

Új típusú fűtőelemek bevezetésének megalapozását szolgáló kísérletek, 2015 & 2016

Slonszki Emese, Nagy Attila

TSO Szeminárium, OAH, 2016. június 7.

A projekt célja

Vízhűtésű termikus reaktorokhoz használható új típusú fűtőelemek bevezetésének megalapozását szolgáló kísérletek áttekintése:

- Tömör és lyukas UO_2 fűtőelem-tabletták használatának előnyeit és hátrányait vizsgáló kísérletek alapján, (2015)
- MOX és REMIX fűtőelemek használatának lehetséges előnyeit és hátrányait vizsgáló kísérletek alapján, (2016)

a fűtőelem-gyártó által meghatározott korlátoktól való távolságot befolyásoló tényezők vizsgálatának tekintetében.

A vízűtősű reaktorokhoz tervezett és/vagy használt új típusú fűtőelemekkel elérendő célok

Fokozódó teljesítmény igények kielégítése \Rightarrow VVER-440 üzemanyagciklus javítása

↳ a fűtőelem hasadóanyag tartalmának növelésével,

↳ az üzemanyag dúsításának növelésével.

\Rightarrow TÖMÖR UO_2

Az üzemanyaghoz felhasznált természetes urán mennyiségének csökkentése

↳ a kiégett üzemanyag újrahasznosításával.

\Rightarrow MOX, REMIX

RK-2+ kazetta:

4,87% átlagos dúsítás, 5 éves üzemanyagciklus:

VVER-440 erőművekben **107% (1471 MW)**, **109% (1498 MW)** és **112% (1540 MW)** névleges hőteljesítmény elérése a cél.

Az ehhez szükséges üzemanyagciklusok elfogadhatóságát ellenőrizték.

Dukovany Atomerőmű 1. blokk, 2014.óta ilyen üzemanyaggal üzemel, 107% elérése a cél.

A vízűtészű reaktorokhoz tervezett és/vagy használt új típusú fűtőelemekkel elérendő célok

RK-3 kazetta:

4,87% átlagos dúsítás, **6+1 éves üzemanyagciklus:**

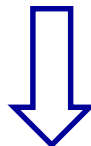
Kolai atomerőmű, 2010. próbaüzem kezdete

RK-2+ kazetta:

5% fölötti (ez a jelenlegi korlát) átlagos dúsítás (5,35% átlagos és 5,6% maximális dúsítású kazetták), **6-7 éves üzemanyagciklusra.**

Az új üzemanyagciklus megfelelőségét az 1471 MW növelt névleges hőteljesítményen szükséges biztonságos üzemeltetés korlátait és a tervezési kritériumait felhasználva ellenőrizték.

A tömör fűtőelemek biztonságos működése mindhárom esetben igazolt,



lehetséges az üzemidő hosszabbítása és



az üzemanyagciklus javítása.



Tervezési kritériumok

A fűtőelem-pálcára vonatkozó tervezési követelmények alapvető célja, hogy az üzemelés során a fűtőelem-pálcák megőrizzék épségüket és geometriai méreteik ne változzanak meg olyan mértékben, ami valamilyen módon akadályozná a reaktor működését.

Négy csoport:

- szilárdsági kritériumok (SC),
- alakváltozási kritériumok (DC),
- hőfizikai kritériumok (TC) és
- korróziós kritériumok (KC).

Jelölés	Megnevezés	Tömör tablettá hatása a kritérium teljesülésére
SC1	Feszültség miatti korróziós repedezés (FKR) agresszív hasadási termékek jelenlétében	Tabletta-burkolat kölcsönhatás
SC2	Ekvivalens feszültség határértéke a burkolatban	Tabletta-burkolat kölcsönhatás
SC3	A burkolat kerületi stabilitásának vesztese nyomásesés következtében	Résméret alakulása
SC4	A burkolat fáradási és tartós szilárdsága	Nincs
SC5	A burkolat megmaradó alakváltozási határértéke	Nincs
DC1	A burkolat átmérő változásának határértéke	Nincs
DC2	Fűtőelem pálcá nyúlási határértéke	Nincs
TC1	Üzemanyag hőmérséklet határa	Max. hőmérséklet
C2	Fűtőelem pálcá burkolata alatti gázok nyomásának határértéke	Gáz kibocsátás
KC1	Burkolat külső felületének oxidációja	Nincs
KC2	Burkolat hidridációja	Nincs
FD	Burkolat kopása	Nincs

Tervezési kritériumok - Tömör és lyukas tablettás kísérleti eredmények

Összehasonlítottuk:

a **Kolai Atomerőműre START-3A** kóddal végzett

- 6 kampány alatt
- 70,5 MWd/kgU átlagos kiégést elérő,
- tömör VVER-440 fűtőelemekre

vonatkozó **számítások** eredményeiből származtatott, a tervezési kritériumokra vonatkozó adatokat, és

a **haldeni IFA-686 kísérletben**

- 10 kampányon át besugárzott,
- 34,5 MWd/kgU átlagos kiégésű,
- lyukas és tömör VVER-440 fűtőelemekkel

végzett kísérlet megfelelő paramétereit.

Az értékelésnél figyelembe kell venni, hogy a fűtőelem-gyártó által meghatározott korlátoktól való távolságot befolyásoló tényezők reaktorfüggők, melyeket az adott reaktorra vonatkozó numerikus modellezéssel lehet értékelni.

Tömör és lyukas tablettás kísérleti eredmények értékelése

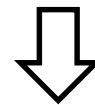


Paraméterek	Kola (K)	Halden (H)	Halden (H)	Tervezési kritérium	Korlát
Üzemanyag-tabletta típusa	tömör	tömör	lyukas		
Üzemanyag átlagos kiégése, MWd/kgU	70,5	34,5	34,5	-	-
Üzemanyag maximális hőmérséklete, °C	1372,8	~1400	~1300	TC1	2795 (K) és 2817(H _{tömör})/ 2818(H _{lyukas})
FGR _{max} , %	6,8	2,08	<1	-	-

Az **üzemanyag kiégése** a haldeni kísérletekben nem érte el az erőműre tervezett kiégéseket → további besugárzás szükséges (ezek a mérések jelenleg is folynak).

A **tabletta hőmérséklete** az erőművi és a haldeni esetben is jóval az olvadáspont alatt marad (de eltérőek a lineáris hőteljesítményeik).

Az erőművi esetről a **hasadási gázkibocsátás** kb. háromszorosa a haldeninek, de a vizsgált fűtőelem kiégése is jóval nagyobb.



További mérésekre lenne szükség magasabb kiégésű fűtőelemekkel annak igazolására, hogy a megengedett kiégésnél sem haladják meg azt az értéket, ami a pálca maximálisan megengedhető belső nyomásához rendelhető.

Tömör és lyukas tablettás kísérleti eredmények értékelése



Paraméterek	Kola (K)	Halden (H)	Halden (H)	Tervezési kritérium	Korlát
Üzemanyag-tabletta típusa	tömör	tömör	lyukas		
Maximális pálca belső nyomás, MPa	7,76	2,25	-	TC2	12,3 (K) és 3,5 (H)
Feszültség alatti korróziós repedezésére vonatkozó érték, MPa	216,9	-	-	SC1	VVER körülmények mellett: 280
A fűtőlempálca megnyúlása, mm (hideg állapotban)	23,4	-	0,4	DC2	31,5
Burkolat átmérők változása, mm	-0,0978/+0,0049	<1%	<1%	DC1	-0,12/+0,03

A haldeni reaktorban a **nyomásviszonyok** nem reprezentatívak a VVER-440 körülményekre. Az alacsony hűtőközeg oldali nyomás miatt a **burkolat deformációja** szükségszerűen elmarad az erőművi állapotoktól. A pálca **nyúlásának** mértékét meg tudták határozni a kísérletekben is, de ez elsősorban a besugárzási növekedés mechanizmusával jött létre és nem feltétlenül tartalmazza a klasszikus kúszásból származó összetevőt.

Tömör és lyukas tablettás kísérleti eredmények értékelése



- ❖ A kísérleti eredmények közvetlenül nem alapozzák meg a fűtőelemek atomerőművi reaktorokban való használatának minden aspektusát, ám
- ❖ lehetővé teszik a numerikus modellek fejlesztését és validációját,
- ❖ általuk megbízhatóan szimulálható a fűtőelemek viselkedése az atomerőműben, és
- ❖ elvégezhetőek azok a számítások, amelyekkel igazolható a tervezési követelmények teljesülése.

A Kolai (VVER-440) Atomerőművekre vonatkozó feldolgozott elemzések igazolták, hogy az erőműben a tömör tabletták használatakor teljesülnek a tervezési követelmények.

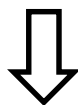
Ha egy más erőműben akarnak bevezetni tömör tablettákat a jelenlegi lyukasak helyett, akkor hasonló elemzéseket kell végezni, figyelembe véve az adott blokk jellemzőit (teljesítmény, átrakási stratégia, stb.).

Tehát az orosz számítások igazolták azt, hogy az említett erőműben bevezethető a tömör tabletták, de más erőművekben történő használatkor (pl. Paksi Atomerőmű) az új típusú fűtőelem bevezetéséhez el kell végezni a teljes engedélyeztetési eljárást, amelynek keretében el kell végezni az erőműre vonatkozó specifikus számításokat.

MOX és REMIX üzemanyagok

Jelenlegi paksi blokkok: UO_2 tablettákat tartalmazó üzemanyag

Új blokkok: kiegészített üzemanyag feldolgozásából származó, plutónium hasadóanyagot is tartalmazó tabletták felhasználásának lehetősége



- **MOX** (Mixed OXide): a gyorsreaktorok elsődleges üzemanyaga, számos vízű atomerőműben használják
- **REMIX** (REgenerated MIXture of U-Pu oxides): a MOX üzemanyagtól eltérően többször is érdemes újrafeldolgozni,
Próbaüzem: Balakovo Atomerőmű 3. blokk, 2016. június

Üzemanyag	Üzemanyag összetétele	Üzemanyag-ciklus
UO_2	3,5-4,5% ^{235}U + ^{238}U	1
MOX	5-7% ^{239}Pu + ^{238}U	1
REMIX	1% ^{239}Pu + 3-4% ^{235}U + ^{238}U	több

A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest

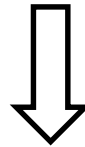
Vizsgáltuk :

1. A MOX és UO_2 üzemanyag-kazetták kezelésének és tárolásának főbb szempontjait és követelményeit
 - a kiégett MOX plutónium, amerícium és kúrium tartalma nagyobb
 - ↳ kezelése nagyobb kihívás,
 - termikus reaktor: UO_2 +MOX / MOX (50% fölötti MOX használattal vagy akár 100% MOX-ot megcélózva: AREVA harmadik generációs EPR™ reaktora)
 - MOX előállítás UO_2 reprocesszálassal \Rightarrow csökkentheti a felhasznált természetes uránérc mennyiségét.



A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest

Az erőmű gazdaságossága nő az üzemanyag-kazetta kiegészének növelésével.



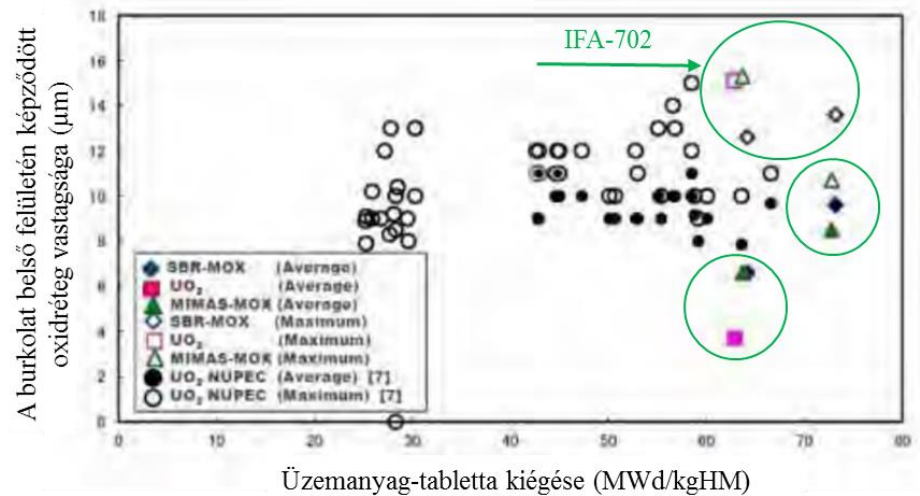
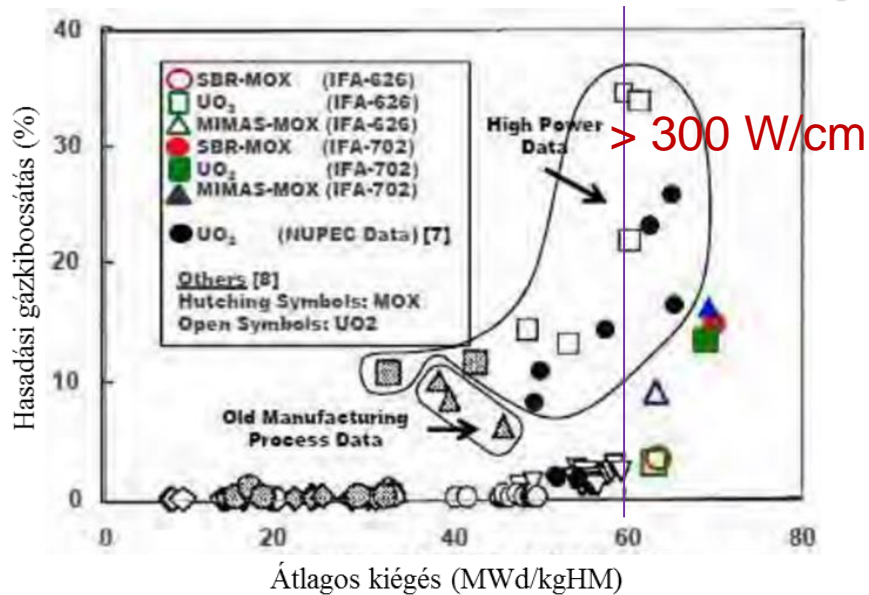
2. A nagy kiegészű MOX és az UO_2 üzemanyag viselkedését normál üzem során, 60 MWd/kgHM kiegész fölött.

- Haldeni IFA-609/626 (alapbesugárzás) és IFA-702 kísérletek
- 3 db, ≈ 65 MWd/kgHM és ≈ 70 MWd/kgHM átlagos kiegészű fűtőelemszakasz

Eredmények

Besugárzás alatti viselkedés	UO_2	MIMAS-MOX	SBR-MOX
Hélium gázkibocsátás	enyhe (0,8)	nagy (20,3%)	nagy (17,9%)
Hasadási gázkibocsátás	jelentős (13,6)	jelentős (16,5%)	jelentős (15%)
Burkolat felületi oxidáció	8 μ m és 16 μ m között		
Tabletta duzzadás	$\approx 4\%$	$\approx 6-7\%$	$\approx 6-7\%$
Hővezetés	MOX üzemanyagé enyhén nagyobb lehet		

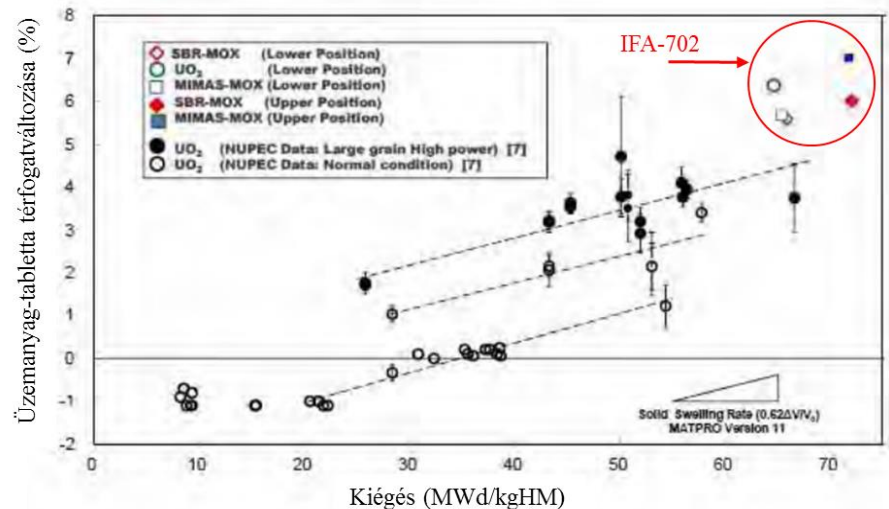
A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO₂ üzemanyaghoz képest



A burkolat belső felületi oxidációja az irodalmi értékek között van

Jelentős hasadási gázkibocsátás

Hasonló mértékű duzzadás





A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest

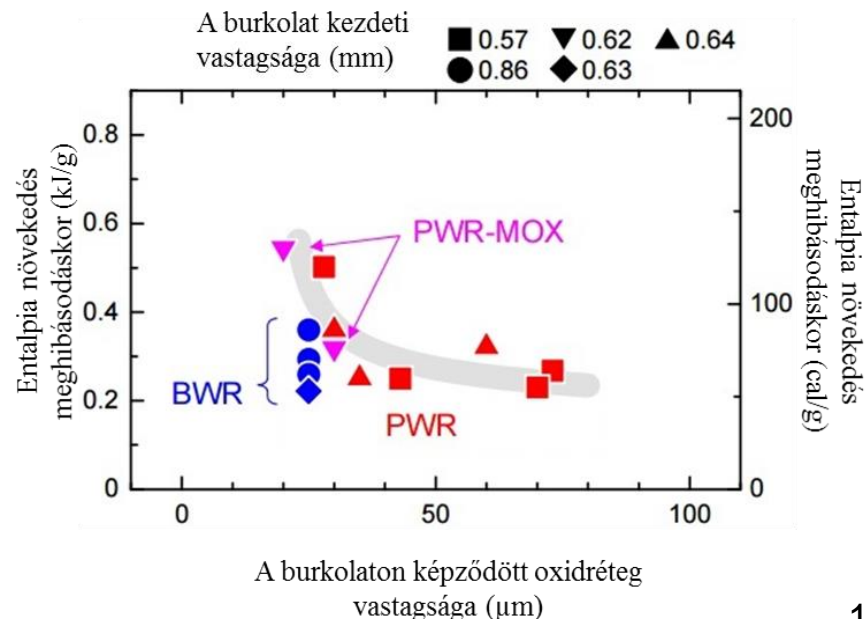
3. A nagy kiégésű MOX és az UO_2 üzemanyag viselkedését reaktivitás üzemzavar során, 60 MWd/kgHM kiégés fölött.

- francia CABRI REP-Na és a japán NSRR ALPS programok
- 7 db, 28-65 MWd/kgHM kiégésű MOX fűtőelemszakasz
- három PWR MOX fűtőelemszakasz hibásodott meg.

Eredmények

- A PCMI miatt bekövetkező burkolat-meghibásodáshoz tartozó küszöbérték csak a burkolat korróziós állapotától függ, amennyiben a tableta és a burkolat közötti mechanikai kölcsönhatást egyedül a tabletták hőtágulása idézi elő.

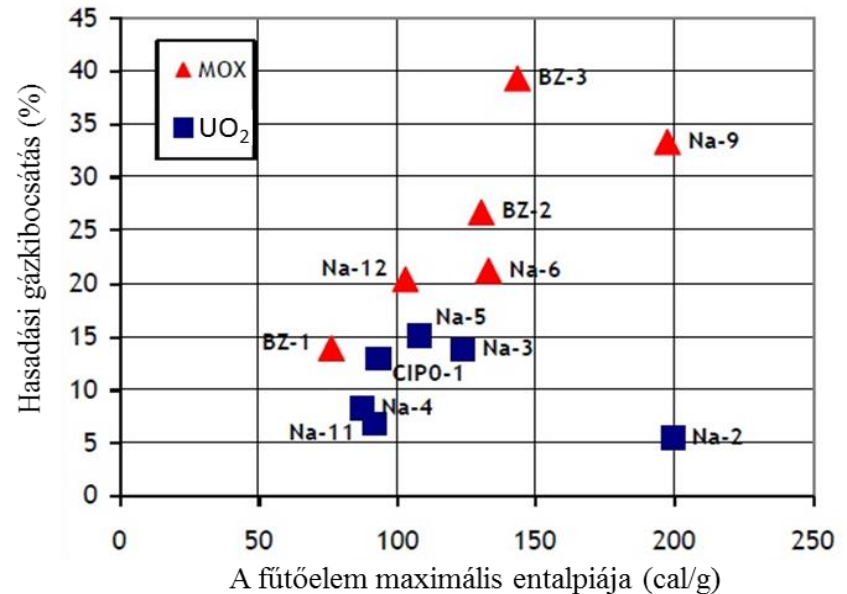
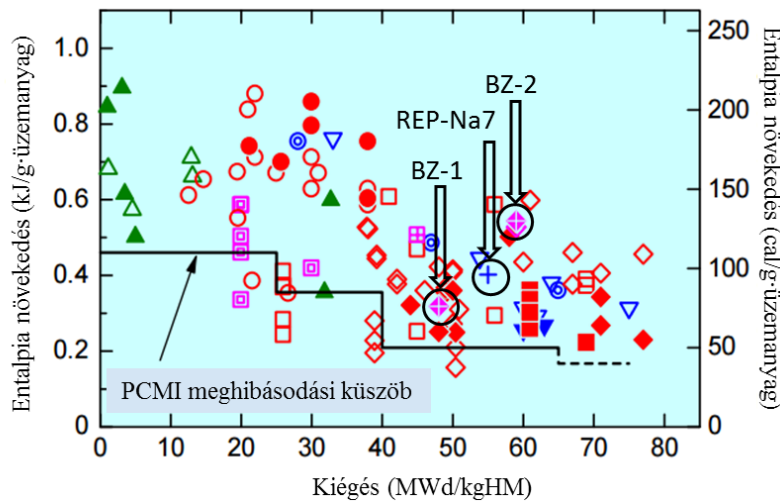
A MOX és az UO_2 fűtőelemszakaszok burkolat meghibásodásához tartozó entalpia értékei egybevágnak.



A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO₂ üzemanyaghoz képest

- Az UO₂-hoz tartozó meghibásodási küszöbérték alkalmazható nagy kiégésű MOX üzemanyagra is.

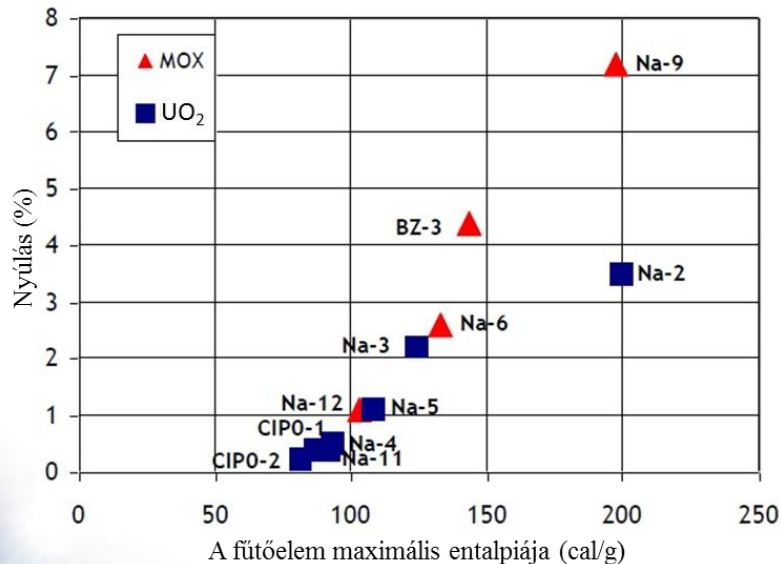
Kísérlet	Nem hibásodott meg	Meghibásodott	Kísérlet	Nem hibásodott meg	Meghibásodott
NSRR	PWR UO ₂	◇	SPERT, PBF	△	▲
	BWR UO ₂	□	CABRI UO ₂	▽	▼
	PWR MOX	◇	CABRI MOX	⊙	+
	BWR MOX	□			
	ATR MOX	□			
	JMTR	○	●		



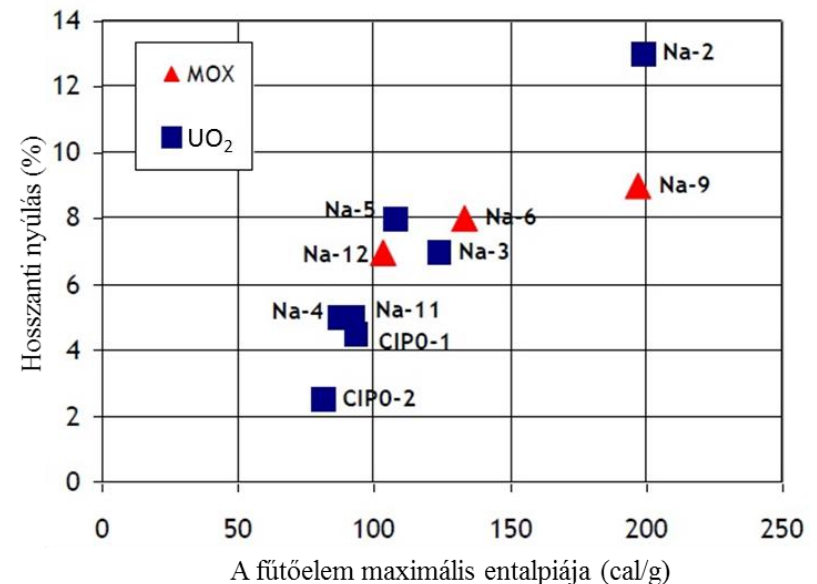
- A hasadási gázkibocsátás a MOX üzemanyagok esetén nagyobb volt, mint az UO₂ üzemanyagoknál.

A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest

- A MOX üzemanyag mechanikai viselkedése eltér az UO_2 -étől:
 - nagyobb mértékű a burkolat kerületi megnyúlása,
 - kisebb mértékű a burkolat hosszanti megnyúlása,
 - a kúszási sebesség nő a besugárzással.



Kerületi nyúlás



Hosszanti nyúlás

A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO₂ üzemanyaghoz képest

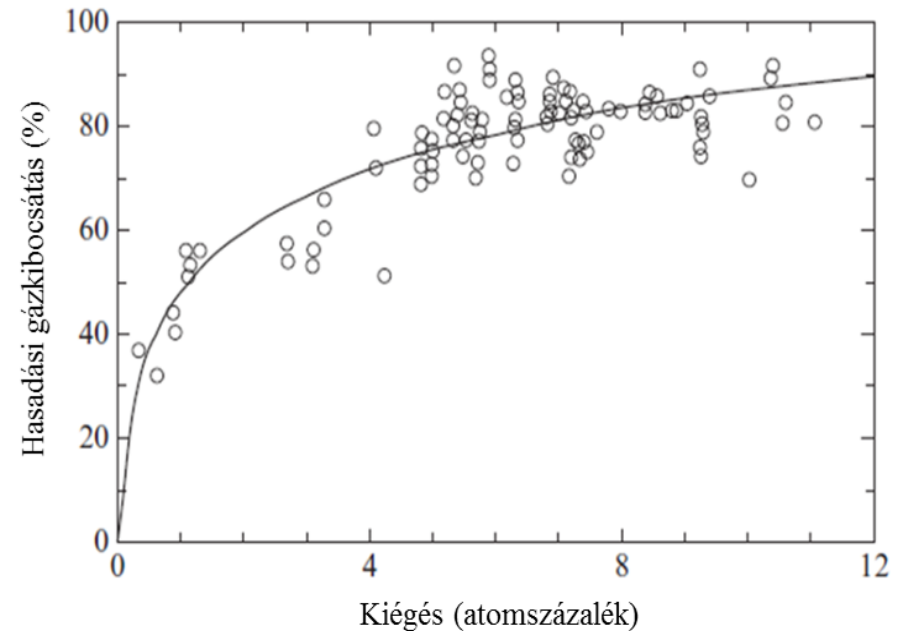
4. A gyors- és a termikus reaktorokban használt MOX üzemanyagok jellemzőit.

Üzem közbeni változások	Gyorsreaktoros MOX tablettá	Termikus MOX tablettá
Lyuk képződés	felléphet	-
Maximális plutónium koncentráció	tablettá közepén	tablettá szélén
Oszlopos szemcseszerkezet	kialakul	-
Nagy kiégésű peremréteg	-	kialakul
Hasadóanyag tartalom és hasadási gázkibocsátás	jóval nagyobb a gyorsreaktorosnál	
Hasadási termék migráció	tablettá széle felé	-

A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest



Phénix gyorsreaktoros, eredetileg tömör tabletta besugárzás után



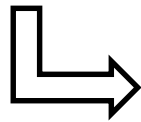
Gyorsreaktoroknál a magas hőmérséklet miatt a hasadási gázok kibocsátása nagyon jelentős, akár 80% is lehet, termikus reaktoroknál a hasadási gázok túlnyomó többsége a tabletta pórusaiban marad.



A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest

5. A MOX és REMIX üzemanyag közötti különbséget.

REMIX, azaz az újrafeldolgozott MOX üzemanyag



- akár ötször
- zárt üzemanyagciklus
- 100%-ban betölthető vele a VVER-1000 zóna
- alig 3 töltettel akár 60 évig üzemeltethető vele egy VVER-1000 reaktor

Neutronfizikai számítások A, B és C típusú REMIX üzemanyagra, Kurcsatov Intézet

A típus: elválasztják a szeparálatlan urán-plutónium izotóp keveréket a többi aktinidától és hasadási terméktől, majd összekeverik dúsított természetes uránnal

B típus: a szeparálatlan urán-plutónium izotóp keveréket a reprocesszállással kinyert plutóniummal és nagy dúsítású természetes uránnal keverik össze (14-16,7% ^{235}U tartalom), ahol az utóbbi kettő az üzemanyag 20%-kát adja

C-típus: előállításában tér el a B típusútól

A MOX ÉS REMIX üzemanyagok jelenlegi és jövőbeni termikus reaktorokban való használatának előnyei és hátrányai az UO_2 üzemanyaghoz képest

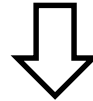
A neutronfizikai számítások eredményei:

- jelentős a neutronfizikai jellemzők változása,
- a REMIX üzemanyaggal töltött zóna számított neutronfizikai jellemzői a VVER-1000 zóna UO_2 -ra vonatkozó névleges korlátain belül vannak,
- az üzemanyag-kazetta és a fűtőelem teljesítmény, valamint a lineáris hőteljesítmény maximális értékei nem haladták meg a megengedett határértékeket,
- a nukleáris biztonsági körülmények a betöltés során és a reaktor a legalacsonyabb szabályozható teljesítményszintre kerülésekor szintén megfelelőek,
- a reaktivitást szabályozó mechanikai rendszer pedig rendelkezik a szükséges hatékonysággal.



Következtetések

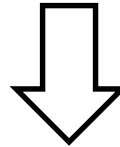
Jelenleg, a VVER-440 atomerőművek üzemanyagciklusának, névleges teljesítményének és gazdaságosságának növelésére irányuló trendek azt mutatják, hogy nagy jelentősége van a betölthető üzemanyag mennyiség növelésének.



A *tömör tableta* megjelenésével ez a cél bizonyítottan és biztonságosan elérhető.

Csakúgy, mint a *MOX üzemanyaggal*, a *REMIX üzemanyag* használatával is csökkenthető a reaktorokban a természetes urán felhasználása, ami elérheti akár a 20% körüli értéket is egy nyílt üzemanyag-ciklushoz képest.

A REMIX üzemanyag alkalmazható a jelenleg üzemelő reaktorok üzemanyagaként is, bár az üzemanyag gyártása költségesebb lesz a nagy aktivitás szint következtében.



A jelen tanulmányban bemutatott eredmények alapján a MOX/REMIX üzemanyag *hazai bevezetését érdemes megfontolni* az új blokkokra.

Köszönöm a figyelmet!

