



**MTA Energiatudományi Kutatóközpont**

# **Nagy kiegészű fűtőelemek használatának megalapozása**

**Kulacsy Katalin,  
Nagy Richárd, Vér Nóra, Vimi András**



# Elvárások a fűtőelemekkel szemben

- kiégés nő
  - max. kb. 80 MWd/kgU (tabletta)
- teljesítmény nő
- kampányhossz, használati idő nő

## UGYANAKKOR

- nagyobb megbízhatóságot várnak

Mi a hatása a nagyobb terhelésnek (kiégésnek)?



# Két szerződés, egy koncepció

## Célkitűzés

A növekvő kiégés fűtőelemekre gyakorolt hatásainak áttekintése

## Felépítés

- kutatóreaktorokban végzett kísérletek
  - ✓ egyedi kísérletek
  - ✓ több kísérletből leszűrhető tapasztalatok
  - ✓ hatás a tablettára
  - ✓ hatás a burkolatra
  - ✓ hatás a pálcára
- erőművi tapasztalatok
  - ✓ normál üzemi meghibásodások
  - ✓ VVER-es tapasztalatok
  - ✓ PWR-es tapasztalatok
- üzemeltetési korlátok és kritériumok

## Terjedelem

Két tanulmány, összesen kb. 150 oldal → szemelvények következnek



# Tartalom

## Célkitűzés

A növekvő kiégés fűtőelemekre gyakorolt hatásainak áttekintése

## Felépítés

- kutatóreaktorokban végzett kísérletek
  - ✓ egyedi kísérletek
  - ✓ több kísérletből leszűrhető tapasztalatok
  - ✓ hatás a tablettára
  - ✓ hatás a burkolatra
  - ✓ hatás a pálcára
- erőművi tapasztalatok
  - ✓ normál üzemi meghibásodások
  - ✓ VVER-es tapasztalatok
  - ✓ PWR-es tapasztalatok
- üzemeltetési korlátok és kritériumok



# A kiégés hatása a tablettára

- az oxigén kémiai potenciálja nő (oxidálóbbá válik az üzemanyag)
- hasadási termékek képződnek, fajtáik:
  - nemesgáz és illékony
  - fém zárvány
  - oxid kiválás
  - oldott oxid
- duzzad az üzemanyag
- létrejön a nagy kiégésű szerkezet (High Burnup Structure, HBS)
- romlik a hővezetés, bár a HBS keletkezésekor kicsit javul
- nő a porozitás



# A kiégés hatása a burkolatra

- külső oldal: oxidáció, hidrogénfelvétel (inkább t-, T- és kémiafüggő)
  - Nb-tartalmúaknál kevésbé jelentős, mint Sn-tartalmúaknál
- kötés létesülhet a tableta és a burkolat között a résbezáródás után
- belső oldal résbezáródás után: feszültségkorróziós repedés lehet (jód)
  - Nb-tartalmúaknál kevésbé jelentős
- gyors neutronok hatása
  - keményedés (telítésbe megy, hőkezeléssel megszüntethető)
  - besugárzás miatti nyúlás (monoton nő, gyártáskor magas T-n feszültségmentesített burkolatokra csekélyebb)
  - anizotrópia csökkenése



# A kiégés hatása a pálcára

- a gázkibocsátás kb. pálcára átlagolt 40 MWd/kgU fölött alacsony  $T_n$  is felgyorsul
- csökken az 1%-os termikus gázkibocsátás  $T$ -küszöbe
- mechanikai kontaktus, később esetleg kötés létesül a tablettá és a burkolat között (Pellet-Cladding (Mechanical) Interaction, PC(M)I)



# Tartalom

## Célkitűzés

A növekvő kiégés fűtőelemekre gyakorolt hatásainak áttekintése

## Felépítés

- kutatóreaktorokban végzett kísérletek
  - ✓ egyedi kísérletek
  - ✓ több kísérletből leszűrhető tapasztalatok
  - ✓ hatás a tablettára
  - ✓ hatás a burkolatra
  - ✓ hatás a pálcára
- erőművi tapasztalatok és fejlesztések
  - ✓ normál üzemi meghibásodások és kivédésük
  - ✓ VVER-es tapasztalatok és fejlesztések
  - ✓ PWR-es tapasztalatok és fejlesztések
- üzemeltetési korlátok és kritériumok



# Normál üzemi meghibásodások

- a pálca meghibásodása (inhermetikusság)
  - dörzsölődéses (fretting) kopás rácsnál
  - dörzsölődéses (fretting) kopás törmelékkel
  - alsó végdugó kopása a tartórácsban (VVER-1000)
  - gyártási hibák
  - tablettá-burkolat kölcsönhatás (PCMI)
  - korrózió és hidrogénfelvétel (esetleg lerakódással együtt)
- a kazetta meghibásodása (deformáció, szabályozó rudak nem mennek be)
  - elhajlás
  - csavarodás

# Normál üzemi meghibásodások kivédése

- a pálca meghibásodása (inhermetikusság)
  - a pálca és a távtartó rács érintkezési felületének növelése, rugalmasabb kontaktus
  - a pálca üzemi rezgésének mérséklése
  - törmelékszűrő a kazettákba
  - gyártástechnológia és minőségbiztosítás javítása
  - új, korrózióálló ötvözetek
- a kazetta meghibásodása (deformáció, szabályozó rudak nem mennek be)
  - mechanikai stabilitás növelése

# VVER-es tapasztalatok és fejlesztések (pálca)

- A burkolat befelé kúszik, a tablettá duzzad → 40-50 MWd/kgU pálcakiégésnél létrejön a PCMI.
- A PCMI létrejöttkor a legnagyobb a burkolat nyúlása, a kiégéssel nem nő tovább.
- A burkolat szakítószilárdsága nem változik jelentősen a közepestől a nagy kiégésig.
- A hidrogénfelvétel mérsékelt, az esetleges hidridek tangenciális irányban állnak.
- A hasadási gázok kibocsátott hányada a legnagyobb (70 MWd/kgU) kiégésnél sem haladja meg a 10%-ot.
- Új burkolatanyagokat fejlesztettek ki: kicsit módosított összetételű, új (szivacsos) gyártástechnológiájú ötvözetek (pl. E110G)



# PWR-es tapasztalatok és fejlesztések (pálca)

- A hagyományos Zircaloy-4 burkolatok erősen oxidálódnak.
- A ZIRLO kevésbé oxidálódik, kedvező mechanikai tulajdonságokkal bír.
- A tabletták éle a PCMI miatt a burkolat sérülését okozhatja.
- A gázkibocsátás (főleg nagy teljesítményen) jelentős lehet.
  
- Új, csökkentett Sn-tartalmú ötvözetek (kis Sn-tartalmú Zircaloy-4, opt. ZIRLO), új fejlesztések (M-MDA, M5, bevonatos).
- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  adalékkal nagy szemcseméretű tabletták (gázkibocsátás csökkentése)



# Tartalom

## Célkitűzés

A növekvő kiégés fűtőelemekre gyakorolt hatásainak áttekintése

## Felépítés

- kutatóreaktorokban végzett kísérletek
  - ✓ egyedi kísérletek
  - ✓ több kísérletből leszűrhető tapasztalatok
  - ✓ hatás a tablettára
  - ✓ hatás a burkolatra
  - ✓ hatás a pálcára
- erőművi tapasztalatok és fejlesztések
  - ✓ normál üzemi meghibásodások és kivédésük
  - ✓ VVER-es tapasztalatok és fejlesztések
  - ✓ PWR-es tapasztalatok és fejlesztések
- üzemeltetési korlátok és kritériumok

# Üzemeltetési korlátok és kritériumok

- Több korlát egyesíthető egy P(BU) korlátban.
- A pálcá belső nyomását is korlátozni kell (lift-off kritérium).
- Az oxidáció és hidrogénfelvétel rontja a burkolat képlékenységet, LOCA alatt konzervatívan a normál üzemi + üzemzavari oxidáció összegére lehet megkövetelni a 17 ECR%-os kritérium teljesülését.
- A H-felvételtől (csak közvetetten BU-függő) a burkolat rideg lesz, fontolgatják RIA-nál BU-függő entalpiakorlát, LOCA-nál BU-függő oxidációs korlát bevezetését (függ a burkolat anyagától!).
- A fűtőelem összetöredezése, aláhullása és szétszóródása RIA során entalpiakorláttal (szétszóródás ellen), LOCA során talán a nagy kiégésű kazetták teljesítményének korlátozásával (magától teljesül) oldható meg.

Úgy tűnik, a jelenleg elképzelt kiégések mellett fenntartható a biztonság.





**MTA Energiatudományi Kutatóközpont**

**Köszönjük a figyelmet!**