

# **A transzmutáció szerepe a fenntartható atomenergetikában**

Készítette: Tóth Barnabás

Budapest

2012.

## Bevezetés

A huszonegyedik század közepére az OECD előrejelzése szerint a világ villamosenergia-igénye a jelenlegi 2,5-szörösére nő. Ezzel párhuzamosan a környezetszennyezés problémája is egyre fenyegetőbbé válik. Mindezek a nukleáris energia, egy hosszú-távú energiaforrás alkalmazásának újragondolására készítetik a világot. Több mint  $10^4$  üzemév tapasztalattal, joggal tekinthetjük az atomenergia felhasználást egy megérett, kiforrott technológiának, amely jelenleg is számottevő részét képezi a villamos energia előállításának. A dolgozat készítésének pillanatában 436 atomreaktor üzemel, amely 370,499 GW<sub>e</sub> beépített elektromos teljesítményt képvisel és 61 darab blokk áll kivitelezés alatt.<sup>[1]</sup> Ez az érték immár több évtizede a világ villamosenergia-termelésének konstans, 16-17%-át jelenti. Ez alapján elmondható, hogy a nukleáris energia képes lépést tartani a gazdasági fejlődés indukálta növekvő energiaigénnyel. 2001 óta a fosszilis tüzelőanyagok árának növekedése, az üvegházhatású gázok kibocsátásának szigorú szabályozása az atomenergetikát, mint ezen problémákat kikerülő alternatívát előtérbe helyezte. Ez a „nukleáris reneszánsz” egészen 2011-ig megkérdőjelezhetetlennek látszott, amikor a Japánban lévő Fukushima Daiichi atomerőműben bekövetkezett baleset számos kételyt vetett fel több, mindeddig a nukleáris energiát felhasználó országban. Az UBS svájci bank előrejelzése szerint 30 atomerőművi blokk kerül bezárássra, amelyek szeizmikusan aktív zónákban, országhatárokon helyezkednek el. A kanadai Cameco uránbányászati cég 2020-ig 90 új reaktor üzembehelyezésével számol, 10%-kal kevesebbel, mint a fukushimai baleset előtt. Addig, amíg nem sikerül egy mindenki által elfogadott új, tiszta és hosszú távon fenntartható energiaforrás-hasznosításának technológia megvalósítása a megfelelő ellátásbiztonsággal, az atomenergia kikerülhetetlen alternatíva marad. Ehhez azonban a következő három elvárást kell teljesíteni:

- az üzembiztonság megteremtése és fenntartása
- az üzemanyag biztonságos tárolása
- a megfelelő hulladékkezelési stratégia kidolgozása

Az első követelmény megoldása a belső, inherens (emberi tényezőtől független) biztonság kiépítése, amelyet a IV. generációs reaktorok a tervek szerint teljesíteni fognak. A második problémát az üzemanyag erőművön belüli tárolása oldja meg, így illetéktelenek birtokába nem juthat. A harmadik elvárásra elképzelt terv a **transzmutációs** technológia.

„... a termikus reaktorból és a hagyományos gyorsreaktorokból eltávolított, majd reprocesszált kiegészített üzemanyagból elválasztott hosszú felezési idejű hasadási termékeket és transzurán izotópokat új üzemanyag részeként behelyezik egy kemény neutronspektrumú (fém üzemanyagú) gyorsreaktorba, vagy spallációs neutronforrás nagyenergiájú neutronsugárzásának teszik ki. Ezáltal a transzurán izotópok átalakítása során még energiát is nyerünk. Ez azt jelenti, hogy az atomreaktor a maga által termelt hulladék megsemmisítésére is alkalmas lehet. E magátalakítás – transzmutáció – hosszabb távon lehetőséget ad az atomenergetika egyik legnagyobb problémájának a megoldására.”<sup>[2]</sup>

Ahhoz, hogy az elképzelést mélyrehatóbban is megismerhessük, a következő pontok ismeretére feltétlenül szükség van.

## Üzemanyag

Az atomerőmű üzemelése során keletkező hulladékokat három csoportba oszthatjuk a veszélyességi indexük alapján: kisaktivitású (LLW), közepes aktivitású (ILW) és nagyaktivitású (HLW) termékeket különböztetünk meg. A továbbiakban ezek közül az utóbbival foglalkozunk. Ebbe a kategóriába elsősorban a kampányok során kiegészített

üzemanyagot soroljuk. Jelenleg az Európai Unió területén működő atomerőművekből évente nagyjából 2500 tonna kiegészített fűtőanyag kerül ki, amely 25 tonna plutóniumot, 3,5 tonna másodlagos aktinidát (neptúnium, amerícium, kúrimum) és 3 tonna hosszú felezési idejű hasadási terméket tartalmaz.<sup>[3]</sup> Ezen melléktermékek relatíve kis koncentrációban fordulnak elő a hulladékokban, azonban mégis veszélyesek ha kikerülnek a környezetbe. Ebből következik, hogy végső elhelyezésük teljes elszigetelést kíván a bioszférától stabil, mély geológiai formációkban hosszú időig.

A radioaktív hulladékok által okozott radiológiai kockázat mértéke és időbeli alakulása számos tényező (pl. a radioaktív hulladékok izotóp-összetétele és aktivitása, a sugárzás fajtája és egyéb jellemzői, stb.) függvénye. A kockázat mértékét leggyakrabban a *radiotoxicitás* értékével mérhetjük. A fogalom a tárolóból kiszabadulás esetén várható sugárterhelést jelenti. Mértékegysége Sv/kg, ha az adott izotóp, vagy a teljes hulladék tömegére vonatkoztatjuk, de lehet Sv/(GW<sub>e</sub>·év), ha villamosenergia-mennyiségre vonatkoztatunk. A radiotoxicitást megkapjuk, ha az izotópokra egyenként összegezzük az izotóp aktivitásának (Bq) és dóziskonverziós tényezőjének (megmutatja, hogy egységnyi bekerülő aktivitás mekkora effektív dózist eredményez, mértékegysége: Sv/Bq) szorzatát. Az üzemanyagban felhalmozódó izotópok gyakorlatilag kivétel nélkül uránból keletkeznek, így célszerű az összes izotóp radiotoxicitását az előállításához szükséges uránmennyiség radiotoxicitásához hasonlítani. Az így definiált hányadost *relatív radiotoxicitásnak* nevezzük.<sup>[4]</sup>

A kiegészített üzemanyagban az eredő radiotoxicitás a referenciaértéket több mint 100 ezer év után éri el. Az első 100 évben a hasadási termékek a dominánsak, majd 300 év múlva áll be a természetes értékre ezen hasadványok radiotoxicitása. A későbbiekben a transzurán izotópok válnak dominánssá. 100-1000 év között az <sup>241</sup>Am járul hozzá legnagyobb mértékben, majd 1000 és 10000 év között a <sup>240</sup>Pu izotóp, majd ezután a <sup>239</sup>Pu a döntő. 100 000 év után az <sup>241</sup>Am izotóp leányelemei a dominánsak.<sup>[3]</sup>

## Üzemanyagciklusok

A legtöbb üzemelő energetikai reaktor esetén az üzemanyag egyszeri felhasználása a jellemző. Ez azt jelenti, hogy az aktív zónából való eltávolítás (jellemzően 4-5 év) az üzemanyag átkerül a pihentető medencébe, ahol vízűtés szükséges a felszabaduló remanens hőteljesítmény miatt. Ezután átkerül egy átmeneti tárolóba, ahol már léghűtéssel lehet elszállítani a már lényegesen kisebb hőteljesítményt. (a Paksi Atomerőmű esetén ezt a létesítményt KKÁT-nak hívják). A tárolt nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezése még nem megoldott. Ez a módszer igen szerény anyaghasznosítási hatásokkal üzemel: a kibányászott urán mindössze 1%-át hasznosítja effektíven. Néhány ország jelentős mérőföldköveket ért el ezen a területen: Finnországban 2020-ban, Svédországban 2022-ben várható a végső geológiai konzerválás. Ez az ún. *nyitott üzemanyagciklus* (Once through cycle) azon országok számára lesz kedvező, akik a nukleáris energiát mérsékelten használják és nincs az újrahasznosításhoz megfelelő infrastruktúrájuk. Ha az elhasznált üzemanyag nem juttatható el egy nemzetközi újrahasznosító egységbe, akkor ki kell dolgozniuk a megfelelő végleges elhelyezés stratégiáját.<sup>[5]</sup>

Egy másik lehetőség, amivel a ciklus részlegesen zárható az üzemanyagban felhalmozódó plutónium (<sup>238</sup>U neutronbefogásával keletkezik) leválasztása, majd újrafelhasználása, (PU Burning) amit az tesz lehetővé, hogy számos plutónium izotóp (pl. <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu) termikus neutronspektrum esetén is hasadóképes. Ennek során természetes uránból és a leválasztott plutóniumból ún. MOX üzemanyag (Mixed Oxide Fuel) gyártható, amit a reaktorban a friss üzemanyaggal együtt „eléggetünk”. A visszamaradt másodlagos aktinidák és hasadási

termékek alkotta kiégett fűtőelemet geológiai tárolókban kell véglegesen elhelyezni.<sup>[5]</sup>

Az urán és plutónium leválasztásán túl lépett fel az igény ettől különböző elemek, vagy elemcsoportok szeparálására is. Ezt a módszert particionálásnak nevezzük és a transzmutációs eljárás előfeltételeként tekintünk rá és együttesen **P&T technológiának** (Partitioning and Transmutation) nevezzük. Ennek során a leválasztást követően **a hosszú felezési idejű radionuklidokat neutronbesugárással rövidebb felezési idejű, vagy stabil izotópokká alakítjuk át**, amivel a jövő generációit terhelő radiológiai kockázatokat mérsékelhetjük, illetve a végső tárolókba helyezendő hulladékok hőteljesítményét csökkenthetjük, ami azt eredményezi, hogy egy helyen nagyobb mennyiségű kiégett fűtőelem lesz tárolható. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a technológia nem helyettesíti a végső elhelyezést, hanem annak egy kiegészítése! Ezzel az üzemanyagciklust zárhatjuk.

	<b>Nyitott üzemanyagciklus</b>	<b>Plutónium visszaforгатás</b>	<b>Zárt ciklus transzmutációval</b>
<b>Szükséges tárolási idő</b>	>400 000 év	~100 000 év	< 1 000 év
<b>Hulladék térfogatigénye</b>	~ 2 m <sup>3</sup> /t	~ 2 m <sup>3</sup> /t	~ 0,5 m <sup>3</sup> /t
<b>Hasadóanyag- hasznosítási hatásfok</b>	~ 0,4%	~ 0,5%	~ 20%

1. táblázat – Különböző üzemanyagciklusok paraméterei<sup>[3]</sup>

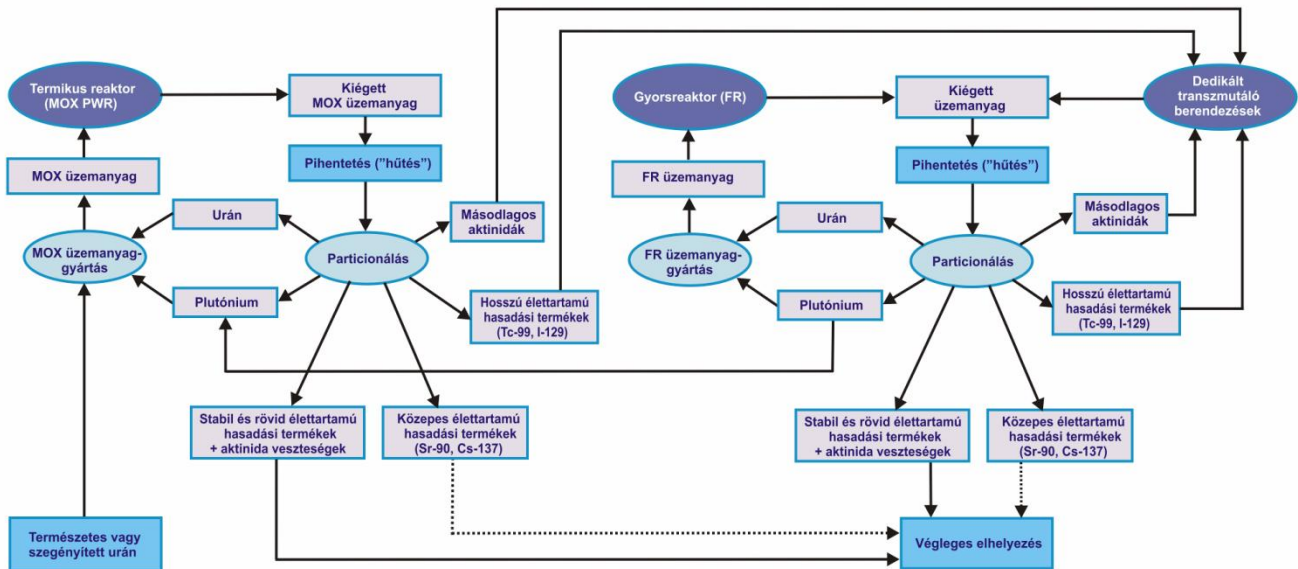
## Particionálás és transzmutáció

Az első átfogó tanulmányok, amelyek a technológia szerepét és megvalósíthatóságát vizsgálták túlnyomórészt Európából származnak az 1970-es évekből. Ebben az évtizedben a magas költségek, biztonsági szempontok miatt háttérbe került az ötlet, majd a '80-as évektől ismét megnőtt az érdeklődés a technológia iránt a végleges elhelyezéssel szembeni tiltakozások miatt. Ennek hatására az OECD országok számos K&F programot indítottak, mint például az OMEGA-t Japánban, a SPIN-t Franciaországban. Az első nemzetközi konferenciát a témával kapcsolatban 1990-ben tartották Japánban. Azóta a találkozót két évente tartják. Jelenleg az Európai Unióban, az EUROTRANS projektben 13 tagország több mint 40 kutatóintézetében folyik a transzmutációs célú ADS (amiről a későbbiekben lesz szó) reaktorok fejlesztése. Az USA 2006-ban indította útnak a Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) elnevezésű programot, amelynek célja a nukleáris üzemanyagciklus zárása a plutónium termikus és gyorsreaktorokba történő visszakeringetésével. A program másik célja a hosszú felezési idejű hulladékok problémájának megoldása. Ebből adódóan a transzmutáció is fontos szerepet kap a program keretein belül, azonban az európaiaktól eltérően gyorsreaktorok alkalmazását szorgalmazza ADS rendszer helyett.<sup>[5]</sup>

A transzmutációs technológia **előfeltétele az üzemanyagciklus zárása és a particionálás**. A leválasztás során az üzemanyagból feltétlenül le kell választani az uránt, amely ugyan nem nagy mértékben járul hozzá a kiégett üzemanyag radiotoxicitásához, azonban neutronbefogásokkal nagy aktivitású transzurán izotópok alakulhatnak ki belőle. A hasadási termékek leválasztása is szükséges, ugyanis ezeket is transzmutálhatjuk ha szükséges, másrészt némelyikük neutronmérgeként (elnyeli a hasításhoz szükséges neutronokat) viselkedik az aktinidák transzmutálásánál. Alapvetően két nagy csoportba oszthatjuk a

transzmutálандó termékeket, amelyekhez szükséges technológia jelentősen különbözik egymástól:

- *hasadási termékek (FP) transzmutációja*
- *másodlagos aktinidák (MA) transzmutációja*



1. ábra – Zárt üzemanyagciklus transzmutációval<sup>[3]</sup>

### A másodlagos aktinidák transzmutációja:

A transzmutáció minden esetben hatáskeresztmetszeteknek és ezeknek a spektrumtól való függvénye. Ebben az esetben a preferált magreakció a fission, azaz a maghasadás, amivel a *hosszú felezési idejű, nagy radiotoxicitású aktinidákat rövid felezési idejű, kevésbé toxikus hasadási termékekké alakítjuk*. Ha az atommag abszorvál egy neutron, akkor az kiválthat hasadást (fission), illetve befogást (capture). Így ezen két folyamat között folyik a „verseny”. Ha megnézzük a fission és abszorpciós mikroszkopikus hatáskeresztmetszetek arányát különböző izotópokra termikus és gyors (moderálás nélküli) reaktorban, akkor azt látjuk, hogy utóbbiban minden izotópnál nagyobb ez az arány.<sup>[3]</sup> Ebből adódóan az ilyen reaktorban az aktinidák elsősorban hasadnak és nem transzmutálódnak nagyobb rendszámú elemekké, tehát a gyors rendszerek hatásosabbak az aktinidák lebontásában, ha a hasadás-befogás arányt tekintjük. Egy aktinida transzmutációja akkor tekinthető végrehajtottnak, ha a transzmutációs lánc, ami neutronreakciók generációiból és radioaktív bomlásokból áll egy hasadással ér véget. Ezek során neutronok keletkezhetnek (fissionból) és „fogyhatnak el” (befogás révén), bomlás során a neutronszám nem változik. A teljes neutronegyensúly előjelhelyesen jelzi, hogy egy adott elem teljes transzmutációjának végeztével mennyi neutron termelt/fogyasztott az átalakulási lánc. A gyors rendszerek szembetűnően jobb neutronegyensúlyt produkálnak az aktinidák transzmutációjában, mint a termikus reaktorok. Mindezek tudatában azt mondhatjuk, hogy a konvencionális könnyűvízes reaktorok (LWR) nem alkalmasak a másodlagos aktinidák által okozott radiotoxicitás jelentős mértékű csökkentésére, mivel a befogás a meghatározó neutronreakció a besugárzások során, ezért **gyors rendszerek (FR)** alkalmazása előnyösebb a transzmutáció megvalósításához.

Mivel néhány MeV fölött már a legtöbb transzurán hasadási keresztmetszete meghaladja a befogási hatáskeresztmetszetet, az aktinidák transzmutációja annál hatásosabb, minél

keményebb neutronspektrumban valósítjuk azt meg. Ezenkívül szükségszerű, hogy a besugárzott anyagban ne legyen  $^{238}\text{U}$  izotóp, hiszen ebből neutronbefogással ismét a lebontani kívánt aktinidák keletkezhetnek. Tehát olyan rendszerre van szükségünk, amely kemény neutronspektrummal rendelkezik és nem tartalmaz  $^{238}\text{U}$  izotópot üzemanyagként. Az eddig épített és működő reaktoraink erre nem alkalmasak, így új egységek kifejlesztése szükséges. Ennek során figyelembe kell venni azt, hogy a neutronok moderálása minimális legyen, ezért vizet nem használhatunk a neutronok lassításra (lehetséges alternatívák a nátrium, hélium-gáz, ólom), másrészt a szerkezeti anyagokat a neutronok energiája által okozott kiváltott sugárterhelés jelentősen igénybe veszi. Ha a reaktorban alkalmazott üzemanyag nem tartalmaz uránt, azaz tisztán transzuránokból áll, akkor a rendszer belső (inherens) biztonsága jelentősen romlik. Ennek oka, hogy az  $^{235}\text{U}$  üzemanyag esetén az effektív későneutron hányad igen jelentős ( $\beta = 0,064\%$ )<sup>[2]</sup> a többi transzurán nuklidhoz képest. A késő neutronoknak fontos szerepük van a rendszer szabályozhatóságában. Ha ez az arány lecsökken, akkor a kritikus állapotból könnyebben juthatunk promptkritikus állapotba, ami a reaktor megszaladásához vezethet. Számítások szerint a biztonság fenntartásának érdekében a másodlagos aktinidák részarányát az üzemanyagban célszerű 2,5 tömegszázalék alatt tartani. Ha nagy transzurán-hányadot tartalmazó reaktort szeretnénk üzemeltetni, akkor a működtetés szubkritikus módban ajánlott.

A probléma megoldására a következő ötlet született: a transzuránokból álló üzemanyagot egy szubkritikus zónában kell elhelyezni, aminek a közepébe egy spallációs neutronforrás helyezkedik el. Ezt a berendezést **gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszernek** (Accelerated Driven Subcritical System – ADS) nevezik. A protonok gyorsítása történhet lineáris gyorsítóban (linac), illetve kör alakúban (ciklotron). Ebből egy nagy intenzitású, folytonos protonszugár, átlagosan 1 GeV energiával, valamint néhány tíz milliamper áramerősséggel egy nehézfém céltárgynak ütközik. A spallációs reakció neutron-kibocsátással jár, ami a szubkritikus zónába hatolva további neutronkibocsátást és nukleáris reakciót vált ki.<sup>[6]</sup> A zóna termikus vagy gyors neutronokkal is működhet. Ezen rendszerek az elhelyezett aktinidamennyiség 20%-át képesek elhasítani egy kampány alatt, amely két-három évig tart. A kiegészítés során bekövetkező reaktivitás-csökkenést az abszorbens-alapú (abszorbens rudak+bórsav oldat) módszer helyett a protonszugár áramának növelésével lehet kompenzálni. A besugárzás végén az üzemanyag eltávolításra kerül a zónából, majd pár év után reprocesszálják, a leválasztott hasadási termékeket geológiai tárolókba helyezik, a megmaradt aktinidákat a hagyományos atomerőműből érkező aktinidákkal ismét ADS üzemanyaggá konvertálják. Az üzemanyag-gyártás és a leválasztás során fellépő veszteségek miatt az aktinidák egy része nem transzmutálódik. A cél az, hogy az ebből adódó radiotoxicitás 1000 éven belül érje el a referenciaszintet.<sup>[7]</sup>

### A hosszú felezési idejű hasadási termékek transzmutációja

A hasadási termékek közül a  $^{129}\text{I}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{79}\text{Se}$  izotópok járulnak hozzá leginkább a kiégett üzemanyag radiotoxicitásához, azonban ez az érték jelentősen elmarad a transzuránok által képviselt értéktől. A transzmutáció igen nehéz feladat ezeknél az izotópoknál, mert a rövidebb felezési idejű, illetve stabil elemmé váló transzformáláshoz szükséges neutronbefogási hatáskeresztmetszet nagyon kicsi, ezenkívül a folyamat során sehol sem keletkezik neutron (hasadásból), tehát a folyamat csak fogyasztja a neutronokat. Emiatt igen hosszú besugárzási periódusra van szükség a transzmutáláshoz. Az izotópok többsége 250 év után elbomlik, és a radiotoxicitáshoz való hozzájárulásuk (ami az első 100 évben igen jelentős volt) jelentősen lecsökken.<sup>[3]</sup> Ezek a körülmények indokolják azt, hogy szerény az érdeklődés a technológiai megvalósítás iránt. A hasadási termékek transzmutációja nagy neutronfluxusú, termikus reaktorban elképzelhető, de nagyon költséges művelet.<sup>[6]</sup>

## Megvalósítás

A transzmutáció, mint rendszer megvalósítására két elképzelés született. Egyrészt körülbelül ugyanannyi termikus és gyors reaktor üzemeltetünk, az utóbbi üzemanyagát a termikus erőműből származó plutónium és másodlagos aktinidák alkotják, tehát a gyors rendszerben történik a transzmutáció. Másrészt elképzelhető olyan rendszer, ahol a transzmutációt dedikált berendezések végzik (pl. ADS), a termikus reaktorok a recirkulált plutóniummal üzemelnek (MOX üzemanyaggal), a gyors és termikus reaktorokban keletkező másodlagos aktinidákat a dedikált berendezések és részben a gyors rendszerek transzmutálják (egy ilyen rendszer látható az *1. ábrán*).

A *negyedik generációs reaktorok* közül elsősorban a gázhűtésű és ólomhűtésű reaktor rendelkezik a transzmutációhoz szükséges kemény spektrummal. A héliumhűtésű reaktor (MHR) lehetővé teszi a transzuránok 90%-ának egyetlen besugárzási ciklusban való transzmutálását. A sóolvadékos reaktorban a moderátor hiánya miatt kemény spektrum alakítható ki, ami szintén lehetőséget ad a transzmutációra.<sup>[4]</sup>

## Konklúzió

Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. 2011. évi értékesítése átlagára 11,66 Ft/kWh volt<sup>[8]</sup>, ami a többi erőművel összehasonlítva igen alacsonynak számít. Jól érzékelhető, hogy jelenleg nincs olyan versenyképes technológia, ami ennél alacsonyabb áron állít elő villamos energiát. Ahhoz azonban, hogy a nukleáris energia hosszútávon is fenntartható maradjon, mindenképpen megfontolandó az, hogy a jelenleg ipari méretekben még nem alkalmazott (csak elméletben létező) *transzmutációs* technológia kutatását, megvalósítását támogassuk. Láthattuk, hogy a környezet terhelése akár 100-ad részére csökkenthető, tehát véleményem szerint jelentősen hozzájárul ahhoz, hogy a jövő generációit megóvjuk a technológia egészségre káros végtermékeiktől. Ehhez azonban legalább száz évre el kell kötelezni magunkat a technológia működtetése mellett...

## Hivatkozások

- [1] IAEA, *The Database on Nuclear Power Reactors*, (<http://pris.iaea.org/public/>)
- [2] DR. CSOM GYULA, *Atomerőművek üzemtana*, I. kötet – A reaktorfizika és –Technika alapjai, Egyetemi tankönyv, Műegyetemi kiadó, 1997.
- [3] M. SALVADORES, G. PALMIOTTI, *Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: Achievements and challenges*, Progress in Particle and Nuclear Physics, 66. évfolyam, 2011.
- [4] DR. FEHÉR SÁNDOR, *Az atomerőművi kiegészített üzemanyag hosszú felezési idejű komponenseinek transzmutációja*, A Magyar Villamos Művek közleményei XLVI. évfolyam, Különlenyomat, 2009.
- [5] NUCLEAR ENERGY AGENCY, *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles*, A comparative study, OECD, 2002.
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Implications of partitioning and transmutation in radioactive waste management*, Technical reports series no. 435, 2004.
- [7] M. SALVADORES, *Nuclear fuel cycle strategies including Partitioning and Transmutation*, Nuclear Engineering and Design 235, 2005.
- [8] MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT., Sajtóközlemény, Paks, 2012. április 12.