

## Radioaktív hulladékok

### Definíciók

#### • **hulladék**

bármely, a jogszabály szerinti kategóriák valamelyikébe tartozó tárgy vagy anyag, amelytől birtokosa megválnak, megválni szándékozik, vagy megválni köteles;

#### • **veszélyes hulladék**

a jogszabályban felsorolt tulajdonságok közül

eggyel vagy többel rendelkező, illetve ilyen anyagokat vagy összetevőket tartalmazó, eredete, összetétele, koncentrációja miatt az egészségre, a környezetre kockázatot jelentő hulladék;

Dr. Pátzay György

1

Energetikai légszennyezés és szilárd hulladékok (2000, millió tonna)						
Szennyező & forrás	Kén- dioxid	Nitrogén oxidok	Por	Szén- monoxid	Szén- dioxid	Szilárd hulladék
Szén	100	20	500	3	9000	200
Gáz	<0.5	2	<0.5	5	4000	minor
Olaj	40	10	2	200	9000	15
Fa	0.2	3	100	200	5000	50
Nukleáris	0	0	0	0	0	0.04
Víz	0	0	0	0	0	0

Ezek becslések. Az autók motorbenzínéből kb. 200 millió tonna CO keletkezik évente. (Sutherland, 2002)

Évente ~ 2 milliárd ( $2 \cdot 10^9$ ) tonna füstgáz és 100 millió ( $100 \cdot 10^6$ ) tonna szilárd hulladék keletkezését váltja ki a szén helyett alkalmazott nukleáris energia!

Dr. Pátzay György

2

Néhány természetes radioaktív izotóp							
<sup>238</sup> U bomlási sora*		Kozmikus és kozmogén radionuklidok			Néhány primordiális radionuklid		
Izotóp	felezési idő	Keletkezési seb. (Atom/cm <sup>2</sup> /s)	Felezési idő	Radionuklid	(előford. (%) a stabil elemhez viszonyítva)	felezési idő	
Uranium-238	4.5 billion y	H-3	0.25	12.3 y	K-40	0.012	1.26E9y
Thorium-234	24 days	Be-7	8.1E-3	53.6 d	V-50	0.25	6E15 y
Protactinium-234m	1.2 min	Be-10	3.6E-2	2.56E y	Rb-87	27.9	4.8E10y
Uranium-234	2.5E5 y	C-14	2.2	5730 y	In-115	95.8	6E14 y
Thorium-230	8E4 y	Na-22	5.6E-5	2.6 y	Te-123	0.87	1.2E13y
Radium-226	1622 y	Na-24		15 h	La-138	0.089	1.1E11y
Radon-222	3.8 days	Si-32	1.6E-4	650 y	Ce-142	11.07	>5E16 y
Polonium-218	3 minutes	P-32	8.1E-4	14.3 d	Nd-144	23.9	2.4E15y
Lead-214	27 minutes	P-33	6.8E-4	24.4 d	Sm-147	15.1	1.0E11y
Astatine-218	2 seconds	S-35	1.4E-3	88 d	Sm-148	11.27	>2E14 y
Bismuth-214	20 minutes	Cl-36	1.1E-3	3.1E5 y	Sm-146	13.82	>1E15 y
Polonium-214	1.6E-4 seconds	S-38		2.87 h	Gd-152	0.20	1.1E14y
Thallium-210	1.3 minutes	Cl-38		37 m	Dy-156	0.052	>1E16 y
Lead-210	22 years	Cl-39	1.6E-3	55 m	Hf-174	0.163	2E15 y
Bismuth-210	5 days				Lu-176	2.6	2.2E10y
Polonium-210	138 days				Ta-180	0.012	>1E12 y
Thallium-206	4.2 minutes				Re-187	62.9	4.3E10y
Lead-206	Stable				Pt-190	0.013	6.9E11y

\* Hasonló bomlási sorral rendelkezik a <sup>235</sup>U és a <sup>232</sup>Th (Sutherland, 2002)

Dr. Pátzay György

3

## Környezeti radioaktivitás néhány anyagban (Bq/kg)

Anyag	U-238 bomlási sor				Th-232 bomlási sor			K-40	U-235 sor
	Th-234	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Ac-228	Bi-212	Tl-208	K-40	U-235
Szén	59,2±10,1	25,6 ±1,3	15,1 ±0,3	14,8 ±0,3	8,0 ±0,4	8,5 ±0,9	7,9 ±0,3	30,4 ±1,2	LLD
Kocsz	50,1 ±6,5	25,4 ±1,3	13,7 ±0,2	11,4 ±0,3	8,2 ±0,3	9,6 ±0,6	8,5 ±0,3	36,7 ±1,1	LLD
Vasérc	460 ±14	245 ±10	221 ±11	212 ±10	6 ±4,5	3,2 ±2,4	LLD	70,8 ±1,6	10,9 ±0,5
Mésző	121 ±10	44,5 ±3,5	32,5 ±1,4	30,0 ±2,2	LLD	LLD	LLD	52,3 ±8,3	LLD
Pernye	41 ±9,6	23 ±1,2	17,5 ±0,25	15,6 ±0,54	9,5 ±0,4	11,3 ±0,84	8,5 ±0,29	93,5 ±2,0	LLD
Salak	89,5 ±10,2	72,7 ±1,9	46,6 ±3,7	41 ±1,4	29 ±0,58	33,6 ±1,3	23,9 ±0,38	97,4 ±1,75	LLD

Dr. Pátzay György

4

Radioaktív hulladékok főbb forrásai	
Nagy aktivitású/kis térfogatú hulladékok	Kis aktivitású/nagy térfogatú hulladékok
<ul style="list-style-type: none"> <li>• atomerőművek kiégett fűtőelemei *</li> <li>• reprocesszási hulladékok</li> <li>• elhasznált radioterápiás és ipari besuárzó eszközök</li> <li>• katonai reprocesszási hulladékok</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uránbányászat hulladékai</li> <li>• Tóriumbányászat hulladékai</li> <li>• Néhány alapvető fém bányászati hulladékai               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atomerőművek karbantartási, üzemelési hulladékai</li> <li>• szegényített urán depóniák*</li> </ul> </li> </ul>
*hulladék, ha nem reciklizálják!	

Dr. Pátzay György 5

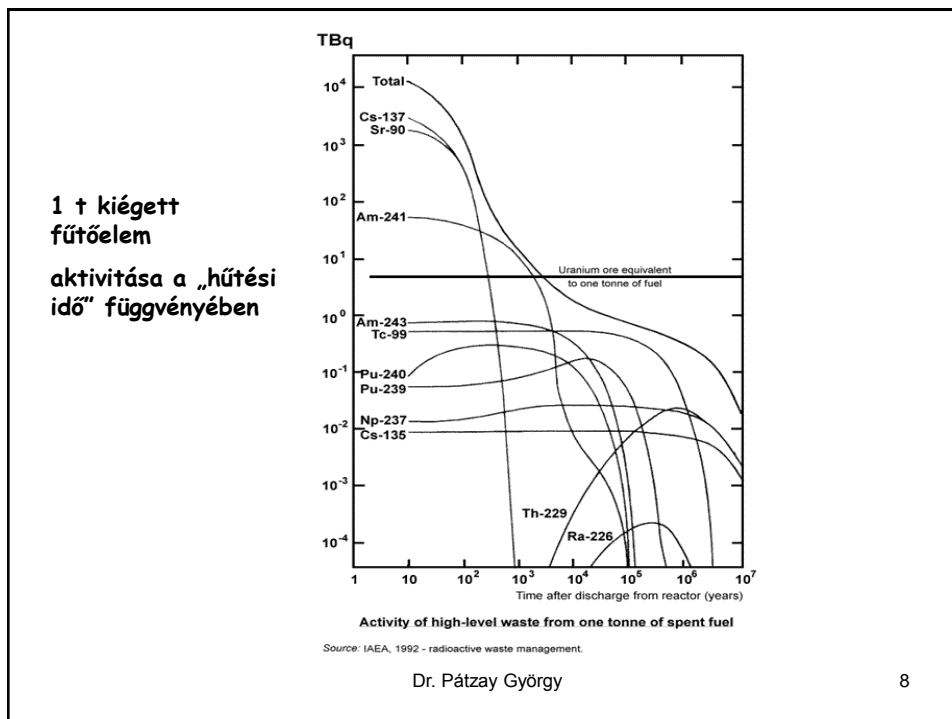
A radioaktív hulladékok egyszerűsített felosztása					
Kategória	Inaktív vagy nagyon kis aktivitású hulladék	Low Level és Intermediate Level Wastes (LLW) – hőtermelés kisebb mint $\sim 2\text{kW/m}^2$ , és az aktivitás - ILW $> 4,000\text{ Bq/g}$		High Level és Transuranium Wastes (HLW, TRU) (nagy aktivitás és a hőtermelés $> 2\text{kW/m}^2$ )	
Felezési idő	Hosszú, vagy rövid felezési idők	Felezési idő $< 30\text{y}$	Felezési idő $> 30\text{y}$	Felezési idő $< 30\text{y}$	Felezési idő $> 30\text{y}$
Anyag	Uránbánya és más hulladékok. Egyes szenek és fák hamui, foszfát hulladékok	A legtöbb atomerőművi üzemelési és karbantartási hulladék hasadási termékekkel szennyezve. Egyes kórházi és orvosi hulladékok	Egyes atomerőművi üzemelési és karbantartási hulladékok és melléktermékek TRU szennyezéssel	Elválasztott hasadási termékek (Cs-137 és Sr-90 jelentősek). Egyes elhasznált orvosi, ipari és kutatási eszközök	Kiégett fűtőelem újrafeldolgozás nélkül. Kiselejtezett katonai plutónium eszközök, ha nem hasznosítják MOX fűtőelemként
Kezelés és a biztonság időkeretei	Nem szükséges. Általában alacsony radioaktivitásúak	Ált. 20 év alatt, felezési idő függvényében	100-1000 év a nuklid és a felezési idő függvényében	Néhány száz év a felezési idő függvényében	Néhány ezer év, a plutónium biztonság a fontos, nem a sugárzás

Dr. Pátzay György 6

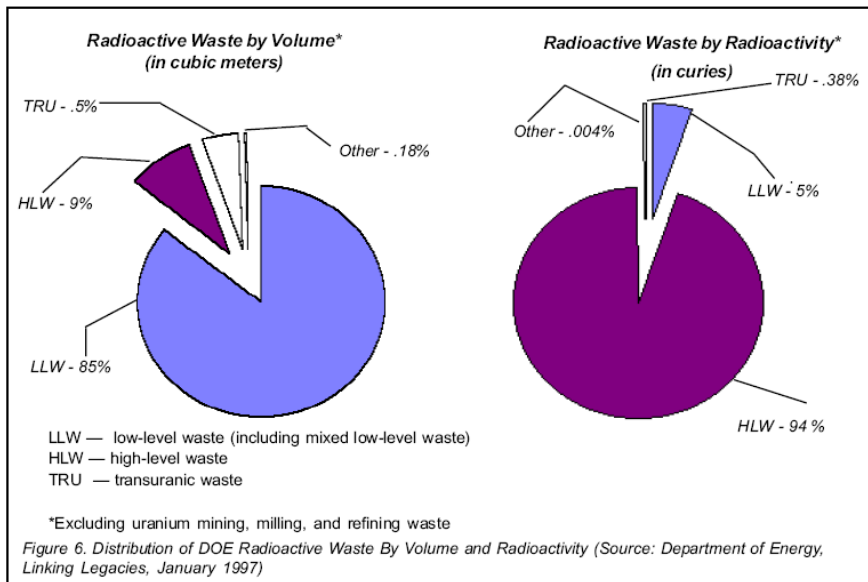
Egy 1,000 MW (e). Teljesítményű hasadási atomreaktor és egy szénerőmű összehasonlítása		
	Atomerőmű (tonna)	Szénerőmű* (tonna)
Üzemanyag szükséglet	20 -150 (nyitott ciklus). Csak 1 tonna kell, ha a gyors szaporító reaktoros (FBR) ciklust alkalmazzuk	2,000,000 +
Szilárd, vagy égetési hulladékok	20 - 150 ha nincs reprocessálás	100,000 - 400,000 ±
Pernye	0	20,000 ±
Kéntelenítés szulfát hulladéka	0	200,000 ± (ha van kéntelenítő)
CO <sub>2</sub>	0	4,500,000
NO <sub>x</sub>	0	20,000 ±
SO <sub>x</sub>	0	40,000 - 200,000 ±
Összes fűtőanyag és égetési hulladék	20 -150 (reciklizálható)	6,800,000 - 7,200,000

\* A hulladék a szén minőségétől, a szennyezők %-os arányától, a füstgáz tisztítástól, a tüzelés típusától függ. A füstgáz tisztítása és a fluidizációs tüzelés energiaigényes, további nagy mennyiségű hulladékot termel és több fűtőanyagot igényel ugyanolyan teljesítmény mellett.

Dr. Pátzay György 7



Radioaktív hulladékok megoszlása térfogat és aktivitás szerint  
(1997)



Kb.1100 üzemelő reaktor van a világon (2002). Ebből 493 nagy erőműreaktor (400-1200 MW<sub>e</sub>, LEU), kb. 400 (+300!) kis reaktor üzemel atomtengeralatjárókban (HEU), kb. 290 kutatóreaktor 60 országban (kW-MW), ide tartoznak a gyors szaporító reaktorok is. (LEU-alacsony, HEU-magas dúsítási fokú uránium)

#### Uránbányászat, kezelés, finomítás

Nyíltszíni bányászat (~38%), földalatti bányászat (~33%), in-situ kioldás (~17%), más bányászat mellékterméke (~12%).

A bányászat hulladéka a meddő (0,1% U tartalom alatt), ez jelenleg 2 milliárd (2\*10<sup>9</sup>) tonna. Megfelelő fedés kell a radon szivárgás, a nedvesedés és a savas kioldás megakadályozására.

Közéltő összefüggés 100 tonna, PWR-ben felhasznált 4%-ban dúsitott fűtőelem nyersanyagigénye és hulladéka között	
Termék vagy folyamat	Tömeg (tonna)
Uránérc (1% urán)	80,000 + tonna
Tisztított urán (0.7% U-235)	800 tonna
Tisztítási hulladék	79,200 + tonna (maradék U & Ra)
Dúsitott urán 4%, (20%), (80%)	100, (20, 5) – tonna 800 tonna természetes U-ból
Szegényített urán DU (0.2 - 0.3% U-235)	700, (780, 795) - tonna DU 'hulladékba'
Kiégett fűtőelem (PWR - 4% dúsitott)	100 tonna
PWR kiégett fűtőelem HLW reprocesszálás nélkül – évente ~ 20 - 30 tonna/év hulladékba kerül.	100 tonna (folyamatos tárolás)*
Reprocesszált kiégett PWR fűtőelem (100 tonna) kb. 30,000 MWnap/tonna kiegészi szint után.	
Nagy aktivitású hasadási hulladék (~ 20m <sup>3</sup> ).	3 tonna (üvegesített folyamatos tárolásra)
Kinyert urán (<1% U-235)	96 tonna (visszakerül a fűtőelem ciklusba)
Kinyert plutónium	1 tonna (visszakerül a fűtőelem ciklusba)
DU – ha nem hasznosítják a jövőben:	700+ tonna „visszanyerhető” tárolásra
DU – ha MOX-ként vagy a jövőben gyors szaporító reaktorban hasznosítják és reprocesszálnak:	700+ tonna, Pu-val vagy HEU-val keverik energiatermelési vagy szaporítási célból.
Intermediate Level Waste 1 reaktor ciklusból.	Max. kb. 200+ m <sup>3</sup> hulladék, melynek egy része tömöríthető.
LLW 1 reaktor ciklusból. Az összes ILW-LLW kb. 800 tonna.	Kb. 300+ m <sup>3</sup> főleg tömörített hulladék.
* A jövőben nem lehetséges a kiégett fűtőelemeket hulladékként tárolni, hanem reprocesszálni és szaporítani szükséges.	

Dr. Pátzay György

11

2000-ig a világon felhalmozódott radioaktív hulladékok és nem hulladék anyagok		
Reaktor fűtőelem ciklus	Radioaktív hulladékok	Reciklizálásra kerülő nem hulladékok
A reaktorig (front end)		
Uránbányászat	1,000,000,000 + tonna	
Feldolgozás	Kevés	
Finomítás	Kevés	
UF <sub>6</sub> konverzió	~ 35,000 m <sup>3</sup>	
Dúsitás	16,000 m <sup>3</sup>	
Szegényített urán (DU)	Csak akkor hulladék, ha nem reciklizálják	1,500,000 tonna
Fűtőelemgyártás	160,000 m <sup>3</sup>	
A reaktor után (back end)		
Kiégett fűtőelem *	Csak akkor hulladék, ha nem reciklizálják	230,000 tonna
A LLW-ILW hulladékok kezelése	~ 6,000,000 m <sup>3</sup>	
Reprocesszálás		218,000 + tonna
Hasadási termék hulladék (4%)	9,000 + tonna	
Military		
Leszerelt uránbombák HEU <sup>235</sup> U		500 tonna ± (U.S. & RUS)
Leszerelt plutónium bombák <sup>239</sup> Pu	Dr. Pátzay György	500 tonna ± (U.S. & RUS)

US\$80/kgU költség alatt kitermelhető urán készlet becsült mennyisége		
	tonnes	%
Ausztrália	890,000	26
Kazakisztán	560,000	17
Kanada	510,000	15
Dél-Afrika	350,000	10
Namíbia	260,000	8
Brazília	230,000	7
Oroszország	150,000	4
USA	125,000	4
Üzbegisztán	120,000	4
Niger	70,000	2
Ukrajna	45,000	<1
Egyéb (28 ország)	>50,000	1
Összesen*	3,360,000	

\* 41,000 tonna/év termelés mellett ez a készlet kevesebb mint 10 év alatt felmerülő ezen az áron reprocessálás és gyors szaporító reaktorok nélküli.

13

A szegényített urán (DU) becsült készletei és az éves növekmény (2001)			
Ország v. dúsító cég	2001 leltár (t)	Becsült éves növekedés (t)	Kémiai forma
USA	590,000	20,000	UF <sub>6</sub>
Franciaország	207,000	12,000	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Urenco (UK, Németország, Hollandia)	53,000	4,000	UF <sub>6</sub>
UK (BNFL)	30,000	0	UF <sub>6</sub>
Oroszország	490,000	10,000	UF <sub>6</sub>
Japán	5,600	500	UF <sub>6</sub>
Dél-Afrika	2,200	0	UF <sub>6</sub>
Kína	26,000	1,000	?
Egyéb	< 1,000	?	?
<b>Összesen</b>	<b>1,404,800</b>	<b>47,500</b>	
<b>Elektromos energia tartalom (US\$)</b>	<b>US\$ 250.10<sup>12</sup></b>	<b>US\$ 8.10<sup>12</sup></b>	

Dr. Pátzay György

14

<b>A világ fűtőelemgyártása (2000)</b>		
LWR fűtőelemgyártó országok (tonna/év)	HWR fűtőelemgyártó országok (tonna/év)	MOX fűtőelemgyártó országok (tonna/év)
United States (3,900)	Kanada (2,700)	Franciaország (140)
Kazakisztán (2,000)	Dél-Korea (400)	UK (128)
Japán (1,674)	India (270)	India (50)
Oroszország (1,620)	Argentína (160)	Belgium (37)
Franciaország (950)	Pakisztán (20)	Japán (10)
Németország (650)		
Svédország (600)		
Belgium (500)		
Dél-Korea (400)		
UK (330)		
Spanyolország (300)		
Brazília (100)		
Kína (100)		
India (25)		
Pakisztán (?)		
Összesen 12,299 tonna	Összesen 3,560 tonna	Összesen 365 tonna

Dr. Pátzay György

15

<b>A világ 10 legnagyobb nukleáris energia felhasználója</b>		
Ország	Blokkok száma	Összesen MW(e)
<b>USA</b>	<b>109</b>	<b>99,784</b>
<b>Franciaország</b>	<b>56</b>	<b>58,493</b>
<b>Japán</b>	<b>59</b>	<b>38,875</b>
<b>Németország</b>	<b>21</b>	<b>22,657</b>
<b>Oroszország</b>	<b>29</b>	<b>19,843</b>
<b>Kanada</b>	<b>22</b>	<b>15,755</b>
<b>Ukrajna</b>	<b>15</b>	<b>12,679</b>
<b>UK</b>	<b>12</b>	<b>11,720</b>
<b>Svédország</b>	<b>12</b>	<b>10,002</b>
<b>Dél-Korea</b>	<b>10</b>	<b>8,170</b>
<b>Összesen</b>	<b>335</b>	<b>297,978</b>
<b>Világ</b>	<b>439</b>	<b>354,416</b>
<b>IAEA (2001).</b>	<b>Dr. Pátzay György</b>	

16

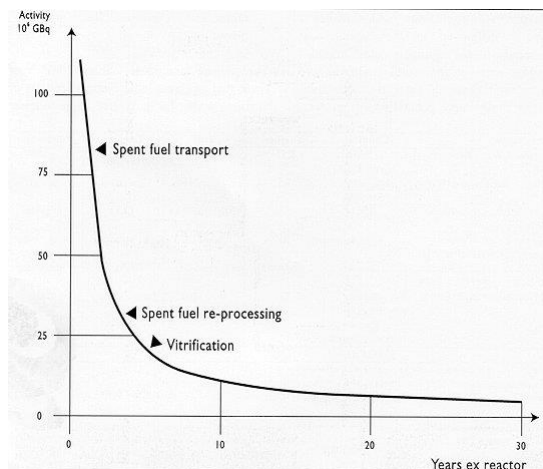


Üzemelő atomerőművek (2001)						
Reaktor típus	Ország	Szám	GW <sub>e</sub>	Hasadóanyag	hűtőközeg	moderátor
PWR, VVER	US, Franciaó., Japán, Oroszo., & egyéb	259	231	dúsított UO <sub>2</sub> , MOX	Víz	Víz
BWR	US, Japán, Svédo., Németo.	91	79	dúsított UO <sub>2</sub>	Víz	Víz
GCR & AGR	UK	34	12	Term. U (fém), dúsított UO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Grafit
"CANDU" (PHWR)	Kanada, Dél-Korea, Argentína, India, Románia, Kína	34	16	Term. UO <sub>2</sub> , PWR kiegészített fűtőelem, MOX	D <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O
RBMK	Oroszország, Litvánia	17	13	Enyhén dúsított UO <sub>2</sub>	Víz	Grafit
FBR	Japán, Franciaó., Oroszo.	3	1	PuO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> , DU (MOX)	Foly. Na	Nincs
Egyéb (HWLWR)	Japán	1	0.1	Enyhén dúsított UO <sub>2</sub>	Víz	D <sub>2</sub> O
	Összesen	439	352			

Dr. Pátzay György 17

Hasadási termékek csoportosítása	
Hasadási termék, felezési idő	Azonosított nuklidok száma*
<24 óra	438+
1 nap-1 év	42
1 év-10 év	4
> 10 év	12
stabil	101
Összes hasadási termék	615
* Számos hasadási termék felezési ideje rendkívüli kicsi és nehéz felezési idejének meghatározása	

Dr. Pátzay György 18



**1 t kiégett PWR fűtőelemben a hasadási termékek bomlása**  
(G bq = bequerel; Basis: 33,000 MWd/t; Source: Cogema)

Dr. Pátzay György

19

**A hosszabb felezési idejű hasadási termékmagok és transzuránok kiégett PWR fűtőelemekben az idő függvényében \***

Nuklidok	$T_{1/2}$	Aktivitás/Tonna U 150 nap * (Bq)	Aktiviás/Tonna U 100 év hűtés után (Bq)	Aktiviás/Tonna U 500 év hűtés után (Bq)
<b>Hasadási termékek</b>				
Niobium-95	35 d	2E16	0	0
Strontium-89	50.5 d	4E15	0	0
Zirconium-95	64 d	1E16	0	0
Cerium-144	285 d	3E16	0	0
Ruthenium-106	1 y	2E16	0	0
Cesium-134	2.1 y	8E15	40	0
Promethium-147	2.6 y	4E15	1E4	0
Strontium-90	28.8 y	3E15	2.7E14	1.8E10
Cesium-137	30.1 a	4E15	4E14	4E10
<b>TRU magok</b>				
Curium-242	163 d	6E14	0	0
Plutonium-241	14.4 y	4E15	3E13	1.4E5
Curium-244	18.1 y	9E13	2E12	4.4E5
Plutonium-238	87.7 y	1E13	4.5E12	1.9E11
Americium-241	433 y	7E12	6E12	3E12
Plutonium-240	6.56E3 y	2E13	2E13	1.9E13
Americium-243	7.37E3 y	6E13	6E13	5.7E13
Plutonium-239	2.41E4 y	1E13	1E13	9.9E12
Plutonium-242	3.75E5 y	5E10	5E10	4.99E10

\* After reprocessing, which can take place after about 150 days, Pátzay György fission nuclides would be significantly present in the wastes. 20

Fission Radionuclides and Actinides with Half-lives greater than 10 years (in order of half-life)		
Fission Radionuclides * (Fission yield)		Half-life (y)
Krypton-85	(1.319%)	10.7
Promethium-145	(3.93%)	17.7
Strontium-90	(5.8%)	29
Cesium-137	(6.19%)	30.17
Tin-121	(0.013%)	55
Samarium-151	(0.419%)	90
Selenium-79	(0.045%)	6.5E4
Technetium-99	(6.1%)	2.13E5
Zirconium-93	(6.35%)	1.5E6
Cesium-135	(6.54%)	3E6
Palladium-107	(0.146%)	6.5E6
Iodine-129	(0.54%)	1.57E7
* Radionuclides beyond Cs-137 in this table, have either low fission yield, have low energy emissions, or are so long-lived as to be low radioactivity.		
TU nuclides with indication of their spontaneous fission (SF) strength, (followed by fission (f), or capture (c) Cross section in barns).		Half-Life in years
Nuclide	(SF) (Cross Section)	
Californium-250	(weak) ((2000	13.1
Plutonium-241	(-----) (f 1010)	14.4
Curium-244	(v. weak) ((15)	18.1
Curium-243	(v. weak) (f 610)	29.1
Plutonium-238	(v. weak) ((540)	87.7
Californium-249	(v. weak) (f 1600)	351
Americium-241	(v. weak) ((50)	432.7
Californium-251	(-----) (f 4800)	900
Americium-242	(v. weak) (f 7000)	1141
Curium-246	(weak) ((1.2)	4.76E3
Americium-243	(v. weak) ((74)	7.37E3
Curium-245	(v. weak) (f 2100)	8.5E3
Plutonium-240	(v. weak) ((290)	6.56E3
Curium-250	(?) ((80)	9.7E3
Plutonium-239	(v.v. weak) (f 750)	2.41E4
Neptunium-236	(-----) (f 2700)	1.55E5
Curium-248	(?) ((2.6)	3.48E5
Plutonium-242	(v. weak) ((19)	3.75E5
Neptunium-237	(-----) ((150)	2.14E6
Curium-247	(-----) (f 80)	1.56E7
Plutonium-244	(weak) ((1.7)	8.0E7

Dr. Pátzay György

21

Néhány radioaktív izotóp hőtermelése * watt/g	
Nuklid	watt/g
H-3	0.325
Co-60	17.45
Kr-85	0.590
Sr-90	0.916
Ru-106	31.8
Cs-137	0.427
Ce-144	25.5
Pm-147	0.340
Tm-170	11.86
Po-210	141.3
Pu-238	0.558
Am-241	0.113
Cm-242	120.0
Cm-244	2.78
* termo-elektromos generátorokhoz Mostly from 'Chart of the Nuclides' (Lockheed Martin and GE Nuclear Energy)	

Dr. Pátzay György

22

Egy CANDU fűtőelemköteg bomlási hőtermelése az időben a CANDU-600 reaktorból történő kiemelés után (Most data from AECL)			
Hűtési idő kiemelés után	Aktinidák hőtermelése (watt/köteg) -kezdetben 21.0 kg UO <sub>2</sub> tartalom mellett)	Hasadási termékek hőtermelése (watt/köteg)	Összes hőtermelés (watt/köteg) (7800 MWnap/MgU kiégés)
1 sec	1810	23,700	25,500
1 óra			9,000
1 nap			3,000
1 év			60
6 év	0.44	5.64	6 (300 watt/Mg)
8 év	0.47	4.44	4.9
10 év	0.50	3.95	4.4*
15 év	0.56	3.34	3.9
20 év	0.60	2.94	3.5
30 év	0.66	2.30	3.0
50 év	0.71	1.43	2.1
100 év	0.70	0.44	1.1 (52 watt/Mg)
Természetes urán			0.1 watt/Mg
* 10 év után a hőtermelés 90%-át a Sr-90 (+Y-90) és a Cs-137 (Pb-210) és a Cs-137 (Bi-210) és a PWR kiégett fűtőelemnél a hőtermelés -1 kW/tonna 10 év után.			

23

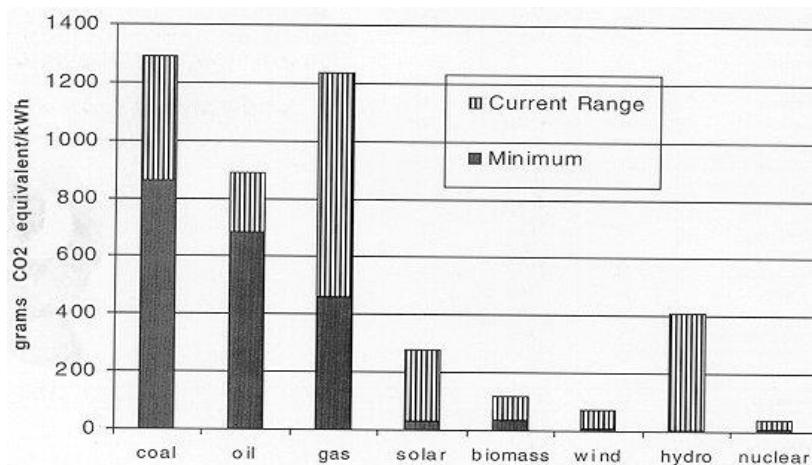
A világ kereskedelmi reprocesszáló kapacitása (tonna/év)		
LWR fűtőelem:	Franciaország, La Hague UK, Sellafield (THORP) Oroszország, Chelyabinsk (Mayak) Japán (Rokkasho) <b>Összes LWR</b>	1600 850 400 90 <b>2940</b>
Más fűtőelem:	UK, Sellafield Franciaország, Marcoule India (Tarapur, Kalpakkam, Trombay) <b>Összes - egyéb</b>	1500 400 200 <b>2100</b>
<b>Összes kereskedelmi kapacitás</b>		<b>5040</b>
Sources: OECD/NEA 1999 Nuclear Energy Data, Nuclear Engineering International handbook 2000.		

Dr. Pátzay György

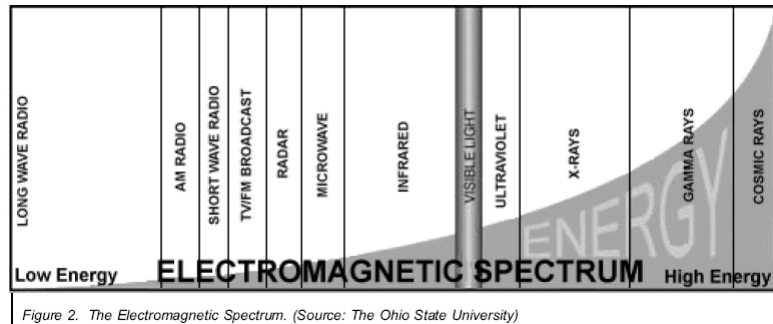
24

Fast Breeder Reactors in the World (2002)					
Country	Reactor	Fuel	Type*	MW (thermal)	Operational
USA	Clementine	Pu	EFR	0.025	1946-53
	EBR 1	U	EFR	1.4	1951-63
	EBR 2	U	EFR	62.5	1963-94
	Fermi 1	U	EFR	200	1963-72
	SEFOR	Pu U	EFR	20	1969-72
	FFTF	Pu U	EFR	400	1980-94
	CRBRP	Pu U	DPFR	975	Cancelled
	ALMR	U Pu	DPFR	840	2005
	ALMRc	U Pu	CSFR	840	To be determined
UK	Dounreay DFR	U	EFR	60	1959-77
	Dounreay PFR	Pu U	DPFR	650	1974-94
	CDFR	Pu U	CSFR to EFR	3800	
France	Rapsodie	Pu U	EFR	40	1966-82
	Phenix	Pu U	DPFR	563	1973-
	Superphenix 1	Pu U	CSFR	2990	1985-98
	Superphenix 2	Pu U	CSFR to EFR	3600	
Germany	KNK 2	Pu U	EFR	58	1972-91
	SNR-2	Pu U	CSFR to EFR	3420	Cancelled
	SNR 300	Pu U	DPFR	762	
India	FBTR	Pu U	EFR	40	1985-
	PFBR	Pu U	DPFR	1250	2010
Japan	Joyo	Pu U	EFR	100	1977-
	Monju	Pu U	DPFR	714	1995-96
	DFBR	Pu U	CSFR	1600	To be determined
Kazakhstan	BN 350 #	U	DPFR	750	1972-99
Russia	BR 2	Pu	EFR	0.1	1956-57
	BR 10	U	EFR	8	1958-
	BOR 60	Pu U	EFR	65	1968-
	BN 600	Pu U	DPFR	1470	1980-
	BN 800	Pu U	CSFR	2100	To be determined
	BN 1600	Pu U	CSFR	4200	To be determined
Italy	PEC	Pu U	EFR	120	Cancelled
Korea	KALIMER	U	DPFR	392	To be determined
China	CEFR	Pu U	EFR	65	To be determined
Europe	EFR	Pu U	CSFR	7500	To be determined

\* EFR - Experimental Fast Reactor; DPFR - Demonstration or Prototype Fast Reactor; CSFR - Commercial Scale Fast Reactor. # 150 MW(th) is used for desalination. Source: IAEA Fast Reactor Data Base.



**Üvegházhatású gázok emissziója a villamos energia termelésében**  
(Source: Bertel & van de Vate, IEAE Bulletin 4/95)



Dr. Pátzay György

27

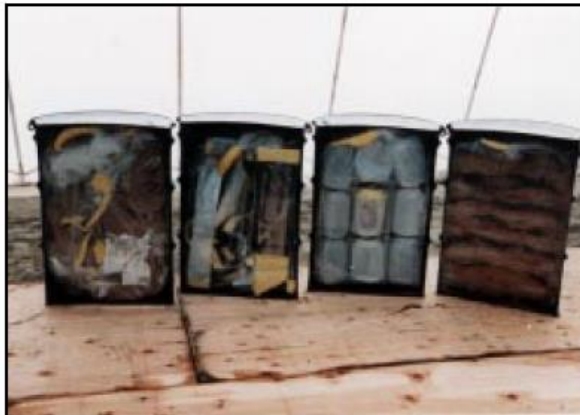


Figure 5. 55-Gallon Drums Containing Low-Level Radioactive Waste. (Source: Department of Energy)



Dr. Pátzay György

28



Figure 14. Compaction waste treatment .  
(Source: Department of Energy)

29

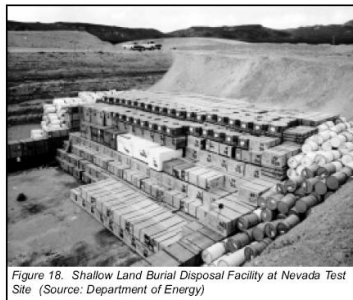


Figure 18. Shallow Land Burial Disposal Facility at Nevada Test Site (Source: Department of Energy)



Figure 19. Above Ground Vaults Disposal Facility at Oak Ridge Reservation (Source: Department of Energy)



Dr. Pátzay György

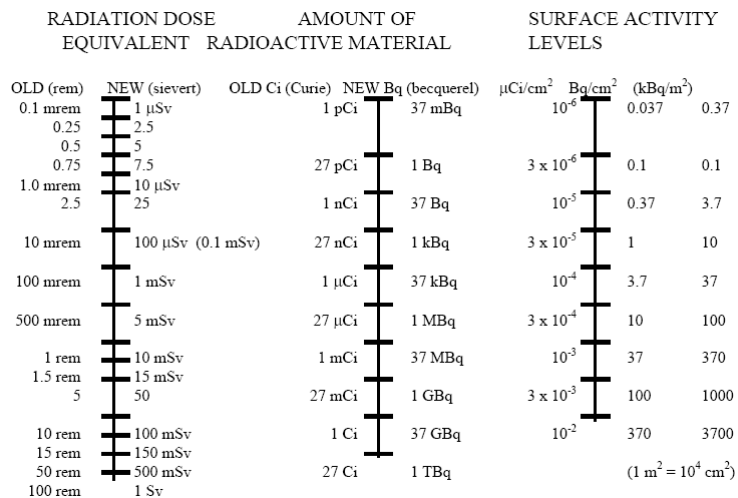
30

**Table 1: Average annual radiation doses due to exposures of the general public to natural background nuclear radiation in normal living environments and to artificial sources of nuclear radiation**

Sources of natural nuclear radiation	Annual radiation dose
Cosmic radiation at sea level	0.3 mSv
Natural radioactive atoms in soil, rocks, building material, etc.	0.3 mSv
Natural radioactive atoms in body tissues and bones	0.4 mSv
Radioactive radon gas in indoor air	1.0 mSv
<i>All natural sources</i>	<i>2.0 mSv</i>
Sources of artificial nuclear radiation	
Medical and dental x-rays	0.40 mSv
Nuclear medicine	0.10 mSv
Nuclear weapons fallout	0.04 mSv
Other sources	0.02 mSv
Nuclear power plant discharges	0.01 mSv
<i>All artificial sources</i>	<i>0.6 mSv</i>
<i>All natural and artificial sources</i>	<i>2.6 mSv</i>

Dr. Pátzay György

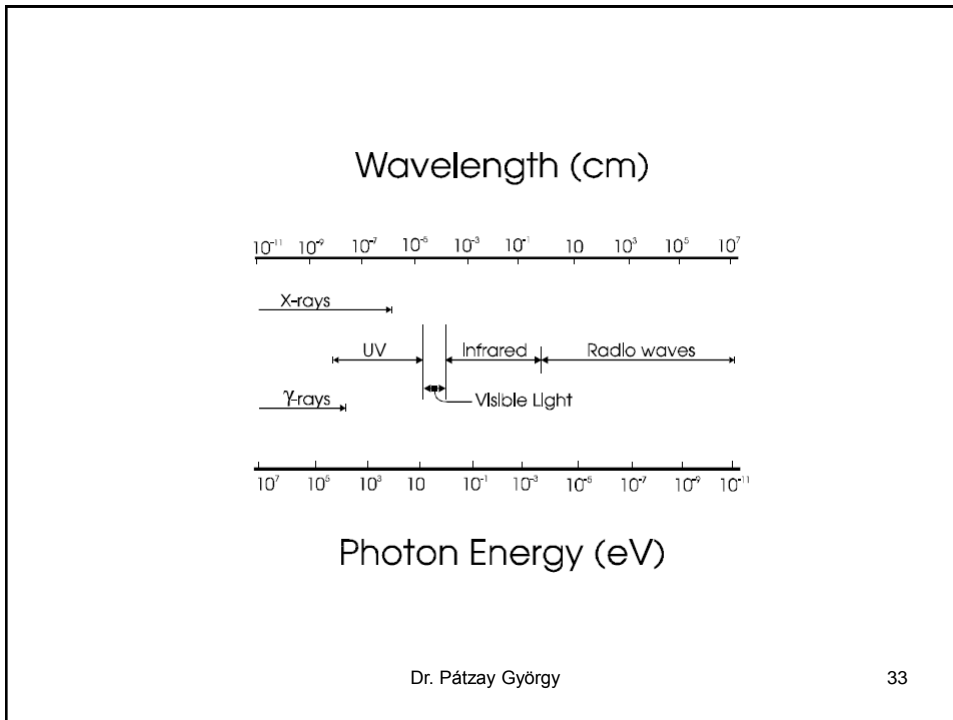
31



Dr. Pátzay György

32





**FIGURE 11-TYPICAL TYPE A PACKAGING CONFIGURATIONS**

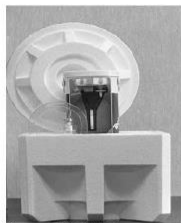


Figure A-Molybdenum  
99 Generator

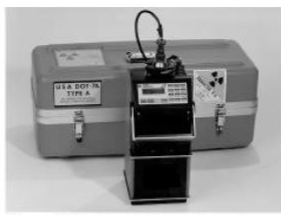


Figure B-Moisture Density Gauge &  
Carrying Case



Figure C-Steel Drum

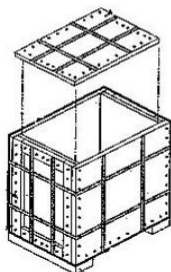


Figure D-Wooden Box



Figure E-Nuclear Pharmacy Unit Dose(s)  
Package

FIGURE 14-TYPICAL PACKAGES FOR RADIOACTIVE WASTE



Figure A-Intermodal Container



Figure B-TRUPACT-II



Figure C-Shielded LSA Cask



Figure D-Steel Drum

35

#### APPENDIX A NOMENCLATURE AND SI UNITS

Multiplication Factors		Prefix	Symbol	
1,000,000,000,000,000,000	=	$10^{18}$	exa	E
1,000,000,000,000,000	=	$10^{15}$	peta	P
1,000,000,000,000	=	$10^{12}$	tera	T
1,000,000,000	=	$10^9$	giga	G
1,000,000	=	$10^6$	mega	M
1,000	=	$10^3$	kilo	k
100	=	$10^2$	hecto	h
10	=	$10^1$	deka	da
0.1	=	$10^{-1}$	deci	d
0.01	=	$10^{-2}$	centi	c
0.001	=	$10^{-3}$	milli	m
0.000,001	=	$10^{-6}$	micro	u (or $\mu$ )
0.000,000,001	=	$10^{-9}$	nano	n
0.000,000,000,001	=	$10^{-12}$	pico	p
0.000,000,000,000,001	=	$10^{-15}$	femto	f
0.000,000,000,000,000,001	=	$10^{-18}$	atto	a

Dr. Pátzay György

36

EQUIVALENTS FOR CONVERSIONSQuantity (Activity)

$$1 \text{ TBq} = 27 \text{ Ci} = 27,000 \text{ mCi}$$

$$1 \text{ GBq} = 0.027 \text{ Ci} = 27 \text{ mCi} = 27,000 \text{ } \mu\text{Ci}$$

$$1 \text{ MBq} = 0.000027 \text{ Ci} = 0.027 \text{ mCi} = 27 \text{ } \mu\text{Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 0.037 \text{ TBq} = 37 \text{ GBq} = 37,000 \text{ MBq}$$

$$1 \text{ mCi} = 0.000037 \text{ TBq} = 0.037 \text{ GBq} = 37 \text{ MBq}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 0.037 \text{ MBq} = 37,000 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ nCi} = 0.000037 \text{ MBq} = 37 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ pCi} = 0.037 \text{ Bq} = 37 \text{ mBq}$$

Radiation level (Dose equivalent rate)

$$1 \text{ Sv/h} = 100 \text{ rem/h} = 100,000 \text{ mrem/h}$$

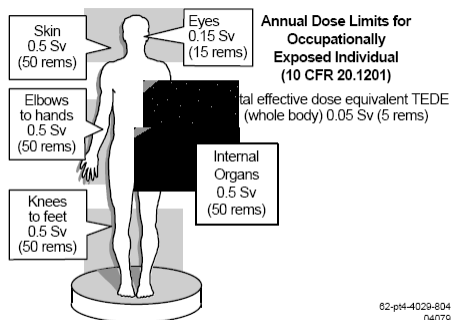
$$1 \text{ mSv/h} = 0.1 \text{ rem/h} = 100 \text{ mrem/h}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 0.0001 \text{ rem/h} = 0.1 \text{ mrem/h}$$

$$1 \text{ rem/h} = 0.01 \text{ Sv/h} = 10 \text{ mSv/h} = 10,000 \text{ } \mu\text{Sv/h}$$

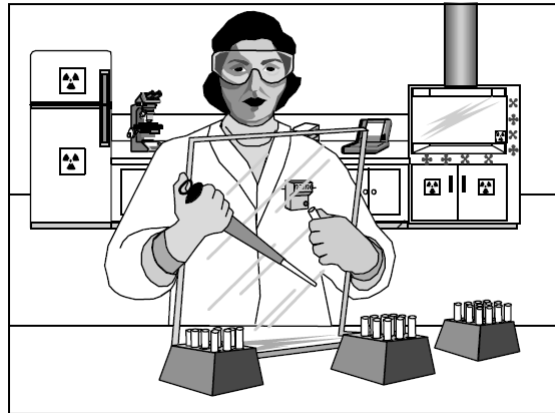
$$1 \text{ mrem/h} = 0.00001 \text{ Sv/h} = 0.01 \text{ mSv/h} = 10 \text{ } \mu\text{Sv/h}$$

37



Annual Dose Limits for Occupationally Exposed Individuals.

### Working Behind a Shield

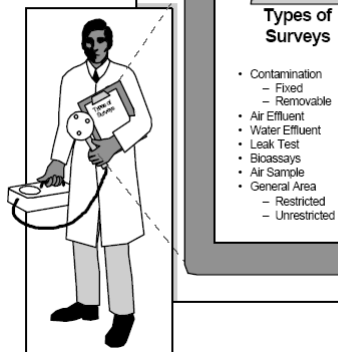


62-pH-6266-810d  
040786

Dr. Pátzay György

39

### Types of Surveys



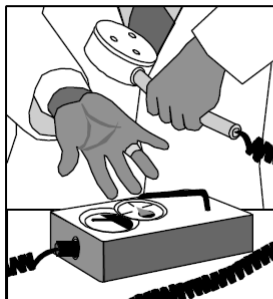
62-pH-4026-826c  
040708

62-pH-4026-807d  
022668

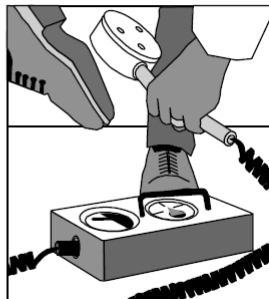
Dr. Pátzay György

40

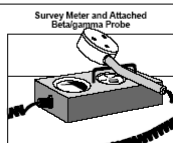
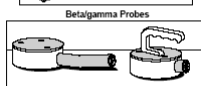
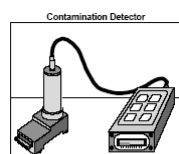
Surveying arm and hand using survey meter and beta/gamma probe.



Surveying feet and legs using survey meter and beta/gamma probe



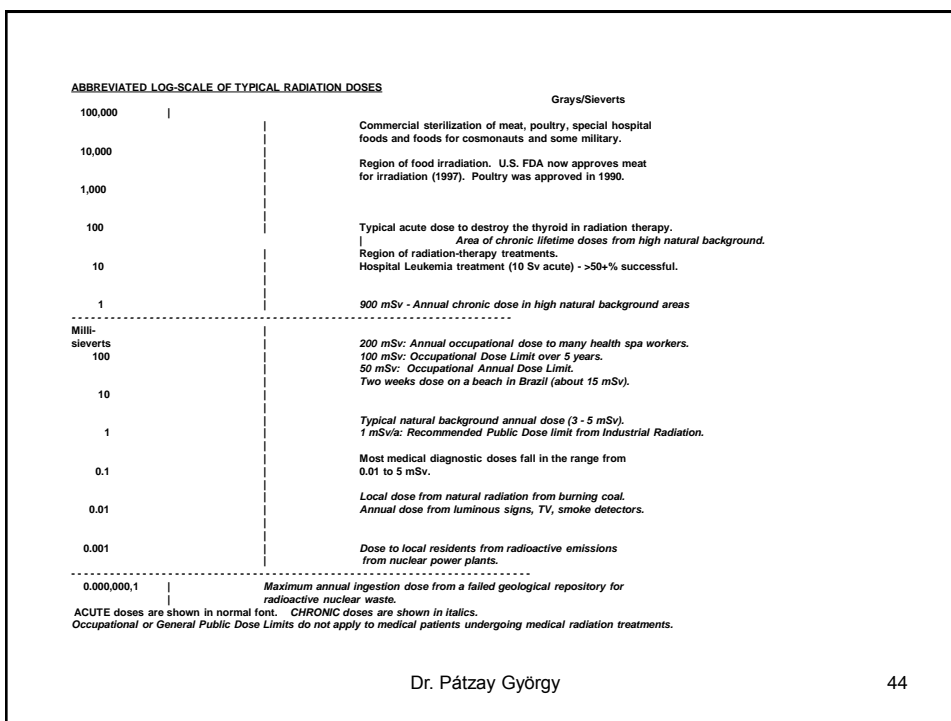
02-p14-0209-800d  
020998



02-p14-0209-800d  
020998

Akut és krónikus egésztest besugárzási dózisok és az emberi szervezet *		
Összes dózis (Gray) **	Akut besugárzás (másodpercek-órák). A sejtreparáció csak részlegesen hatékony.	Krónikus besugárzás (általában 1 év felett). A sejtreparáció hatékony.
	Risk of long-term injury is assumed for all survivable exposures.	Risk of injury is assumed for all exposures, even though it is not readily definable.
50 to 100	Nausea, vomiting, diarrhea. Rapid onset of unconsciousness. Death in hours or days.	Few data. No obvious deaths. Injuries difficult to define.
10 to 50	Nausea, vomiting, diarrhea. Death in weeks	Few data. Injuries difficult to define, if they occur. Confounding effects from smoking and other hazards in the Uranium mine worker data.
3 to 10	Nausea, vomiting, diarrhea in most individuals. About 50% survival rate without hospital treatment.	No definable health effects attributable solely to radiation. Many confounding effects.
1 to 3	Nausea and fatigue in some individuals. Eventual recovery.	No definable health effects.
0.1 to 1	Somatic injury unlikely. Delayed effects possible but improbable.	No definable adverse health effects
0 to 0.1	No detectable adverse health effects.	No definable adverse health effects. Significant benefits possible and likely, through Adaptive Response.
<p>* Cellular responses and changes can be detected at all doses, as with any toxicity insult.                  ** The gray and the sievert are comparable. At very high doses, above occupational dose limits, the gray is used rather than the sievert.</p>		

Dr. Pátzay György



Dr. Pátzay György

## RADIOAKTÍV HULLADÉKOK

**HULLADÉK:** olyan anyag, amely egyéb célra már nem használható fel.

**RADIOAKTÍV HULLADÉK:** a háttérsugárzást meghaladó radioaktivitással rendelkező radioaktív izotópokat tartalmazó hulladék.

### SZILÁRD

Helyhez kötött

### CSEPPFOLYÓS

korlátozott mozgékonyságú

### GÁZ

mozgékony

Aktivitás (fajlagos aktivitás) szerint: **kisaktivitású, közepes aktivitású és nagyaktivitású hulladékokat** különböztetünk meg.

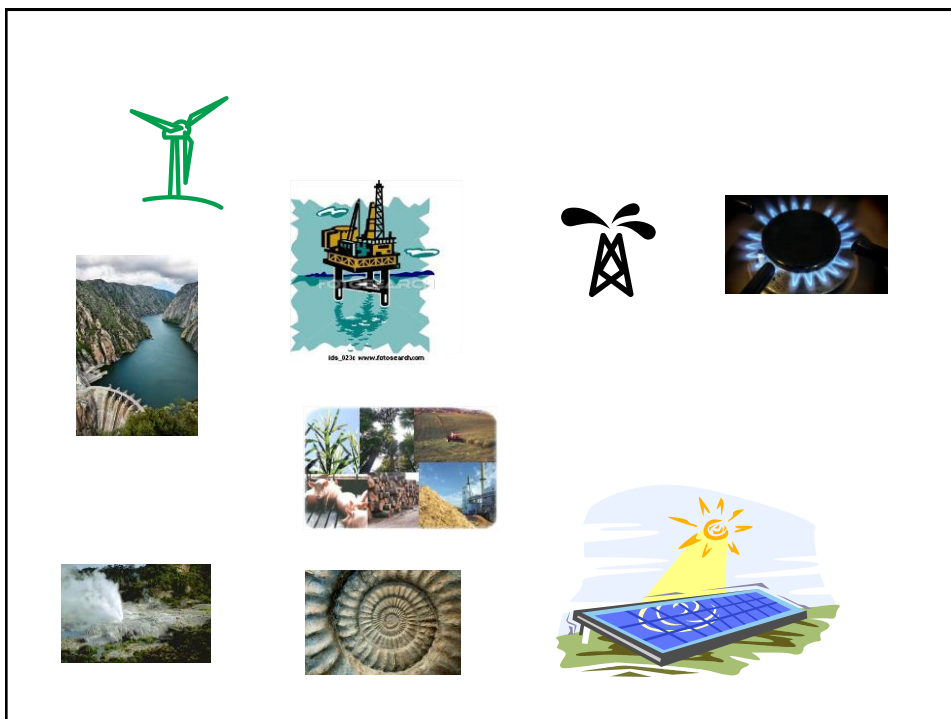
Felezési idő szerint rövid élettartamú, közepes élettartamú és hosszú élettartamú radioaktív hulladékokról beszélünk.

A radioaktív hulladékokat sokféleképpen osztályozhatjuk. Az osztályozásnál nem csak a sugárvédelmi szempontok lehetnek fontosak, hanem a hulladék halmazállapota, hogy tartalmaz-e valamilyen más okból kifolyólag veszélyes anyagot, például erős savat, vagy tűzveszélyes anyagot. Magyarországon a radioaktív hulladékok kategorizálása az MSZ 14344 számú szabvány alapján történik. Ebben halmazállapot, [aktivitás-koncentráció](#), [felületi dózisteljesítmény](#) és [felezési idő](#) szerint csoportosítják a radioaktív hulladékokat.

Dr. Páztay György

Radiokémia-VI.

45



## 2. Nukleáris energiatermelés (hasadási és fúziós)

**A radioaktív izotópok a bányászott, feldolgozott, fűtőelemként előállított és bevitt hasadóanyaggal, a hasadás és más magreakciók során keletkező hasadási termék aktivációs termékekben és a radiolízis során keletkező radioaktív izotópok formájában jelentkeznek.**

### Aktivitás-koncentráció szerint osztályozva:

- kis aktivitású hulladékok (low level waste - LLW):  $< 5 \cdot 10^5$  kBq/kg
- közepes aktivitású hulladékok (intermediate level waste - ILW):  $5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^8$  kBq/kg
- nagy aktivitású hulladékok (high level waste - HLW):  $> 5 \cdot 10^8$  kBq/kg

### Halmazállapot szerint osztályozva:

- szilárd hulladékok
- cseppfolyós hulladékok (tűzveszélyes, nem tűzveszélyes)
- légnemű hulladékok

### Felezési idő szerint osztályozva:

- rövid élettartamú hulladékok: max. 30 nap a felezési idő
- közepes élettartamú hulladékok: max. 30 év a felezési idő
- hosszú élettartamú hulladékok: 30 év feletti a felezési idő

### Felületi dózisteljesítmény szerint osztályozva:

- kis felületi dózisteljesítményű hulladékok:  $< 3 \cdot 10^{-2}$  Gy/óra
- közepes dózisteljesítményű hulladékok:  $3 \cdot 10^{-2} - 10^{-2}$  Gy/óra
- nagy dózisteljesítményű hulladékok:  $> 10^{-2}$  Gy/óra



Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

47

A különböző kategóriákba eső hulladékok különböző kezelési és elhelyezési módokat igényelnek.

A [kis aktivitású hulladékok](#) egészségkárosító hatása már nagyon alacsony. Míg a [közepes](#) és [nagy aktivitású hulladékok](#) esetében a biztonságos kezelhetőség és tárolhatóság érdekében mindig meg kell adni a hulladék izotópösszetételét, addig a kis aktivitású hulladékok esetében erre nincsen szükség. Amennyiben a hulladék egy bizonyos szintnél már kisebb veszélyt jelent a környezetére már nem kell szabályozást alkalmazni. Ezeket a szinteket hívjuk mentességi szinteknek. A mentességi szint fogalma 1997-ben került be a magyar törvénykezésbe, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség ajánlása alapján.

[Mentességi szintek](#) nevezzük az egyes radionuklidokra meghatározott azon [aktivitás](#) illetve [aktivitás-koncentráció](#) értékeket, amely alatt úgy tekintjük, hogy a hulladék már nem jelent veszélyt környezetére nézve. A mentességi szintek megállapítására nincs általános szabály, rendszerint külön táblázatokban adják meg az értékeket, izotóponként, aktivitásban és aktivitás-koncentrációban is.

A nagy aktivitású hulladékok esetében fontos figyelembe venni hulladék keletkezésének körülményeit is, mivel az elhelyezésüknél figyelembe kell venni, hogy milyen, a későbbiekben felhasználható anyagokat tartalmaznak. Továbbá a nagy aktivitású hulladékok esetében különösen fontos szempont, hogy tartalmaznak-e valamilyen más, nem sugárvédelmi szempontból is veszélyes anyagot, például erős savat. Az USA-ban ezekre a hulladékokra az ún. vegyes hulladék elnevezést használják, ekkor a hulladék veszélyessége nem kizárólag a nukleáris veszélyességből adódik.

Számos országban, például az USA-ban az [alfasugárzó](#) izotópokat tartalmazó hulladékokra külön szabályok szerint kezelik, függetlenül aktivitás-koncentrációjuktól<sup>48</sup>



Más felosztás szerint:

- Folyékony hulladékok koncentrátuma (iszapok, kimerült ioncserélő gyanták stb.)
- Szilárd hulladékok (éghető-nem éghető, alfa sugárzó nuklidot tartalmazó-nem tartalmazó)
- Speciális hulladékok (szerves besugárzott, felaktivált anyagok, leszerelési atomerőművek hulladékai,  $^3\text{H}$  és  $^{14}\text{C}$  tartalmú hulladékok)

Hulladékforrások: fő forrás a nukleáris energiatermelés, emellett ipari, orvosi kutatási, oktatási és egyéb hulladékok.

#### A fűtőelemciklus hulladékai:

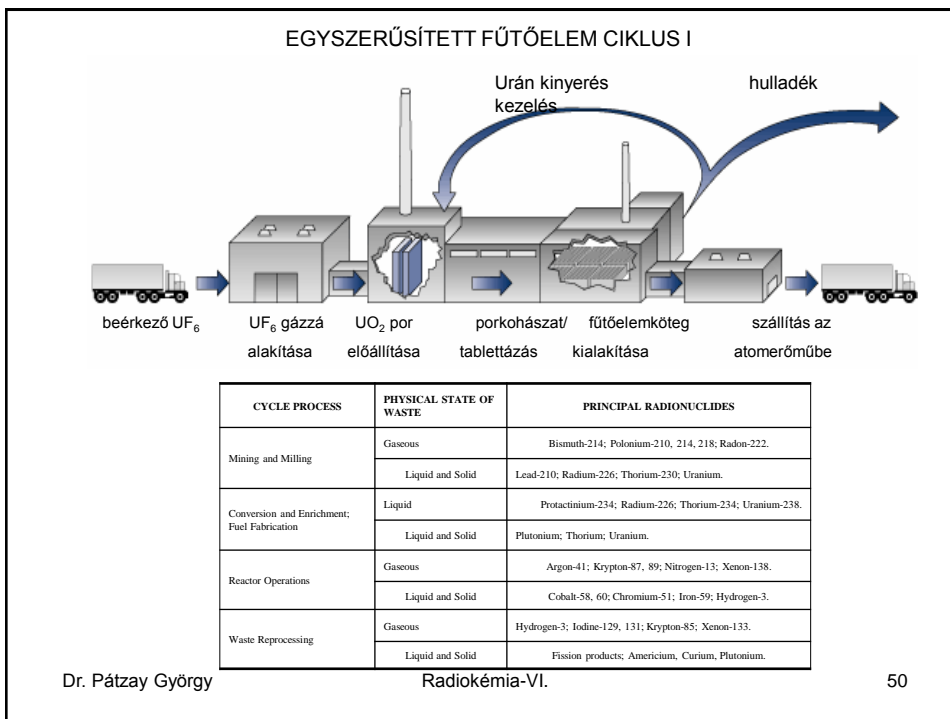
- Bányászati, őrlési, feltárási hulladékok
- $\text{UF}_6$  konverziós hulladékok
- Dúsítási hulladékok
- Fűtőelemgyártási hulladékok
- Atomerőművi hulladékok
- Feldolgozási, reprocesszási hulladékok
- Átalakítási, szilárdítási, beágyazási és temetési hulladékok.

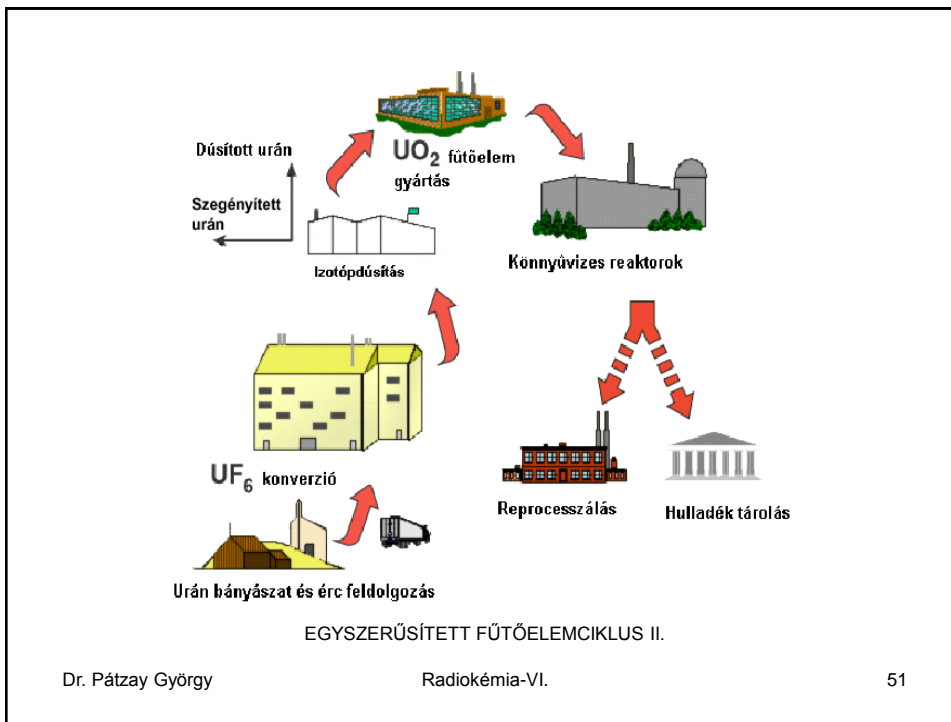
#### KISMENNYISÉGŰ RADIOAKTÍV HULLADÉK KELETKEZÉSE ELKERÜLHETETLEN!

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

49





Közeli összefüggés 100 tonna, PWR-ben felhasznált 4%-ban dúsított fűtőelem nyersanyagigénye és hulladéka között	
Termék vagy folyamat	Tömeg (tonna)
Uránérc (1% urán)	80,000 + tonna
Tisztított urán (0.7% U-235)	800 tonna
Tisztítási hulladék	79,200 + tonna (maradék U & Ra)
Dúsított urán 4%, (20%), (80%)	100, (20, 5) – tonna 800 tonna természetes U-ból
Szegényített urán DU (0.2 - 0.3% U-235)	700, (780, 795) - tonna DU 'hulladékba'
Kiégett fűtőelem (PWR - 4% dúsított)	100 tonna
PWR kiégett fűtőelem HLW reprocessálás nélkül – évente ~ 20 - 30 tonna/év hulladékba kerül.	100 tonna (folyamatos tárolás)*
Reprocessált kiégett PWR fűtőelem (100 tonna) kb. 30,000 MWnap/tonna kiegészi szint után.	
Nagy aktivitású hasadási hulladék (~ 20m³).	3 tonna (üvegesített folyamatos tárolásra)
Kinyert urán (<1% U-235)	96 tonna (visszakerül a fűtőelem ciklusba)
Kinyert plutónium	1 tonna (visszakerül a fűtőelem ciklusba)
DU – ha nem hasznosítják a jövőben:	700+ tonna „visszanyerhető” tárolásra
DU – ha MOX-ként vagy a jövőben gyors szaporító reaktorban hasznosítják és reprocessálnak:	700+ tonna, Pu-val vagy HEU-val keverik energiatermelési vagy szaporítási célból.
Intermediate Level Waste 1 reaktor ciklusból.	Max. kb. 200+ m³ hulladék, melynek egy része tömöríthető.
LLW 1 reaktor ciklusból. Az összes ILW-LLW kb. 800 tonna.	Kb. 300+ m³ főleg tömörített hulladék.
* A jövőben nem lehetséges a kiégett fűtőelemeket hulladékként tárolni, hanem reprocessálni és szaporítani szükséges.	

Dr. Pátzay György 52

2000-ig a világon felhalmozódott radioaktív hulladékok és nem hulladék anyagok		
Reaktor fűtőelem ciklus	Radioaktív hulladékok	Reciklizálásra kerülő nem hulladékok
<b>A reaktorig (front end)</b>		
Uránbányászat	1,000,000,000 + tonna	
Feldolgozás	Kevés	
Finomítás	Kevés	
UF <sub>6</sub> konverzió	~ 35,000 m <sup>3</sup>	
Dúsítás	16,000 m <sup>3</sup>	
Szegényített urán (DU)	Csak akkor hulladék, ha nem reciklizálják	1,500,000 tonna
Fűtőelemgyártás	160,000 m <sup>3</sup>	
<b>A reaktor után (back end)</b>		
Kiégett fűtőelem *	Csak akkor hulladék, ha nem reciklizálják	230,000 tonna
A LLW-ILW hulladékok kezelése	~ 6,000,000 m <sup>3</sup>	
Reprocessálás		218,000 + tonna
Hasadási termék hulladék (4%)	9,000 + tonna	
<b>Military</b>		
Leszerelt uránbombák HEU <sup>235</sup> U		500 tonna ± (U.S. & RUS)
Leszerelt plutónium bombák <sup>239</sup> Pu	Dr. Pátzay György	500 tonna ± (U.S. & RUS)

### Uránbányászat, kezelés, finomítás

Nyíltszíni bányászat (~38%), földalatti bányászat (~33%), in-situ kioldás (~17%), más bányászat mellékterméke (~12%).

A bányászat hulladéka a meddő (0,1% U tartalom alatt), ez jelenleg 2 milliárd (2\*10<sup>9</sup>) tonna. Megfelelő fedés kell a radon szivárgás, a nedvesedés és a savas kioldás megakadályozására.

A bányászati, őrlési, feltárási, UF<sub>6</sub> konverziós, dúsítási és fűtőelemgyártási hulladékok döntően kisaktivitású hulladékok. Az itt keletkezett hulladékok forrásai az urán és bomlástermékei. Az uránvegyületek por formájában kerülhetnek a környezetbe és a feldolgozási lépések során a bomlástermékek közül a radon és a rádium említhető meg.

### Atomerőművi nukleáris hulladékok

#### 1. Hasadási termékek

A maghasadás során egy nehéz atommag (<sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu) egy becsapódó neutron hatására két kisebb részre (hasadvány magok) szakad. A hasadvány magok kezdeti nagy mozgási energiája sorozatos ütközések miatt hamar hővé alakul (ezt a hőt hasznosítja az atomerőmű), majd lelassulásuk után kialakul az elektronburkuk, így keletkeznek a hasadási termékek. Magfizikai okokból ezek a hasadási termékek  $\beta$ - és  $\gamma$ -sugárzó izotópok. Több mint 100 különféle radioizotóp, melyek a hasadás során keletkeztek. Egy, vagy többlépcsős bomlással bomlanak és a fűtőelem burkolat repedésein keresztül jutnak ki a hűtőközegbe. CSAK A GÁZ HALMAZÁLLAPOTÚ ÉS/VAGY HOSSZÚ FELEZÉSI IDEJŰ HASADVÁNY RADIONUKLIDOK FONTOSAK.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

55

#### Hasadási termékek csoportosítása

Hasadási termék, felezési idő	Azonosított nuklidok száma*
<24 óra	438+
1 nap-1 év	42
1 év-10 év	4
> 10 év	12
stabil	101
Összes hasadási termék	615
* Számos hasadási termék felezési ideje rendkívüli kicsi és nehéz felezési idejének meghatározása	

Dr. Pátzay György

56

## 2. Aktinidák

A reaktorban száguldozó neutronok bizonyos valószínűséggel befogódhatnak egy atommagba, aminek éppen nekiütöznek. Ha ez egy nehéz atommag az üzemanyagban, akkor különböző, a természetben elő nem forduló transzurán (uránon túli) elemek keletkeznek. Ezek az elemek általában  $\alpha$ - és  $\gamma$ -sugárzó izotópok.

A hasadási termékek és az aktinidák az üzemanyagban keletkeznek, és csak elenyésző hányaduk jut ki az üzemanyagrudakból

## 3. Aktivációs termékek

A neutronok befogódhatnak a reaktor szerkezeti anyagainak atommagjaiba is, ilyenkor  $\beta$ - és  $\gamma$ -sugárzó izotópok keletkeznek. Aktivációs termékek keletkezhetnek a hűtőközegben, a hűtőközegben oldott és lebegő állapotban jelenlévő anyagokban és a szerkezeti anyagokban.

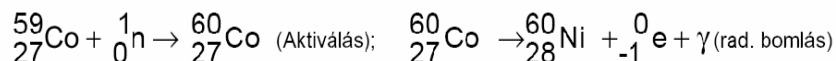
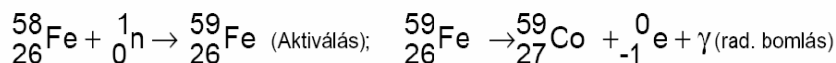
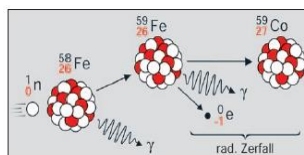
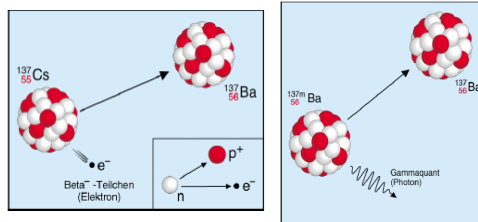
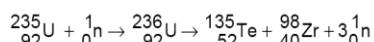
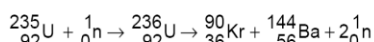
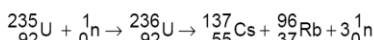
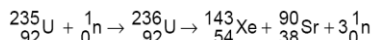
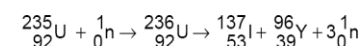
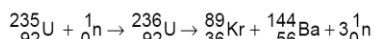
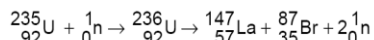
A hasadvány termékek mennyisége:

Minden MW.nap energiafejlődésnél 1,3 g  $^{235}\text{U}$  „reagál”, ebből 86% a magok elhasadása, 14% neutronbefogásos transzurán képződés. Így ekkora teljesítménynél  $0,86 \cdot 1,3 = 1,1$  g  $^{235}\text{U}$  hasad el. Egy 3000 MW teljesítményű reaktor így naponta kb. 3,3 kg hasadvány terméket generál, ami évi 1200 kg hasadvány terméket jelent. Nagy sűrűsége miatt ez csak kb.  $120 \text{ dm}^3$  ( $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}$ -es kocka). Ugyanakkor a keletkezett hő és aktivitás óriási.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

57



Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

58

### A hőhordozóban lejátszódó magreakciók

Magreakció	Másodlagos	$T_{1/2}$
${}^2_1\text{H}(n, \gamma) {}^3_1\text{H}$	${}^3_1\text{H} \xrightarrow{\beta^-} {}^3_2\text{He}$	12,3a
${}^{16}_8\text{O}(n, p) {}^{16}_7\text{N}$	${}^{16}_7\text{N} \xrightarrow[\gamma]{\beta^-} {}^{16}_8\text{O}$	7,3s
${}^{17}_8\text{O}(n, p) {}^{17}_7\text{N}$	${}^{17}_7\text{N} \xrightarrow[\gamma]{\beta^-, n} {}^{16}_8\text{O}$	4,2s
${}^{18}_8\text{O}(n, \gamma) {}^{19}_8\text{O}$	${}^{19}_8\text{O} \xrightarrow[\gamma]{\beta^-} {}^{19}_9\text{F}$	29s
${}^{41}_{19}\text{K}(n, \gamma) {}^{42}_{19}\text{K}$	${}^{42}_{19}\text{K} \xrightarrow[\gamma]{\beta^-} {}^{42}_{20}\text{Ca}$	12,4h
${}^{10}_5\text{B}(n, 2\alpha) {}^3_1\text{H}$	${}^3_1\text{H} \xrightarrow{\beta^-} {}^3_2\text{He}$	12,3a
${}^{14}_7\text{N}(n, T) {}^{12}_6\text{C}$		
${}^{10}_5\text{B}(n, \alpha) {}^7_3\text{Li}$		
${}^7_3\text{Li}(n, n\alpha) {}^3_1\text{H}$		

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

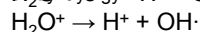
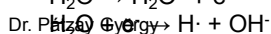
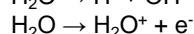
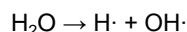
59

### Korróziós termékek

 ${}^{51}\text{Cr}, {}^{54}\text{Mn}, {}^{56}\text{Mn}, {}^{58}\text{Co}, {}^{60}\text{Co}, {}^{59}\text{Fe}, {}^{95}\text{Zr}$ 

	$T_{1/2}$	Sugárzás	$E_\gamma(\text{MeV})$
${}^{51}\text{Cr}$	27,8 nap	$\gamma, \text{K}$	0,325
${}^{54}\text{Mn}$	291 nap	$\gamma, \text{K}$	0,842
${}^{56}\text{Mn}$ 3,39	2,6 óra	$\beta^-, \gamma$	0,8 –
${}^{58}\text{Co}$ 1,62	71,3 nap	$\beta^+, \gamma, \text{K}$	0,81;
${}^{60}\text{Co}$ 1,33	5,27 év	$\beta^-, \gamma$	1,17;
${}^{59}\text{Fe}$ 1,29	45,0 nap	$\beta^-, \gamma$	0,2; 1,1;
${}^{95}\text{Zr}$ 0,76	65,0 nap	$\beta^-, \gamma$	0,72;

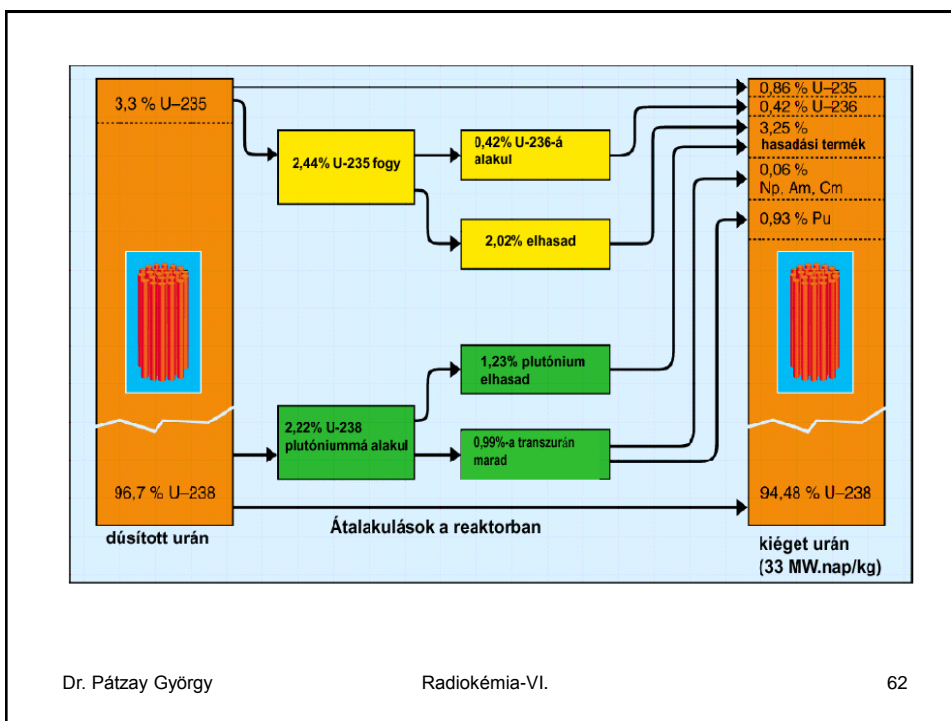
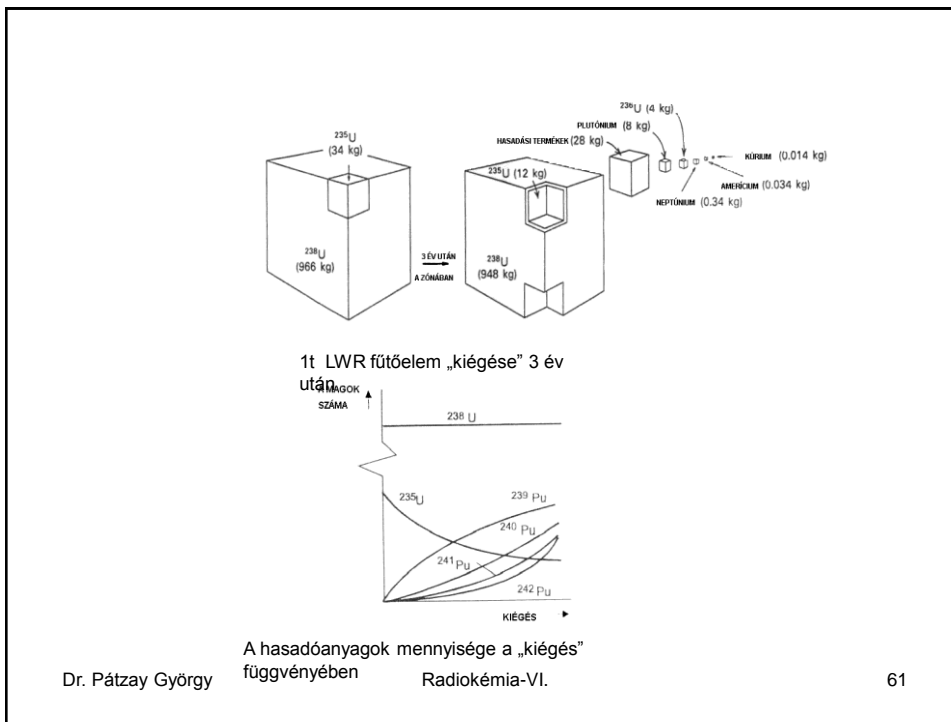
### A víz radiolízise

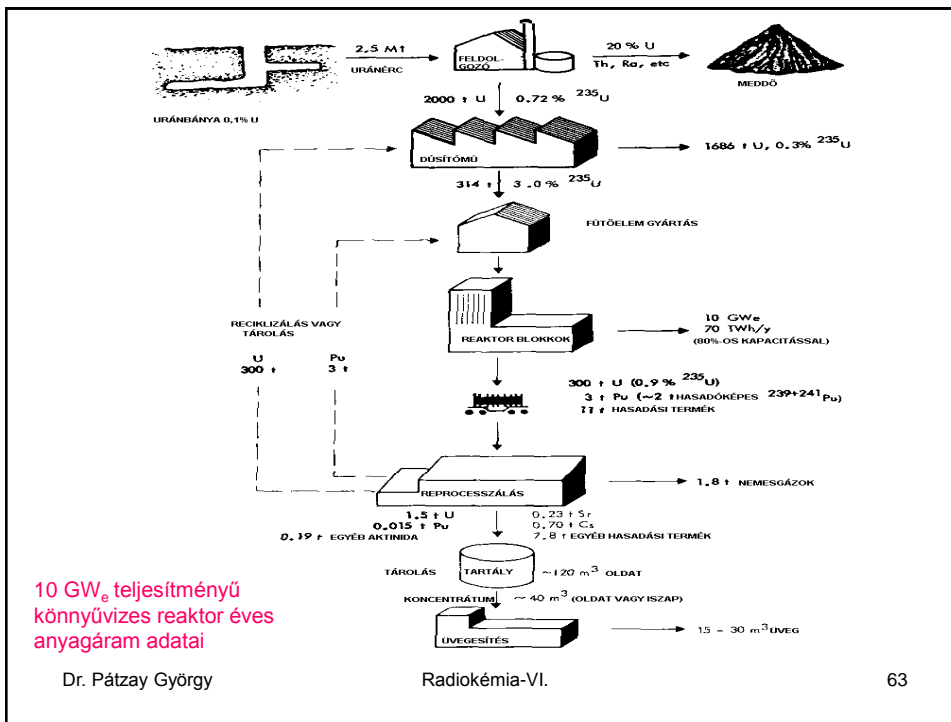


Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

60





A hosszabb felezési idejű hasadási termékmagok és transzuránok kiégett PWR fűtőelemekben az idő függvényében \*

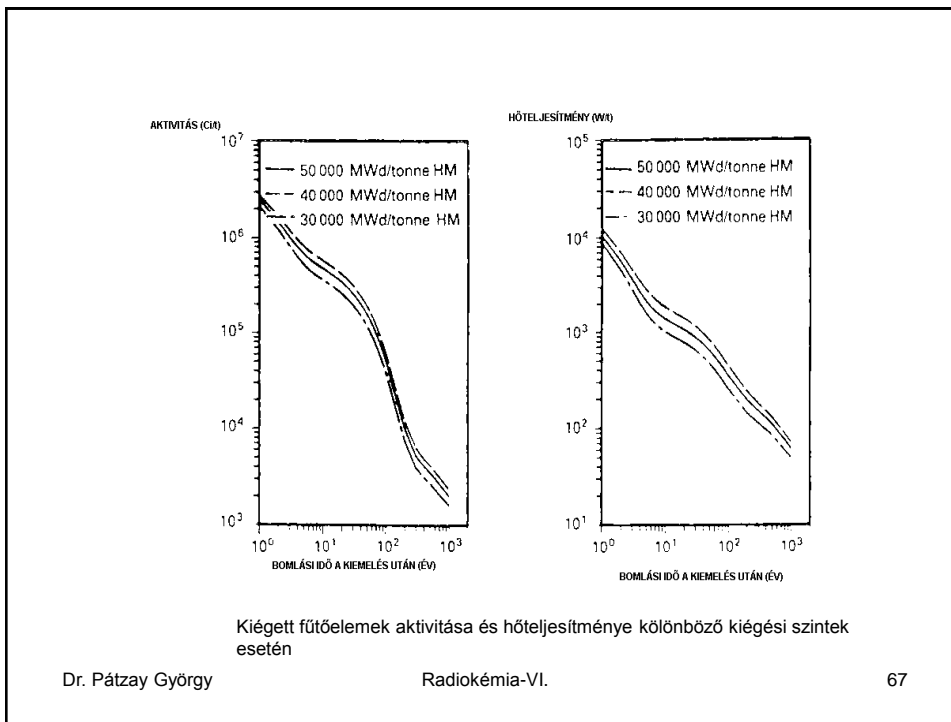
Nuklidok	T <sub>1/2</sub>	Aktivitás/Tonna U 150 nap * (Bq)	Aktivás/Tonna U 100 év hűtés után (Bq)	Aktivás/Tonna U 500 év hűtés után (Bq)
<b>Hasadási termékek</b>				
Niobium-95	35 d	2E16	0	0
Strontium-89	50.5 d	4E15	0	0
Zirconium-95	64 d	1E16	0	0
Cerium-144	285 d	3E16	0	0
Ruthenium-106	1 y	2E16	0	0
Cesium-134	2.1 y	8E15	40	0
Promethium-147	2.6 y	4E15	1E4	0
Strontium-90	28.8 y	3E15	2.7E14	1.8E10
Cesium-137	30.1 a	4E15	4E14	4E10
<b>TRU magok</b>				
Curium-242	163 d	6E14	0	0
Plutonium-241	14.4 y	4E15	3E13	1.4E5
Curium-244	18.1 y	9E13	2E12	4.4E5
Plutonium-238	87.7 y	1E13	4.5E12	1.9E11
Americium-241	433 y	7E12	6E12	3E12
Plutonium-240	6.56E3 y	2E13	2E13	1.9E13
Americium-243	7.37E3 y	6E13	6E13	5.7E13
Plutonium-239	2.41E4 y	1E13	1E13	9.9E12
Plutonium-242	3.75E5 y	5E10	5E10	4.99E10

\* After reprocessing, which can take place after about 150 days, the following fission nuclides would be significantly present in the wastes.

Dr. Pátzay György 64







Néhány radioaktív izotóp hőtermelése * watt/g	
Nuklid	watt/g
H-3	0.325
Co-60	17.45
Kr-85	0.590
Sr-90	0.916
Ru-106	31.8
Cs-137	0.427
Ce-144	25.5
Pm-147	0.340
Tm-170	11.86
Po-210	141.3
Pu-238	0.558
Am-241	0.113
Cm-242	120.0
Cm-244	2.78

\* termo-elektromos generátorokhoz  
Mostly from 'Chart of the Nuclides' (Lockheed Martin and GE Nuclear Energy)

Dr. Pátzay György 68

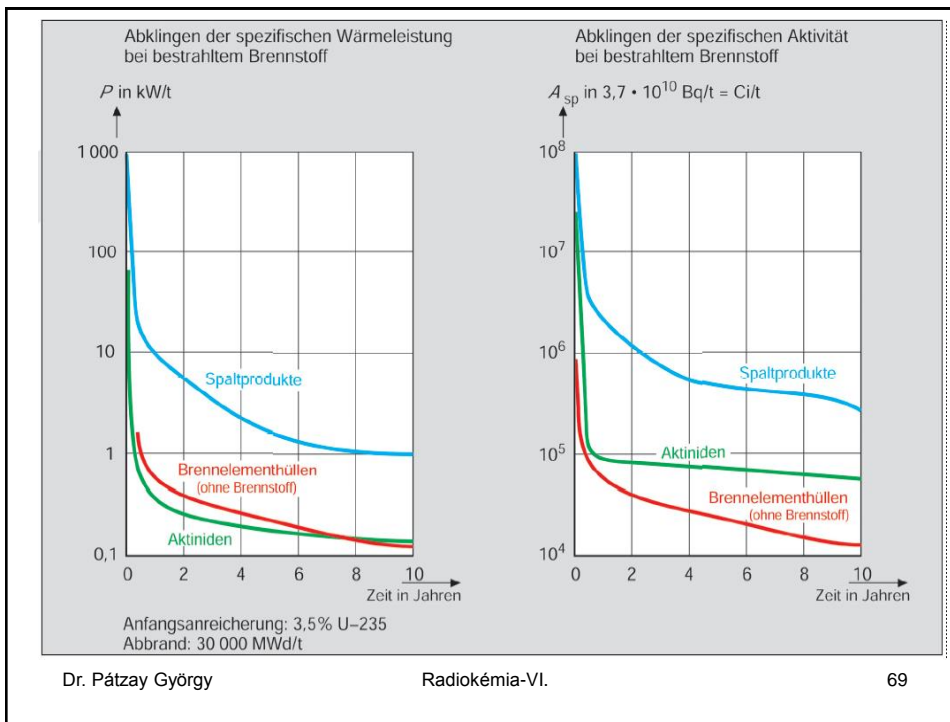


Table 1. Annual production of plutonium, minor actinides and fission products from a 3000 MWth pressurized light water reactor with fuel burned to 33,000 MWd/ton (after 70 years decay)

Isotope	Half-life (yrs)	Mass kg/yr
<b>Plutonium and Minor Actinides (MA)</b>		
$^{239}\text{Pu}$	2,100,000	14.5
$^{240}\text{Pu}$	80	4.5
$^{241}\text{Pu}$	24,000	166.0
$^{242}\text{Pu}$	6,600	76.7
$^{243}\text{Pu}$	14	25.4
$^{244}\text{Pu}$	380,000	15.5
$^{241}\text{Am}$	430	16.6
$^{243}\text{Am}$	7,400	3.0
$^{244}\text{Cm}$	18	0.6
<b>Long Lived Fission Products (LLFP)</b>		
$^{90}\text{Sr}$	65,000	0.2
$^{90}\text{Zr}$	29	13.4
$^{93}\text{Zr}$	1,500,000	23.2
$^{99}\text{Tc}$	210,000	24.7
$^{107}\text{Pd}$	6,500,000	7.3
$^{129}\text{I}$	100,000	1.0
$^{129}\text{I}$	17,000,000	5.8
$^{135}\text{Cs}$	3,000,000	9.4
$^{137}\text{Cs}$	30	31.8
$^{153}\text{Sm}$	90	0.4

Dr. Pátzay György Radiokémia-VI. 70

## Composition of Spent Nuclear Fuel

Contents of 1 tonne PWR fuel (~ 2 fuel assemblies) at 50 MWd/kg burnup after cooling for 10 years:

955.4 kg U  
8.5 kg Pu (5.1 kg <sup>239</sup>Pu)  
0.5 kg <sup>237</sup>Np  
1.6 kg Am  
0.02 kg Cm  
34.8 kg fission products

Fission Products:  
10.1 kg Lanthanides  
1.5 kg <sup>137</sup>Cs  
0.7 kg <sup>90</sup>Sr  
0.2 kg <sup>129</sup>I  
0.8 kg <sup>99</sup>Tc  
0.006 kg <sup>79</sup>Se  
0.3 kg <sup>135</sup>Cs  
3.4 kg Mo isotopes  
2.2 kg Ru isotopes  
0.4 kg Rh isotopes  
1.4 kg Pd isotopes



Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

71

## Principal Contributors to the Radiotoxicity of PWR Spent Fuel

(50 MWd/kg burnup, 10 years' cooling)

Isotope	Sv/tonne	Isotope	Sv/tonne	Isotope	Sv/tonne
U-236	6.0E+02	Sr-90	9.2E+07	Y-90	8.9E+06
U-238	5.0E+02	Cs-134	1.4E+07	Ce-144	3.7E+04
Np-237	3.0E+03	Cs-137	6.3E+07	Pr-144	3.5E+02
Pu-238	3.5E+07			Pm-147	6.6E+04
Pu-239	2.8E+06			Sm-151	5.0E+03
Pu-241	2.0E+07			Eu-154	8.7E+05
Pu-242	2.0E+04			Eu-155	1.5E+04
Am-241	1.9E+07				
Am-243	7.7E+05			Ru-106	2.0E+05
Cm-244	4.9E+07				

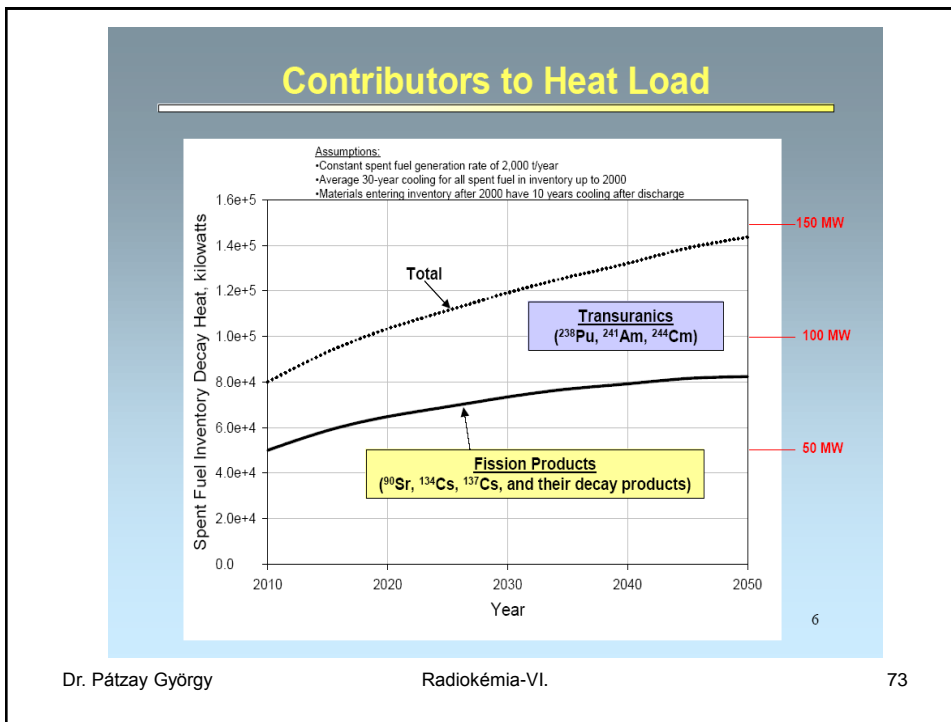


(1 Sievert = 100 Rem)

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

72



Az említett radioaktív izotópok jelennek meg az atomerőmű üze során keletkező hulladékokban. A hulladékokat 3 fő csoportra lehet felosztani:

#### 1. Kis- és közepes aktivitású technológiai hulladékok

Ide főleg a szerelési munkák során elszennyeződött ruhadarabok, szerszámok, illetve a primer köri hűtővízből a szennyeződések eltávolításához felhasznált ioncserélő gyanták tartoznak. A szükséges tipikus tárolási idő néhány száz év. A paksi atomerőműben évente átlagosan 120 m<sup>3</sup> szilárd és 250 m<sup>3</sup> folyékony [kis- és közepes aktivitású hulladék](#) keletkezik, az össztömeg kb. 600 tonna.

#### 2. Nagy aktivitású hulladék

Ez a legnagyobb gondot okozó része az egész üzemenyagciklusnak. A kiégett üzemenyag (illetve az esetleges feldolgozása után keletkező maradék) tartozik ide. A mennyisége kicsi: Pakson évente 55 tonna, azaz kb. 5 m<sup>3</sup> kiégett üzemenyag keletkezik. A tipikus tárolási idő a jelenlegi technológia mellett kb. egymillió év - ez technikailag már ma megoldható lenne, de sok ország inkább más módszereket (pl. [transzmutáció](#)) fejleszt, és a [nagy aktivitású hulladékot](#) átmeneti tárolókban őrzi.

## Nagy aktivitású hulladék-High-Level Waste (HLW) (fontosabb hosszú felezési idejű nuklidok)

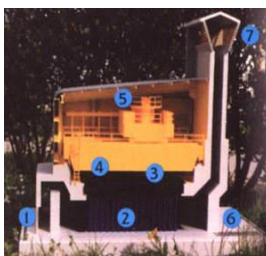
Hasadási termékek		Aktinidák	
Nuklid	Felezési idő (év)	Nuklid	Felezési idő (év)
Sr-90	28.8	Np-237	$2.1 \times 10^6$
Tc-99	210,000	Pu-238	89
Ru-106	1.0	Pu-239	$2.4 \times 10^4$
Sb-125	2.7	Pu-240	$6.8 \times 10^3$
Cs-134	2.1	Pu-241	13
Cs-137	30	Pu-242	$3.8 \times 10^5$
Pm-147	2.6	Am-241	458
Sm-151	90	Am-243	$7.6 \times 10^3$
Fu-155	1.8	Cm-244	18.1

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

75

A kiégett üzemanyag a benne történő radioaktív bomlások mértéke miatt komoly hőforrás is. Ezért a reaktorból való kivétele után az első néhány évben víz alatt tárolják, mivel azt hűteni kell. Később, mikor már a léghűtés is elegendő, a kiégett üzemanyag elszállítható az atomerőműből.



1. Levegő belépés
2. Üzemanyag kazetták tároló csövei
3. Sugárvédő záródugók
4. Biztonsági burkolat
5. Üzemanyag átrakó gép
6. Megerősített vasbeton épületszerkezet
7. Levegő kilépés

Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója, Paks

### 3. Az erőmű leszerelésekor keletkező hulladék

Az atomerőmű lebontásakor (*leszerelés*) nagy mennyiségű (pl. Pakson blokkonként 20000 m<sup>3</sup>) kis- és közepes aktivitású hulladék keletkezik, aminek a kezelése hasonló az 1. pontban említett hulladékhoz

Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

76

Az atomerőművekből kikerülő kiegészített fűtőelemekben 3 fő radioaktív komponens található:

- A még el nem hasadt  $^{235}\text{U}$  magok, a még el nem reagált  $^{238}\text{U}$  (és  $^{235}\text{U}$ ) magok
- Az  $^{238}\text{U}$ -ból és a  $^{235}\text{U}$ -ból neutronbefogással keletkezett transzurán magok közöttük a frissen keletkezett és el nem hasadt  $^{239}\text{Pu}$  magok
- Az  $^{235}\text{U}$  (és  $^{239}\text{Pu}$ ) hasadása révén keletkezett hasadvány radioizotópok

A kiegészített fűtőelemek feldolgozása a reprocessálás tulajdonképpen ezen 3 komponens csoport különválasztását jelenti.

A **reprocessálás** jelenleg alkalmazott technológiájánál a kiegészített üzemanyagot először feldarabolják, majd salétromsavban feloldják. A fűtőelemek cirkóniumötvözetből készített burkolata nem oldódik fel, azt először leszűrik. A keletkezett oldatból egy szerves vegyület (tributilfoszfát) segítségével kiextrahálják a plutóniumot és az uránt. A maradék oldat a hulladék (benne a plutóniumon kívüli transzuránokkal és a hasadási termékekkel). A daraboláskor és oldáskor keletkező gázok közül a jódgőzöket és a többi légnemű radioaktív anyagot kiszűrik, a nemesgázokat pedig felhígítás után kiengedik a légkörbe.

Az uránt és a plutóniumot elválasztják egymástól. Az uránt dúsításhoz újra fel lehet használni, a plutóniumból pedig plutónium-dioxidot ( $\text{PuO}_2$ ) gyártanak, ami urán-dioxidhoz ( $\text{UO}_2$ ) keverve a MOX (Mixed-OXid fuel, kevert oxid üzemanyag) alapanyaga. Így a kiegészített üzemanyag nagy része (tömegének több, mint 95%-a) újrahasznosítható, és csak a tényleges hulladékot kell kezelni és eltemetni.

#### A reprocessálás során az alábbi hulladékok keletkeznek:

- Burkolati hulladék
- Nagyaktivitású hulladék (HLW)
- Gáz-effluens hulladékok (pl.  $^{85}\text{Kr}$ )
- Kisaktivitású hulladékok (LLW)
- Transzurán tartalmú hulladékok (TRU)



Kiegészített üzemanyag átmeneti tárolómedencéje egy franciaországi reprocesszáló üzemben.

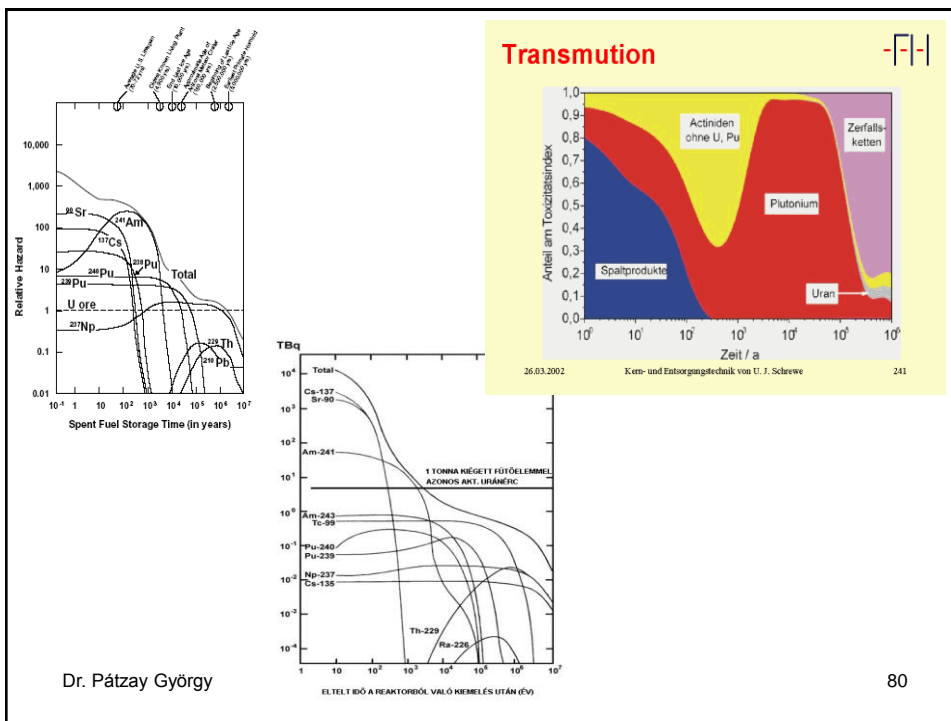
## Gáz-effluens hulladékok

Nuklid	Felezési idő	Aktivitás (curie/év)		
		30 perc	1-nap	60 nap
Kr*-83	1.86 óra	90,000	12	0
Kr-85	10.8 év	250	250	250
Kr*-85	4.4 óra	160,000	3900	0
Kr-87	2.8 óra	510,000	1500	0
Xe*-131	11.9 nap	420	150	10
Xe-133	5.3 nap	160,000	22,000	50
Xe*-133	2.3 nap	6000	50	0
Xe-135	9.2 óra	540,000	0	0
Xe-138	14 perc	780,000	0	0

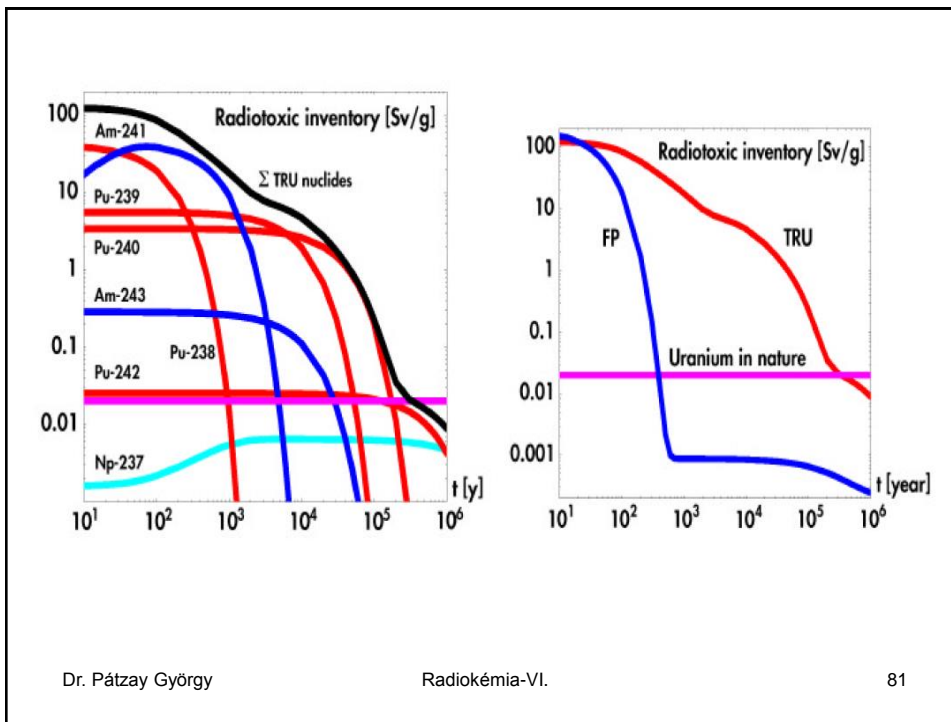
Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

79







## HULLADÉKKEZELŐ MÓDSZEREK

Alapelv: mivel jelenlegi technológiával a radioaktív bomlás nem gyorsítható, két lehetőség maradt:

1. Hígítás és szétterítés.
2. Koncentráció és tárolás

ALARA elv: a lehetőség szerinti legkisebb kockázattal kell a kezelést elvégezni (as low as reasonably achievable). A radioaktív hulladékokat a végleges elhelyezés előtt szinte kivétel nélkül hosszabb-rövidebb ideig átmeneti tárolókban helyezik el. Nagy aktivitású hulladékok esetén az átmeneti tárolókra azért van szükség, hogy biztosítsuk az eleinte jelentős hőt fejlesztő hulladék megfelelő hűtését. Az atomerőművek kiégett fűtőelemeit például néhány évig vizes hűtést biztosító ún. pihentető medencében, majd általában 50 évig egy levegőhűtésű átmeneti tárolóban helyezik el, és csak ezután kerülhetnek végleges helyükre.

A kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok hőfejlesztése többnyire elhanyagolható, ezért esetükben az átmeneti tárolás oka inkább csak a hulladékok gyűjtésének, osztályozásának és kezelésének megkönnyítése, vagy egyszerűen a végleges tároló hiánya (ez a helyzet jelenleg hazánkban is). Ezekkel az átmeneti tárolókkal szemben támasztott legfontosabb követelmény, hogy (legfeljebb) néhány évtizeden keresztül biztosítsák a radioaktív anyagok tárolását, felügyelet mellett. Azaz, ha bármiféle probléma merül fel a radionuklidok elszigetelésével, az a monitorozó rendszer segítségével azonnal mérhető, és súlyosabb következmények nélkül közbe lehet avatkozni

### A radioaktív hulladékok feldolgozásának szokásos menete:

a gyűjtés,  
 az osztályozás-válogatás,  
 az előkészítés,  
 a térfogatcsökkentés,  
 a szilárdítás-kondicionálás,  
 a minősítés  
 és az átmeneti vagy végleges tárolás (temetés).

A hulladékokat éghetőségük, [halmazállapotuk](#), [aktivitás-koncentrációjuk](#) illetve kémiai összetételük szerint osztályozzák. A kémiai összetétel nem csak a radioaktivitás szempontjából érdekes. A hulladékok összegyűjtése után feljegyzik azok megnevezését, becsült aktivitását, a szilárd hulladékok esetében a felületi [dózisegyenérték](#)-teljesítményt, folyékony hulladékok esetében a pH-t, a keletkezés helyét, idejét, s a hulladékban levő inaktív komponenseket. Ha a hulladék sugárforrást is tartalmaz, annak az adatait külön fel kell tüntetni.

A radioaktív hulladékok feldolgozásának a célja mindig a lehető legkisebb térfogatú, szilárd halmazállapotú hulladék előállítás. Így oldható meg ugyanis a biztonságos és gazdaságos elhelyezés.

A térfogatcsökkentés csak a kis és közepes aktivitás-koncentrációjú hulladékokra alkalmazható.

**A térfogatcsökkentés történhet:** tömörítéssel, égetéssel, bepárlással, extrakcióval, szorpcióval (ioncserével).

Magyarországon a hulladékok térfogatát tömörítéssel, bepárlással és szorpcióval csökkentik.

A szilárdítás-[kondicionálás](#) során a hulladékban található radioaktív részeket megkötik, mozgásukat megakadályozzák. A radioaktív hulladék megszilárdítása jelenti az első gátat, hogy ne juthasson ki radioaktív szennyezés a környezetbe miután a hulladékot elhelyezték. A hulladékot a szilárdítás-kondicionálás során különféle kötőanyagokba ágyazzák be.

A szilárdítás-kondicionálás [kis](#), [közepes](#) és [nagy aktivitás-koncentrációjú](#) hulladékokra egyaránt alkalmazható. Kis aktivitások esetén általában az olcsóbb megoldást, vagyis a [cementezést](#), [bitumenezést](#) alkalmazzák. A jelentős hőtermelésű, nagy aktivitású hulladékok esetén az [üvegesítés](#) a megfelelő megoldás.

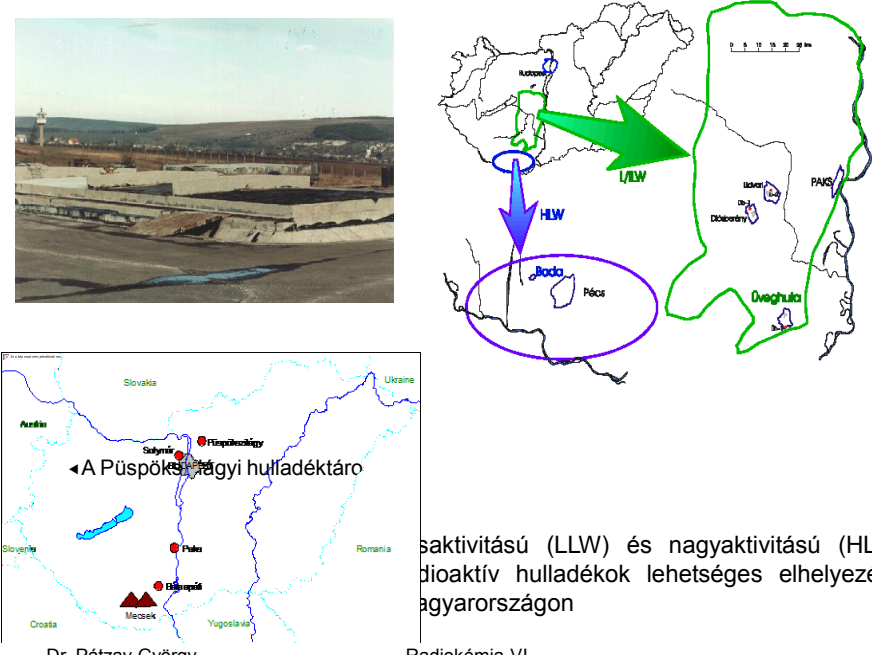
A legújabb hulladék szilárdító eljárásokban műanyagokkal is kísérleteznek, a különféle [rögzítő anyagokba](#) különböző típusú műanyagokat kevernek, ezzel javítani lehet a bitumennel ill. a cementtel szilárdított hulladékok tulajdonságait, kisebb térfogatú cementezett hulladékot lehet előállítani. Egyes különleges hulladékokat leginkább műanyag adagolásával lehet megkötni. Néhány helyen fém szilárdító anyagokat is alkalmaznak. Ezeket az alacsony olvadáspontú fémekeket általában a reprocesszáló üzemek hulladékának a megszilárdításához használják

A szilárdítás- kondicionálás után a hulladékokat [minősítik](#), majd temetik.

A radioaktív hulladék-tárolók két fő csoportja:

[a felszín közeli,](#)  
[és a mélységi tárolók](#)

<i>helyszín</i>	<i>környezet</i>	<b>Nagy aktivitású és/vagy hosszú élettartamú hull.</b>	<b>Közepes aktivitású hulladék</b>	<b>Kis aktivitású hulladék</b>
<b>felszín közeli elhelyezés</b>	<b>száraz</b>	nem ajánlott	szilárd, becsomagolt formában lehetséges	
	<b>nedves</b>	nem ajánlott	szilárd, becsomagolt formában lehetséges, de több műszaki gáttal	
<b>elhelyezés bányákban v. sziklaüregekben</b>	<b>száraz</b>	lehetséges, a körülményektől függően	szilárd, esetleg csomagolt formában lehetséges	
	<b>nedves</b>	nem ajánlott	szilárd, csomagolt formában lehetséges	
<b>elhelyezés mély geológiai alakzatokban</b>	<b>száraz</b>	szilárd, becsomagolt formában lehetséges		
	<b>nedves</b>	szilárd, becsomagolt formában lehetséges, de több műszaki gáttal	alkalmazható, de a szükségesnél esetleg szigorúbb	



Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

87

aktivitású (LLW) és nagyaktivitású (HLW) radioaktív hulladékok lehetséges elhelyezése Magyarországon

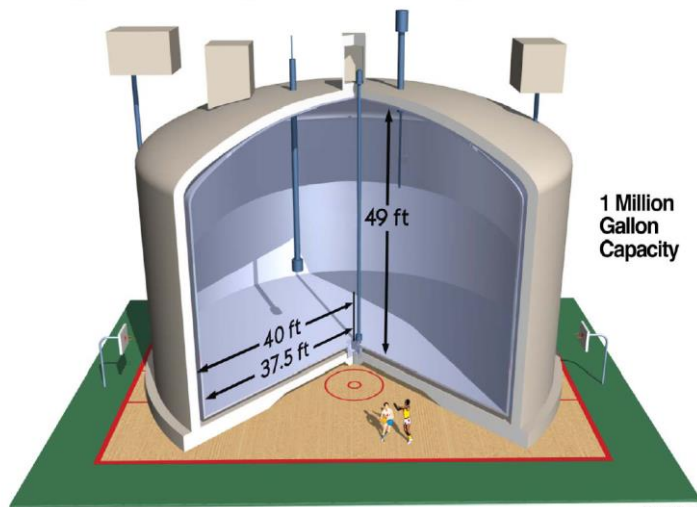


Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

88

## Hanford High-level Waste Radioactive Underground Storage Tanks are Large



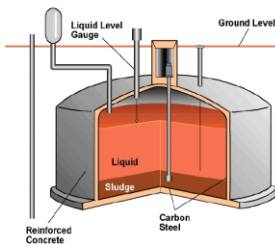
Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

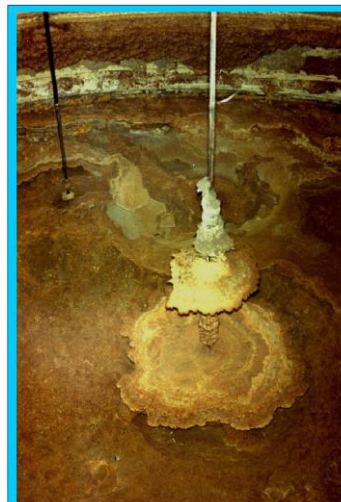
A97020277.1

89

## Single-Shell Tanks



- 149 Tanks Constructed 1943-64
- ~210 m<sup>3</sup> to 3,800 m<sup>3</sup> Capacity (55 kgal to 1 Mgal)
- Bottom of Tanks at Least 50 m (150 Feet) Above Groundwater
- No Waste Added to Tanks Since 1980
- Tanks Currently Contain:
  - ~132,500 m<sup>3</sup> (35 Mgal) of Salt Cake, Sludge, and Liquid
  - ~407 x 10<sup>16</sup> Bq (110 MCi)
- 67 Are Assumed to Have Leaked ~3,800 m<sup>3</sup> (~1 Mgal)

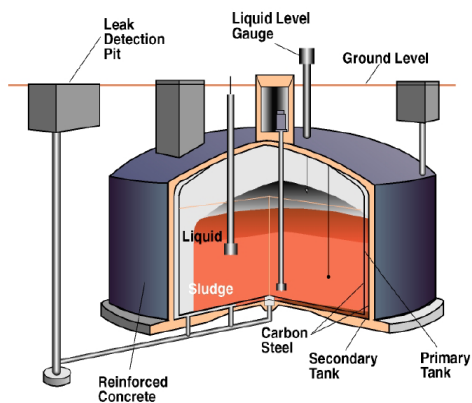


Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

90

## Double-Shell Tanks



- 28 Tanks Constructed Between 1968-86
- ~3,800 m<sup>3</sup> to 4,300 m<sup>3</sup> (1 to 1.14 Mgal) Capacity
- Tanks Currently Contain
  - ~ 72,000 m<sup>3</sup> (19 Mgal) of Mostly Liquids (Also Sludges and Salts)
  - ~ 296 x 10<sup>16</sup> Bq (80 MCi)
- None Have Leaked

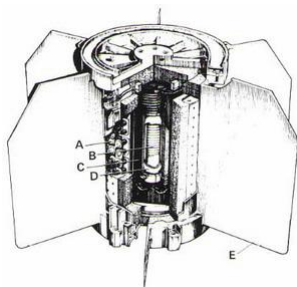
Dr. Pátzay György

Radiokémia-VI.

91

### 3. Egyéb radioaktivitást alkalmazó energiatermelési formák

**Termoelektromos generátor** (Nuclear Cell, Atomic battery, Radioisotope battery)



- A - Termoelektromos elemek
- B - Radioaktív üzemanyag kapszula
- C - Hőáryékolás
- D - Üzemanyag tárcsák
- E - Hőelvezető bordák

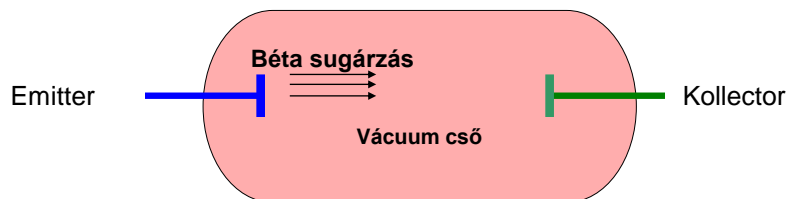
Gyakoribb izotópok:

1. Plutónium-238 ( $^{238}\text{Pu}$ )
2. Amerícium-241 ( $^{241}\text{Am}$ )
3. Polónium-210 ( $^{210}\text{Po}$ )
4. Stroncium-90 ( $^{90}\text{Sr}$ )
5. Cérium-144 ( $^{144}\text{Cs}$ )

Izotóp	Felezési idő (év)	Watt/g (termikus)
Polónium-210	0.378	141
Plutónium-238	86.8	0.55
Cérium-144	0.781	25
Stroncium-90	28.0	0.93
Cúrium-242	0.445	120

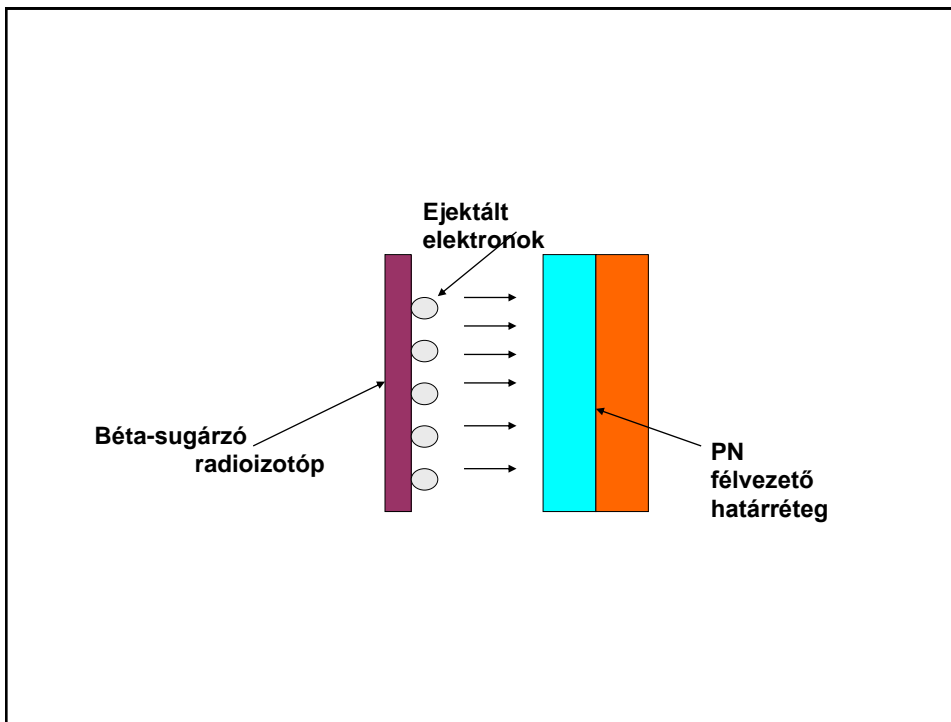
## Fontosabb típusok

### 1. Nagyfeszültségű cella (béta-sugárzókra)



Bétavoltaikus cella.

- nagyfeszültség
- $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^3\text{H}$
- 24W/kg 10éves műveleti ciklus, 25%-os hatásfok.



## 2. Alacsonyfeszültségű cella

Három különböző elvet alkalmaznak:

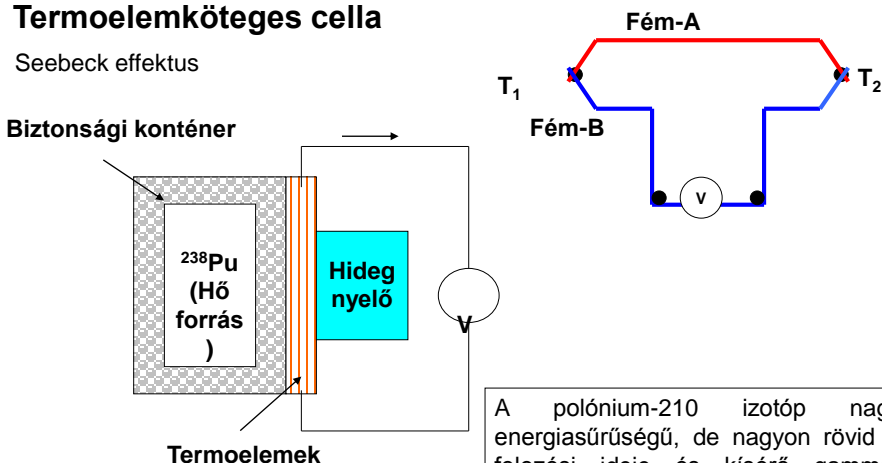
- Termoelemtöteges módszer (hő hatására áram generálódik)
- Ionizált gázos módszer (ionizált gáz áramlik két eltérő fém között és áramot indukál)
- Foszforos módszer (a sugárzást fénné alakítják, majd a fényt fotoelektromos átalakítással árammá)

1V, mikroamper



### Termoelemköteges cella

Seebeck effektus



**Biztonsági konténer**

**238Pu (Hő forrás)**

**Hideg nyelő**

**Termoelemek**

**Fém-A**

**Fém-B**

**T<sub>1</sub>**

**T<sub>2</sub>**

**V**

A polónium-210 izotóp nagy energiasűrűségű, de nagyon rövid a felezési ideje és kísérő gamma-sugárzása van.

1kg tiszta <sup>210</sup>Po 95 mm élhosszúságú kocka és kb. 63.5 kW hőteljesítménye van (~140 W/g),

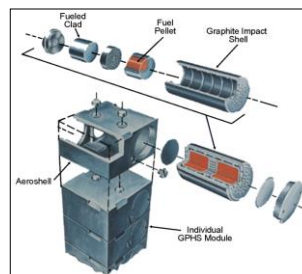
- 3-7% hatásfok
- <sup>210</sup>Po, nagyobb feszültség, 140 watt/g
- <sup>238</sup>Pu kisebb feszültség, 0,55 watt/g

### Alkalmazások

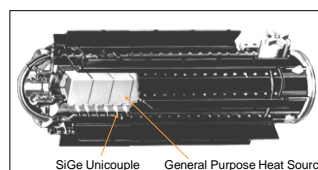
- űrhajók, műholdak energiaforrása
- pacemakerek energiaforrása
- emberektől távoli állomások energiaforrása (obszervatórium stb.)
- elektronikus berendezések hordozható energiaforrása

## Radioizotóp energiaforrás részei

- Pu-238 (generates decay heat)
  - Alfa-sugárzó, 87-év felezési idő
  - Nem hadi anyag
  - Nagymértékben oldhatatlan
- Ir burkolat (bezárja a forrást)
  - Konténment (normális vagy baleseti körülményekre)
  - Magas olvadási pont– termikus védelem
  - Duktilis – behatással szemben
- Grafit hőközlő (védi az izotópot és a burkolatot)
  - Védőréteg– védelem
  - Szigetelő – védi a burkolatot ismételt behelyezéskor
  - Légrés– gyulladást gátolja ismételt behelyezéskor
- Konverter (hő→elektromos átalakító)
  - Termoelektromos egység – reális, de alacsony hatásfok (7%)
  - Stirling motor– magas hatásfok (20-25%), fejlesztés alatt
- Radiátor (a felesleges hőt sugározza ki)



Általános hőforrás modul



Radioizotópos termoelektromos generátor

## Light-Weight Radioisotope Heater Unit (LWRHU)



1 Watt, 1.8 gm Pu-238

### Recent LWRHU Flights

**Cassini (117 LWRHUs)**

**Mars Pathfinder-Sojourner (3)**

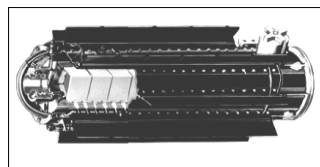
**Galileo (120)**

# Radioisotope Power System Development

(100 Watt Generator Modules for Future Missions)

## Multi-Mission RTG

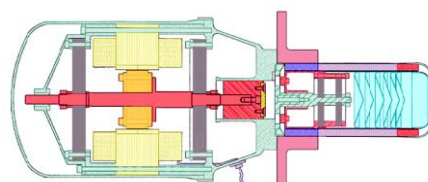
- Based on thermoelectrics used in past NASA missions
  - Silicon Germanium for Voyager, Galileo, Ulysses and Cassini or
  - Lead Telluride/TAGS for Pioneer, Viking, NIMBUS and ALSEP
- Use 8 heat source modules (4 kgs of Pu-238)
- Procurement initiated
  - Request for Proposals - June 2002
  - Contractor selection - Fall 2002



Radioisotope Thermoelectric Generator

## Radioisotope Stirling Generator (RSG)

- Based on demonstrated technology
  - Terrestrial engine life tests
  - Key component life tests
  - Cryocoolers flown in space
- Use 2 heat source modules (1 kg of Pu-238)
- Procurement completed
  - Phase 1 conceptual designs complete
  - Contractor selected - Lockheed Martin Astronautics
  - Phase IIA Engineering Unit underway - May 2002



Stirling Engine

Name & Model	Used On (# of RTGs per User)	Maximum output		Radio-isotope	Max fuel used (kg)	Mass (kg)
		Electrical (W)	Heat (W)			
SRG*	in prototype phase, <a href="#">MSL</a>	~110 (2x55)	~500	<sup>238</sup> Pu	~1	~34
MMRTG	in prototype phase, <a href="#">MSL</a>	~110	~2000	238Pu	~4	<45
GPHS-RTG	Cassini (3), New Horizons (1), Galileo (2), Ulysses	300	4400	238Pu	7.8	55.9-57.8
MHW-RTG	LES-8/9, Voyager 1 (3), Voyager 2 (3)	160	2400	238Pu	~4.5	37.7
SNAP-3B	Transit-4A(1)	2.7	52.5	238Pu	?	2.1
SNAP-9A	Transit 5BN1/2 (1)	25	525	238Pu	~1	12.3

Name & Model	Used On (# of RTGs per User)	Maximum output		Radio-isotope	Max fuel used (kg)	Mass (kg)
		Electrical (W)	Heat (W)			
SNAP-19	Nimbus-3 (2), Pioneer 10 (4), Pioneer 11 (4)	40.3	525	238Pu	~1	13.6
Modified SNAP-19	Viking 1(2), Viking 2(2)	42.7	525	238Pu	~1	15.2
SNAP-27	Appolo 12-17 ALSEP (1)	73	1480	238Pu	3.8	20

--	--	--	--	--	--	--