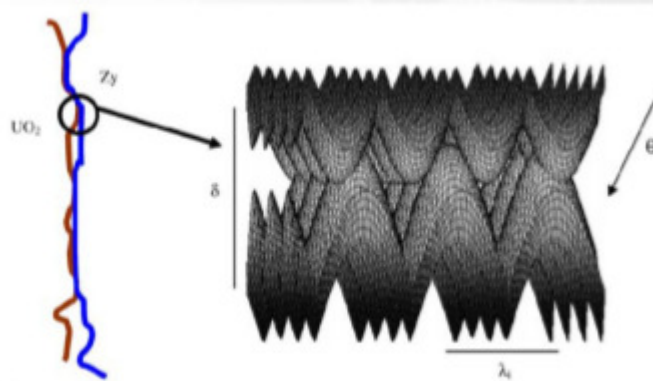
- V novem gorivu imamo le He
- V starem gorivu imamo He, Kr, Xe, I -> mešanico plinov
 - Popravek enačb
- Mešanica plinov zmanjša toplotno prevodnost plina v reži

$$g = g_1^{x_1} * g_2^{x_2} * \dots * g_i^{x_i} \quad x_i = \frac{M_i m_i}{\sum_{i=1}^n M_i m_i}$$
$$k_{mix} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i k_i}{x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_j \phi_{ij}}$$
$$\phi_{ij} = 0.3765 * \left\{ 1 + \left(\frac{M_i}{M_j} \right) \right\}^{-\frac{1}{2}} * \left\{ 1 + \left(\frac{k_j}{k_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right\}^2$$

Koeficient prenosa toplote med srajčko in gorivom

- Toplota lahko teče skozi točke stika med gorivom in srajčko

Solid conductance


$$h_s = a \cdot P_{rel} \cdot \frac{K_f K_c}{K_f + K_c} \frac{e^{(0.528 \ln(R_2) - 5.738)}}{\sqrt{R_f^2 + R_c^2}}$$

a is a constant that depends on the interfacial pressure;
 P_{rel} is the ratio of interfacial pressure to cladding Meyer hardness;
 K_f is the fuel thermal conductivity [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];
 K_c is the cladding thermal conductivity [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];
 R_f is the roughness of the fuel surface [m];
 R_c is the roughness of the inner cladding surface [m];
 R_2 is the roughness of the rougher surface [m].

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

4/24

Koeficient prenosa toplote sevanja

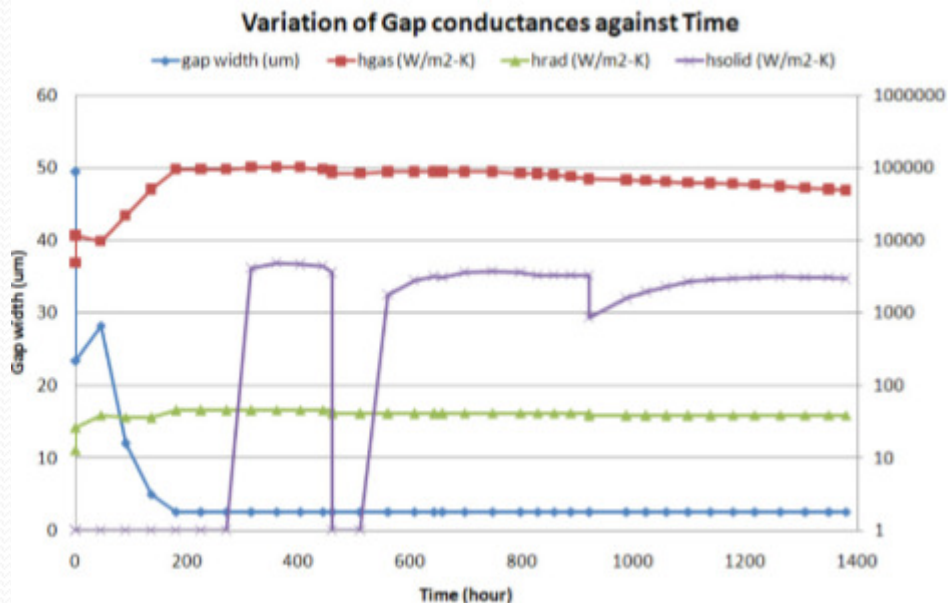
- Sevanje relativno nepomemben prenos
- Izjema: široke reže z velikim deležem fizijskih plinov
 - Pomemben v primeru LOCA
- Pomemben pri visokih temperaturah

$$h_r = \frac{\sigma \varepsilon_f \varepsilon_c}{(\varepsilon_f + \varepsilon_c - \varepsilon_f \varepsilon_c)} \frac{(T_{r0}^4 - T_{rci}^4)}{(T_{r0} - T_{rci})}$$

δ = Stefanova konstanta, ε = emisivnost

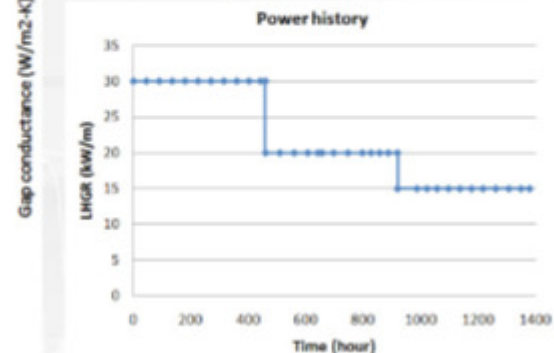
Relativna pomembnost koeficientov prenosa toplote

- Najpomembnejši člen je prenos toplote v plinu h_g
- h_r je med normalnim obratovanjem konstanten
- h_s je lahko nič, čeprav ste gorivo in srajčka v stiku (t.i. mehki stik)



Calculated by
FRAPCON3.4

Power profile



Nestacionarno stanje

- LOCA(Lost Of Coolant Accident)
- V energijski enačbi $\frac{\partial T}{\partial t}$ ni več enak o
- Robni toplotni tokovi so enaki -> robni pogoji
 - hlajenje se poslabša
- hitre spremembe toplotnih tokov
 - ciklična odvisnost

$$-k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial r} \right)_{r=r_{fs}} = -k_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial r} \right)_{r=r_{ci}}$$

$$-k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial r} \right)_{r=r_{fs}} = h [T_{fs} - T_{ci}]$$

Ostali vplivi

- Odvisnost toplotne prevodnosti goriva , reže in srajčke od T in poroznosti
 - Odvisnost specifične toplote od T
 - Emisivnost
 - Toplotna prevodnost plinov
 - Vpliv fluksa na temperaturno porazdelitev
- Geometrijske spremembe med obratovanjem (izgorelost goriva)

Zaključek

- Osnovni enačbi za izračun $T(r)$ v reži sta energijska enačba in enačba za toplotni tok
 - Najpomembnejši koeficient prenosa toplota je koeficient prenosa v plinu h_g
 - Reža ima najbolj strm temperaturni profil
 - Relativno enostavni modeli stacionarnega stanja
 - Kompleksi modeli nestacionarnega stanja
- Parametri omenjeni v ostalih vplivih v naših izpeljavi so bili konstante, čeprav so odvisni od temperature



Hvala za pozornost!



Viri

- Cap Conductance in Zircaloy-clad LWR fuel rods; J.D.Ainscough, 1982
- Power-point predstavitel Adaptive linked gap element for FE-based conductance model; H.C.Kim, Y.S.Yang, Y.H.Koo, 2013
- Technology and Components of Accelerator Driven systems; OECD, 2010