

Gázhűtésű gyorsreaktor üzemanyagciklusának modellezése

Szieberth Máté, Halász Máté, Fehér Sándor, Reiss Tibor¹

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9, tel.: +36 1 463 4339

A gázhűtésű gyorsreaktor (GFR) a negyedik generációs atomreaktorok egyik perspektivikus típusa, amely kemény neutronspektrumával ígéretes lehetőséget teremt a nukleáris üzemanyag hatékonyabb felhasználására és a másodlagos aktinidák transzmutációjára, hozzájárulva ezzel a nukleáris energiatermelés fenntarthatóságának növeléséhez. A cikk a BME Nukleáris Technikai Intézetben a GFR 2400 MWth koncepciójára végzett üzemanyagciklus-számításokat mutatja be. Közel kétezer zónaszámítás eredményeire támaszkodva egy többdimenziós regressziós számításokon alapuló, gyors és rugalmas kiéegszámítási eljárás került kifejlesztésre, amely alkalmas az üzemanyagciklus-számításokba történő integrálásra. A modell segítségével különböző visszatáplálási stratégiák mellett vizsgáltuk egy GFR-eket és hagyományos könnyűvízes reaktorokat tartalmazó atomerőműpark egyensúlyi állapotait a GFR üzemanyag-hasznosításának és transzmutációs képességeinek felmérése érdekében.

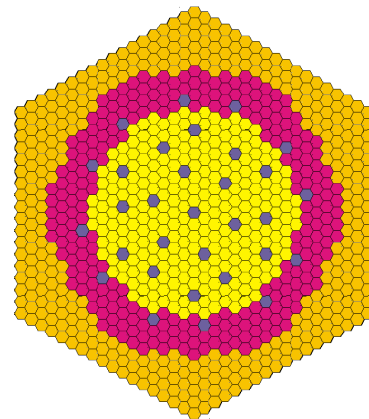
Bevezetés

Az atomenergetika fenntarthatóságát alapvetően meghatározza a nukleáris üzemanyagciklus szervezése. Míg napjainkban az atomerőművek elsősorban nyitott üzemanyagciklusban üzemelnek, addig a következő évtizedekben várhatóan előtérbe kerül a kedvezőbb üzemanyag-hasznosítást és hulladékformát kínáló zárt üzemanyagciklus, melynek megvalósítását az ún. negyedik generációs atomreaktorokkal képzelik el. A Generation IV International Forum [1] hat negyedik generációs reaktortípust választott ki fejlesztésre a fenntarthatóság, proliferáció-állóság, gazdaságosság és a megnövelt biztonság érdekében. A hat reaktor-típus közül három gyorsreaktor, ezek egyike a gázhűtésű gyorsreaktor (Gas-cooled Fast Reactor, GFR), amelynek koncepcióját a francia CEA dolgozta ki és az Euratom által finanszírozott GoFastR projekt keretein belül zajlott további fejlesztése [2,3]. A GFR hűtőközegének magas kimenő hőmérséklete lehetőséget teremt a villamos energia nagy határfokkal történő előállítására, valamint potenciálisan hidrogéntermelésre és egyéb folyamathő felhasználásokra is. A héliummal történő hűtés eredményeképpen ebben a reaktortípusban különösen kemény neutronspektrum alakul ki, ami kedvez az üzemanyag tenyésztésnek és a másodlagos aktinidák transzmutációjának. Ezeknek a kérdéseknek a vizsgálatához azonban olyan összetett számítási modell szükséges, amely képes meghatározni a GFR kiégett üzemanyagának összetételét, illetve képes modellezni a nukleáris üzemanyagciklus főbb létesítményeit és az ezek között fellépő anyagáramokat.

A GFR2400 reaktor

A GFR2400 a gázhűtésű gyorsreaktor 2400 MW termikus teljesítményű, ipari méretű energiatermelésre tervezett koncepciója.

A reaktor aktív zónája 516 darab kazettából és 24 darab szabályozórúdból áll, amelyek az 1. ábra szerinti elrendezésben foglalnak helyet. A sárga és lila színű kazetták rendre a belső és külső üzemanyagot jelölik, a kék kazetták a szabályozó- és biztonságvédelmi rudakhoz kapcsolódó követőkazettákat, a narancssárga kazetták pedig a radiális reflektort.



1. ábra: A GFR2400 reaktor zónaelrendezése (sárga kazetták: belső régió, lila: külső régió, kék: SZBV kazetták, narancssárga: radiális reflektor)

A nagy határfokot eredményező magas hőmérsékletek lehetővé tételéhez mind a GFR üzemanyaga, mind a pálcák burkolata keramikus anyagokból készül: a SiC burkolattal rendelkező UPuC kerámia pálcák alkotják a kazettákat, és a proliferáció-állóság érdekében a reaktor nem rendelkezik külön tenyészköpennyel. A karbid alapú üzemanyagok előnye az oxidokkal és nitridekkel szemben, hogy nagyobb nehézfém sűrűség elérését teszik lehetővé, megkönnyítve ezzel a körülbelül 43%-os hűtőközeg térfogat-arány ellensúlyozását. A zóna egy 7,3 méter átmérőjű, 20 méter magas nyomásálló tartályban helyezkedik el, amelynek falvastagsága a tartály közepén 20 cm, tömege pedig megközelíti az 1000 tonnát. Kétféle üzemanyag-kazetta

¹ A szerző 2012 szeptemberétől a svájci Paul Scherrer Institut munkatársa.

található a zónában: a belső és külső zóna kazettái, előbbieket alacsonyabb, míg utóbbiak magasabb plutónium tartalommal rendelkeznek a fluxus eloszlás és a teljesítményprofil minél egyenletesebbé tétele érdekében [4].

A számítási modell

Az üzemanyag izotóp-összetételének változását az ún. Bateman-egyenletrendszer írja le, amely az egyes magfajtákra felírt mérlegegyenletekből áll:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i} (\sigma_{j \rightarrow i} \Phi + f_{j \rightarrow i} \lambda_j) N_j - (\sigma_i \Phi + \lambda_i) N_i \quad (1)$$

ahol N_i jelöli az i -edik izotóp magfajta mennyiségét, $\sigma_{j \rightarrow i}$ a j -edik izotópból i -edik izotópra vezető reakció mikroszkopikus hatáskeresztmetszetét, σ_i az i -edik izotóp fogyasztás eredményező reakciók teljes hatáskeresztmetszetét, $f_{j \rightarrow i}$ a bomlási gyakoriságokat, λ_j a j -edik izotóp bomlási állandóját, Φ pedig a teljes spektrumra integrált neutronfluxust. A kiégett üzemanyag összetétel meghatározásának nehézségét az adja, hogy az (1) egyenletben szereplő egycsoportos hatáskeresztmetszetek és a neutronfluxus a neutronspektrum változásán keresztül bonyolult módon függnek az összetételtől. A kiéggésszámítások során ezért vagy időigényes zónaszámításokat kell elvégezni meghatározott időlépésenként, vagy a kiéggésszámítások megadott hatáskeresztmetszet-könyvtárakat kell használni, ahogy a legtöbb ún. szcenárió-kód esetében szokás [5]. Utóbbi megoldás pontossága azonban megkérdőjelezhető egy másodlagos aktinida visszatáplálást is feltételező üzemanyagciklusban. Az üzemanyag-ciklus-modellbe integrálható gyors és rugalmas kiéggésszámítási eljárás létrehozása érdekében az egycsoportos hatáskeresztmetszeteket nagyszámú részletes zónaszámítás eredményeire támaszkodva az izotóp összetétel analitikus függvényeivel közelítettük.

A reakciósebességek közel egészéért felelős 16 legfontosabb aktinida izotópot (^{234}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{242}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm , ^{245}Cm), valamint a hasadási termékek összes mennyiségét választottuk ki az összetétel jellemzésére. Az illesztett paraméterek nagy száma miatt a hatáskeresztmetszetek illesztése csak az ún. Moore-Penrose pseudo inverz alkalmazásával lehetséges, ennek a módszernek azonban korlátja, hogy csak olyan függvények illesztésére alkalmazható, amelyek lineárisak az illesztett paramétereikben [6]. Mivel a polinomok kielégítik ezt a feltételt, illetve előzetes vizsgálatok azt mutatták, hogy a harmadfokú tagok bevezetése nem javítja az illesztés pontosságát, ezért a következő másodfokú polinom került kiválasztásra:

$$\sigma(\underline{N}) = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j N_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j}^n a_{j,k} N_j N_k \quad (2)$$

ahol \underline{N} jelöli a magfajták mennyiségéből összeállított vektort, N_j és N_k az egyes magfajták mennyiségét, a_0 , a_j és $a_{j,k}$ pedig a részletes zónaszámítások eredményei alapján illesztett paramétereket.

SCALE zónaszámítások

Az előző szakaszban szereplő illesztés lehetővé tételéhez nagyszámú különböző üzemanyag-összetételre kellett részletes zónaszámításokkal meghatározni az egycsoportos hatáskeresztmetszeteket. Mivel az illesztett paraméterek nagy száma miatt ez a gyakorlatban több ezer ilyen számítás

elvégzését jelenti, ezért egy egyszerűsített zónamodell került felállításra, amely képes megadni a zónára homogenizált egycsoportos hatáskeresztmetszeteket.

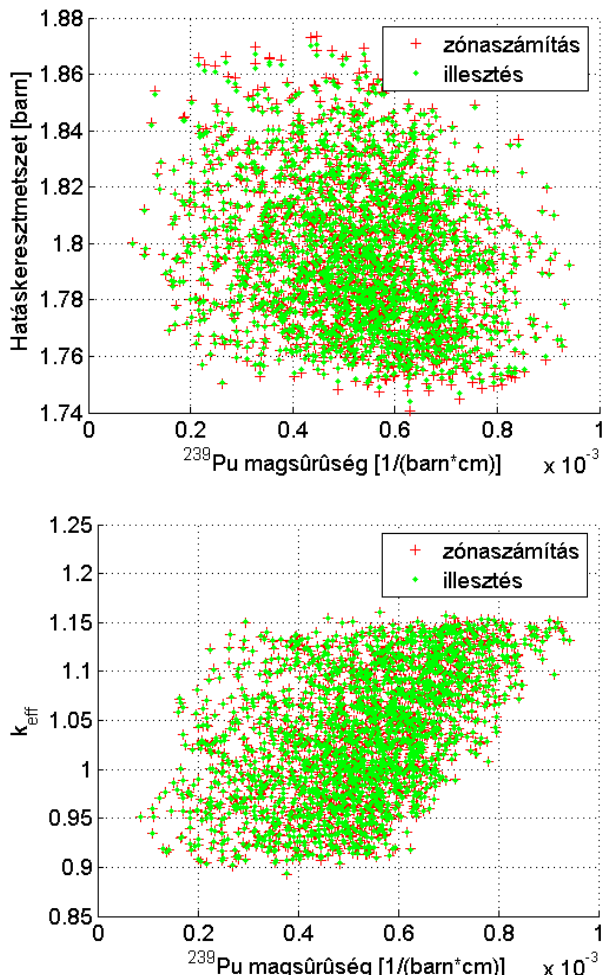
A részletes zónaszámítások elvégzése a SCALE kódrendszerrel [7] történt egy pálca- és kazetta-homogenizációt is magában foglaló szekvenciában. Elsőként a GFR2400 egy elemi cellája került definiálásra, amely egy keramikus üzemanyag-pálcából, valamint az azt körülvevő hűtőközegekből áll. Az egydimenziós, hengerszimmetrikus modellben a zóna magassága görbületi paraméter (buckling) korrekcióval lett figyelembe véve. A T-XSEC modul és az ENDF/B-VII könyvtár felhasználásával állítottuk elő a rezonancia-árnyékolt 238 csoportos hatáskeresztmetszeteket, melyekből az XSDRN-PM diszkrét ordinátás transzport kód segítségével határoztuk meg az elemi cellára érvényes homogenizált hatáskeresztmetszeteket. A hatszöges üzemanyag-kazetta szintén egydimenziós, hengeres modellje tartalmazza a homogenizált üzemanyagot, a keramikus szerkezeti anyagokat, valamint a kazetták közötti rést. A homogenizált kazetta-modell ellenőrzésére kiéggésszámításokat végeztünk egy részletes, háromdimenziós modellen is a TRITON6 kiéggésszámító szekvencia segítségével. A két modell segítségével végzett számítások eredményét összevetve megállapítottuk, hogy minden jelentősebb izotóp esetében pár százalékon belüli egyezést produkálnak, így a homogenizálás során alkalmazott közelítéseket megfelelően tekinthetjük. A többi zónaelem (axiális és radiális reflektor, követőkazetták) homogenizációját végtelen, homogén közegként történő közelítésben végeztük. A zóna háromdimenziós modellje a homogenizált üzemanyag-kazettákból és egyéb zónaelemekből áll az 1. ábra szerinti elrendezésben. A teljes zónára vonatkozó számítások a KENO-VI sokcsoportos Monte Carlo kritikussági kód felhasználásával készültek 238 energiacsoporttal.

Közel 2000 zónaszámítást végeztünk el az egyszerűsített zónamodell segítségével az üzemanyag különböző izotóp-összetételei mellett. Az egyes számításokhoz tartozó aktinida-összetételek véletlen mintavételezéssel lettek kiválasztva az alábbi szempontok figyelembevételével:

- Az üzemanyag plutónium tartalma 10-25% között változott, a belső és külső régióban érvényes plutónium-tartalmak aránya 0,8, ami összhangban van a kezdeti betöltéssel.
- A másodlagos aktinidák aránya az üzemanyagban a teljes magfajta arány 0-10%-a között változott.
- A fennmaradó aktinida mennyiséget teljes egészében urán tette ki.
- A hasadási termékek egy átlagos hozamvektorral lettek figyelembe véve, mennyiségük közvetlen kapcsolatban áll az üzemanyag kiéggésével, amely 0 és 10% között változott.
- Az aktinidák izotóp-összetétele szintén véletlenszerűen lett mintavételezve a betöltött kezdeti üzemanyag összetétele és az előzetes számítások [8,9] alapján becsült egyensúlyi összetételek között.

A zónaszámítások eredményei a külső és belső régióra érvényes reakciósebességek és normált fluxusok, valamint az egyes üzemanyag-összetételekhez tartozó k_{eff} értékek. Mivel az egyszerűsített kiéggésszámítások csak az egész zónára értelmezett átlagos összetétellel számol, ezért a külső és belső régió eredményeiből megfelelő homogenizációs eljárással meghatároztuk a teljes zónára homogenizált hatáskereszt-

metszeteket oly módon, hogy a reakciósebességek összege ne változzon meg. Az ilyen módon előállított egycsoportos hatáskeresztmetszeteket, illetve a zónaszámítások eredményeképpen szintén előállt effektív sokszorozási tényezőt a (2) alakú polinom néhány százalékos maximális hibával képes reprodukálni. Példaként látható a ²³⁹Pu hasadási hatáskeresztmetszetének és a k_{eff} illesztésének eredménye a 2. ábrán.



2. ábra: ²³⁹Pu hasadási hatáskeresztmetszetére (fent) és a k_{eff} -re (lent) történő illesztések eredménye az izotóp-összetétel függvényében

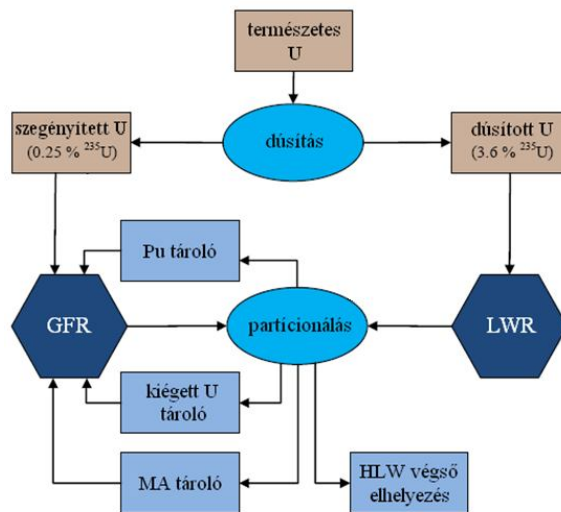
Az üzemanyagciklus-modell

Az egyszerűsített kiegészőmodell segítségével a 3. ábrán látható üzemanyagciklus-modellt hoztuk létre. A modell MATLAB környezetben került implementálásra, és tartalmazza a GFR kiegészőmodellt, valamint képes követni az egyes reaktorok és tárolók közötti anyagáramokat. A tárolókba a betöltött anyag homogén keverékként van nyilvántartva és radioaktív bomlási folyamatok a tárolási idő során modellezve vannak. Ennek abban az esetben van jelentősége, ha valamelyik raktárban hosszabb távon felhalmozódás alakul ki. Az üzemanyagciklus-modell kétféle reaktortípust tartalmaz: GFR és hagyományos könnyűvízes (Light Water Reactor, LWR) reaktorokat. Az LWR-ek kiegésző üzemanyagát konstans összetétellel vettük figyelembe: kezdetben 3,6%-os dúsítású urán üzemanyaguk 33 MWnap/kgU kiegészés után kerül kivételre (lásd. 1. táblázat). Az LWR-ekbe nem feltételezünk visszatáplálást, azonban kiegésző üzemanyaguk feldolgozásra

kerül az U, Pu és MA komponensek kémiai szétválasztásának céljával (particionálás). Ezután Pu és MA tartalmuk a GFR-ekbe kerül visszatáplálásra. A GFR-ek kezdeti üzemanyagát az LWR üzemanyag előállítása során keletkező szegényített urán, illetve a reprocessált LWR üzemanyagból származó Pu és MA alkotják. A gázhűtésű reaktorok háromtöltetes ciklusokban üzemelnek, minden 481 napos kampány végén a zóna egyharmada kerül átrakásra, és minden töltet három kampányt tölt a zónában.

1. táblázat Az LWR kiegésző üzemanyagának összetétele 33 MWnap/kgU kiegészés és 5 éves hűtési idő után

MA izotóp	Atomi hányad (%)	Pu izotóp	Atomi hányad (%)
²³⁷ Np	0,495	²³⁸ Pu	0,027
²⁴¹ Am	0,316	²³⁹ Pu	0,564
^{242m} Am	0,00103	²⁴⁰ Pu	0,240
²⁴³ Am	0,148	²⁴¹ Pu	0,099
²⁴² Cm	$4,13 \cdot 10^{-9}$	²⁴² Pu	0,0697
²⁴³ Cm	0,000436		
²⁴⁴ Cm	0,0369		
²⁴⁵ Cm	0,00262	Komponens	Atomi hányad (%)
²⁴⁶ Cm	0,000477	összes Pu	0,905
²⁴⁷ Cm	0,0000101	összes MA	0,067



3. ábra: A vizsgált üzemanyagciklus-modell. Az LWR-ekből származó Pu és MA akkor kerül betöltésre a GFR-be, ha nincsen elegendő mennyiség a megfelelő tárolóban.

A megfelelő reaktivástartalék eléréséhez a zóna kezdeti Pu tartalmát iteráció segítségével határozzuk meg olyan módon, hogy a kampány végi (End Of Cycle, EOC) k_{eff} értéke 1,005 körül legyen. Körülbelül azonos reaktivitás-csökkenést feltételezve a következő kampány elején (Beginning Of Next Cycle, BONC) érvényes effektív sokszorozási tényező az alábbi módon számolható:

$$k_{eff}^{BONC} = k_{eff}^{BOC} - k_{eff}^{EOC} + 1,005 \quad (3)$$

Homogén MA betöltést feltételeztünk a zónába, és különböző visszatáplálási stratégiákat vizsgáltunk az üzemanyag kezdeti MA tartalmát illetően. A GFR-ek kiégett üzemanyaga 5 éves hűtési idő után kerül particionálásra, majd az egyes összetevők (U, Pu, MA) a megfelelő tárolóba kerülnek. A GFR U, Pu és MA igényét elsősorban a tárolókból fedezzük, a szegényített uránt és az LWR-ek kiégett üzemanyagát csak abban az esetben használjuk fel, ha a tárolókban lévő aktinida-mennyiség nem elegendő a betöltéshez. Az egyszerűsített kiégésszámítás segítségével a modell néhány perces számítási idő mellett képes hosszú távon (több száz ciklus erejéig) követni a leírt üzemanyagciklust, ami feltétlenül szükséges a rendszer egyensúlyi állapotának eléréséhez.

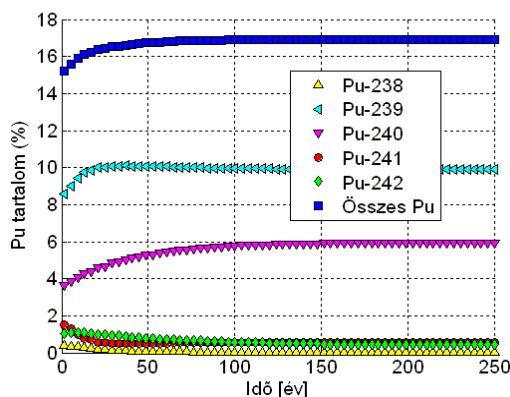
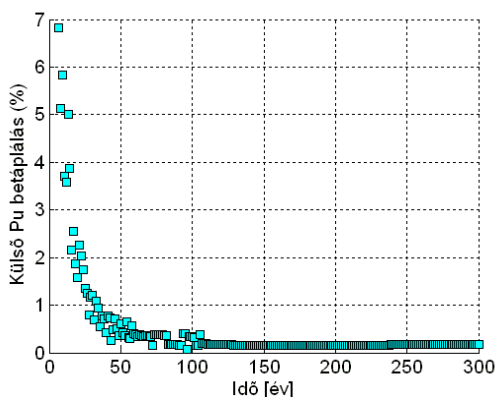
Eredmények

A vizsgálatok során minden szimulációt a rendszer egyensúlyi állapotának beállításáig futtattunk. A tranziens szimuláció ebben az esetben csak az egyensúly megtalálásának módszere, mert az ehhez szükséges idő túl hosszú volt ahhoz, hogy reális legyen egy valódi üzemanyagciklusban (néhány száz év). Ugyanakkor egyensúly ismerete nélkülözhetetlen a rendszer megfelelő értékeléséhez, mert azt az egyensúly közelében érdemes majd üzemeltetni. Célzott betöltési, visszatáplálási stratégiával az egyensúly reális időtávon is beállítható. Az ilyen stratégiák kialakítása további vizsgálatok tárgya.

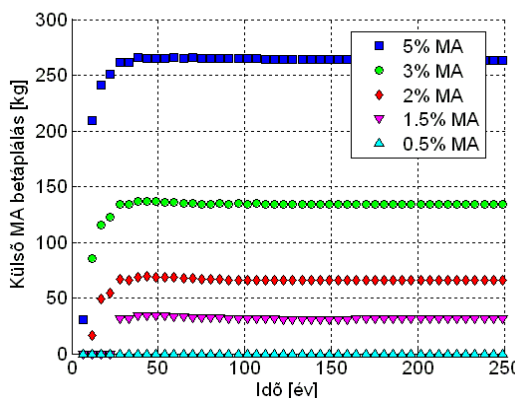
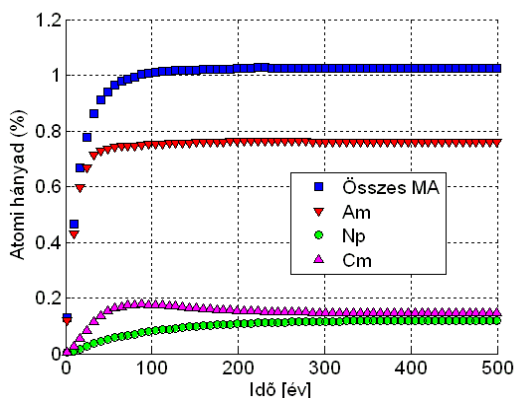
Az első vizsgált eset során csak Pu visszatáplálást feltételeztünk a GFR-ekbe, ezzel szolgáltatva referenciát a további vizsgálatokhoz. A szimuláció eredménye azt mutatja, hogy az LWR-ekből származó külső Pu betáplálás értéke

gyorsan csökken (lásd 4. ábra), és az egyensúlyban a GFR-nek mindössze 0,2% külső Pu betáplálásra van szüksége, vagyis a GFR ebben az esetben rendkívül közel van az öntenyésztéshez. A zóna kezdeti 15,2%-os plutónium-tartalma 16,9%-ra növekszik a ²⁴⁰Pu felhalmozódásának, illetve a hasadóképes ²⁴¹Pu fogyasztásának következtében, ami tipikus jelenség gyorsreaktorok esetében.

A következő esetben mind a GFR által termelt Pu, mind az általa termelt MA tartalom visszatáplálásra került, azonban LWR-ekből származó MA betáplálás nem történt. Egy fontos kérdés ebben az esetben, hogy beáll-e az egyensúlyi állapot, és ha igen, akkor milyen MA koncentráció mellett. Az 5. ábrán látható, hogy az egyensúly valóban beáll, és a kiégett üzemanyag egyensúlyi MA tartalma valamivel nagyobb, mint 1%. Az elemeken belüli izotóp-összetételek is egyensúlyi értékre állnak be (6. ábra), tehát a GFR minden MA izotópot képes elhasítani, és az MA visszatáplálás hatására nem jön létre folyamatos Cm felhalmozódás, ami igazolja azt, hogy a GFR valóban alkalmazható a másodlagos aktinidák transzmutációjára. Egyes MA izotópok fertilis jellege miatt a magasabb MA tartalom kismértékben javítja a zóna tenyésztési képességeit is, ami már elegendő az öntenyésztés eléréséhez. A betöltött hasadóképes MA izotópoknak köszönhetően a zónába töltött Pu tartalom is alacsonyabb, mint a csak Pu visszatáplálást feltételező stratégia esetén (lásd 2. táblázat). A plutónium izotóp-összetételében emellett megfigyelhető a ²³⁸Pu felhalmozódása, ami a megnövekedett mennyiségű ²³⁷Np izotópból neutronbefogással keletkező ²³⁸Np béta-bomlása során keletkezik.



4. ábra: A GFR külső Pu betáplálásának időbeli alakulása az MA visszatáplálást nem tartalmazó stratégia esetén (balra) és a GFR üzemanyag Pu tartalmának időbeli változása (jobbra)



5. ábra: A GFR MA tartalmának időbeli alakulása a Pu és saját MA visszatáplálást feltételező stratégiában (balra), illetve a külső MA betáplálás időbeli alakulása a különböző visszatáplálási stratégiák esetén (jobbra)

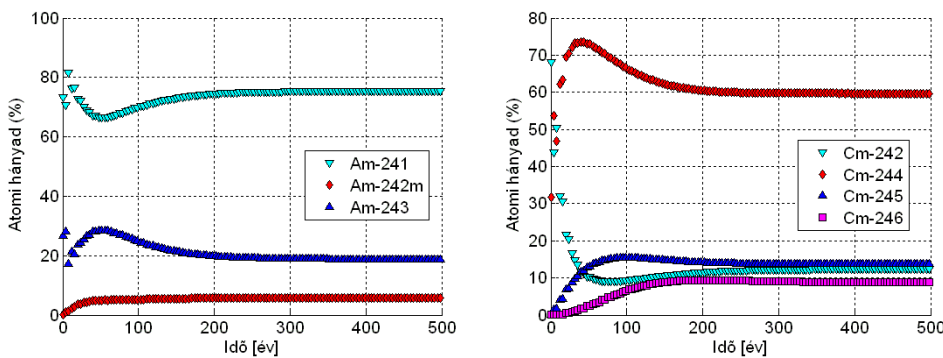
2. táblázat Egyensúlyi üzemanyag-hasznosítási és transzmutációs paraméterek a különböző visszatáplálási stratégiák mellett

Stratégia	Egyensúlyi Pu tartalom (%)	Egyensúlyi Pu termelés [kg]	Egyensúlyi tenyésztési nyereség	Külső MA betáplálás [kg]	LWR MA teljesítményarány (%)*
Pu visszatáplálás	16,91	-	-	-	-
Saját MA visszatáplálás	16,76	58,9	0,041	-	-
0,5% MA betöltés	16,92	40,3	0,031	0,0	0,0
1,5% MA betöltés	16,67	73,3	0,050	31,2	57,1
2% MA betöltés	16,60	87,8	0,059	66,2	73,9
3% MA betöltés	16,47	115,8	0,076	134,1	85,1
5% MA betöltés	16,23	167,8	0,112	262,7	91,8

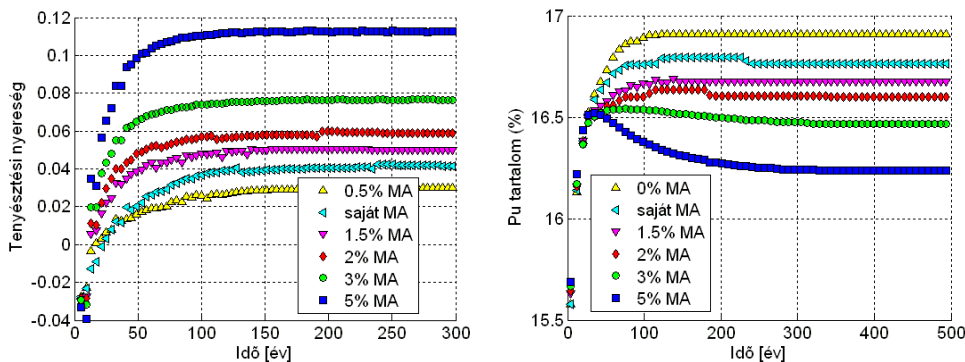
*: A GFR-be történő MA betáplálás fedezéséhez szükséges LWR teljesítményarány az atomerőműparkban.

Az 1%-os egyensúlyi MA koncentráció felveti annak a lehetőségét, hogy magasabb MA betöltés esetén a GFR esetleg képes elhasítani a más reaktorokból származó másodlagos aktinidákat, ezáltal nettó MA fogyasztóvá válik. A feltevés igazolásához a betöltött üzemanyag különböző, rögzített MA tartalmával (0,5%-5%) végeztünk szimulációkat. A várakozásoknak megfelelően a 0,5% kezdeti MA tartalom esetén az egyensúlyban a külső MA betáplálás nullára csökken, míg az 1,5% és annál magasabb MA tartalmak esetén egy jelentős külső betáplálás stabilizálódik (lásd 5. ábra). Ahogy a 2. táblázatból is megállapítható, az 5% MA esetben a GFR saját teljesítményének 10-szeresét meghaladó termikus teljesítményű LWR park teljes másodlagos aktinida termelését képes

elhasítani. Ez azt jelenti, hogy létrehozható olyan szimbiotikus atomenergia-rendszer, ahol az LWR-ek a dúsított urán felhasználásával megtermelik a GFR-ek kezdeti üzemanyagához szükséges Pu mennyiséget, miközben a GFR elhasítja a saját és az LWR-ek által termelt másodlagos aktinidákat, vagyis a teljes rendszer MA termelése a particionálási veszteségekre korlátozódik. Érdeemes még megemlíteni, hogy a nagyobb MA tartalom az üzemanyag-hasznosításra is kedvező hatással van (7. ábra). Ugyan az üzemanyagciklus szempontjából a magasabb MA tartalom kedvezőbb paraméterekkel szolgál, emellett nem szabad figyelmen kívül hagyni a biztonsági jellemzőkre vetített hatását, amely korlátot szabhat a GFR üzemanyagának MA tartalmára.



6. ábra: Am (balra) és Cm (jobbra) izotóp-összetételének időbeli alakulása. Az ábrákon megfigyelhető, hogy az elemeken belüli izotóp-összetételekben is beáll az egyensúly.



7. ábra: A GFR tenyésztési nyereségének (balra) és a zóna Pu tartalmának (jobbra) időbeli alakulása a különböző visszatáplálási stratégiák esetén. A magasabb kezdeti MA tartalom kedvező hatással van az üzemanyag-tenyésztésre.

Összefoglalás

A BME Nukleáris Technikai Intézetben kifejlesztésre került egy gyors és rugalmas kiégés-számítási eljárás, amely az egycsoportos hatáskeresztmetszeteknek és egyéb zónaparamétereknek az izotóp-összetétel függvényeként történő illesztésén alapul. A kiégés-modellt egy LWR és GFR reaktorokat tartalmazó nukleáris üzemanyagciklus-modellbe integráltuk, és különböző visszatáplálási stratégiák mellett vizsgáltuk a kérdéses atomenergia-rendszer üzemanyag-hasznosítási és transzmutációs képességeit.

Az eredmények megmutatták, hogy a GFR az egyensúlyban öntenyésztő, és csak a zóna kezdeti Pu tartalmát kell fedezni az LWR-ek kiégett üzemanyagából. A GFR által termelt másodlagos aktinidák visszatáplálása esetén körülbelül 1% egyensúlyi MA koncentráció alakul ki, ennél több MA

betáplálása esetén pedig a GFR képes elhasítani az LWR-ek kiégett üzemanyagából származó MA tartalmat. A GFR-be történő magasabb MA betöltés mindezek mellett a nukleáris üzemanyag hasznosítási hatásfokára is kedvező hatással van. Eredményeinket nemzetközi konferenciákon és folyóirat-cikkben is ismertettük [8-10]. Az egyensúlyi izotópkoncentrációkra kapott értékeket összevetettük a svájci Paul Scherrer Institute kutatócsoportja által más módszerrel végzett számításokkal [10]. Az eltérő módszerrel végzett számításokkal mutatkozó jó egyezés is megerősíti az alkalmazott megoldás helyességét. A jelen munka a gázhűtésű gyorsreaktorokra fókuszál, azonban a modell elegendő számú részletes zónaszámítás elvégzése esetén más reaktortípusokra is alkalmazható.

Köszönetnyilvánítás

Ez a munka az Európai Atomenergia Közösség (EURATOM) 7. kutatás-fejlesztési keretprogramja által támogatott GoFastR projekt (támogatási megállapodás száma: 249678) keretében készült. A projekthez kiegészítő finanszírozást nyújtott a Kutatási és Technológiai Innovációs Alap az Új Széchenyi Terv EU_BONUS_12 programja keretében (szerződés száma: EU_BONUS_12-1-2012-0002).

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚSZT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, *The Generation IV International Forum* (2010), <http://www.gen-4.org>
- [2] STAINSBY, R., PEERS, K. et. al.: *Gas cooled fast reactor research in Europe. Nuclear Engineering and Design* 241, pp. 3481-3489. (2011)
- [3] C. POETTE et al.: *Gas Cooled Fast Reactors: Recent Advances and Prospects*, in: *Proc. of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*, CN-199, IAEA, Paris, France, 4-7 March 2013
- [4] RICHARD, P., PÉNELIAU, Y., ZABIÉGO, M.: *Reference GFR 2400 MWth core definition at start of GOFASTR, Technical report*, CEA/DEN/CAD/DER/SESI/LC4G DO2 26/03/10 Version 0, Commissariat à l'Énergie Atomique, Cadarache, France (2010)
- [5] L. BOUCHER, et al.: "International comparison for transition scenario codes involving COSI, DESAE, EVOLCODE, FAMILY and VISION" in: *Proc. of Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation 11th Information Exchange Meeting San Francisco, USA 1-4 November 2010*
- [6] PENROSE, R.: *A generalized inverse for matrices. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 51: 406-413. (1955)
- [7] SCALE: *A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, ORNL/TM-2005/39 Version 6 Vols. I-III, Oak Ridge National Laboratory, US (2009)
- [8] M. SZIEBERTH, M. HALÁSZ, T. REISS, S. FEHÉR: "Fuel cycle studies on minor actinide burning in gas cooled fast reactors" in: *Proc. of Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation 12th Information Exchange Meeting, Prague, Czech Republic, 24-27 September 2012*
- [9] M. SZIEBERTH, M. HALÁSZ, T. REISS, S. FEHÉR: "Fuel cycle studies on minor actinide burning in gas cooled fast reactors" in: *Proc. of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*, CN-199, IAEA, Paris, France, 4-7 March 2013
- [10] Z. PERKO, et. al.: *Core Neutronics Characterization of the GFR2400 Gas Cooled Fast Reactor, Progress in Nuclear Energy, Special Issue on Gen-IV reactors*, (2014) (benyújtva)