

# A fűtőelemek inhermetikusságának vizsgálata a 15 hónapos teljesítményüzemben (C15)

Vajda N., Ósz J.

LG Energia Kft.

OAH TSO szeminárium

2016. június 7.

# Célkitűzés

Paksi reaktorok üzemmódja

1995-2000. átállás a 3 évesről a 4 éves ciklusra	1,6-2,4-3,6 % dúsítású FE
2007-2010. teljesítménynövelés 108%-ra	+3,8% dúsítású FE (profilírozott)
2015-től 15 hónapos C15 kampány (5 éves ciklus)	+4,2 és 4,7% dúsítású FE (2.generációs)

- **Megnőhet-e a fűtőelemek inhermetikusságának gyakorisága a nagyobb hőteljesítmény (108 %-os) és a hosszabb tartózkodási idő (C15 üzemmódban ez akár öt év is lehet) miatt?**
- **Milyen kapcsolat van a jódízotópok koncentrációja és a fűtőelemek inhermetikussága között megnövelt teljesítményen (108%) 15 hónapos teljesítményüzemben?**

# Tartalom

## 1. kérdéshez

- A fűtőelem-meghibásodások főbb okai, befolyásoló paraméterek
- Új fűtőelem-típusok Pakson
- A TVEL 2. generációs fűtőelemeinek főbb jellemzői
- Üzemeltetési tapasztalatok 2. generációs fűtőelemekkel
  - nemzetközi
  - paksi

## 2. kérdéshez

- a korábban kidolgozott szivárgási modell alkalmazása
- a jódízotópok koncentrációja nagyobb teljesítményen – paksi példák
- a jódízotópok koncentrációja C15 üzemmódban - elméletileg

# A fűtőelem-meghibásodások főbb típusai és okai

A FE-ek óriási igénybevételnek vannak kitéve. Az üzemanyagban és burkolatban anyagszerkezeti, fizikai-kémiai, mechanikai-geometriai... változások következnek be.

## A meghibásodások főbb típusai:

**Kopás** (Fretting, debris fretting, buffle jetting),

Rács és FE közti kölcsönhatás,

**Pasztilla-burkolat kölcsönhatás** (PCMI=pellet-cladding mechanical interaction,

Korrózió (CILC=crud induced local corrosion),

Burkolat összeroppanása, Zr hidridizációja

Gyártási és üzemeltetési rendellenességek.

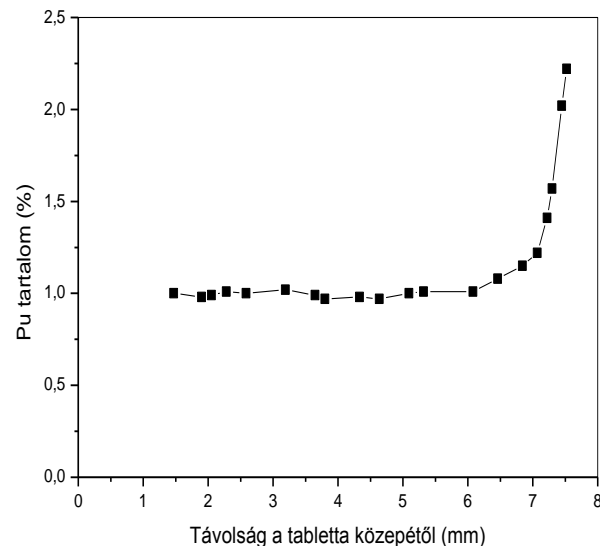
## A meghibásodás szempontjából kritikus paraméterek:

- neutronfizikai (a hőteljesítmény, a teljesítményoszlás, a teljesítmény-változtatás sebessége, a kiégettség),
- termohidraulikai (a hűtővíz és a FE hőmérséklete, a FE-n belüli nyomás, a hőmérséklet eloszlás),
- mechanikai (a burkolat stabilitása, rugalmassága, kopásállósága),
- kémiai-korróziós (vízkémiai paraméterek mint az oldott oxigén, hidrogén, lúgosító és szennyezők koncentrációja).

# A fűtőelem-meghibásodások főbb okai

## A kiégés hatása:

**Magas kiégések** eléréskor az ún. rezonancia önárnyékolás miatt a pasztillák peremén több Pu képződik a  $^{238}\text{U}$ -ból epitermikus neutronok befogásával, mint a pasztilla belsejében.



Nagy Pu tartalmú, kisebb szemcseméretű **porózus rim réteg** alakul ki.

- 50 MWd/kgU kiégésű tablettában a plutónium koncentráció a peremen kb. kétszer olyan magas, mint a tableta belsejében,
- a tablettán belüli teljesítmény-eloszlás és a hasadási termékek eloszlása is megváltozik.

# A fűtőelem-meghibásodások főbb okai

A tablettá és a burkolat közötti **rés** - a tablettá hőtágulása, széttöredezése, duzzadása és a burkolat kúszása miatt - **bezárul**.

Ez függ a lineáris hőtéljesítményétől és a kiégéstől: **40–50 MWnap/kg U kiégésnél**

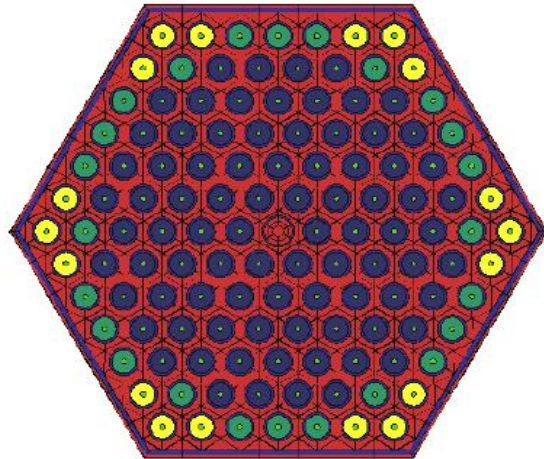
A rés bezáródása után erős mechanikai kölcsönhatás jön létre a tablettá és a burkolat között, ami feszültségeket okoz, a burkolat belső felületén kémiai, korróziós folyamatok indulnak el, repedésképződés indulhat meg, ami a burkolat sérüléséhez vezethet.

**PCMI** (pellet-cladding mechanical interaction) **hiba!**

# A Pakson alkalmazni kívánt új fűtőelem-típusok

Kék 4,0%  
Zöld 3,6%  
Sárga 3,3%

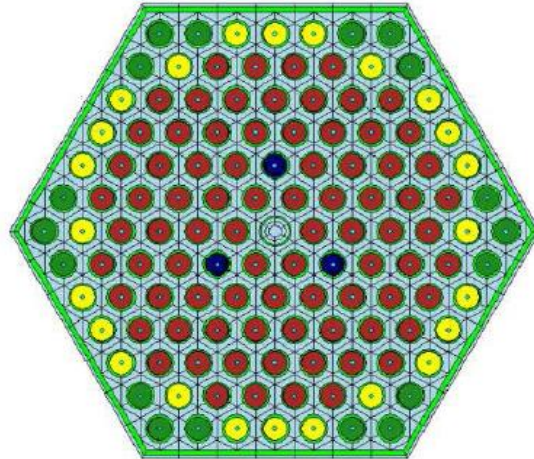
Átlag 3,82%



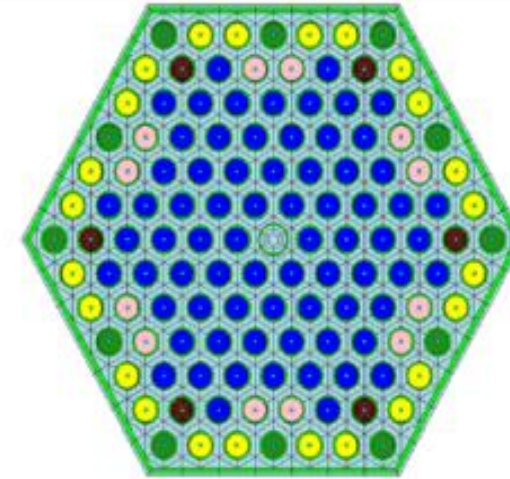
2000-től

Barna 4,4%  
Sárga 4,0%  
Zöld 3,6%  
Kék 4,0% + 3,35%  $Gd_2O_3$

Átlag 4,2%



2011-től



2014-től

2015  
Zöld 4,0%  
Sárga 4,4%  
Barna 4,4% + 3,35%  $Gd_2O_3$   
Kék 4,95%  
Rózsaszín 4,6%  
Átlag 4,7%

2. generációs FE-k

# Az üzemanyagciklusokat jellemző főbb paraméterek

	C12, 4 éves kampány 100% teljesítmény	C12, 4 éves kampány 108% teljesítmény	C15, 5 éves kampány 108% teljesítmény		C12, 4 éves kampány 100% teljesítmény	C12, 4 éves kampány 108% teljesítmény	C15, 5 éves kampány 108% teljesítmény	
termikus teljesítmény, MW	1375	1485	1485	<b>MÜSZ</b> <b>üzemelt</b> <b>korlát</b>	hűtővíz melegági hőmérséklete, °C	295	298	298 ≤ 325
ciklushossz, nap	325-330	325-330	415-425		burkolat vízdali hőmérséklete, °C	282-312	283-315	283-315
4 ciklus időtartama leállításokkal	4 év	4 év	5 év		burkolat belső hőmérséklete, °C	300-329	302-334	302-334 ≤ 1200
használt kazetta típus (munka és követő)	1,6-2,4-3,6% dúsítású hagyományos,  (3,8% dúsítású profilírozott)	3,8% dúsítású profilírozott,  4,2% dúsítású 3 Gd-os profilírozott	4,2% dúsítású 3 Gd-os profilírozott,  4,7% dúsítású 6 Gd-os profilírozott		hűtővíz nyomása, bar	125	125	125
friss kazetták száma évente	84	84	102		<b>Vízkémiai paraméterek (koordinált hidrazinos vízkémia)</b>			
<b>Neutronfizikai paraméterek</b>					bórsav koncentráció (kezdeti), g/kg, csökkenés jellege	7,0  lineáris	7,65  lineáris	7,65  3 szakaszos a Gd kiégése miatt
átlagos lineáris hőteljesítmény, W/cm	139	151	151		KOH koncentráció, mg/kg	minimumos, 16-2 mg/kg	minimumos, 20-2 mg/kg	minimumos, 20-2 mg/kg
átlagos kiégettség, MWnap/kg U	43	46	49*	LiOH koncentráció, mg/kg	maximumos, kb. 1 mg/kg	maximumos, kb. 1,1 mg/kg	maximumos, kb. 1,6 mg/kg	
teljesítmény-eloszlás: (power peaking factor)	referencia	javul	tovább javul	oldott H <sub>2</sub> koncentráció, mg/kg	2,25-4,5	2,25-4,5	2,25-4,5	

≤ 325

≤ 58



# A TVEL által VVER-440 reaktorokhoz gyártott FE típusok

	1. generációs		2. generációs	3. generációs
Használat kezdete	1998. előtt	1998. után	2003. után	2010. után
Kazetta típusa	hagyományos, kazettafallal	hagyományos, kazettafallal	2. generációs, kazettafallal	kazettafal nélkül
	nem profilírozott	profilírozott	profilírozott, Gd	profilírozott, Gd
<sup>235</sup> U dúsítás, %	3,60	3,82	4,25/4,38	4,87-4,95-ig
átrakáskor cserélt kazetták, db	105	84	66	60
Átlagos kazetta kiégés, MWnap/kg U	36	45	57	65
üzemanyag ciklus	3 éves	4 éves	5 éves	6 éves
természetes U fogyasztás, kg/MWd	0,256	0,209	0,184	0,180

# A TVEL által VVER-440 reaktorokhoz gyártott 2. generációs FE-k

A 2. generációs fűtőelemek konstrukciós változásai alapvetően **a gazdaságosság növelésére** irányultak.

Nagyobb dúsítás,  
nagyobb urán mennyiség,  
jobb moderátor/üzemanyag arány

→ nagyobb teljesítmény és kiégés, **gyakoribb meghibásodás iránya**

Profilírozás,  
Gd kiégő méreg,  
rezgés csökkentés,  
intenzívebb hűtés,  
követő-kazettákon megvalósított újítások

→ egyenletesebb teljesítmény-eloszlás,  
**kisebb meghibásodási gyakoriság iránya**

**A nagy kiégés (60-65 MWnap/kg U) jelenti a hermetikusság szempontjából a legnagyobb kockázatot.**

# FE-k meghibásodása

## Nemzetközi tapasztalatok

Reaktor	2. generációs üzemanyag bevezetése	Teljesítménynövelés befejezése	Megnövelt teljesítmény, %	Fűtőelem átlagos <sup>235</sup> U dúsítása, %	4,87% dúsítású fűtőelem bevezetése
Kola#3, #4	2002, 2005	2008, 2009	107	4,25/3,82	2010
Dukovani #1, #3	2007, 2005	2008	105	4,38/4,25	
Mohi #1, #2	2006		107	4,25/3,84	2010
Bohunyice #3, #4	2006		107	4,25/3,84	2011
Loviisa		2008	109	4,37/4,0	
Rovno		2010-11	108	4,38/4,25	
<b>Paks</b>	<b>2010</b>	<b>2007-2010</b>	<b>108</b>	<b>3,80; 4,20</b>	

**Nincs elegendő  
üzemelési tapasztalat  
nagy kiégésű  
2. generációs  
FE-k meghibásodási  
gyakoriságáról!**

**2. generációs**, 4,87 % <sup>235</sup>U dúsítású FE használatával megnövelt teljesítmény mellett 6 éves ciklusú (C12) üzemeltetést valósítottak meg a **kolai 4.** reaktorban.

A kazetták átlagos kiégettsége 59 MWnap/kg U-ra nőtt és a maximális kiégettség 70 MWnap/kg U volt.

**3. generációs** maximális 4,95% dúsítású FE-t használtak a kolai #4 reaktorban 107% teljesítmény mellett 2010-ben.

**Cél: 0 meghibásodás illetve  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  meghibásodási gyakoriság**

# FE-k meghibásodása

## Paksi tapasztalatok

### Összefoglalás:

#### a meghibásodási gyakoriság

**hagyományos kazetták esetében** a 4 blokkon viszonylag szűk tartományban **2,6E-5 és 4,8E-5** között változott, ami egy-másfél nagyságrenddel nagyobb mint a TVEL által publikál 1E-6 meghibásodási gyakoriság, **profilírozott kazetták esetében** (3,8% és 4,2% dúsítású) minden blokkon  $\leq 1,4E-5$ , ami semmiképp sem nagyobb, mint a hagyományos kazetták esetében,

**A használt kazetták száma nem elegendő pontosabb statisztika készítéséhez.**

**A használt kazetták kiégése nem tekinthető nagy kiégésnek, így nincs gyakorlati adatunk a fűtőelemek állapotáról nagy kiégés mellett.**

# A jódiszotópok primer körű koncentrációja inhermetikus fűtőelemek esetében

Az egyensúlyi primer körű jódiszotóp aktivitáskoncentráció  $a_i$  elméletileg az alábbi egyenlet alapján számolható:

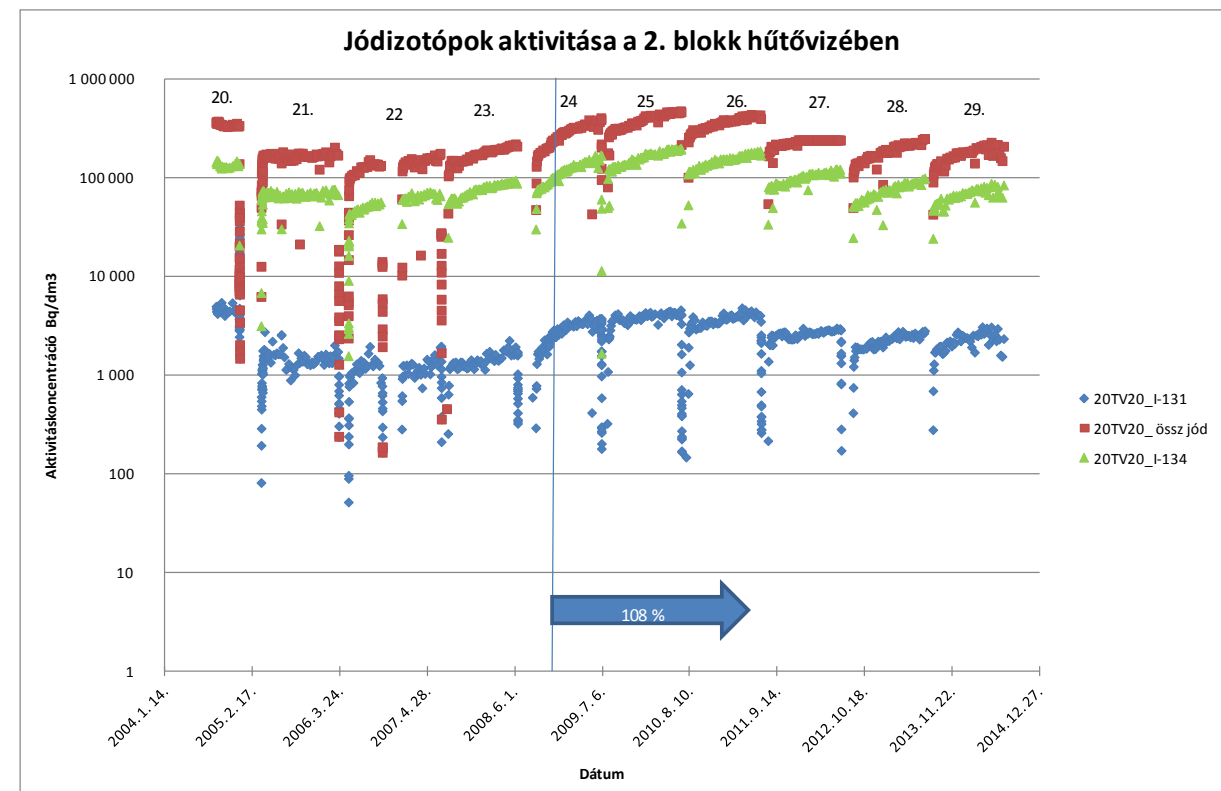
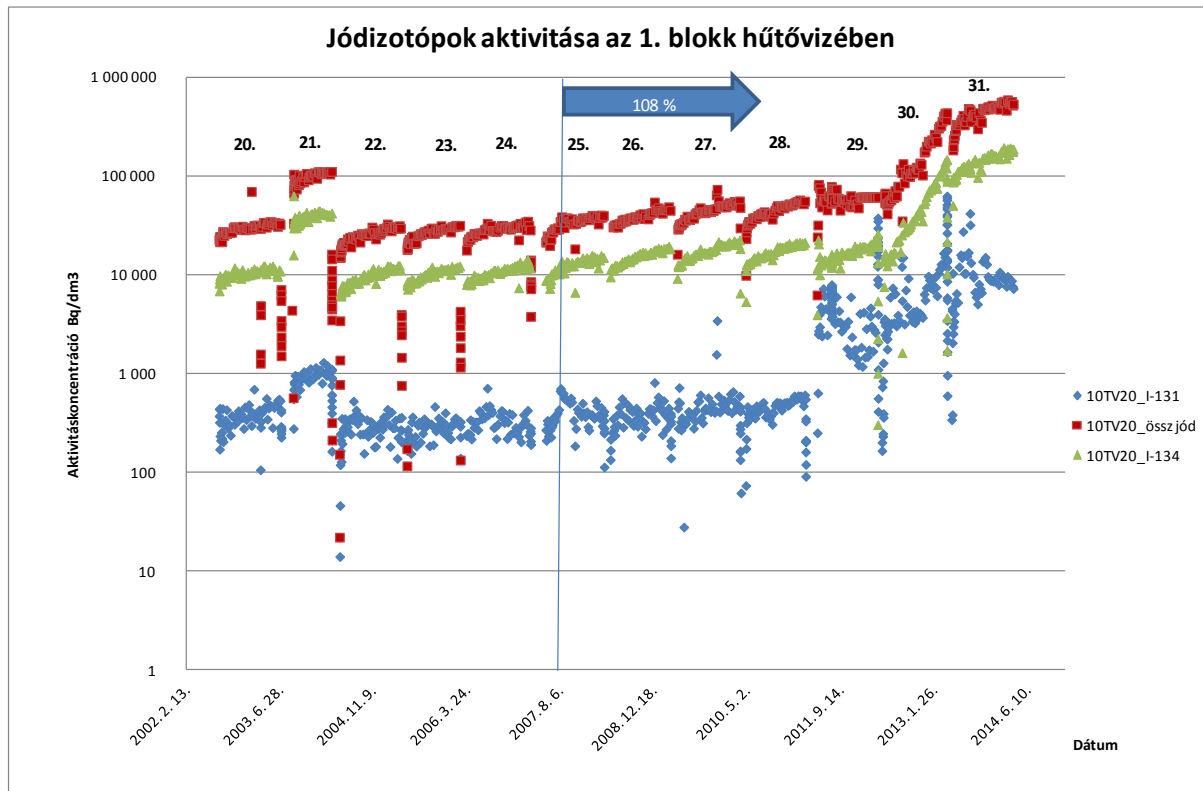
$$a_i = \frac{R_i}{B_i} \cdot \frac{1}{k \cdot V} \cdot \frac{\lambda_i \cdot y_i}{\lambda_i + \beta} = \frac{R_i}{B_i} \cdot \frac{3,12 \cdot 10^{10} \cdot Q_t}{V} \cdot \frac{\lambda_i \cdot y_i}{\lambda_i + \beta}$$

ahol a jódiszotóp származhat a felületi urán szennyezettségből, illetve a szivárgó fűtőelemből.

Szivárgó elemek esetén becsülhető  $\frac{R_i}{B_i} = \frac{v}{v + \lambda_i}$

**Az  $a_i$  aktivitáskoncentráció lineáris függvénye a Q termikus teljesítménynek.**

# A jódízotópok primer körü koncentrációja inhermetikus fűtőelemek esetében 108% teljesítményen



# A jódtizotópok primer körü koncentrációja inhermetikus fűtőelemek esetében 108% teljesítményen 15 hónapos üzemben

A C15 üzemmódban állandó teljesítmény mellett növelik meg az üzemidőt 12 hónapról 15 hónapra. Egyensúlyi állapot áll be az izotópok képződése és fogyása között, mégpedig az izotóp felezési idejétől függő idő alatt ( $^{131}\text{I}$  esetében kb 30 nap alatt).

Ezért a **C15 üzemmódban a primerköri jódaktivitások azonosak lesznek a C12 üzemmódban kapott értékekkel**, legalábbis viszonylag kis kiégés esetében.

**Nagy kiégésnél** (> 40-50 MWnap/kg U) kialakul a fűtőelem pasztillákban a rim réteg, melyben megnő a a hasadási termékek képződése, és a porózus szerkezetéből megnő a radioizotópok migrációja a burkolat alatti részbe, valamint a hűtővízbe.

Hibás FE esetében a kiszabaduló jód mennyisége feltételezhetően néhányszorosára nőhet. Szintén megnő a leállási spiking alatt a jódkibocsátás.

# Összefoglalás

Megnőhet-e a fűtőelemek inhermetikusságának gyakorisága a nagyobb hőteljesítmény (108 %-os) és a hosszabb tartózkodási idő (C15 üzemmódban) miatt?

**Ezt jelenlegi ismereteink szerint nem lehet kizárni. Az inhermetikusság szempontjából a kritikus paraméter nem a megnövelt 108% teljesítmény, hanem a C15 üzemmódban megnövelt tartózkodási idő és az így jelentősen megnőtt kiégettség. Kisebb kiégettségnél, így a C15 üzemmód első 3 ciklusában nem valószínű a fűtőelem-meghibásodás gyakoribbá válása.**

Milyen kapcsolat van a jódzotópok koncentrációja és a fűtőelemek inhermetikussága között megnövelt teljesítményen (108 %) 15 hónapos teljesítményüzemben?

**A C15 üzemmódban, kis kiégéseknél (< 40 MWnap/kg U) a primer körű jódkoncentrációk alakulásában nem lesz változás a korábbi C12 üzemmódban (108% teljesítményen) megfigyelt állapothoz képest. Nagy kiégések esetében nagyobb mennyiségű radiojód és hasadási gáz kerül a rim rétegből a résbe, ezért a fűtőelem meghibásodásakor a primer körű jód és nemesgáz aktivitáskoncentrációk is néhányszorosra megnőhetnek.**