

csak az atomenergia részarányának növelése ad módot. Ennek fő gátja jelenleg az atomenergia nem kellő társadalmi elfogadottsága. Ezen az új atomerőmű-típusok megjelenése segíthet. Ehhez mindenki számára érthetően demonstrálni kell, hogy a negyedik generációs erőművek környezetbarát tulajdonsága nem kétséges, segítenek a fenntartható fejlődés megőrzésében, biztonságosak, megbízhatóak és hadi célokra használhatatlanok.

Irodalom

1. US Department of Energy, International Energy Annual 2002, Released March–June 2004 (<http://eia.doe.gov/>)
2. *Global Energy Perspectives* – World Energy Council (WEC), 1998
3. *World Energy Assessment* – Joint Publication of UN and WEC, 2000
4. VIDOVSKY I.: *Az atomenergia előnyei és kockázatai* – Fizikai Szemle 53/8 (2003) 272–277
5. J.M. OGDEN: *Prospects for building a hydrogen energy infrastructure* – Annual Review of Energy and the Environment 24 (1999) 227–279

A NUKLEÁRIS HULLADÉKKEZELÉS ÚJABB IRÁNYAI

Veres Árpád

MTA KK Izotópkutató Intézet

Történeti visszatekintés

Enrico Fermi 1934-ben elsőként idézett elő atommagátalakítást neutronokkal. Már 1940-ben ráérezett arra, hogy a mesterségesen létrehozott, de további felhasználásra már alkalmatlan radioaktív anyagok – a nukleáris hulladékok – komoly technikai és társadalmi problémákat okozhatnak. Ez a jóslata napjainkra beigazolódott.

1942. december 2-án a világon először értek el atommáglyában önfenntartó láncreakciót az USA chicagói egyetemén. Az első békés célú mesterséges radioizotóp-alkalmazás (^{131}I , ^{32}P) pedig 1946. augusztus 2-án történt (Oak Ridge, NL).

Hazánkba nyolc évvel később, 1954. szeptember 15-én érkezett először mesterséges radioaktivitású szállítmány: 100 mCi (3,7 GBq) ^{60}Co sugárforrás és három ^{32}P radioizotóp-készítmény (63 MBq, Na_2HPO_4 ; 15 MBq, H_3PO_4 ; 74 MBq, K_2HPO_4) formájában (1. ábra).

A hazai radioizotóp-alkalmazások 50 éves alakulását jól szemléltetik a forgalmazás adatai. A 2. ábrán feltüntettük az import-, export- és a hazai szállítmányok számát. Ez a forgalom magában foglalja az orvosi diagnosztika, a biológia, a mezőgazdaság, az iparfejlesztés és a tudományos kutatás legkülönbözőbb területein alkalmazott radioizotópokat. Az izotópok alkalmazásaival azonban megjelentek a sugárzó hulladékok kezelésének problémái is.

A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére 1960-ban létesült az első felszíni „ideiglenes radioaktív hulladék-tároló” Solymár határában. Az 1970-es években foglalkoztak e hulladékok hosszabb távú tárolására alkalmas geológiai hely feltárásának kérdéseivel. A kutatások eredményeként Püspökszilágyon 1976-ban helyeztek üzembe egy felszíni betonmedencés tárolót, amelybe a solymári hulladékot is áthelyezték.

Az elhelyezés mellett nem kevésbé fontos feladat a radioaktív hulladék mennyiségének csökkentése. Erre vonatkozóan többféle technológiát is kidolgoztak (elektrodialízis, bepárlás, ioncserélés [1–3]).

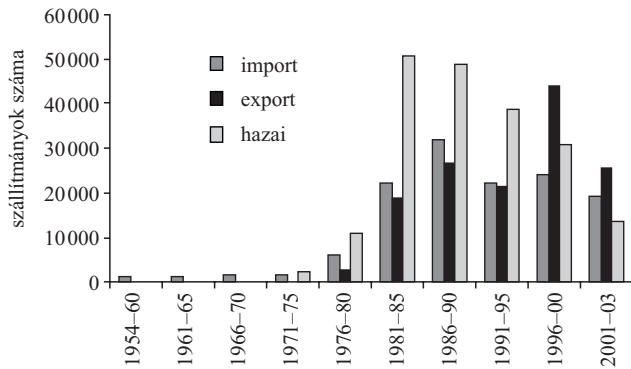
A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

A kis és közepes aktivitású, főleg rövid felezési idejű radioaktív hulladékok hosszú távon jóval kisebb veszélyeket jelentenek környezetünkre, mint az atomerőművek kiégett fűtőelem kötegeiben felhalmozódott, nagy aktivitású nukleáris hulladék, amely több, hosszú felezési idejű radionuklidot is tartalmaz.

1954. június 27-én lépett üzembe az első olyan atomerőmű (Obnyinszk, SzU), amely már a hálózatra is termelt villamos energiát. Ennek villamos teljesítménye mindössze 5 MW volt. Ötven év alatt a világ villamosenergia-termelésében az atomenergia részesedése már megközelítően 17%-ra emelkedett. Egy 1998-as becslés szerint, ha az atomerőművi energiatermelés a jelenlegi szinten marad, akkor 2015-re a nukleáris hulladék mennyisége eléri a 250 ezer tonnát, és ez a hulladék több mint 2000 tonna plutóniumot is tartalmaz. A nagy mennyiségű, hosszú életű és nagy aktivitású nukleáris hulladékok keletkezésének mértékére a 1. táblázatban mutatunk be néhány adatot.

1. ábra. Az első, mesterséges radioaktivitású szállítmány kézírásos nyilvántartási adatai.

Készlet		Felszólítás	
(jel., m., dát.)	levegő alatti	(jel., m., dát.)	levegő alatti
CO^{60}	100 mc	1954	12.22
Na_2HPO_4			
P^{32}	1,7 mc	12.15	1954
H_3PO_4			
P^{32}	0,4 mc	12.15	1954
K_2HPO_4			
P^{32}	2,9 mc	12.15	1954
		CO^{60} 100 mc	1954
			12.22
		Na_2HPO_4	
		P^{32} 1,7 mc	12.15
			1954
		K_2HPO_4	
		P^{32} 2,9 mc	12.15
			1954



2. ábra. A radioaktív izotópforgalom alakulása az elmúlt 50 évben

A nukleáris hulladék felhalmozódásával járó környezeti veszélyek és az atomerőművi balesetektől való igen erős lakossági félelmek világszerte egyre növekvő ellenállást váltanak ki mind a hulladékok elhelyezésével, mind a nukleáris energiatermeléssel szemben. Ezek új eljárások keresésére ösztönözték a szakembereket az egész világon, hosszú felezési idejű, nagy aktivitású nukleáris hulladékok átalakítására, megsemmisítésére (elégetésére), továbbá „tisztább” energiaforrások feltárására.

A továbbiakban a nagy aktivitású és hosszú felezési idejű nukleáris hulladékok mennyiségét csökkentő eljárásokkal (*transzmutáció*), az elérhető hasznosítási lehetőségekkel és a biztonságos elhelyezés kérdésével foglalkozunk, hazai szempontokat is szem előtt tartva.

Nukleáris hulladékok mennyiségének csökkentése spallációval

A megfelelően előkészített, hosszú felezési idejű nukleáris hulladék intenzív neutronterben rövidebb felezési idejű izotópokká alakulhat át. A transzuránok (ld. *táblázat*) elhasadnak, a hosszú felezési idejű hasadási termékek pedig rövidebb felezési idejűekké alakulnak. El kell azonban kerülni, hogy miközben az egyik nuklidot rövid felezési idejűvé alakítjuk, közben egy másik – eredetileg rövid felezési idejűből – hosszú felezési idejűt hozzon létre. Ezért a nukleáris hulladékot a transzmutálás előtt

1. táblázat

**Az aktinidák és hasadási termékek mennyisége
1 tonna kiégett (33 MWd/kg)
urán fűtőelemkötegen (g/t)**

Aktinidák			Hasadási termékek		
Nuklid	$T_{1/2}$ (év)	(g/t)	Nuklid	$T_{1/2}$ (év)	(g/t)
^{239}Pu	$2,4 \times 10^4$	5450	^{99}Tc	$2,1 \times 10^5$	810
^{237}Np	$2,1 \times 10^6$	450	^{129}I	$2,3 \times 10^6$	370
^{243}Am	$7,4 \times 10^3$	100	^{135}Cs	$1,6 \times 10^7$	170
^{245}Cm	$8,5 \times 10^3$	1,2			

fel kell dolgozni (*particionálás*), azaz külön kell választani a megfelelő komponenseket.

Makroszkopikus mennyiség átalakításához igen nagy neutronfluxus és megfelelő neutronspektrum (energia-eloszlás) szükséges. Nagy neutronfluxus előállításának egyik ígéretes módja a gyorsítóval hajtott rendszer (*accelerator driven system, ADS*).

Ha egy nehéz atommag igen nagy energiájú (1–10 GeV) részecskékkel (p, γ stb.) lép kölcsönhatásba, akkor sok elemi részecske és maradék magképződmény keletkezik. Ez a spalláció. Két különböző típusát szokás megkülönböztetni:

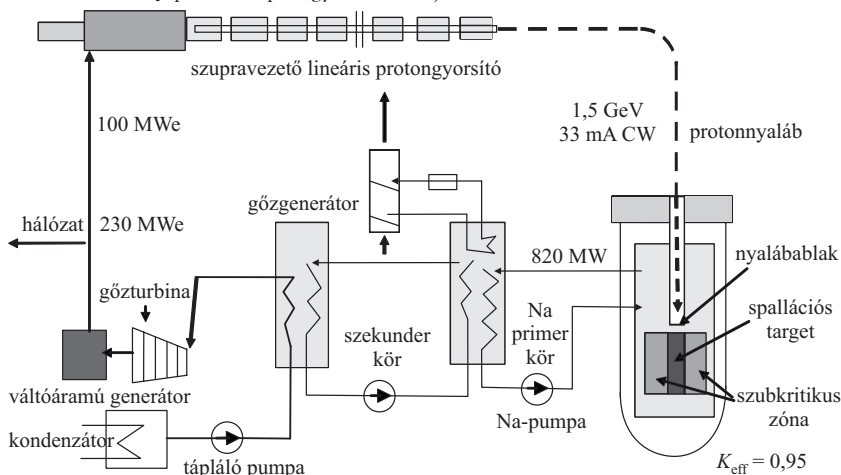
- 1) hadronspalláció (erős kölcsönhatási folyamatok),
- 2) fotonspalláció (elektromágneses kölcsönhatási folyamatok).

Ezek a folyamatok közvetlenül is használhatók nuklidok átalakítására, tehát transzmutációra. A spallációnak van azonban egy másik előnye is. Egyetlenegy 1–5 GeV energiájú proton nehéz elemekből álló céltárgyból (W, Pb, Bi, U, Pu stb.) 40–55 neutron is kelthet az energiától és céltárgytól függően. Így a spalláció igen intenzív neutronforrások létesítésére is alkalmas. Ha ezeket az intenzív neutronforrásokat szubkritikus rendszerek meghajtására használjuk, a neutronok száma tovább sokszorozható, és így igen nagy neutronfluxusú rendszerek (10^{15} – 10^{17} $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) hozhatók létre. Ezen szubkritikus rendszerek további előnye, hogy a gyorsító lekapcsolásával leállnak, s így például elkerülhető egy kritikusági baleset (Csernobil).

A nagy intenzitású spallációs neutronforrások segítségével tehát lehetővé válik, hogy szubkritikus üzemmódban, protongyorsítóval hajtott erőművekben „égessük el” (alakítsuk át, transzmutáljuk) a felhalmozódott nagy aktivitású és hosszú felezési idejű nukleáris hulladékokat. Egy protongyorsítóval hajtott (1 GeV és 100 mA nyalábáramú) 2×500 MW energiát előállító szubkritikus reaktorrendszer – a tervezet szerint – 1200 kg/év nukleáris hulladék (800 kg ^{239}Pu és 400 kg Np, Am és Cm) transzmutálására képes [4].

Az elmúlt tíz évben sok nagy projekt készült amerikai, japán (3. ábra), francia, orosz és több nemzetközi együttműködés keretében, a nukleá-

3. ábra. Japán koncepció gyorsítóval hajtott szubkritikus reaktorrendszerre [5]



ris hulladékok elégetésével működő szubkritikus rendszerek és nagy intenzitású spallációs neutronforrások létesítésére.

A kiégett fűtőelemek elválasztására, valamint spallációs céltárgyak készítéséhez sok radiokémiai eljárást dolgoztak ki. Újabban pirokémiai elválasztási technológiák kutatásfejlesztései kaptak nagyobb hangsúlyt, tekintettel az igen magas hőmérsékletekre.

Az Izotópkutató Intézetben elért eredmények

Az atommagok átalakításának két módja – a spalláció és a neutronbefogás – megtervezéséhez és sikeres végrehajtásához minél pontosabban kell ismerni a megfelelő hatás-keresztmetszeteket. E téren számos mérés és elemzés történt az Izotópkutató Intézetben mind a 45 MeV – 5 GeV γ -energia, mind az 1–2 GeV-es protonenergia, mind pedig a termikus neutronok tartományában.

Japán együttműködés keretében 50 MeV-ig meghatároztuk a $^{99}\text{Tc}^m$ izomer integrális hatás-keresztmetszetét: ($\sigma_i = 5,8 \pm 1$ mbarMeV) [6], továbbá a (γ, xn) reakció ^{129}I transzmutációs hozamait, (4. ábra) a spallációs küszöb-energia körüli energiatarományban [7].

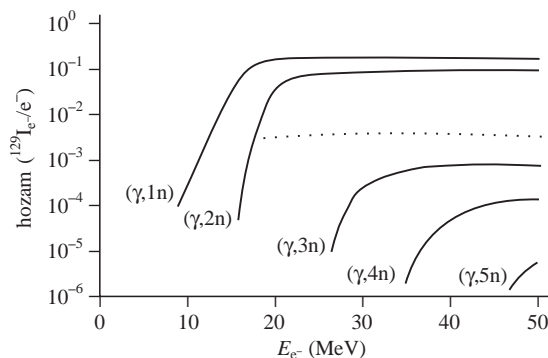
Belgya Tamás és munkatársai promptgamma-aktivációs analitikai (PGAA) berendezésükkel nemzetközi együttműködésben számos izotóp termikus neutronbefogási hatás-keresztmetszetét határozták meg [8, 9]. A nem mérhető nukleáris adatok modellszámítása is rendkívül fontos. Erre a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) egy Referencia Bemenő Adatkönyvtár Projektet indított, amelyhez az Izotópkutató Intézet munkatársai diszkrét atommag-nívó-könyvtárat készítettek [10].

Az ilyen adatok lényegesek a gyorsítóval hajtott rendszerek számítógépes tervezésénél, mivel az eddig végzett számítógépes szimulációs rendszerek eredményei – a paraméterek nem megfelelően pontos ismerete miatt – rendkívüli mértékben eltértek egymástól.

A nukleáris hulladék elhelyezése mély geológiai formációkban

A világban...

A nagy aktivitású nukleáris hulladékok kezelése és föld alatti tárolása témában az első szimpóziumot a NAÜ 1962-ben szervezte [11]. Azóta számos nemzetközi együttműködés keretében is foglalkoztak a hosszú idejű tárolás biztonsági kérdéseivel. Az 1970-es években az USA Sandia National Laboratories projektje keretében nemzetközi együttműködések alakultak a nukleáris erőművek hulladékainak tenger alatti elhelyezésére. Ezt az elképzelést azonban később feladták. Az 1980-as és 90-es években további, nemzetközi rendezvényeken megvitatott együttműködési modellek alakultak ki nukleáris hulladékok elhelyezési lehetőségeinek vizsgálatára mély geológiai formációkban (lásd pl. a NEA/OECD keretében tartott GEOTRAP Workshopokat [12]). 1987-ben, két-évenkénti *Migrációs Konferencia* sorozat indult, amely még napjainkban is folytatódik.



4. ábra. A $^{129}\text{I}(\gamma, xn)$ reakció transzmutációs hozama 2,3 kg/cm² vastagságú mintában a 9–50 MeV energiatarományban, elektronhőj nélkül. A szaggatott vonal a $^{129}\text{I}(n, \gamma)$ reakció hozama, elektronhőj jelenlétében.

A nukleáris anyagok mély geológiai formációkba történő elkülönítésére általában háromszoros gátrendszert alakítanak ki:

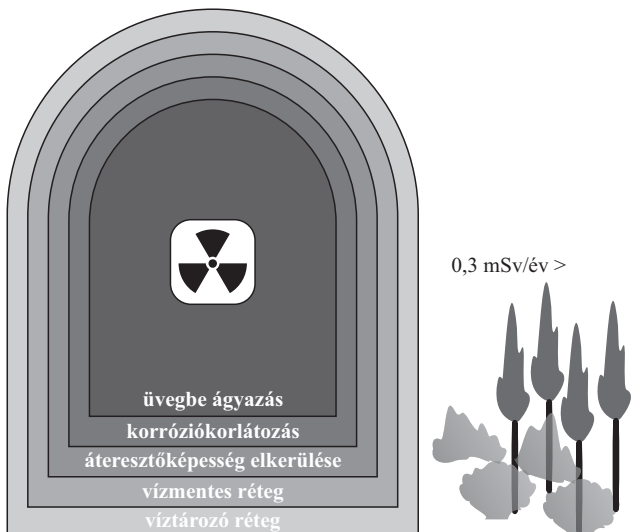
1. műszaki gátak (korrózióknak hosszan ellenálló konténerek);
2. bányaműszaki gátak (a konténereket körülvevő, a radionuklidokat jól megkötő, izoláló anyagok);
3. földtani gátak (azok a mélygeológiai képződmények, amelyekben az előző gátak elhelyezkednek).

Az 5. ábrán például, a karlsruhei nukleáris kutatóintézetben 15 éves kutatómunka alapján kifejlesztett többgátas hulladéktároló rendszer elvi felépítése látható. A kiválasztott tárolóhely a gorlebeni kőszóképződmény, amely 850 m mélységben helyezkedik el, mintegy 250 millió éves, és azóta nem érintkezett vízzel.

...és ittthon

A nagy aktivitású nukleáris hulladékok hazai tároló helyének keresése (1994–98) során a kővágószőlősi Bodai aleurolitformáció geológiai vizsgálatai azt mutat-

5. ábra. Többgátas tárolórendszer sematikus rajza a nagy aktivitású hulladékok környezetbe jutásának hosszú idejű meggátolására [13]. Az egyes gátak funkciói: legbelül a kiégett fűtőelem üvege ágyazva a feloldódás megakadályozására; utána korrózió-, szorpciókorlátozás; majd a leülepedés, átteresztőképesség elkerülése; negyedikként a 250 millió éves vízmentes réteg; legkívül vizes oldatokat, kolloidokat visszatartó víztároló réteg.



ták, hogy a több száz méter vastag, ~6 km² kiterjedésű másodlagos kőzet kiválóan alkalmas nukleáris tárolóhely létesítésére [14]. A legkedvezőtlenebb – nedvesített – anyagmintákon ¹²⁵I- és más izotópokkal végzett szorpció és diffúziós vizsgálatok 10⁻¹⁰ m/s diffúziósebességet mutattak, ami 10–100 m / 1000 év migrációs sebességet jelent [15]. Ez azt jelenti, hogy ha mindenféle műszaki gát nélkül, egyenesen az agyagba helyeznénk el a nukleáris hulladékot, akkor ezer év alatt kevesebb mint 100 méterre távolodna csak el a helyétől, tehát biztosan nem érné el a talajvíz szintjét.

A nukleáris hulladékok határfelületek közötti kicserélődési mechanizmusának nyomjelzés-technikai módszerekkel történő vizsgálatát a szerző a *Radiotracer Studies of Interfaces*, 3 című könyv 10.2 fejezetében tekintette át [16]. A feldolgozatlan, a kémiai reprocesszálást követő és a kiégett fűtőelemek kezelése (transzmutáció) utáni nukleáris hulladékok elhelyezése és hosszú idejű tárolása során felmerülő kérdések irodalmi tapasztalataira helyeztünk hangsúlyt.

Következtetések

Nemzetközi rendezvények elemzése alapján az alábbi területekre különös figyelmet és jelentős kapacitást kell fordítani tudományos és fejlesztési kísérletekben, valamint az eredmények ipari léptékű megvalósításában:

- Az elválasztási (particionálási) és transzmutációs folyamatok olyan irányú továbbfejlesztése, hogy megte-remtődhessen az összes aktinida (U, Np, Pu, Am és Cm) visszanyerése és újrafeldolgozása a hasadási termék és radiotoxikus anyagtartalom oly mértékéig, hogy a visszamaradó véghulladék radioaktivitása már pár száz év alatt drasztikusan lecsökkenjen.

- Nukleáris mérések a transzmutációs eljárásokban szereplő magreakciók hatáskeresztmetszetének minél pontosabb megismerésére.

- A mély geológiai formációkban történő elhelyezéskor a hosszú idejű tárolás során fellépő felületi kémiai reakciók által kialakuló anyagáramlás követése, kiegészítve a környezetvédelmi problémák megoldására irányuló vizsgálatakkal. A nukleáris hulladék tárolási körülményeinek tökéletesítése, és a feldolgozás újabb lehetőségeinek keresése.

Irodalom

1. J. HIRLING, O. PAVLIK: *Infra-Red-Heated Evaporator System for Concentration of Radioactive Effluents* – Proc. Symp. on Management of Low- and Intermediate Level Radioactive Wastes, Aix-en-Provence, IAEA, 773, 1970
2. VERES Á.: *Nukleáris létesítményekben keletkező kis és közepes aktivitású, radioaktív hulladékok feldolgozásának és elhelyezésének problémái* – Energia és Atomtechnika 18 (1974) 366
3. FEHÉR L., FÉNYES GY., TORDAI GY.: *Radioaktív hulladékfeldolgozó és -tároló létesítése* – Izotóptechnika 17 (1974) 177
4. V.D. KAZARITSKY et al. – Nucl. Instr. Meth. In PR, A414 (1998) 21
5. T. TAKIZUKA: *Status of Nuclear Transmutation Study* – JAERI-Conf. 99.003, 150, 1999
6. T. SEKINE, K. YOSHIHARA, L. LAKOSI, Á. VERES: *Integral Cross Section of the ⁹⁹Tc(γ,γ)^{99m}Tc Reaction in the 15–30 MeV Energy Region* – Appl. Radiat. Isot. 42 (1991) 149
7. VERES Á., LAKOSI L., SÁFÁR L.: *Nukleáris hulladékok átalakítása fűkezési sugárzással* – Fizikai Szemle, 50 (2000) 399–402
8. T. BELGYA, G.L. MOLNÁR, ZS. RÉVAY, J.L. WEIL: *Determination of thermal neutron capture cross sections using cold neutron beams* – 10th Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. Techn., Sept. 26 – Oct. 1, 2004, Santa Fe, New Mexico, AIP, 2005, in print
9. G.L. MOLNÁR, T. BELGYA, Z. RÉVAY et al. – J. Radioanal. Nucl. Chem. 2005, in print
10. T. BELGYA – in RIPL-2 Handbook, (ed. M. Hermann) IAEA, 13, 2004
11. International Atomic Energy Agency: *Treatment and Storage of High-Level Radioactive Wastes* – Proc. Symp. Vienna, IAEA, 1963
12. Proc. 5th Workshop on Radionuclide Retention in Geological Media, (Oskarshamn, Sweden 7–9 May 2001) OECD, 2002
13. B. GRAMBOW, A. LOIDA, E. SMAILOS: *Long-term stability of spent nuclear fuel waste packages in Gorleben salt repository environments* – Nucl. Technology 121 (1998) 174
14. P. ORMAI, F. FRIGYESI, I. BENKOVICS, G. ÉRDY-KRAUSZ, L. KOVÁCS, GY. BÁRDOSY: *Hungarian Approach for the Final Disposal of High Radioactive Waste* – Chapter 12, in Geological Problems in Radioactive Waste Isolation (ed. P. Whitespoon) 113, 1998
15. K. LÁZÁR: *Study of migration of radionuclides in claystone considered as a prospective media for nuclear waste disposal* – IAEA-TECDOC-1177 (2000) 57
16. Á. VERES: *Environmental problems* – Chapter 10.2, in Radiotracer Studies of Interfaces 3 (ed. G. Horányi) Elsevier 359–404, 2004

TRANSPORT-RELEVÁNS FLUKTUÁCIÓK MÉRÉSE A WENDELSTEIN 7-AS FÚZIÓS BERENDEZÉSEN

Pokol Gergő, Pór Gábor
BME Nukleáris Technika Tanszék
Zoletnik Sándor
KFKI-RMKI Plazmafizikai Főosztály

Anomális transzportjelenségeket vizsgáltunk a Wendelstein 7-AS sztellarátoron az 1/3 plazmaszéli rotációs transzformációérték környezetében mért jó és rossz összetartású állapotok közötti átmenetben. Ebben az átmenetben a mágneses térszerkezet kismértékű változására

a plazma energiaösszetartási ideje kétszeresére változik. A jó és rossz összetartású kísérletsorozatokról származó, különböző fluktuációs diagnosztikák jelei közül a Mirnov-szondákból, a LOTUS kollektív lézerszórás kísérletből és a lítiumnyaláb-emissziós spektroszkópiából (Li-BES) származó információk közötti korrelációt vizsgáltuk. Az adatok feldolgozását a hagyományos korrelációs módszerek mellett folytonos idő-frekvencia transzformációk és

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.