

Akademie věd České republiky
Ústav teorie informace a automatizace, v.v.i.

Academy of Sciences of the Czech Republic
Institute of Information Theory and Automation

RESEARCH REPORT

P. Pecha, E. Pechová

K otázkám hodnocení radiologických důsledků mimořádných úniků radionuklidů ze skladů vyhořelého jaderného paliva

No. 2367

December 15, 2017

ÚTIA AV ČR, P. O. Box 18, 182 00 Prague, Czech Republic

Tel: (+420) 266052009, Fax: (+420) 286890378, Url: <http://www.utia.cas.cz>,

Email: utia@utia.cas.cz

Anotace

V oblasti mimořádných úniků z jaderných zařízení je pozornost soustředěna na ty radionuklidy, které mají podstatnou radiotoxicitu pro populaci. Existuje celá škála hypotetických mimořádných úniků, které je nutno analyzovat a výsledky analýz předkládat k procesu povolovacího řízení pro dokladování splnění bezpečnostních kritérií. Přitom je třeba simulovat potenciální mimořádné zdroje úniku škodlivin z hlediska různých časových intervalů v kampani jaderného paliva od jeho zavážení, regulérního vyhořívání až po ukládání vyhořelého paliva do přechodných skladů s výhledem transportu do hlubinných úložišť.

1. Význam zahrnutí izotopů s dlouhými poločasy rozpadu do hodnocení radiologických dopadů úniků do životního prostředí

Při vývoji kódu HARP (Pecha et al., 2015) pro odhadování vlivu radiologických důsledků nehod byly téměř výhradně hodnoceny mimořádné události s okamžitým nástupem během některé fáze normálního provozu jaderného zařízení. V tomto případě byly uvažovány hlavně krátkodobé nuklidy s poločasy rozpadu řádově od minut do několika desítek roků, které se uplatňují již krátce po odstavení reaktoru. Takto byly připraveny analýzy do provozních bezpečnostních zpráv, kdy byly propočítávány jednotlivé DBA (Design Bases Accidents) doporučené v příslušných Regulatory Guides a posléze předepsané státním dozorem nad jadernou bezpečností. Obvykle šlo o hypotetické incidenty mající za následek nutnost spouštění neodkladných opatření na ochranu obyvatelstva v zóně havarijní ochrany (řádově s rozsahem několik málo desítek kilometrů). Systém HARP byl testován pro mnoho desítek takových scénářů (Pecha, P. and Pechová, 2013) a výsledky obálkových scénářů byly po částech srovnávány s některými zahraničními kódy (COSYMA, RODOS, NAME 4, PC-CREAM, ADMS). Jedním z hlavních úkolů takových analýz v horizontu od okamžiku vzniku problému během normálního provozu až po mimořádné úniky z úložiště vyhořelého paliva s možným nástupem až v řádu desítek či stovek let po zastavení jaderné reakce je vytvoření rozsáhlé databáze zdrojových členů environmentálního systému HARP. Byly sestaveny grupy radionuklidů významné pro jednotlivé typy nehod a specifické pro úniky nastupující krátce po odstavení reaktoru v samém počátku vzniku nehody až po trvání úniku v horizontu několika dní. Nicméně poněkud neprobádanou zůstala právě oblast postulovaných nehod ve skladech (bazénech a pak úložištích) vyhořelého paliva. Zde se předpokládá, že krátkodobé nebezpečné nuklidy se již rozpadly na zanedbatelné úrovně a počáteční inventář vyhořelého paliva klesá s časem uskladnění (řádově roky). Na významu nabývají nuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, které jsou sice nevýznamné v časných fázích nehody, ale jejich relativní důležitost roste (převažuje) u druhého typu nehod souvisejících s mimořádnými úniky ze skladů vyhořelého jaderného paliva.

Je tedy nutné revidovat implicitní grupy radionuklidů a rozšířit je o typické postulované mimořádné úniky ze skladů vyhořelého paliva. K únikům aktivity může hypoteticky dojít již ve fázi překládání horkého paliva do přechodného chladicího tanku. Iniciační události v důsledku nejrozličnějších příčin jako ztráta chlazení vyhořelé kazety s obnažením pokrytí paliva a rychlou oxidací zirkonového povrchu, pád sudů s palivem při přepravě až po málo pravděpodobné seizmické události mohou vést k nadprojektovým nehodám s vážnými radiologickými následky. Postupem času dochází ke snižování vývinu tepla ve vyhořelém palivu a v řádu let nabývají na významu radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu. Případně obnažený povrch paliva v této fázi pravděpodobně nepovede k destrukci pokrytí palivové tyče. Nemůže však být vyloučen pád palivového souboru v úložišti resp. deformace konstrukčních struktur vedoucí k možným parciálním únikům. Je nutno uvažovat (byť spekulativně) další iniciační události jako např. vzniklé netěsnosti sudu v důsledku zásahu střelou, nehody při přepravě nebo dokonce destruktivní vlivy extrémní meteorologické situace

(tornádo). Po uložení do hlubinného úložiště musí být pravděpodobnost průniku radioaktivity do životního prostředí zcela zanedbatelná.

Inventář radionuklidů se po několika letech v přechodných skladech jaderného paliva podstatně mění. Záleží na původním stupni vyhoření a na délce vymírání radionuklidů počínaje odstavením reaktoru. Vyhořelé palivo obsahuje široké spektrum radionuklidů. Většina z nich je krátkodobých, u jiných je zastoupení v inventáři natolik nízké, aby případná kontaminace představovala významnější hrozbu. Dozorový orgán EPA dále uvádí dolní mez 20 roků pro poločas radioaktivního rozpadu, od kterého by se dlouhodobé nuklidy měly uvažovat. Lze ale nalézt výjimku pro Pu-241 a Cm-244, které sice mají malou podlimitní hodnotu rozpadu, ale mají vysoké zastoupení v inventáři vyhořelého paliva a dále jsou rodiči význačnějších radionuklidů v rozpadové řadě pod nimi. Z tohoto důvodu by se také měly uvažovat rozpadové řady 4n+2 uranová a 4n+3 aktiniová. Vlastní EPA limit je definován poměrem:

$$EPA \text{ limit} = [Aktivita \text{ v jednotkách Ci}] / [MTU (\text{tuny počáteční vsázky štěpného uranu})]$$

V literatuře jsou definovány například standardní zdrojové členy pro vyhořelé palivo starší než 10 let od skončení jaderné reakce (od odstavení resp. kampaňové výměny).

Postupně se ve scénářích vynořuje nová významná grupa dlouhodobých nuklidů. Na různých pracovištích jsou prováděna třídění (screening testy) s cílem odhalit parciální příspěvky jednotlivých radionuklidů k totálním dávkám. Relevantní nuklidy pak pocházejí ze skupin štěpných a aktivačních produktů a transuranů (s podgrupou aktinidů). Tuto situaci dokumentuje Tabulka 1, která ukazuje zcela rozdílnou situaci mezi zdrojovým členem pro těžkou nadprojektovou havárii typu ST2 (databáze zdrojových členů systému RODOS) a postulovanými úniky z úložišť vyhořelého jaderného paliva. V prvním případě jde o zcela spekulativní nepravděpodobný katastrofický únik s fatálními následky, kdy se do životního prostředí dostávají až procenta radioaktivity obsažené v inventáři aktivní zóny. Situace si vynutí zavedení okamžitých neodkladných opatření (ukrytí, rozdání jodových tablet, evakuace z nejohroženějších sektorů) a v pozdější fázi by bylo nutno uvažovat o dlouhodobějším vysídlení z nejvíce kontaminovaných oblastí. Ale i takové hypotetické neštěstí bylo nutno analyzovat, aby se získala představa o bezpečnostních otázkách v havarijní přípravě. Na pracovním workshopu nazvaném MELK II byly v minulosti prezentovány i příspěvky získané českým kódem HAVAR (Pechova, E., 2003) – rodičovský produkt současného kódu HARP.

Tabulka 1: Ukázka dvou rozdílných zdrojových členů: Těžká nadprojektová havárie typu ST2-LOCA a únik aktivity při nehodě při transportu vyhořelého paliva do úložiště

Těžká nadprojektová havárie ST2			Typický únik: Úložiště vyhořelého paliva		
Nuklid	Uniklá aktivita (Bq)	Poločas rozpadu	Nuklid	Uniklá aktivita (Bq)	Poločas rozpadu
.....					
.....					
.....			H-3	~ 2.0E+11	12.28 r

Kr-87	~ 1.0E+18	76.3 min	C-14	~ 4.0E+03	5730 r
Sr-90	~ 1.0E+16	28.6 r	Kr-85	~ 3.0E+12	10.72 r
Mo-99	~ 1.0E+18	66.02 h	Sr-90	~ 6.0E+07	28.6 r
Ru-103	~ 1.0E+18	39.35 d	I-129	~ 2.0E+05	1.57E7 r
I-129	<<	1.57E7 r	Cs-137	~ 9.0E+07	30.17 r
I-131	~ 5.0E+18	8.04 d	Pu-238	~ 3.0E+05	87.75 r
Te-132	~ 1.0E+18	78.2 h	Pu-239	~ 1.0E+04	24131 r
Xe-133	~ 5.0E+18	5.24 d	Pu-240	~ 2.0E+04	6569 r
Cs-137	~ 1.0E+17	30.17 r	Am-241	~ 2.0E+05	433 r
Ba-140	~ 1.0E+17	12.79 d	Am-243	~ 2.0E+05	7380 r
La-140	~ 1.15E+16	40.22 h	Cm-244	~ 6.0E+04	18 r
.....			Cm-245	~ 7.0E+04	8500 r
.....					
.....					

Ve druhém případě na pravé části Tabulky 1 jsou zobrazeny typické očekávané aktivity unikající ze skladu vyhořelého paliva. Tyto aktivity jsou mnohořádově nižší než v prvním případě a jejich nebezpečnost bude nižší a navíc lokálně omezená. Nicméně vzhledem k tomu, že životní prostředí by bylo vystaveno dlouhodobým účinkům řádově stovek roků, mohou být i tyto nízké aktivity významné a je nezbytné provést detailní analýzu.

Dva nuklidy ze skupiny štěpných produktů Cs-137 a Sr-90 zodpovídají za podstatnou část vývinu tepla v první periodě po uložení. Postupně se však jejich podíl s rozpadem snižuje a zvyšuje se relativní podíl dlouhožijících aktinidů, které jsou pak v dlouhém časovém horizontu (stovky let) kompletně zodpovědné za radiologické riziko. Vývin tepla podstatně padá ve srovnání s počáteční periodou. V pozdějších periodách však nastupuje další efekt vycházející z faktu, že transurany z řady aktinidů mají podstatně vyšší konverzní dávkové faktory pro ingesci a hlavně pro inhalaci. Tento fakt dokumentuje Tabulka 2 převzatá z (Westlen, 2007). Aktinidy si tak zachovávají toxicitu nad referenční úroveň po dobu zhruba 300 000 roků. Ze štěpných produktů je závažná ingesce I129 představující podstatnou zátěž způsobenou vysokými úvazky dávky na štítnou žlázu, které vzhledem k dlouhému poločasu rozpadu 1.61×10^7 roků hrozí po dlouhou dobu.

Tabulka 2: Konverzní faktory pro úvazky dávek z vnitřního ozáření dlouhodobých transuranů a štěpných produktů (převzato z Schwenk-Ferrero, 2013 – vychází z ICRP 1996)

Dose coefficients for important nuclides in spent nuclear fuel given for intake by ingestion and for inhalation in adult humans

Transuranic elements			Fission products		
Nuclide	Dose coefficient (nSv/Bq)		Nuclide	Dose coefficient (nSv/Bq)	
	Ingestion	Inhalation		Ingestion	Inhalation
²³⁷ Np	110	23 000	⁷⁹ Se	2.9	2.6
²³⁸ Pu	230	46 000	⁹⁰ Sr	28	36
²³⁹ Pu	250	50 000	⁹³ Zr	1.1	10
²⁴⁰ Pu	250	50 000	⁹⁹ Tc	0.64	4
²⁴¹ Pu	4.8	900	¹⁰⁷ Pd	0.037	0.085
²⁴² Pu	240	48 000	¹²⁶ Sn	4.7	28
²⁴¹ Am	200	42 000	¹²⁹ I	110	15
^{242m} Am	190	37 000	¹³⁵ Cs	2	3.1
²⁴³ Am	200	41 000	¹³⁷ Cs	13	9.7
²⁴² Cm	12	5200			
²⁴³ Cm	150	31 000			
²⁴⁴ Cm	120	27 000			
²⁴⁵ Cm	210	42 000			

The inhalation data are given for a moderate uptake rate. Data from ICRP 72 (1996) was used.

Základní otázkou výpočtových modelů je určení relevantní sady radionuklidů vstupujících do odhadů dlouhodobého radiologického rizika. V rámci řešených projektů jsou uváděna různá doporučení na volbu relevantní grupy dlouhodobých nuklidů s možnými závažnými účinky na populaci. V zásadě se jedná o výběr štěpných a aktivačních produktů a dále o transurany ze skupiny aktinidů. SPA Project (EUR 19132 EN) vybírá 10 štěpných a aktivačních nuklidů

C-14, Cl-36, Sr-90, Mo-93, Nb-94, Tc-99, Pd-107, Sn-126, I-129, Cs-135,

a 13 aktinidů z řad:

U-236→Th-232; Np-237→U-233→Th-229; Pu-242→U-238→U-234→Th-230→Ra-226;
Pu-239→U-235→Pa-231;

Obdobný poněkud podrobnější výběr použil japonský projekt (JNC, 2000) s podrobnější skupinou 23 aktinidů. V TEC DOC-1519 je popsán transport vyhořelého paliva v meziskladech ve formě transportních košů posléze ukládaných do kontejnerů CASTOR RBMK a transportovaných do hlubinného uložště. Je zde publikován údaj o inventáři radioaktivity v transportním koši ID 009, odkud pro představu uvádíme:

Isotope	Activity, MBq
Kr-85	5.10×10^5
Y-90	6.40×10^6
Sr-90	6.40×10^6
Rh-106	6.18×10^4
Ru-106	6.18×10^4
Cs-134	2.61×10^5
Cs-137	8.49×10^6
Ba-137m	8.49×10^6
Ce-144	2.43×10^4
Pr-144	2.43×10^4
Pm-147	1.70×10^6
Eu-154	1.18×10^5

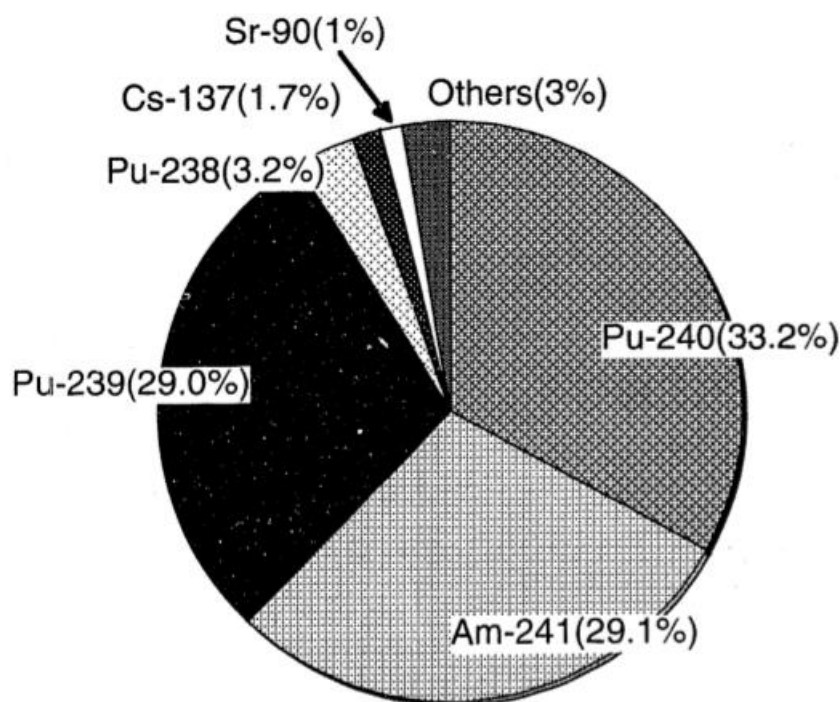
Pu-238	5.78×10^4
Pu-239	3.28×10^4
Pu-240	6.35×10^4
Pu-241	5.46×10^6
Am-241	1.22×10^5
Cm-244	1.76×10^4
Total activity of isotops in BASKET 3.83×10^7 MBq	

V témže přehledu je zmíněno spuštění projektu NPP Dukovany se společností Škoda JS, a.s. na výpočtech vyhořelého paliva uloženého v suchých obalových souborech (kontejnerech) CASTOR 440/84. Je počítán inventář pro 19 vytypovaných radionuklidů:

H-3, Kr-85, Sr-90, Ru-106, I-129, Cs-134, Cs-137, Ce-144, U-235, U-236, U-238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Cm-242, Cm-244

Pro konkrétní hypotetickou nehodu je otázkou dalšího hodnocení, jaké zlomky z inventáře sudu mohou uniknout a tak definovat zdrojový člen úniku.

Odhady spektra unikajících nuklidů při nehodách s vyhořelým palivem mohou být různě detailní, kdy se berou v úvahu shora zmíněné EPA limity. Nicméně zjednodušování by se mělo zastavit u minimální grupy. Obrázek 1 převzatý z (Barnard, 1993) ukazuje takovou minimální grupu radionuklidů, nejvíce zastoupených v případném úniku (střední hodnoty za 10000 roků).



Obrázek 1: Zastoupení radionuklidů v případném úniku (střední hodnoty za 10 000 roků).

Otázce bezpečného ukládání vyhořelého jaderného paliva se detailně věnuje Německo v souvislosti s jeho odklonem od jaderné energetiky. Provozní licence pro všechny jaderné elektrárny bez výjimky vyprší do konce roku 2022. Od původních úvah o přepracování odpadu v zahraničí s možným návratem přepracovaného plutonia do palivového cyklu bylo v roce 2005 upuštěno. Přímé ukládání jaderného odpadu do vymíracích nádrží s pozdějším transportem do hlubinných úložišť se tak stalo jedinou zákonnou možností hospodaření s vyhořelým palivem. Práce (Schwenk-Ferrerro, A, 2013) se detailně věnuje odhady inventářů vyhořelého paliva a jeho izotopického složení. Výpočty ukazují, že po dosažení rovnováhy v provozu by se mohlo objevit kolem 51 aktinidů a více než 250 štěpných produktů. Simulační experimenty odhadují celoněmecký inventář vyhořelého paliva do roku 2022. Určují se unikající frakce jednotlivých grup nuklidů při postulovaných nehodách ve skladech vyhořelého paliva s následnými odhady radiologického rizika. Z této publikace přebíráme následující Tabulku 3, která ukazuje odhad relevantních radionuklidů v celoněmeckém inventáři vyhořelého paliva v roce 2022. Odhadované frakce z těchto hodnot mohou být využity při dosud neuvažovaných nadprojektových nehodách s extrémně nízkou pravděpodobností výskytu spojených s určitým stupněm destrukce v hlubinném úložišti v důsledku teroristického útoku nebo zemětřesení.

Tabulka 3: Vybraný izotopický inventář (tuny) dosažený v r. 2022 (vyhořelé palivo + horké zbytky) v Německu.

U-233	3.59E-05	Am-242m	2.77E-02
U-234	4.50E-01	Am-243	2.34E+00
U-235	8.41E+01	Cm-242	1.16E-03
U-236	4.21E+01	Cm-243	7.34E-03
U-237	4.79E-07	Cm-244	5.72E-01
U-238	9.58E+03	Cm-245	7.43E-02
Pu-238	3.05E+00	Cm-246	6.76E-03
Pu-239	7.10E+01	Cm-247	9.52E-05
Pu-240	3.66E+01	Cm-248	6.56E-06
Pu-241	9.91E+00	Bk-249	5.84E-10
Pu-242	1.01E+01	Cf-249	9.78E-08
Pu-244	9.92E-04	Cf-250	7.51E-09
Th-229	3.12E-09	Cf-251	5.90E-09
Th-230	1.30E-05	Cf-252	5.53E-11
Th-232	1.98E-05	Cs-134	8.74E-02
Pa-231	1.33E-06	Cs-135	5.43E+00
Pa-233	2.11E-07	Cs-137	1.04E+01
Np-237	6.21E+00	Sr-90	4.29E+00
Np-238	4.77E-09	Tc-99	9.28E+00
Np-239	2.02E-06	I-129	2.27E+00
Am-241	1.22E+01	Ru-106	3.22E-02
Am-242	3.30E-07		

Tento výběr může být vhodným vodítkem pro sestavování relevantního zdrojového členu případných úniků z úložišť. V (Schwenk-Ferrerro, A, 2013) jsou dále uváděny podrobnější fyzikální konstanty pro grupu izotopů plutonia:

Tabulka 4a: Poločasy rozpadu a základní vyzařování izotopů plutonia z grupy majoritních aktinidů

Isotope	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Half-life (y)	87.7	24 110	6 561	14.29	374 000
Radiations	α	α	α	β	α

Tabulka 4b: Poločasy rozpadu a základní vyzařování nejdůležitějších izotopů Cm, Np, a Am z grupy minoritních aktinidů.

Isotope	Np-237	Am-241	Am-243	Cm-243	Cm-244	Cm-245
Half-life (yr)	2 144 000	432.5	7 390	29.1	18.1	8 600
Radiations	α, γ	α, n	α, γ, n	α, γ, n	α, γ, n	α

Při kvantitativních úvahách je třeba respektovat ten fakt, že Cm243, Cm244 a Cm245 vznikají v relativně malém množství ve srovnání s Am241 a Np237.

Poznámka:

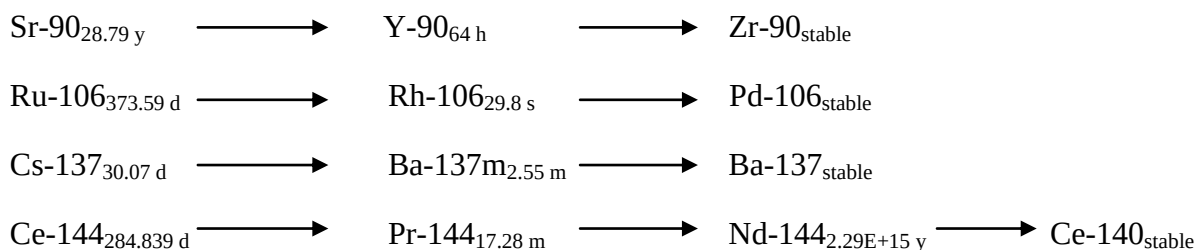
Termín “Major actinide“ se v oblasti jaderné fyziky zavádí pro plutonia a urany obsažené ve vyhořelém palivu. Termín “Minor actinide“ je naproti tomu zaveden převážně pro prvky neptunium, americium, curium, berkelium, a californium, které jsou vedlejšími produkty vznikajícími v reaktoru. Jsou produkovány v menších množstvích než “major“ aktinidy.

Tabulka 4c: Poločasy rozpadu a základní vyzařování nejzávažnějších štěpných produktů

Isotope	Tc-99	I-129	Cs-134	Cs-135	Cs-137	Sr-90
Half-life (y)	211 110	15 700 000	2.06	2 300 000	30.08	28.9
Radiations	β	β	β	β	β, γ	β

Během prvního roku po ukončení řetězové reakce zhruba 73 % celkové radioaktivity pochází od čtyř rozpadových řetězců zobrazených v Tabulce 5.

Tabulka 5: Rozpadové řady s hlavním příspěvkem k aktivitě štěpných produktů během prvního roku po ukončení řetězové reakce



Vysokou radiotoxicitu mezi dlouhodobými štěpnými produkty vykazují Tc-99, I-129 a Cs-135, přičemž první dva vykazují navíc vysokou mobilitu. Ze střednědobého hlediska je zcela dominantní radiotoxicita Sr-90 a Cs-137. Celkově více než 80 % aktivity během prvních 100 roků jde na vrub štěpných produktů. Potom vzrůstá relativní příspěvek aktinidů. Projevuje se predominantní vliv Pu-239, Pu-240 a Am-241 s pozdějším přesahem k izotopům Np-239, Pu-239, Pu-240 a Am-243. Po 10 000 letech se aktivita sníží zhruba 600 x vzhledem k počátečním úrovním.

2. Rozšíření databáze radionuklidů systému HARP o dlouhodobé transurany

Tabulka 6: Spent fuel ST_HARP-2017: Část Implicitní grupy dlouhodobých nuklidů

Nuklid	v HARP původní (Pechova E. , 2005)	v HARP nový od 2017
H-3	*	*
Kr-85	*	*
Sr-90	*	*
Ru-106	*	*
I-129	*	*
Cs-134	*	*
Cs-137	*	*
Ce-144	*	*
U-235	*	*
U-236	NE	*
U-238	*	*
Pu-238	*	*
Pu-239	*	*
Pu-240	*	*
Pu-241	*	*
Pu-242	NE	*
Am-241	*	*
Am-242m	NE	*
Am-243	NE	*
Cm-242	*	*

Cm-244	*	*
Cm-245	NE	*
Np-237	NE	*

* nuklid zařazen do databáze zdrojových členů

Bylo nutné rozšířit databázi konstant HAVDB00.DAT o příslušné fyzikální hodnoty a konverzní faktory. Tyto údaje jsou dále v příloze č.1 a 2.

3. Neurčitosti při stanovování zdrojových členů

Znalost vývoje časového izotopického složení ve vyhořelém palivu ve všech jeho fázích od vyjmutí z aktivní zóny až po budoucí permanentní uložení v hlubinných geologických úložištích je klíčovým faktorem při posuzování vlivu dlouhodobé radiologické a chemické toxicity na životní prostředí. Jde o co nejvěrnější predikci radionuklidů s respektováním obsažených neurčitostí definovaných jejich "nejlepšími" odhady (best estimated) a přidruženými konfidenčními intervaly vyjadřujícími možné náhodné fluktuace. Existují počítačové kódy (v převážné většině odvozené z produktu ORIGEN), které v první fázi berou v úvahu neurčitosti inventáře radionuklidů v závislosti na dosaženém vyhoření paliva a dále odhadují časový vývoj koncentrace izotopů. Přitom je modelováno šíření neurčitostí modelem včetně náhodného charakteru nukleárních dat (účinné průřezy, poločasy rozpadu). Tyto výpočty slouží jako vstupní data při analýze potenciálního nástupu úniku radioaktivity do životního prostředí a odpovídající konstrukci zdrojového členu úniku. Je zřejmé, že potom musí následovat vlastní modelování mechanismů, jak se radionuklidy mohou dostávat do životního prostředí, ať již na základě destrukce původních bariér proti průniku (mechanické poškození obálek - například při pádu kontejneru s vyhořelým palivem) nebo postupnou dlouhodobou plíživou ztrátou těsnosti bariér s následným rozrušováním uloženého paliva v důsledku vlivu radiolytických procesů na rozpustnost paliva (zvýšení mobility a migrace izotopů). Tyto problémy odkrývají další širokou oblast výzkumů. Jejich důležitost je podtržena odhady a výsledky expertů, že potenciálně možné odchylky v určení zdrojového členu úniku pro případy vyhořelého paliva mohou být až řádové.

4. Srovnání výsledků produktu HARP s evropským kódem COSYMA pro scénář s únikem dlouhodobých nuklidů

Kód COSYMA se osvědčil při obsáhlé validaci produktu HARP (Pecha a Pechová, 2013). V minulosti šlo převážně o mimořádné úniky radioaktivity, které bezprostředně přerušily běžný provoz jaderného zařízení. V tomto případě bylo nutné prověřovat radionuklidy unikající bezprostředně po havarijním odstavení aktivní zóny, jejichž aktivity jsou pro některé nehody enormní (viz například pravá část předchozí Tabulky 1). V této zprávě by měly být validovány jiné specifické scénáře související s potenciálními úniky z úložiště vyhořelého jaderného paliva (viz například levá část předchozí Tabulky 1). Přes některá omezení může

kód COSYMA sloužit jako vhodný a akceptovaný prostředek ke vzájemnému srovnávání výsledků obálkových scénářů úniku.

4.1 Sestavení scénáře úniku

Ve zjednodušeném scénáři je uvažováno přímočaré šíření gaussovske vlečky exhalací nad rovinným terénem, přičemž:

- výška úniku nad terénem je 15 metrů, nulová tepelná vydatnost vzdušin,
- atmosférická disperze podle modelu pro drsný stredoevropský terén KFK-Jülich,
- únik trvá 1 hodinu při rychlosti větru 2 m.s^{-1} a kategorii stability atmosféry F, bez deště,
- bez vlivu blízkostojících objektů na počáteční vznos vlečky.

Sestavení zdrojového členu nemá žádný reálný podklad, byl zvolen pouze pro co nejnázornější demonstraci vlivu dlouhodobých izotopů s různými fyzikálně-chemickými vlastnostmi (elementární forma, aerosolová forma, vzácné plyny) na disperzní a depoziční procesy. Zde byl původní záměr definovat grupu nuklidů se zcela minimálními radiologickými důsledky, například definovat hodinové úniky radioaktivity podle zprošťovacích úrovní aktivity tabelovaných ve Vyhlášce SÚJB č. 422/2016 Sb.

Zprošťovací úrovně: hodnota celkové aktivity, při jejímž nepřekročení se kontaminace radionuklidem zpravidla považuje za zanedbatelnou. Zde jsme si vědomi, že to neplatí pro sumární vliv všech radionuklidů z úniku. Lze však očekávat, že se přiblížíme k spodnímu odhadu radiologických důsledků celého úniku.

Pokud byly do zdrojového členu použity tabelované zprošťovací úrovně, výpočty z programu HARP například poskytovaly úvazky efektivní dávky pro dospělé zhruba na úrovni několika nanoSv v bližším okolí zdroje. V produktu COSYMA byl zjištěn spodní limit pro zadávání úrovně unikající aktivity a bylo třeba zvýšit hodnoty unikajících aktivit o zhruba 5 až 6 řádů. Pořád však lze tvrdit, že výsledné dávkové úvazky budou nízké (například ve srovnání, že bychom aktivity zadali jejich tabelovanými D-hodnotami, které by naopak daly představu o prahu k závažné tkáňové reakci).

Testovací zdrojový člen s dlouhodobými nuklidy (přímocharý hodinový únik) byl zvolen jako:

nuklid	uniklá aktivita (Bq.hod ⁻¹)	fyz.-chem. forma
Kr-85	1.00E+10	vzácný plyn
Sr-90	1.00E+10	aerosol
Ru-106	1.00E+10	aerosol
I-129	1.00E+10	elementární forma
Cs-134	1.00E+10	aerosol
Cs-137	1.00E+10	aerosol
Ce-144	1.00E+10	aerosol
U-235	1.00E+10	aerosol
U-238	1.00E+10	aerosol
Pu-238	1.00E+10	aerosol
Pu-239	1.00E+10	aerosol
Pu-240	1.00E+10	aerosol

Pu-241	1.00E+10	aerosol
Pu-242	1.00E+10	aerosol
Am-241	1.00E+10	aerosol
Am-243	1.00E+10	aerosol
Cm-242	1.00E+10	aerosol
Cm-244	1.00E+10	aerosol
Cm-245	1.00E+10	aerosol
Np-237	1.00E+10	aerosol

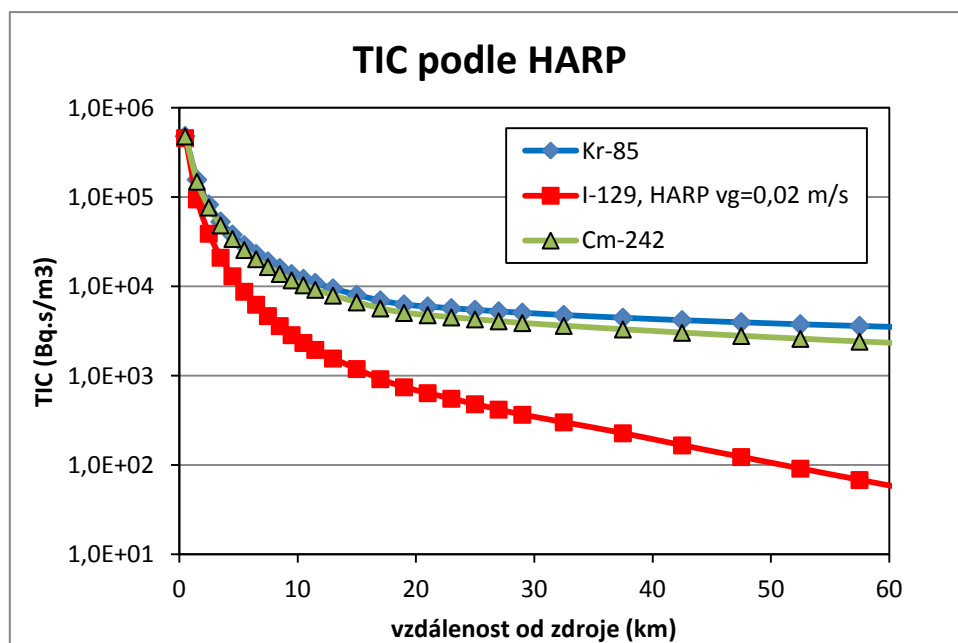
4.2 Rozšíření databáze konverzních koeficientů pro nové dlouhodobé nuklidy

Pro nově zahrnuté nuklidy z grupy transuranů byla databáze HAVDB00.DAT rozšířena o příslušné fyzikální parametry a hodnoty konverzních koeficientů (v Přílohách č. 1 a č. 2).

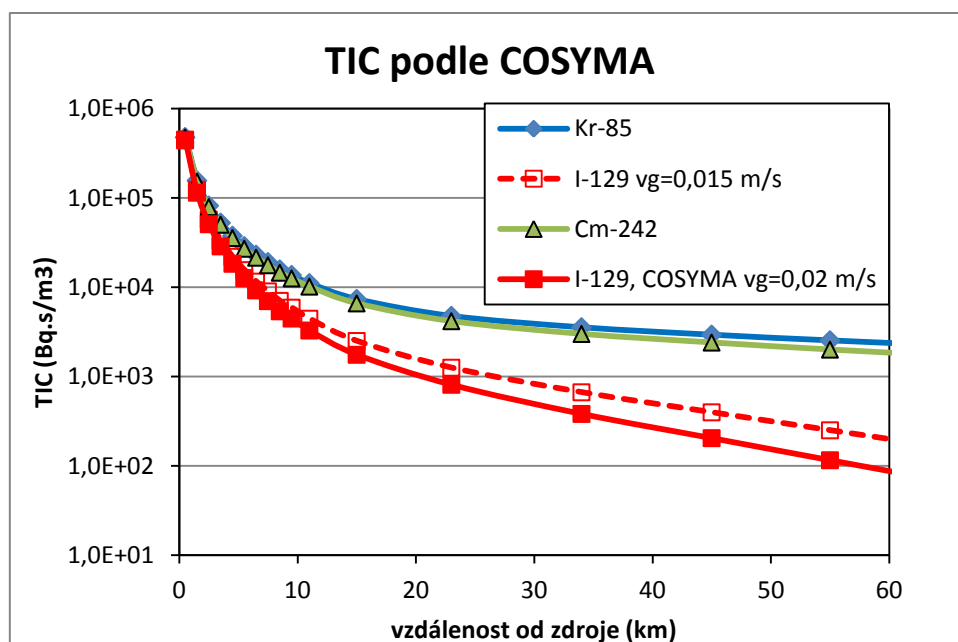
4.3 Některé výsledky srovnávací analýzy výpočetního kódu HARP s evropským produktem COSYMA

Z celé škály výstupů jsou dále srovnávány jen výstupy pro radionuklidy Kr-85 (vzácný plyn), I-129 (elementární fyzikálně-chemická forma jódu), Cs-137 a Cm-242 (oba posledně jmenované unikají do atmosféry ve formě aerosolů). Jsou zobrazovány 1-D výsledky - pod osou mraku ve směru šíření.

a) Časové integrály objemové aktivity TIC v přízemní vrstvě vzduchu

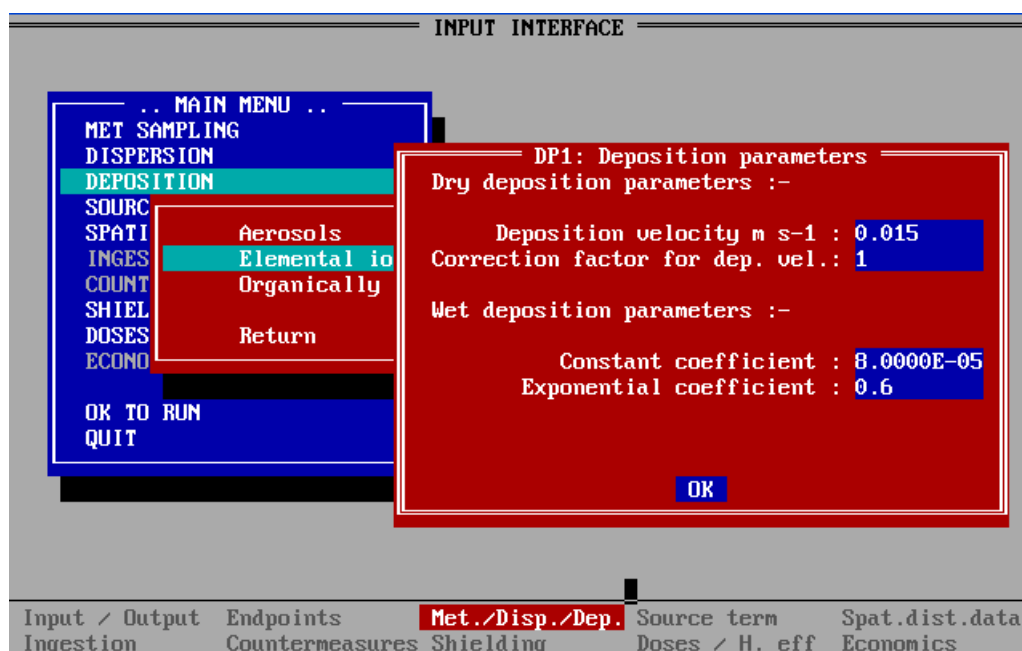


Obrázek 2: Výsledky TIC podle HARP ((hodnoty pro Cs-137 nejsou vykreslovány, protože jsou totožné s hodnotami pro Cm-242).

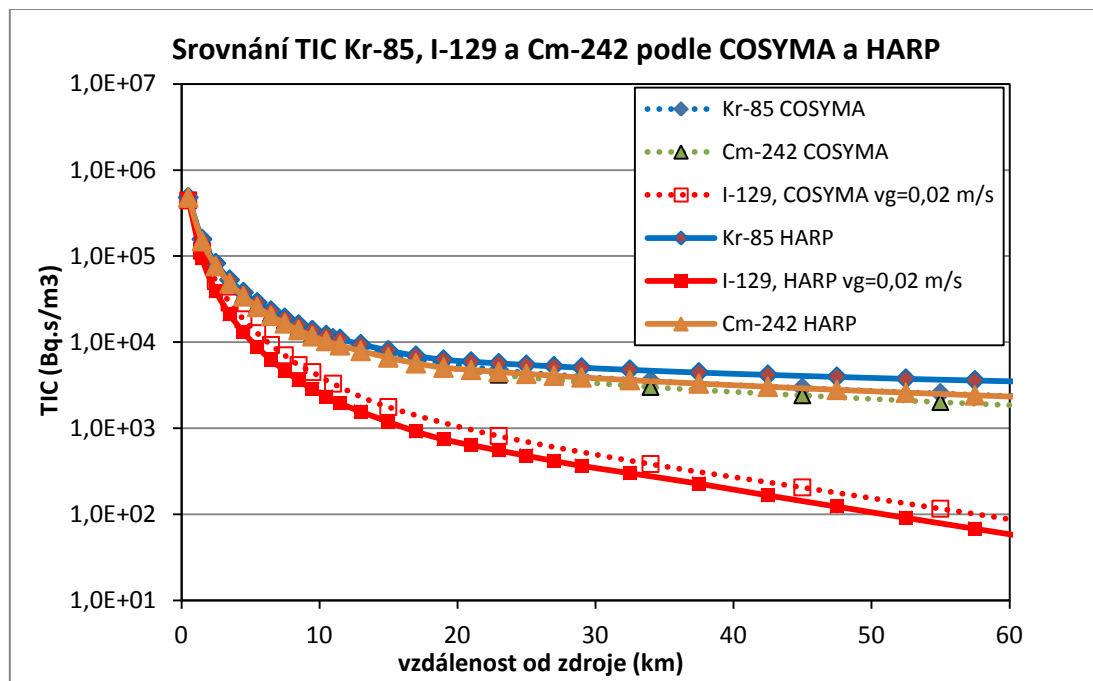


Obrázek 3: Výsledky TIC podle COSYMA ((hodnoty pro Cs-137 nejsou vykreslovány, protože jsou totožné s hodnotami pro Cm-242).

V původních výpočtech byla použita implicitní hodnota pro rychlost suché depozice elementárního jódu I-129 $v_g = 0.015 \text{ m/s}$, což odpovídá travnatému povrchu (čárkovaná červená křivka na obr. 3) - viz COSMA panel na obrázku 4. Pro HARP byl zadán jednotný typ zemského povrchu *agri* ($v_g = 0.020 \text{ m/s}$). Tato hodnota byla zadána i do výpočtů COSYMA (plná červená čára na obr. 3). Z následujícího obrázku 5 je vidět (tečkovaná a plná červená čára), jak se srovnávané křivky přiblížily. Takové opakování s alternativními vstupy může být chápáno jako úvod do citlivostních studií.

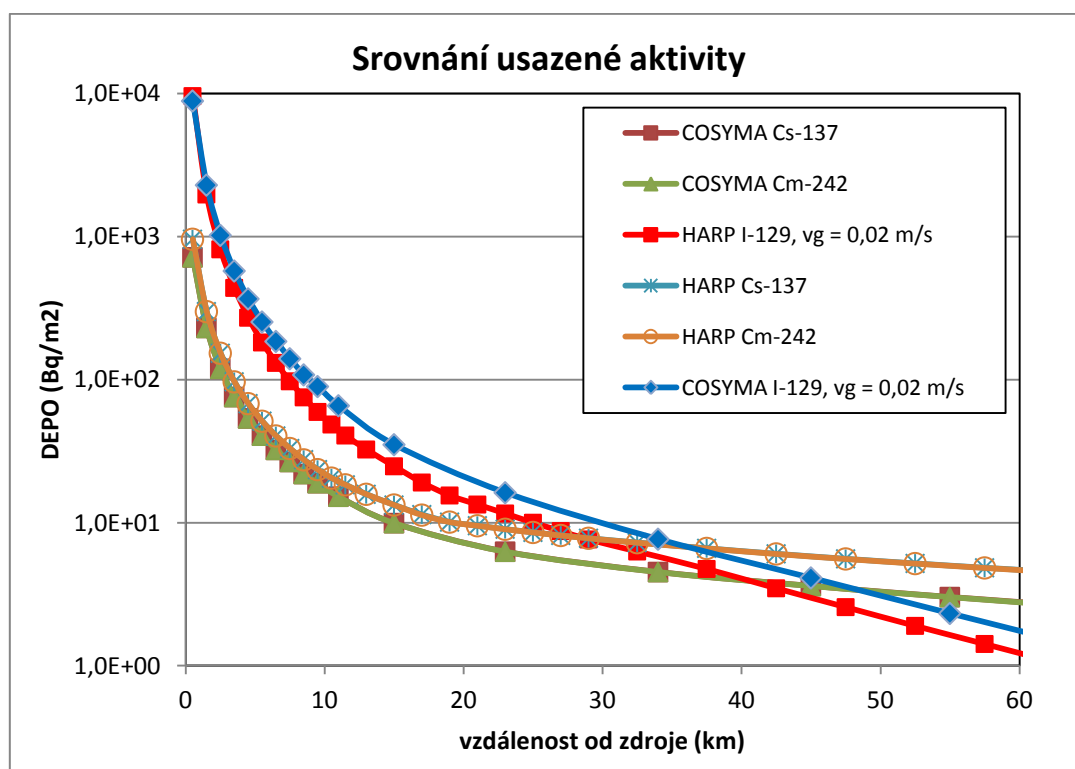


Obrázek 4: COSYMA vstupní panel „DEPOSITION“ s implicitní hodnotou rychlosti suché depozice I-129 $v_g = 0.015 \text{ m/s}$ (travnatý povrch).

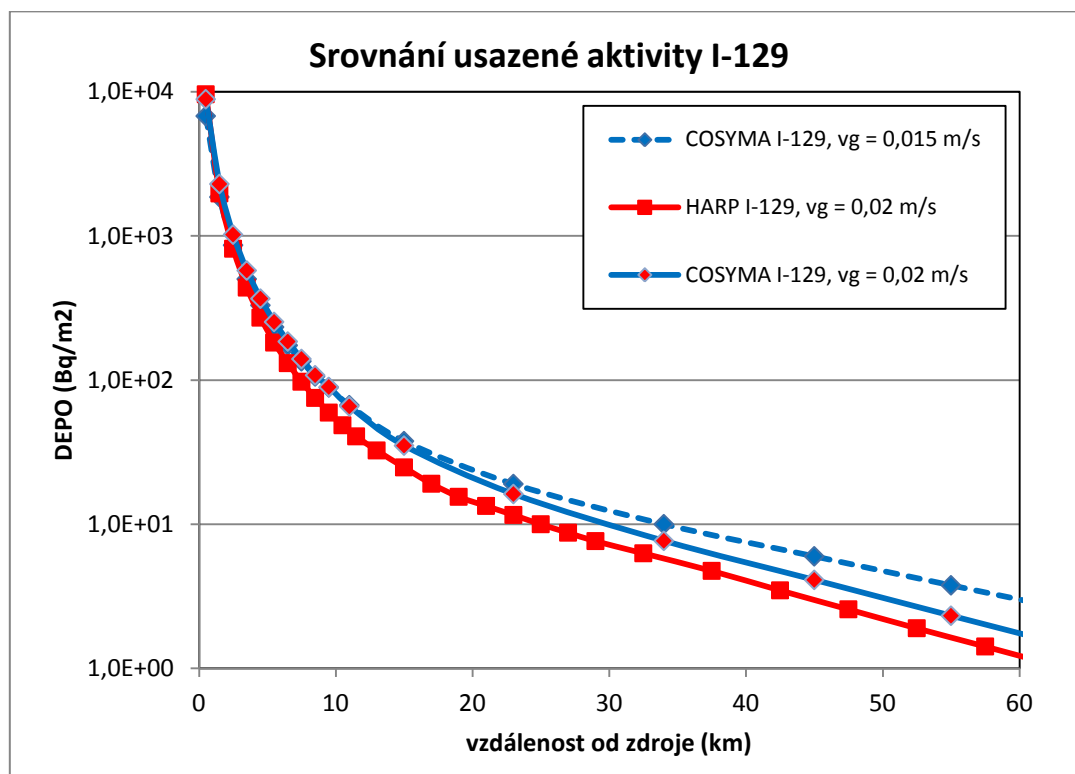


Obrázek 5: Výsledky srovnání prostorového průběhu hodnot TIC podle HARP (plné čáry) a COSYMA (tečkovaně).

b) Průběhy usazené aktivity DEPO pod osou mraku.

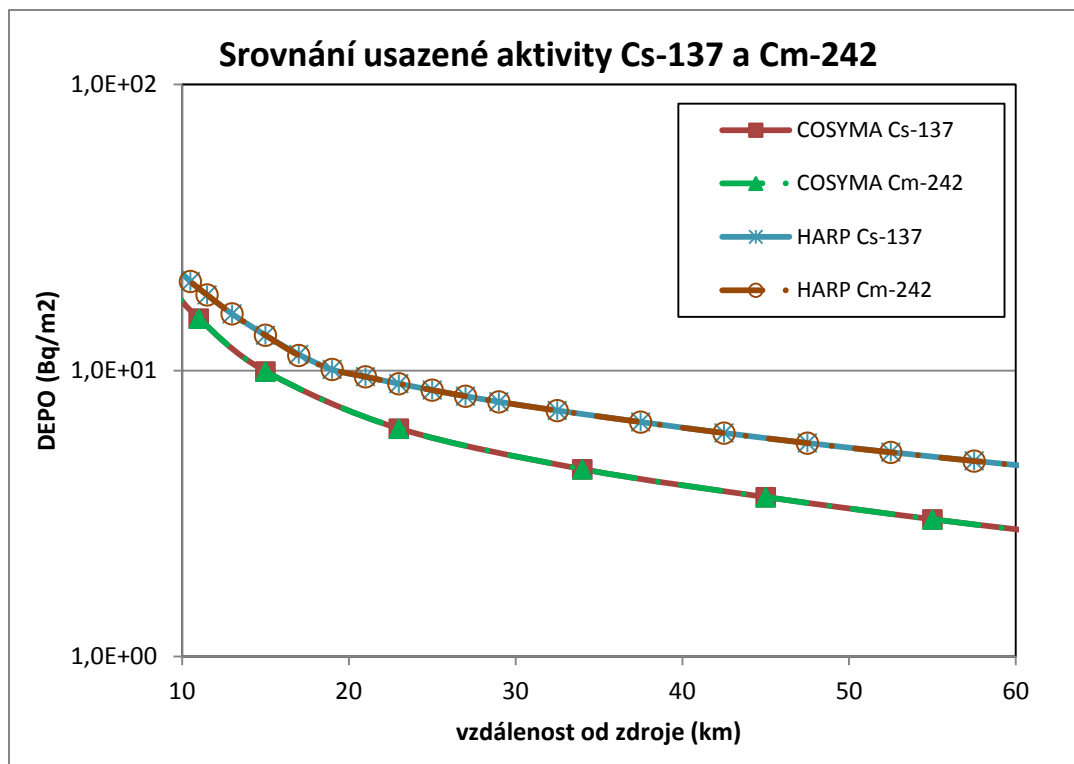


Obrázek 6: Výsledky srovnání prostorového průběhu hodnot DEPO pod osou postupujícího mraku podle HARP a COSYMA.



Obrázek 7: Detailnější rozbor difference hodnot obou kódů pro I-129. Je zřejmé, že pokud se počítá v obou kódech pro stejnou hodnotu rychlosti suché depozice $v_g = 0.020$ m/s, pak se vypočtené hodnoty přiblíží.

Následující obrázek 8 znázorňuje zvětšení části obrázku 5 pro oblast aerosolů Cs-137 a Cm-242 s cílem poukázat na (očekávanou) diferenci mezi oběma kódy, způsobenou různou hodnotou suché depozice $v_g = 0.0020$ m/s (HARP) a $v_g = 0.0015$ m/s COSYMA). Opakování výpočtů pro při stejném nastavení hodnot v_g zde není provedeno. Na tyto výsledky je opět možno nahlížet jako na část citlivostní analýzy.



Obrázek 8: Rozdíly pro aerosoly mezi výsledky pro HARP ($v_g = 0.0020\text{m/s}$) a COSYMA ($v_g = 0.0015\text{m/s}$).

5. Strategie srovnávacích analýz

V této fázi ukončujeme vzájemné srovnávání základních radiologických veličin, kdy je nezbytné dojít k prokázání jejich dobré shody. V tomto prvním kroku disperzní a depoziční submodel systému HARP počítá čtyři základní veličiny pro časovou fázi úniku, která končí v čase T_{end} s koncem přechodu mraku nad sledovanou oblastí. Shora popsaným schématem jsou pro každý nuklid n z úniku detailně generovány predikce čtyř základních řídicích veličin (3-D resp. 2-D diskretních polí v uzlech výpočtové sítě (x, y) ve výšce z nad terénem):

- $CAP^n(x, y, z; t)$ – objemové aktivity ve vzduchu (Bq.m^{-3}),
- $TIC^n(x, y, z=0; T_{end})$ – časový integrál objemové aktivity (Bq.s.m^{-3}) v přízemní vrstvě vzduchu v daném uzlu během časové periody $t \in <0; T_{end}>$,
- $DEP^n(x, y, z=0; T_{end})$ – usazená aktivita (Bq.m^{-2}) v uzlu během periody $<0; T_{end}>$ vztažená k T_{end} (počítá se z časového průběhu depozičního příkonu suché a mokré depozice),
- $TID^n(x, y, z=0; T_{end})$ – časový integrál aktivity (Bq.s.m^{-2}) usazené v uzlu během periody $<0; T_{end}>$.

K těmto čtyřem řídicím veličinám v časné fázi se pomocí dynamického ingesčního modelu ještě dopočítají i normalizované měrné aktivity v produktech a normalizované ingesční roční příjmy aktivity nuklidů pro jednotlivé věkové kategorie (vztažené ke dni spadu a pak dále alternativně pouze ke kořenovému transportu). Podstatné potom je, že jednoduchými časovými integracemi pro $t > T_{end}$ a přenásobováním různými faktory lze rychle a jednoduše

vypočítat i všechny ostatní odvozené radiologické veličiny v různých fázích nehody a lze také online testovat vlivy aplikací různých protiopatření jak v časné fázi, tak v pozdějších fázích.

Shrňme pro proceduru srovnávání:

1. V prvním kroku je spuštěn časově náročný výpočet čtyř řídicích veličin v časné fázi nehody v intervalu $t \in < 0; T_{end} >$.
2. Ve druhém kroku následuje jednoduché násobení tabelovanými hodnotami dávkových konverzních faktorů F případně u dlouhodobých dávek ještě časové integrály empirických rozpadových závislostí resp. zahrnutí migrace nuklidů z povrchu.

Právě druhý bod může být zdrojem dalších dohadů o konzistentnosti vzájemných výsledků. Podrobně se tomuto tématu věnuje příspěvek na konferenci (Pecha a Pechová, 2014). Potíž může být s odhalením implicitních hodnot použitých konstant a vztahů u cizího kódu (v tomto případě COSYMA). Různé kódy mohou generovat tzv. očekávané hodnoty, zatímco jiné sledují koncepci konzervativních odhadů a dávají potenciální hodnoty (bez faktorů setrvání, filtrace a stínění budovami, s konzervativními hodnotami konverzních dávkových faktorů apod.). Vlastní hodnoty konverzních dávkových faktorů jsou voleny podle různých edicí ICRP doporučení.

Nicméně nutná podmínka pro korektní srovnání je prokázání dobré shody vzájemných výsledků v prvním kroku, což v našem případě zde provedené analýzy HARP $\times$ COSYMA je zřejmé. Hodnoty (uspokojivě vzájemně srovnané) z prvního kroku jsou určující pro výpočet dávek resp. jejich úvazků podle různých cest ozáření a **v následujících vzorcích jsou zvýrazněny modrým orámováním**. Postoupíme-li dále ve druhém kroku k určování dávek resp. dávkových úvazků, je nutné přesně vědět, jak který model přistupuje k výpočtu těchto hodnot. Podrobné výpočtové vztahy jsou shrnuty v metodickém manuálu produktu HARP. Zde poukážeme na separaci prvního a druhého kroku, která se odráží ve výpočtových rovnicích na příkladu vnějšího ozáření z mraku a z depozice a vnitřního ozáření z inhalace kontaminovaného vzduchu (poslední dvě jmenované cesty ozáření hrají u dlouhodobých radionuklidů včetně transuranů dominantní úlohu). Zmíněna je i cesta ingesce.

- a) **Vnější ozáření fotony z radioaktivního oblaku** postupujícího nad terénem se obvykle používá přiblížení ponoření do polonekonečného izotropního mraku podle:

$$H_{oblak}^{a,n,o}(x,y;T_{end}) = \boxed{TIC^n(x,y,z=0;T_{end})} \cdot R_{oblak}^{a,n,o}$$

$H_{oblak}^{a,n,o}(x,y;T_{end})$... celková konzervativní potenciální dávka v (Sv) z ozáření z oblaku po odeznění úniku v čase T_{end} nad místem (x,y) na tkáň o ($o=1$ pro efektivní dávku) jedince z věkové kategorie a , který pobýval po celou dobu úniku v místě uzlu (x,y) na otevřeném prostranství

$TIC^n(x,y,z=0;T_{end})$ celkový časový integrál za čas T_{end} měrné aktivity nuklidu n v přízemní vrstvě vzduchu v místě (x,y)

$R_{oblak}^{a,n,o}$ dávkový faktor pro ozáření z oblaku od nuklidu $\underline{n}$ na orgán $\underline{o}$ (stanoven na základě polonekonečného modelu mraku) ($\text{Sv.m}^3.\text{Bq}^{-1}.\text{s}^{-1}$);

Veličina TIC byla tedy spočtena v prvním kroku, všechny ostatní vstupy mezi oběma srovnávanými kódy se musí adekvátně nastavit ve druhém kroku (dávkové faktory, případně další faktory pro normální životní rytmus jako lokační a stínící faktory a faktory setrvání).

b) Vnější ozáření fotony od radionuklidů usazených na zemském povrchu

Dávkový příkon $\dot{H}$ vyvolaný vteřinovým usazováním radioaktivity v důsledku suchého a mokrého vypadávání aktivity nuklidu $\underline{n}$ z mraku (Sv.s^{-1}) na orgán $\underline{o}$ jedince z kategorie $\underline{a}$ nacházejícího se v místě (x,y) , se v určitém časovém okamžiku $t \in <0 ; T_{end}>$ určuje podle vztahu:

$$\dot{H}_{povrch}^{a,n,o}(x,y;t) = \boxed{DEP^n(x,y,z=0;t)} \cdot R_{povrch}^{a,n,o}$$

$DEP^n(x,y,z=0;t)$... usazená aktivita nuklidu $\underline{n}$ v místě (x,y) a v čase t , která se počítá integrací přes τ časového průběhu depozičního příkonu suché a mokré depozice $SUMA^n(x,y)$ (v rámci časového segmentu úniku se bere konstantní) v intervalu $\tau \in <0 ; t>$

$R_{povrch}^{a,n,o}$ tabelovaný dávkový faktor ozáření od kontaminovaného povrchu pro nuklid $\underline{n}$ a orgán $\underline{o}$ jedince z věkové kategorie $\underline{a}$ ($\text{Sv.m}^2.\text{Bq}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

Celkovou dávku $H_{povrch}^{a,n,o}(x,y,z=0;T)$ v [Sv] za dobu $T=T_{end} + T_k$ od začátku depozice nuklidu $\underline{n}$ v místě (x,y) na tkáň $\underline{o}$ jedince z věkové kategorie $\underline{a}$, který pobývá celou dobu T v místě (x,y) , dostaneme integrací příslušných dílčích výrazů pro depoziční příkon - podrobně v (Pecha a Pechova, 2011). Pro účely demonstrace zmíněné separace vyjádříme dílčí příspěvek k dávce z depozice ΔH_{povrch} na intervalu $<T_{end}; T_{end} + T_k>$ podle:

$$\Delta H_{povrch} = \boxed{DEP^n(x,y,z=0;t=T_{end})} \cdot R_{povrch}^{n,o} \cdot (1 - \exp(-\lambda_{ef}^n \cdot T_k)) / \lambda_{ef}^n$$

Je zavedena efektivní konstanta λ_{ef} , která zahrnuje radioaktivní rozpad a přibližně též působení dalších mechanismů vedoucích k odstraňování radionuklidů ze zemského povrchu (vliv větrné erose, splachy do vodotečí, transport do hlubších vrstev půdy). U některých produktů je prováděna hlubší analýza ozáření od depozice a na příklad v systému RODOS je zaváděna korekce na odstínění záření v důsledku časové migrace usazovaného radionuklidu do půdy. Časově závislý korekční faktor $Y(t)$ se uvažuje ve tvaru :

$$Y(t) = a_1 \cdot \exp(-\lambda_{m1} \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\lambda_{m2} \cdot t)$$

Pro migrační konstanty se uvádějí hodnoty:

$$\lambda_{m1} = 1,01 \cdot 10^{-3} [\text{den}^{-1}]; \quad \lambda_{m2} = 0,0 [\text{den}^{-1}];$$

$$a_1 = 0,6; \quad a_2 = 0,5;$$

Tyto migrační konstanty byly odvozeny z měření externího ozáření deponovaného cesia po nehodě v Černobylu. Je zde zohledněno původní usazování jak suchou tak mokrou cestou. Pro jiné nuklidy zatím podobná data nejsou k dispozici, používá se však pro hrubé odhady i pro jiné prvky s dlouhým poločasem rozpadu. Jejich užitím se mohou výsledné dávky z depozice různit až řádově ve srovnání s $Y(t)=1$.

Migrační konstanty, časově závislé korekční faktory, alternativní vyjádření λ_{ef}^n neurčitosti v konverzních faktorech $R_{povrch}^{a,n,o}$ a další subjektivní volby vstupních hodnot výpočtů jsou potom zdrojem odchylek srovnávacích analýz v deklarovaném druhém kroku.

c) Vnitřní ozáření při inhalaci vzduchu obsahujícího radioaktivní příměsi (přímý průchod mraku nad terénem)

Dávkový příkon v $(Sv.s^{-1})$ na orgán o pro jedince z věkové kategorie a vyvolaný radionuklidem n ovlivňujícím orgán o skrze mechanismus dýchání tohoto jedince pobývajícím v místě (x,y) se určuje podle:

$$\dot{H}_{inh}^{a,n,o}(t;x,y) = \dot{B}_{inh}^{a,n}(t;x,y) \cdot R_{inh}^{a,n,o}$$

$R_{inh}^{a,n,o}$ je tabelovaný dávkový faktor z ozáření při inhalaci nuklidu n na orgán o jedince z a $(Sv.Bq^{-1})$, který z hlediska účinku uvnitř organismu představuje úvazek ekvivalentní resp. efektivní dávky z jednotkového příjmu radionuklidu n cestou inhalace (účinek se vztahuje od o příjmu do očekávaného konce života pro danou věkovou kategorii a - 50 let pro dospělé, 70 let pro děti)

$\dot{B}_{inh}^{a,n}$ je vteřinový příjem radionuklidu n při inhalaci jedince z kategorie a žijícího v místě (x,y) , během fáze úniku je považován za konstantní. Je dán vztahem:

$$\dot{B}_{inh}^{a,n}(x,y;t) = CAP^n(x,y,z=0;t) \cdot u_{inh}^a$$

Ke dříve definovaným významům zopakujeme:

$CAP^n(x,y,z=0;t)$ měrná aktivita v přízemní vrstvě vzduchu (konstantní v rámci jednoho segmentu (fáze) při vícefázovém modelu úniku), $(Bq \cdot m^{-3})$

u_{inh}^a tabelovaná rychlost dýchání jedince věkové kategorie a $(m^3 \cdot s^{-1})$

Stejně jako v případě ozáření z mraku je zřejmé, že v případě stacionárních výpustí v rámci jedné fáze úniku veličina CAP představuje časově konstantní hodnotu a pak tedy hodnota příslušného úvazku (50-ti či 70-ti letého) v (Sv) od příjmu radionuklidu n za dobu trvání fáze T je dána výrazem:

$$H_{inh}^{a,n,o}(T; x, y) = \dot{B}_{inh}^n(x, y) \cdot R_{inh}^{a,n,o} \cdot T$$

Jedná se o konzervativní odhad, který předpokládá, že jedinec žije v místě (x,y) po celou uvažovanou dobu T . Možné neurčitosti po druhý krok plynou z rychlosti dýchání jedince, ale hlavně z toho, jak jsou voleny konverzní koeficienty $R_{inh}^{a,n,o}$. V tabulce 2 bylo uvedeno, že transurany z řady aktinidů mají podstatně vyšší konverzní dávkové faktory hlavně pro inhalaci. Podle možné subjektivní volby závislosti na typu absorpce v plicích do tělesných tekutin (F – fast, M – medium, S – slow) se hodnoty mohou lišit téměř řádově. Například pro izotop Pu-239 jsou ve Vyhlášce SÚJB č. 422/2016 Sb. uvedeny hodnoty konverzních koeficientů pro úvazek efektivní dávky pro příjem vdechnutím radioaktivních aerosolů pro skupinu dospělých z obyvatelstva:

$$R_{inh}^{a=dospeli, n=Pu239, o=eff} = 1.2 \text{ E-04 [Sv.Bq}^{-1}] \text{ pro typ absorpce F}$$

$$5.0 \text{ E-05 [Sv.Bq}^{-1}] \text{ pro typ absorpce M}$$

$$1.7 \text{ E-05 [Sv.Bq}^{-1}] \text{ pro typ absorpce S}$$

Je zřejmé, že subjektivní volba může vést až k řádové odchylce při určování úvazku efektivní dávky. Faktem je, že Vyhláška doporučuje typ absorpce pro některé chemické látky a sloučeniny. Nicméně u blíže neidentifikovaných fyzikálně-chemických forem radioaktivních látek nebo vlastností vdechovaného aerosolu se doporučuje použít z tabulky nejvyšší konverzní faktor. Toto také odpovídá koncepci produktu HARP, který může generovat radiologické dopady s různým stupněm konzervativnosti (zmíněné očekávané či potenciální hodnoty).

d) Vnitřní ozáření při inhalaci vzduchu kontaminovaného resuspenzí radionuklidů dříve deponovaných na zemském povrchu

Pro uvažovaný radionuklid n se dodatečná objemová aktivita v přízemní vrstvě vzduchu vyvolaná resuspenzí vyjadřuje v závislosti na usazené aktivitě pomocí faktoru resuspenze k_{RES} (m^{-1}) jako:

$$k_{RES}(t; x, y) = \frac{\text{Objemová aktivita vzduchu v důsl. resuspenze v místě } x, y \text{ a čase } t \text{ (Bq} \cdot m^{-3})}{\text{Okamžitá depozice v daném místě a čase [Bq} \cdot m^{-2}]}$$

Pomocí shora zavedených veličin pro objemovou aktivitu izotopu n v přízemní vrstvě vzduchu v důsledku resuspenze platí::

$$CAP_{RES}^n(x, y, z = 0; t) = k_{RES}(t; x, y) \cdot \boxed{DEP^n(x, y, z = 0; t)}$$

Jsou zaváděny empirické modely složitějšího jevu resuspenze a jejich validací (experimenty po testech nukleárních zbraní, experimentální fitování s hodnotami měřeními po černobylské havárii, testování v aerodynamických tunelech) jsou k dispozici robustní modely pro limitní odhady dávek. Nicméně neurčitosti v určování k_{RES} zavádějí odchylky ve druhé fázi výsledných odhadů.

e) Vnitřní ozáření při konzumaci kontaminované potravy

Princip dynamického modelování spočívá v proceduře, kdy pro každý produkt l se počítá integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu n v důsledku jeho konzumace jedincem z věkové skupiny a , a to za období ode dne spadu do dne $TING$ (za $TING$ je obvykle volen juliánský den konce roku). V prvním roce je dynamicky řešen listový a kořenový transport aktivity radionuklidů směrem k potravnímu řetězci osob. Je respektován skutečný den spadu $TSPAD$ vzhledem k vegetačním periodám rostlinných produktů. V dalších letech po spadu je přírůstek dávkových úvazků řešen jako samostatný úsek s fiktivním dnem spadu 1. ledna každého dalšího roku, přičemž je uvažován pouze kořenový transport aktivity do rostlin (uvažuje se i o zahrnutí listového transportu v důsledku resuspenze z půdy na rostliny v dalších letech – tuto volbu nabízí vstupní panel INGMODEL). Pro každý počátek dalšího roku je dynamicky modelována příslušná depozice $DEP^n(x, y, z = 0; t)$ na základě jejího dlouhodobého časového vývoje.

Obrázek 9: Vstupní panel ingesčního modulu

Ingesční modul je v programu HARP samostatný subsystém, ve kterém je nutno zvolit celou řadu parametrů strukturovaných podle obrázku 9. V případě srovnávací analýzy se jedná o 2. krok, kdy je současně vnášena celá řada subjektivních voleb, které vedou k neurčitostem

odhadů úvazků ingesčních dávek. Tento obsáhlý problém je detailně popisován v jiných reportech systému HARP na webu : <http://havarrp.utia.cas.cz/harp/>, případně na mateřském webu: <http://havarrp.utia.cas.cz> .

Při srovnávání dávkových úvazků z příjmu kontaminované potravy je obtížné přesné nastavení vstupů obou srovnávaných kódů. Ingesční modul systému HARP je lokalizován na podmínky České Republiky, popis tohoto rozsáhlého procesu je v lokalizačním reportu systému HARP. Lokalizovat cizí produkt na naše podmínky je obtížný proces proveditelný pouze přibližně a neúplně. Toto dokládá publikace (Pecha P. et al., 1999), ve které je popsán rozsáhlý pokus o lokalizaci ingesčního modulu FDMT (Food Chain and Dose Modul Terrestrial) evropského systému RODOS na české podmínky provedený v rámci RODOS projektu řešeném v minulosti v UTIA (poskytovatel SÚJB). Tato studie navazovala na publikaci (Pecha P. et al., 1998), ve které jsou konkretizovány požadavky na standardizaci cizího produktu (v tomto případě RODOS) pro jeho povolení k užívání v oblasti výpočtů jaderné bezpečnosti v ČR.

Poděkování

V práci je provedeno rozšíření možností systému HARP, vyvinutého díky minulé podpoře grantu MV ČR č. VG20102013018 v letech 2010 až 2013. Současné rozšíření bylo umožněno podporou z grantu MŠMT číslo MSMT-28477/2014.

Literatura

Barnard, R. W., 1993: Review of Radionuclide Source Terms Used for Performance Assessment Analysis. SAND 92-2431.

Schwenk-Ferrero, A. 2013: German Spent Nuclear Fuel Legacy: Characteristics and High-Level-Waste Management Issues. Science and Technology of Nuclear Instalations, Volume 2013 (2013), Research article ID 293792.

Westlen, D., 2007: Reducing radiotoxicity in the long run. Progress in Nuclear Energy 49 (2007) 597 - 605.

Pecha P., Pechová E., 2013: Validace a aplikace environmentálního modelu HARP, verze 2013. UTIA research report 2335. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reporty_PDF/2013/Validace_Aplikace_2013.pdf.

Pecha P., Pechová E., 2015 : [Pitfalls Associated with the Estimation of Radiological Burdens on Population Caused by Radiation Accidents](#) , IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 1, p. 222-227, MATHMOD 2015 - 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, (Vienna, AT, 18.02.2015-20.02.2015) [2015] [Download](#)

Pechová E., 2003: Výpočty šíření radionuklidů pro společné česko-rakouské cvičení STEP II b „Realistic Case Studies“, zpráva EGP arch.č. 5014-L-030152, Praha, březen 2003

Pechová E., 2005 : Rozšíření databáze HAVDB00.DAT programu HAVAR-RP.
Dokumentace pro Hodnotící komisi č. 6 - SUJB , říjen 2005.
web: havarrp.utia.cas.cz : [Rozšíření databáze nuklidů a konverzních faktorů](#).

Pecha P., 2015 : [Informace o stavu vývoje programového systému HARP pro odhady radiologických důsledků mimořádných atmosférických úniků radioaktivity do životního prostředí](#) , *Bezpečnost jaderné energie*, p. 86-97 [2015].

Pecha P., Nedoma P., Kárný M., Kuča P., 1999 : [FDMT Customisation for its Use in the Czech Republic](#), *ÚTIA AV ČR, (Praha 1999) Research Report WG3-TN(98)-14* [1999].

[INCO: Documentation on the two INCO working programs](#): 'Review of the adequacy of the present foodchain and dose calculations' and 'Collection of the data required for each radioecological region and their integration into RODOS', RODOS research report WG3-TN-99-40.

Pecha P., Nedoma P., Kárný M. : [Preparation of RODOS System for the Accreditation Procedure for its Use in the Czech Republic](#), *ÚTIA AV ČR, (Praha 1998) Research Report WG1* [1998].

HARP(2013): HARP - HAZardous Radioactivity Propagation: A Software Tool for Fast Assessment of Radiological Consequences of Radiation Accident URL:
<http://havarrp.utia.cas.cz/harp/>

IAEA-TECDOC-151, Data Requirements and Maintenance of Records for Spent Fuel Management: A Review IAEA.

EUROPEAN UNION, Spent Fuel Disposal Performance Assessment (SPA Project), EUR 19132 EN, 2000.

JAPAN NUCLEAR FUEL CYCLE INSTITUTE, Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC, 2000.

IAEA-TECDOC-1519 : Data Requirements and Maintenance of Records for Spent Fuel Management: A Review, 2006.

Příloha č 1:

Transurany – konverzní faktory pro inhalaci (Sv/Bq) pro příjem vdechnutím radioaktivních aerosolů jednotlivcem z obyvatelstva podle Vyhlášky č. 422 / 2016. Pro každý nuklid je užit jeden z doporučených z typů absorpce radionuklidu v plicích (F- fast, M- medium, S- slow).

S U-235						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.00E-05	2.60E-05	1.70E-05	1.10E-05	9.20E-06	8.50E-06
gonády	4.30E-08	2.60E-08	2.10E-08	1.70E-08	1.60E-08	1.50E-08
červená kostní dřeň	2.20E-07	8.30E-08	6.80E-08	6.40E-08	6.40E-08	5.00E-08
plíce	2.50E-04	2.20E-04	1.40E-04	9.20E-05	7.70E-05	7.00E-05
štítná žláza	4.50E-08	2.80E-08	2.20E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.60E-08
vrchní část tlustého střeva	1.10E-07	7.50E-08	4.30E-08	3.00E-08	2.30E-08	2.10E-08
kůže	4.30E-08	2.60E-08	2.10E-08	1.70E-08	1.60E-08	1.60E-08

S U-238						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	2.90E-05	2.50E-05	1.60E-05	1.00E-05	8.70E-06	8.00E-06
gonády	4.30E-08	2.50E-08	2.10E-08	1.70E-08	1.50E-08	1.50E-08
červená kostní dřeň	2.20E-07	8.20E-08	6.70E-08	6.20E-08	6.30E-08	4.90E-08
plíce	2.40E-04	2.10E-04	1.30E-04	8.70E-05	7.20E-05	6.70E-05
štítná žláza	4.00E-08	2.40E-08	1.90E-08	1.50E-08	1.50E-08	1.50E-08
vrchní část tlustého střeva	1.10E-07	7.30E-08	4.20E-08	2.90E-08	2.20E-08	2.10E-08
kůže	4.00E-08	2.30E-08	1.90E-08	1.50E-08	1.50E-08	1.50E-08

M Np-239						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	5.90E-09	4.20E-09	2.00E-09	1.40E-09	1.20E-09	9.30E-10
gonády	3.10E-10	2.30E-10	1.10E-10	7.90E-11	4.40E-11	3.70E-11
červená kostní dřeň	4.50E-10	2.70E-10	1.40E-10	7.80E-11	5.30E-11	4.50E-11
plíce	2.30E-08	1.70E-08	1.10E-08	8.40E-09	8.10E-09	6.30E-09
štítná žláza	5.60E-11	4.20E-11	2.30E-11	1.40E-11	9.30E-12	8.20E-12
vrchní část tlustého střeva	1.20E-08	8.00E-09	3.30E-09	2.00E-09	9.40E-10	7.70E-10
kůže	4.90E-11	3.30E-11	1.60E-11	1.00E-11	6.20E-12	5.70E-12

M Pu-238						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	7.80E-05	7.40E-05	5.60E-05	4.40E-05	4.30E-05	4.60E-05
gonády	2.60E-05	2.80E-05	2.20E-05	1.90E-05	2.10E-05	1.90E-05
červená kostní dřeň	1.70E-04	1.50E-04	9.30E-05	6.60E-05	6.10E-05	6.90E-05
plíce	1.50E-04	1.20E-04	7.30E-05	5.10E-05	4.40E-05	3.70E-05
štítná žláza	7.80E-06	7.30E-06	4.70E-06	3.30E-06	2.80E-06	2.40E-06
vrchní část tlustého střeva	7.90E-06	7.40E-06	4.80E-06	3.30E-06	2.80E-06	2.40E-06
kůže	7.80E-06	7.30E-06	4.70E-06	3.30E-06	2.80E-06	2.40E-06

M Pu-239						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	8.00E-05	7.70E-05	6.00E-05	4.80E-05	4.70E-05	5.00E-05
gonády	2.80E-05	3.00E-05	2.40E-05	2.10E-05	2.30E-05	2.10E-05

červená kostní dřev	1.70E-04	1.60E-04	9.80E-05	7.10E-05	6.60E-05	7.40E-05
plíce	1.40E-04	1.10E-04	6.80E-05	4.60E-05	4.00E-05	3.30E-05
štítná žláza	8.40E-06	8.00E-06	5.30E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.70E-06
vrchní část tlustého střeva	8.50E-06	8.00E-06	5.30E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.70E-06
kůže	8.40E-06	8.00E-06	5.30E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.70E-06

M Pu-240						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	8.00E-05	7.70E-05	6.00E-05	4.80E-05	4.70E-05	5.00E-05
gonády	2.80E-05	3.00E-05	2.40E-05	2.10E-05	2.30E-05	2.10E-05
červená kostní dřev	1.70E-04	1.60E-04	9.80E-05	7.10E-05	6.60E-05	7.40E-05
plíce	1.40E-04	1.10E-04	6.80E-05	4.60E-05	4.00E-05	3.30E-05
štítná žláza	8.40E-06	8.00E-06	5.30E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.70E-06
vrchní část tlustého střeva	8.50E-06	8.00E-06	5.30E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.70E-06
kůže	8.40E-06	8.00E-06	5.30E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.70E-06

M Pu-241						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	9.10E-07	9.70E-07	9.20E-07	9.20E-07	8.30E-07	9.00E-07
gonády	4.40E-07	4.80E-07	4.90E-07	4.90E-07	4.50E-07	4.10E-07
červená kostní dřev	1.40E-06	1.50E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.10E-06	1.20E-06
plíce	1.70E-07	1.70E-07	1.20E-07	1.20E-07	8.90E-08	6.60E-08
štítná žláza	1.30E-07	1.30E-07	9.80E-08	9.80E-08	7.50E-08	5.60E-08
vrchní část tlustého střeva	1.30E-07	1.30E-07	9.80E-08	9.80E-08	7.50E-08	5.60E-08
kůže	1.30E-07	1.30E-07	9.80E-08	9.80E-08	7.50E-08	5.60E-08

M Am-241						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	7.30E-05	6.90E-05	5.10E-05	4.00E-05	4.00E-05	4.20E-05
gonády	3.90E-05	4.20E-05	3.50E-05	3.20E-05	3.40E-05	3.30E-05
červená kostní dřev	2.00E-04	1.90E-04	1.00E-04	7.00E-05	6.10E-05	5.80E-05
plíce	1.50E-04	1.20E-04	7.30E-05	5.10E-05	4.40E-05	3.70E-05
štítná žláza	6.50E-06	6.40E-06	4.80E-06	3.60E-06	3.10E-06	2.90E-06
vrchní část tlustého střeva	6.60E-06	6.50E-06	4.80E-06	3.60E-06	3.10E-06	2.90E-06
kůže	6.50E-06	6.40E-06	4.80E-06	3.60E-06	3.10E-06	2.90E-06

M Cm-242						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	2.20E-05	1.80E-05	1.10E-05	7.30E-06	6.40E-06	5.20E-06
gonády	8.20E-07	9.40E-07	7.90E-07	8.10E-07	7.40E-07	4.80E-07
červená kostní dřev	3.40E-05	2.50E-05	9.40E-06	5.00E-06	3.30E-06	1.90E-06
plíce	1.40E-04	1.10E-04	6.70E-05	4.80E-05	4.40E-05	3.50E-05
štítná žláza	2.10E-07	1.60E-07	8.80E-08	5.30E-08	3.80E-08	3.50E-08
vrchní část tlustého střeva	2.80E-07	2.10E-07	1.10E-07	6.60E-08	4.40E-08	4.00E-08
kůže	2.10E-07	1.60E-07	8.80E-08	5.30E-08	3.80E-08	3.50E-08

M Cm-244						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	6.20E-05	5.70E-05	3.70E-05	2.70E-05	2.60E-05	2.70E-05

gonády	2.60E-05	2.80E-05	2.20E-05	1.80E-05	1.90E-05	1.80E-05
červená kostní dřev	1.80E-04	1.60E-04	8.30E-05	5.10E-05	4.10E-05	3.90E-05
plíce	1.60E-04	1.20E-04	7.70E-05	5.40E-05	4.80E-05	3.90E-05
štítná žláza	3.20E-06	3.00E-06	2.10E-06	1.50E-06	1.30E-06	1.30E-06
vrchní část tlustého střeva	3.30E-06	3.10E-06	2.10E-06	1.50E-06	1.30E-06	1.30E-06
kůže	3.20E-06	3.00E-06	2.10E-06	1.50E-06	1.30E-06	1.30E-06

F U-236						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	2.0E-06	1.3E-06	8.5E-07	7.5E-07	7.8E-07	5.3E-07
Gonády	8.1E-07	7.4E-07	5.1E-07	4.0E-07	3.3E-07	3.2E-07
červená kostní dřev	5.6E-06	2.6E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.5E-06	9.3E-07
Plíce	8.6E-07	7.8E-07	5.4E-07	4.2E-07	3.5E-07	3.3E-07
štítná žláza	8.1E-07	7.4E-07	5.1E-07	4.0E-07	3.3E-07	3.2E-07
vrchní část tlustého střeva	8.3E-07	7.6E-07	5.2E-07	4.0E-07	3.3E-07	3.2E-07
Kůže						

M U-236						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	1.4E-05	1.0E-05	6.5E-06	4.5E-06	3.9E-06	3.2E-06
gonády	2.7E-07	2.5E-07	1.9E-07	1.4E-07	1.3E-07	1.3E-07
červená kostní dřev	1.6E-06	8.5E-07	5.4E-07	5.2E-07	5.9E-07	3.8E-07
plíce	1.1E-04	8.3E-05	5.2E-05	3.5E-05	3.0E-05	2.5E-05
štítná žláza	2.7E-07	2.5E-07	1.9E-07	1.4E-07	1.3E-07	1.3E-07
vrchní část tlustého střeva	3.3E-07	2.9E-07	2.0E-07	1.5E-07	1.4E-07	1.3E-07
kůže						

S U-236						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.1E-05	2.7E-05	1.8E-05	1.1E-05	9.5E-06	8.7E-06
gonády	4.2E-08	2.5E-08	2.0E-08	1.6E-08	1.6E-08	1.5E-08
červená kostní dřev	2.2E-07	8.1E-08	6.7E-08	6.3E-08	6.3E-08	4.9E-08
plíce	2.6E-04	2.3E-04	1.5E-04	9.4E-05	7.9E-05	7.2E-05
štítná žláza	4.2E-08	2.5E-08	2.0E-08	1.6E-08	1.6E-08	1.5E-08
vrchní část tlustého střeva	1.1E-07	6.9E-08	4.0E-08	2.8E-08	2.2E-08	2.0E-08
kůže						

M Np-237						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	4.4E-05	4.0E-05	2.8E-05	2.2E-05	2.2E-05	2.3E-05
gonády	2.2E-05	2.3E-05	1.9E-05	1.7E-05	1.7E-05	1.4E-05
červená kostní dřev	1.1E-04	1.0E-04	6.3E-05	4.2E-05	3.7E-05	3.9E-05
plíce	1.2E-04	9.4E-05	5.9E-05	4.0E-05	3.4E-05	2.9E-05
štítná žláza	4.5E-06	4.2E-06	2.8E-06	2.0E-06	1.7E-06	1.3E-06
vrchní část tlustého střeva	4.5E-06	4.3E-06	2.8E-06	2.0E-06	1.7E-06	1.3E-06
kůže						

M Pu-242						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	7.6E-05	7.3E-05	5.7E-05	4.5E-05	4.5E-05	4.8E-05

gonády	2.7E-05	2.9E-05	2.5E-05	2.2E-05	2.2E-05	2.0E-05
červená kostní dřev	1.6E-04	1.5E-04	9.3E-05	6.8E-05	6.3E-05	7.0E-05
plíce	1.3E-04	1.0E-04	6.3E-05	4.3E-05	3.7E-05	3.1E-05
štítná žláza	8.0E-06	7.6E-06	5.0E-06	3.5E-06	3.0E-06	2.6E-06
vrchní část tlustého střeva	8.1E-06	7.6E-06	5.1E-06	3.6E-06	3.0E-06	2.6E-06
kůže						

S Pu-242						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	4.0E-05	3.6E-05	2.5E-05	1.7E-05	1.6E-05	1.5E-05
gonády	2.8E-06	3.0E-06	2.9E-06	2.5E-06	2.5E-06	2.4E-06
červená kostní dřev	1.3E-05	1.3E-05	9.8E-06	7.9E-06	8.1E-06	8.7E-06
plíce	2.9E-04	2.5E-04	1.6E-04	1.1E-04	8.9E-05	8.1E-05
štítná žláza	6.4E-07	6.6E-07	5.0E-07	3.6E-07	3.3E-07	3.0E-07
vrchní část tlustého střeva	7.1E-07	7.1E-07	5.2E-07	3.8E-07	3.4E-07	3.1E-07
kůže						

M Am-242m						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	5.2E-05	5.3E-05	4.1E-05	3.4E-05	3.5E-05	3.7E-05
gonády	3.7E-05	4.0E-05	3.7E-05	3.3E-05	3.4E-05	3.2E-05
červená kostní dřev	1.6E-04	1.5E-04	9.2E-05	6.3E-05	5.6E-05	5.5E-05
plíce	3.2E-05	2.8E-05	1.8E-05	1.2E-05	1.0E-05	8.8E-06
štítná žláza	6.4E-06	6.3E-06	4.8E-06	3.6E-06	3.1E-06	2.9E-06
vrchní část tlustého střeva	6.4E-06	6.3E-06	4.8E-06	3.6E-06	3.1E-06	2.9E-06
kůže						

M Am-243						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	7.2E-05	6.8E-05	5.0E-05	4.0E-05	4.0E-05	4.1E-05
gonády	3.8E-05	4.1E-05	3.8E-05	3.4E-05	3.5E-05	3.3E-05
červená kostní dřev	2.0E-04	1.8E-04	1.0E-04	6.9E-05	6.0E-05	5.7E-05
plíce	1.4E-04	1.1E-04	6.9E-05	4.8E-05	4.2E-05	3.5E-05
štítná žláza	6.6E-06	6.5E-06	4.9E-06	3.6E-06	3.1E-06	2.9E-06
vrchní část tlustého střeva	6.6E-06	6.5E-06	4.9E-06	3.6E-06	3.2E-06	2.9E-06
kůže						

M Cm-245						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	7.3E-05	6.9E-05	5.1E-05	4.1E-05	4.1E-05	4.2E-05
gonády	4.0E-05	4.2E-05	3.9E-05	3.5E-05	3.6E-05	3.4E-05
červená kostní dřev	2.0E-04	1.8E-04	1.0E-04	7.0E-05	6.1E-05	5.9E-05
plíce	1.4E-04	1.1E-04	7.1E-05	4.9E-05	4.3E-05	3.6E-05
štítná žláza	6.8E-06	6.7E-06	5.1E-06	3.8E-06	3.3E-06	3.0E-06
vrchní část tlustého střeva	6.9E-06	6.8E-06	5.1E-06	3.8E-06	3.3E-06	3.0E-06

kůže						
------	--	--	--	--	--	--

Příloha č 2:

Transurany – konverzní faktory pro ingesci (Sv/Bq) pro příjem požitím radioaktivních aerosolů jednotlivcem z obyvatelstva podle Vyhlášky č. 422 / 2016.

U-235						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.50E-07	1.30E-07	8.50E-08	7.10E-08	7.00E-08	4.70E-08
gonády	1.30E-07	5.90E-08	4.60E-08	3.80E-08	2.80E-08	2.60E-08
červená kostní dřeň	8.60E-07	1.90E-07	1.20E-07	1.20E-07	1.30E-07	7.60E-08
plíce	1.20E-07	5.50E-08	4.10E-08	3.30E-08	2.80E-08	2.60E-08
štítná žláza	1.20E-07	5.50E-08	4.10E-08	3.30E-08	2.80E-08	2.60E-08
vrchní část tlustého střeva	3.20E-07	1.90E-07	1.10E-07	7.10E-08	4.90E-08	4.30E-08
kůže	1.20E-07	5.50E-08	4.10E-08	3.30E-08	2.80E-08	2.60E-08

U-238						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.40E-07	1.20E-07	8.00E-08	6.80E-08	6.70E-08	4.50E-08
gonády	1.30E-07	5.70E-08	4.40E-08	3.60E-08	2.70E-08	2.50E-08
červená kostní dřeň	8.40E-07	1.90E-07	1.20E-07	1.10E-07	1.30E-07	7.50E-08
Plíce	1.20E-07	5.30E-08	4.00E-08	3.10E-08	2.60E-08	2.50E-08
štítná žláza	1.20E-07	5.30E-08	4.00E-08	3.10E-08	2.60E-08	2.40E-08
vrchní část tlustého střeva	2.90E-07	1.70E-07	9.60E-08	6.50E-08	4.50E-08	3.90E-08
Kůže	1.20E-07	5.30E-08	4.00E-08	3.10E-08	2.60E-08	2.40E-08

Np-239						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	8.90E-09	5.70E-09	2.90E-09	1.70E-09	1.00E-09	8.00E-10
gonády	1.00E-09	7.60E-10	4.40E-10	3.00E-10	2.00E-10	1.50E-10
červená kostní dřeň	1.40E-10	6.60E-11	5.30E-11	4.20E-11	3.20E-11	2.60E-11
Plíce	3.70E-11	2.30E-11	1.10E-11	6.20E-12	3.40E-12	2.10E-12
štítná žláza	1.30E-11	5.40E-12	2.00E-12	7.90E-13	2.80E-13	1.50E-13
vrchní část tlustého střeva	4.50E-08	2.90E-08	1.50E-08	8.80E-09	4.90E-09	3.90E-09
kůže	4.50E-11	2.80E-11	1.50E-11	9.50E-12	6.10E-12	5.00E-12

Pu-238						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	4.00E-06	4.00E-07	3.10E-07	2.40E-07	2.20E-07	2.30E-07
gonády	1.60E-06	1.70E-07	1.30E-07	1.10E-07	1.20E-07	9.90E-08
červená kostní dřeň	1.10E-05	9.60E-07	5.60E-07	4.10E-07	3.40E-07	3.70E-07
plíce	5.20E-07	4.50E-08	2.90E-08	2.00E-08	1.60E-08	1.30E-08
štítná žláza	5.20E-07	4.50E-08	2.90E-08	2.00E-08	1.60E-08	1.30E-08
vrchní část tlustého střeva	7.40E-07	1.90E-07	1.00E-07	6.40E-08	4.00E-08	3.20E-08
kůže	5.20E-07	4.50E-08	2.90E-08	2.00E-08	1.60E-08	1.30E-08

Pu-239						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	4.20E-06	4.20E-07	3.30E-07	2.70E-07	2.40E-07	2.50E-07
gonády	1.80E-06	1.80E-07	1.50E-07	1.20E-07	1.30E-07	1.10E-07
červená kostní dřeň	1.10E-05	9.60E-07	5.90E-07	4.40E-07	3.70E-07	3.90E-07

orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	2.90E-06	2.90E-07	1.90E-07	1.40E-07	1.20E-07	1.20E-07
gonády	1.60E-06	1.70E-07	1.30E-07	1.10E-07	1.10E-07	9.70E-08
červená kostní dřeň	1.20E-05	1.00E-06	5.10E-07	3.20E-07	2.40E-07	2.10E-07
pľíce	2.10E-07	1.90E-08	1.30E-08	9.20E-09	7.50E-09	6.90E-09
štitná žláza	2.10E-07	1.90E-08	1.30E-08	9.20E-09	7.50E-09	6.90E-09
vrchní část tlustého střeva	4.50E-07	1.70E-07	9.00E-08	5.50E-08	3.30E-08	2.70E-08
kůže	2.10E-07	1.90E-08	1.30E-08	9.20E-09	7.50E-09	6.90E-09

U-236						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.5E-07	1.3E-07	8.4E-08	7.0E-08	7.0E-08	4.7E-08
gonády	1.3E-07	5.6E-08	4.2E-08	3.3E-08	2.8E-08	2.6E-08
červená kostní dřeň	8.7E-07	2.0E-07	1.2E-07	1.2E-07	1.3E-07	7.7E-08
pľíce	1.3E-07	5.6E-08	4.2E-08	3.3E-08	2.8E-08	2.6E-08
štitná žláza	1.3E-07	5.6E-08	4.2E-08	3.3E-08	2.8E-08	2.6E-08
vrchní část tlustého střeva	3.1E-07	1.8E-07	1.0E-07	6.9E-08	4.8E-08	4.2E-08
kůže						

Pu-242						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	4.0E-06	4.0E-07	3.2E-07	2.6E-07	2.3E-07	2.4E-07
gonády	1.7E-06	1.7E-07	1.5E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.0E-07
červená kostní dřeň	1.0E-05	9.1E-07	5.6E-07	4.2E-07	3.6E-07	3.7E-07
pľíce	5.3E-07	4.6E-08	3.0E-08	2.2E-08	1.7E-08	1.4E-08
štitná žláza	5.3E-07	4.6E-08	3.0E-08	2.2E-08	1.7E-08	1.4E-08
vrchní část tlustého střeva	7.3E-07	1.8E-07	9.6E-08	6.1E-08	3.8E-08	3.1E-08
kůže						

Np-237						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	2.0E-06	2.1E-07	1.4E-07	1.1E-07	1.1E-07	1.1E-07
gonády	1.4E-06	1.4E-07	1.1E-07	1.0E-07	9.6E-08	7.4E-08
červená kostní dřeň	7.3E-06	6.4E-07	3.9E-07	2.6E-07	2.1E-07	2.1E-07
pľíce	2.9E-07	2.6E-08	1.7E-08	1.2E-08	9.6E-09	7.1E-09
štitná žláza	2.9E-07	2.6E-08	1.7E-08	1.2E-08	9.6E-09	7.1E-09
vrchní část tlustého střeva	5.1E-07	1.6E-07	8.5E-08	5.3E-08	3.2E-08	2.5E-08
kůže						

Np-237						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	2.0E-06	2.1E-07	1.4E-07	1.1E-07	1.1E-07	1.1E-07
gonády	1.4E-06	1.4E-07	1.1E-07	1.0E-07	9.6E-08	7.4E-08
červená kostní dřeň	7.3E-06	6.4E-07	3.9E-07	2.6E-07	2.1E-07	2.1E-07

plíce	2.9E-07	2.6E-08	1.7E-08	1.2E-08	9.6E-09	7.1E-09
štítná žláza	2.9E-07	2.6E-08	1.7E-08	1.2E-08	9.6E-09	7.1E-09
vrchní část tlustého střeva	5.1E-07	1.6E-07	8.5E-08	5.3E-08	3.2E-08	2.5E-08
kůže						

Am-242m						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.1E-06	3.0E-07	2.3E-07	2.0E-07	1.9E-07	1.9E-07
gonády	2.3E-06	2.4E-07	2.2E-07	2.0E-07	1.9E-07	1.7E-07
červená kostní dřev	1.0E-05	9.1E-07	5.4E-07	3.8E-07	3.1E-07	2.9E-07
plíce	4.1E-07	3.8E-08	2.9E-08	2.2E-08	1.8E-08	1.5E-08
štítná žláza	4.1E-07	3.8E-08	2.9E-08	2.2E-08	1.8E-08	1.5E-08
vrchní část tlustého střeva	4.4E-07	5.6E-08	3.8E-08	2.8E-08	2.1E-08	1.8E-08
kůže						

Am-243						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.6E-06	3.7E-07	2.7E-07	2.2E-07	2.0E-07	2.0E-07
gonády	2.4E-06	2.4E-07	2.3E-07	2.1E-07	2.0E-07	1.7E-07
červená kostní dřev	1.3E-05	1.1E-06	6.2E-07	4.2E-07	3.4E-07	3.0E-07
plíce	4.3E-07	3.9E-08	2.9E-08	2.2E-08	1.8E-08	1.5E-08
štítná žláza	4.3E-07	3.9E-08	2.9E-08	2.2E-08	1.8E-08	1.5E-08
vrchní část tlustého střeva	6.6E-07	1.9E-07	1.0E-07	6.7E-08	4.3E-08	3.5E-08
kůže						

Cm-245						
orgán	Věková kategorie (roky)					
	<1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	>17
efektivní dávka	3.7E-06	3.7E-07	2.8E-07	2.3E-07	2.1E-07	2.1E-07
gonády	2.5E-06	2.5E-07	2.3E-07	2.1E-07	2.0E-07	1.8E-07
červená kostní dřev	1.3E-05	1.1E-06	6.3E-07	4.3E-07	3.5E-07	3.1E-07
plíce	4.4E-07	4.0E-08	3.1E-08	2.3E-08	1.9E-08	1.6E-08
štítná žláza	4.4E-07	4.0E-08	3.1E-08	2.3E-08	1.9E-08	1.6E-08
vrchní část tlustého střeva	6.8E-07	1.9E-07	1.1E-07	6.8E-08	4.4E-08	3.6E-08
kůže						