

Poznámky k problematice ozáření poloniem (^{210}Po)

Státní ústav radiační ochrany, Praha

Úvod:

Polonium objevila Marie Curie 1898 při výzkumu radioaktivity smolince. Polonium je chemicky podobné bismutu a teluru. Existuje řada izotopů polonia, středem zájmu je nyní izotop ^{210}Po (poločas 138 dní). ^{210}Po je členem uran-radiové rozpadové řady, ve velmi malých koncentracích se proto běžně vyskytuje v přírodě.

Periodic Chart of the Elements

© 2001 ADR S Associates

The image shows a standard periodic table with Polonium (Po) highlighted in blue. It is located in the 84th row and 16th column. An arrow points from the table to the corresponding entry in the Uranium decay series table.

Uranium 238		
Isotope	Emitted particle	Half-life
$^{238}_{92}\text{U}$	α	4.47 x 10 ⁹ yrs
$^{234}_{90}\text{Th}$	β^-	24.1 days
$^{234}_{91}\text{Pa}$	β^-	1.17 min
$^{234}_{92}\text{U}$	α	2.48 x 10 ⁵ yrs
$^{230}_{90}\text{Th}$	α	7.52 x 10 ⁴ yrs
$^{226}_{88}\text{Ra}$	α	1.60 x 10 ³ yrs
$^{222}_{86}\text{Rn}$	α	3.8235 days
$^{218}_{84}\text{Po}$	α	3.10 min
$^{214}_{82}\text{Pb}$	β^-	27 min
$^{214}_{83}\text{Bi}$	β^-	19.9 min
$^{214}_{84}\text{Po}$	α	1.64 x 10 ⁻⁴ sec
$^{210}_{82}\text{Pb}$	β^-	22.3 yrs
$^{210}_{83}\text{Bi}$	β^-	5.01 days
$^{210}_{84}\text{Po}$	α	138.38 days
$^{206}_{82}\text{Pb}$		Stable

Výskyt ^{210}Po v přírodě

V půdě, horninách, stavebních materiálech se vyskytuje ^{210}Po v hmotnostní měrné aktivitě běžně v rozmezí 10 až 100 Bq/kg (podobně jako uran, radium apod.), to chemicky představuje hmotnostní koncentraci v řádu 10^{-16} - 10^{-15} (kg ^{210}Po na kg půdy). V atmosféře, kde ^{210}Po vzniká postupně přeměnou z radonu, se uvádí hodnoty objemové aktivity (0,1 až 2 mBq/m³). Z atmosféry se deponuje na povrch Země, díky tomu bývají vyšší hodnoty na rostlinách s velkou plochou listů. Známé jsou např. vyšší hodnoty ^{210}Po v tabáku (1 cigareta obsahuje cca 75 mBq, z toho v popelu cca 91 %, příjem kuřáka z vdechnutého kouře cca (7%), únik kouře do místnosti cca 2%), vyšší výskyt ^{210}Po v lišejnících, tím i v masu sobů, odtud vyšší dávky ^{210}Po např. u Laponců. Kořenový přestup ^{210}Po je podstatně méně významný.

Průměrné hmotnostní aktivity ^{210}Po a dalších přírodních radionuklidů v běžných potravinách jsou v tabulce 1, průměrný odvozený roční příjem aktivity ^{210}Po a dalších přírodních radionuklidů a z toho odvozený úvazek efektivní dávky je v tabulce 2.

Běžně vylučované hodnoty v exkretech (moči a stolici - důležité pro měření a odhad vnitřní kontaminace) kolísají u jednotlivců podle skladby potravin i vlivem kouření. Uvádí se v moči jednotky až desítky mBq/den, ve stolici desítky až stovky mBq/den.

Tabulka 1 - Průměrné hmotnostní aktivity ^{210}Po a dalších přírodních radionuklidů v běžných potravinách (mBq/kg)

Příjem	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{228}Ra	^{228}Th	^{235}U
Mléčné produkty	1	0,5	5	40	60	0,3	5	0,3	0,05
Maso	2	2,0	15	80	60	1,0	10	1,0	0,05
Obiloviny	20	10,0	80	100	100	3,0	60	3,0	1,0
Listová zelenina	20	20,0	50	30	30	15,0	40	15,0	1,0
Ovoce	3	0,5	30	25	30	0,5	20	0,5	0,1
Ryby	30	-	100	200	2000	-	-	-	-

Tabulka 2 - Průměrný roční příjem aktivity ^{210}Po a dalších přírodních radionuklidů a odvozený úvazek efektivní dávky

Radionuklid	Roční příjem [Bq]		Úvazek efektivní dávky [μSv]	
	ingesce	inhalace	ingesce	Inhalace
U-238	5,7	0,007	0,22	0,056
U-234	5,7	0,007	0,24	0,066
Th-230	3,0	0,0036	0,53	0,050
Ra-226	22,0	0,0036	5,30	0,013
Pb-210	36,0	3,6	22,0	4,0
Po-210	63,0	0,36	66,0	1,2
Th-232	1,7	0,007	0,30	0,18
Ra-228	15,0	0,007	9,0	0,019
Th-228	3,0	0,007	0,09	0,28
U-235	0,2	0,0004	0,009	0,003

Výroba ^{210}Po



Hlavní způsob výroby je produkce ^{210}Po v jaderném reaktoru reakcí:
$$^{209}\text{Bi} + n \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po}$$

(Možná je i produkce na protonových urychlovačích reakcemi (p,n) a (p,2n) na vizmutu, případně separací z uran-radiové rozpadové řady).

Několik zajímavostí k aktivitě a vlastnostem koncentrovaného ^{210}Po

^{210}Po se, díky relativně krátkému poločasu, vyznačuje mimořádně vysokou měrnou aktivitou. Jeden gram ^{210}Po má aktivitu $1,7 \times 10^{14}$ Bq (tj. přibližně 5 000 x větší než měrná aktivita Ra-226. Při srovnání s dalšími významnými nuklidy (tab.3) je vidět, jak malá hmotnost prvku (resp. počet atomů) odpovídá jednotkové aktivitě 1 Bq. ^{210}Po je prakticky čistým zářičem alfa. Díky vysoké měrné aktivitě a tomu, že se prakticky veškerá uvolněná energie z radioaktivní přeměny pohltí uvnitř materiálu, má ^{210}Po velký měrný tepelný výkon (1 gram ^{210}Po přibližně 140 W).

^{210}Po je velmi těkavé i pod bodem tání, při uvedené aktivitě svítí modrým světlem (je to způsobeno vysokou ionizací okolního vzduchu).

Tabulka 3:
Aktivita 1 Bq a jí odpovídající
hmotnost prvku (izotopu) a počty atomů
pro některé významné izotopy

Nuklid	m (g)	Počet atomů N
Po210	6.0E-15	1.7E+07
Th228	3.3E-14	8.7E+07
Pu241	2.4E-13	6.1E+08
Pu238	1.6E-12	3.9E+09
Am241	8.3E-12	2.1E+10
Pu240	1.2E-10	3.0E+11
Pu239	4.4E-10	1.1E+12
Th230	1.4E-09	3.6E+12
U233	2.8E-09	7.2E+12
U234	4.3E-09	1.1E+13
Pu242	7.0E-09	1.7E+13
Np237	4.0E-08	1.0E+14
U235	1.3E-05	3.2E+16
U238	8.0E-05	2.0E+17
Th232	2.5E-04	6.4E+17

Použití

^{210}Po ve slitině nebo směsi s beryliem vytváří **neutronový zdroj** (PoBe), používaný v minulosti např. jako roznětka v jaderných zbraních. Vysoký měrný tepelný výkon umožňuje použití v radiačních termoelektrických člancích (využíváno zejména v naváděcích systémech a satelitech, byl použit např. i jako zdroj v Lunochodu). Dalším použitím je eliminace elektrostatického náboje v průmyslu (např. kartáče s ^{210}Po na odstranění elektrostatického náboje ve fotografickém průmyslu, používané aktivity řádu 20 MBq (500 μCi).

Problém detekce Po-210

^{210}Po je téměř čistý alfa zářič (5,3 MeV), gama linie (803 keV) má velmi slabé zastoupení (10^{-5}), proto je zářič ^{210}Po **velmi obtížně detekovatelný** prostřednictvím gama záření a to bohužel i při velké aktivitě.

Pro představu jednoduchá úvaha:

Při předpokládané minimální „radiotoxické aktivitě“ zářiče cca 100 MBq (tj. 0,6 μg ^{210}Po), která odpovídá dávce při ingesci řádově jednotky Gy, (viz dále) lze odhadnout dávkový příkon gama v 1 m cca 0,14 nGy/h (v 10 cm cca 14 nGy/h). Uvážíme-li, že běžné přírodní pozadí je v rozmezí 50-100 nGy/h, je evidentní, že tento zářič nezpůsobí měřitelné zvýšení dávkového příkonu (od záření gama) při běžném screeningu.

Otázkou je schopnost spektrometrického stanovení (HPGE detektorem) v terénu. Pro zdroj (v reálné vzdálenosti při měření v terénu 25 cm na přírodním pozadí s detektorem HPGE účinnosti 25%) lze odvodit minimálně detekovatelnou aktivitu (MDA) při minutovém měření MDA \approx 100 MBq! (při hodinovém měření MDA \approx 10 MBq). V těsné geometrii se citlivost zlepšuje přibližně o řád.

Závěr: v terénu je zářič, který je na hranici radiotoxicity, **velmi obtížně zachytitelný** i spektrometrií gama! (Pozn. Při analýze odebraného vzorku ve stínění pomocí HPEG detektoru s účinností 100%, T=350 000s, je MDA \approx 1,2 kBq).

Pro analýzy jsou nutné rychlé screeningové metody založené na detekci alfa.

Vnitřní kontaminace ^{210}Po

Vnitřní kontaminace ^{210}Po byla předmětem zájmu již od padesátých let. Ze šedesátých let existuje mnoho publikací, týkající se nejen distribuce ^{210}Po v organismu laboratorních zvířat, ale i studie, týkající se akutního radiačního syndromu z ^{210}Po . Vnitřní kontaminace připadala v úvahu jak u pracovníků, vyrábějících poloniové zdroje, tak i u laboratorních pracovníků. Ponechá-li se otevřený poloniový zářič, polonium se z něho „plíží“ ven.

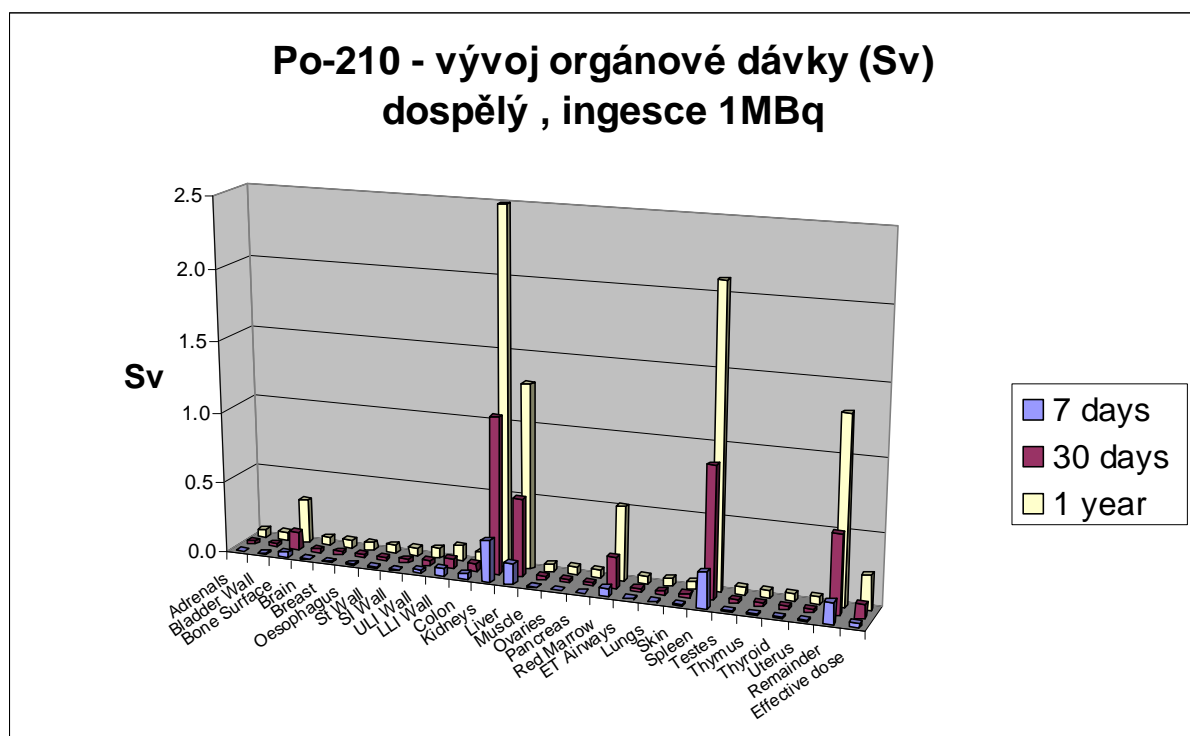
Vnitřní kontaminace je stanovitelná prostřednictvím ^{210}Po v moči nebo ve stolici (90% ve stolici, 10% v moči). Teprve při velmi vysokých aktivitách by bylo měřitelné i prostřednictvím gama záření – znamená to, že ve srovnání s ^{137}Cs je citlivost asi o pět řádů menší (minimální detekovatelná aktivita stotisíckrát větší).

Efektivní poločas pro člověka je udáván na 30 až 50 dní. Faktor vstřebávání ze střeva do krevního oběhu je udáván v širokém rozmezí (0.06 – 0.35). ICRP udává 0.1, pro ^{210}Po absorbované s potravou je tento faktor vyšší (studováno zejména u osob s potravinovým řetězcem lišejník – maso sobů nebo losů – člověk).

Distribuce v těle: prostřednictvím autoradiografie byla studována již ve dvacátých letech; při tom byly identifikovány agregáty, nazvané radiokoloidy. Jako orgán s nejvyšší koncentrací jsou většinou udávány ledviny, dále slezina, játra a kostní dřeň. Jiní autoři udávají, že se dále váže na červené krvinky, v placentě, slzných a mléčných žlázách, mozkových plenách a střevní stěně. Obecně se má za to, že do retikuloendoteliálního systému se polonium dostává v agregovaném (koloidním) stavu, neagregované je více uniformně distribuováno, nezávisí na formě podání.

Pro modelové odhady se uvažuje homogenní distribuce polonia v těle, což ovšem neplatí na úrovni tkání. Ozáření organismu je neuniformní, rozdíl mezi koncentrací v ledvinách a v kosti 2 řády, rovněž tak v ledvinách je např. 30 násobně Po více v ledvinových kanálcích než v ledvinové tkáni, rovněž neuniformní je v játrech a ve slezině.

Vylučování z jednotlivých tkání se dá popsat exponenciální funkcí s efektivním poločasem 29 – 42 dní. Nárůst ekvivalentní dávky v jednotlivých orgánech podle modelu ICRP je na obrázku 3.



Dávkové konverzní faktory pro stochastické účinky (viz Basic Safety Standards 1996, stejně tak Vyhláška SUJB 307/2002 Sb):

Pro **pracovníky**:

ingesce ($f_1 = 0.1$) $2,4 \times 10^{-7}$ Sv/Bq.
inhalace (tř.M, AMAD = 1mm, $f_1 = 0.1$) $3,0 \times 10^{-6}$ Sv/Bq

Pro **populaci**:

ingesce: ($f_1 = 0.5$), $1,2 \times 10^{-6}$ Sv/Bq,
inhalace ($f_1 = 0.1$, tř.M, AMAD = 1mm) $3,3 \times 10^{-6}$ Sv/Bq

Pro akutní účinky lze použít velmi přibližně uvedené hodnoty, dělené radiačním váhovým faktorem pro alfa (20), tomu odpovídá rozmezí dávek 10^{-8} - 10^{-7} Gy/Bq.

²¹⁰Po: Klinika akutního poškození (předběžná úvaha)

O možném klinickém obrazu a o přesnější klasifikaci zdravotního poškození oběti útoku na bývalého agenta Litviněnka je možné se vyjádřit jen obecně a spoléhat přitom na dedukci z dostupných dat o fyzikálních a chemických vlastnostech ²¹⁰Po a o jeho kinetice v savčím (lidském) organismu. Chybějí údaje a metodách měření a jejich výsledcích, tedy parametry základní pro racionální radiotoxikologickou úvahu. Na zveřejněných fotografiích se zdá, že oběť má holou lebku, jak ji vidáme po podání cytostatik, takže došlo asi k radiační alopecii.

Dá se předpokládat, že látka byla podána perorálně ve vhodném kyselém prostředí, tedy ve formě relativně dobře vstřebatelné a to v množství řádově zlomků až desítek GBq, tedy zlomků až jednotek Ci. (Možná cesta kožním vpichem nebyla zmíněna, nelze ji rovněž vyloučit; vyloučit však lze prakticky cestu inhalační). V časně fázi po perorálním podání se 50% - 90% vyloučí stolicí, a ze vstřebané části se asi 45% ukládá do tkání retikulioendoteliového systému - RES (slezina, játra, mízní uzliny) a do ledvin. Na kostní dřevě připadá asi 10% a ostatní aktivita je rozmístěna v těle více méně rovnoměrně.

Dá se předpokládat podání spíše jednorázové, které vedlo k dávce přibližně celotělové v úrovni až 10 Gy. Distribuci dávky v čase a to specifikovaně pro dílčí orgánové a funkční systémy lze obtížně rekonstruovat (nejsou podklady), rozhodující dávka ozáření byla pravděpodobně realizována v řádu hodin (biologický poločas se odhaduje na 50, efektivní na 37 dní), a tomu mohl odpovídat dosti přibližně obraz akutní nemoci z ozáření ze zevního zdroje. Zda se objevily v prvních dvou dnech prodromální příznaky, jakého byly charakteru a jakou měly intenzitu nevíme. Klinický obraz rozvinuté akutní nemoci z ozáření nemusel odpovídat typickým obrazům, např. dřevňové nebo střevní formy.

Pokus o klinickou úvahu lze brát jen s velkou rezervou. Otázkou zůstává, odkud se vzala kontaminace, která byla nalezena na některých místech, kde se oběť pohybovala. Opět však chybí kvantitativní údaje. Pokud to byly hodnoty nepřilíš nad mezí měřitelnosti, mohla by kontaminace pocházet z vyměšování (mimo stolicí a moč je asi třeba uvažovat i o nosním sekretu, potu apod.) i při dodržování běžných hygienických standardů.

Méně pravděpodobný je původ rozptýlené kontaminace od manipulací nebo nepozornosti útočníka.

Zpracoval :

kolektiv pracovníků SÚRO Praha,

Praha, prosinec 2006