

Úloha V.P ... Dodo nechce umřít

9 bodů

Jaký izotop je nejnebezpečnější z hlediska nehod jaderných elektráren? Berte ohled na množství, které může být při havárii uvolněno, šanci úniku, šíření konkrétních izotopů a jejich vliv na lidský organismus.

Dodo přišel na pivo k Jardovi a bál se, že nestihne dopít sud.

Struktura řešení je přebrána od řešitelky Aleny Moučkové.

Úvod

Radioaktivní izotopy se postupně přeměňují na stabilnější izotopy nejčastěji za vyzáření *alfa*, *beta* nebo *gamma* záření.

Aktivita vzorku A je dána vztahem

$$A = \lambda N = \frac{N \ln 2}{T_{1/2}},$$

kde $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$ je rozpadová konstanta a N je počet atomů. Jednotkou aktivity je bequerel (Bq), nebo jinak s^{-1} . Počet atomů v materiálu spočítáme jako

$$N = nN_A = \frac{m}{M}N_A, \quad (1)$$

kde n je látkové množství, m je hmotnost vzorku, M je molární hmotnost a N_A je Avogadrova konstanta. Dále můžeme spočítat absorbovanou dávku D

$$D = \frac{E}{m_t},$$

kde E je absorbovaná energie a m_t je hmotnost materiálu. Jednotkou absorbované dávky je gray (Gy), nebo jinak $J \cdot kg^{-1}$.

Účinky radioaktivního záření na živý organismus mohou být stochastické nebo deterministické. Deterministické účinky se projevují už v krátké době (minuty až hodiny) po ozáření a jejich závažnost se zvyšuje s přijatou dávkou. Jedná se o důsledek poškození či přímo úmrtí buněk – nevolnost, zvracení, radiační popáleniny, a další. Některé deterministické účinky se ale mohou projevit až po letech. Deterministické účinky se projeví až od určité prahové dávky, protože při nízkých dávkách se lidské tělo dokáže s poškozením většinou vyrovnat. Oproti tomu stochastické účinky se projevují až s odstupem let či desetiletí a pravděpodobnost jejich výskytu roste s přijatou dávkou. Jejich závažnost ale není vůbec navázána na velikost dávky. Nejčastěji jde o nějakou formu rakoviny v důsledku poškození genetické informace.

Jelikož různé druhy záření způsobují různou míru poškození živé tkáně, pro zohlednění účinků ozáření v lidském těle se definuje ekvivalentní dávka

$$H = Dw_r,$$

kde w_r jsou váhové faktory pro různé druhy záření (např. 1 pro elektrony a fotony, 20 pro alfa částice). Ekvivalentní dávka se měří v sievertech (Sv), nebo jinak $J \cdot kg^{-1}$. Také různé tkáně jsou jinak citlivé na ozáření z hlediska stochastických účinků. Efektivní dávka E v lidském těle se spočítá jako vážený součet ekvivalentních dávek v různých tkáních a orgánech

$$E = \sum Hw_t,$$

ke w_t jsou tkáňové váhové faktory. I jednotkou efektivní dávky je sievert, proto je potřeba si vždy dávat pozor, o jaké veličině uváděné v sievertech se hovoří. Ekvivalentní a efektivní dávka jsou určeny k posouzení stochastických účinků ozáření. Deterministické účinky ozáření záleží na absorbované dávce.

Hodnoty w_r a w_t jsou standardizovány dle ICRP (International Commission on Radiological Protection) k dohledání na stránkách SÚJB¹.

Běžně používanou jednotkou energie v jaderné fyzice je elektronvolt (eV) a jeho násobky (keV, MeV). Platí $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Uran-235

Uran-235 je štěpným izotopem v jaderných elektrárnách. Uran-235 je v přírodě vzácný (0,72 % v přírodním uranu), a proto je potřeba jeho procentuální zastoupení v palivu vůči uranu-238 navýšit, tzv. obohatit. Sám o sobě se rozpadá hlavně alfa rozpadem, ale s pravděpodobností $7 \cdot 10^{-9} \%$ se spontánně štěpí.² Při spontánním štěpení se těžké jádro rozpadne na dvě srovnatelně těžká jádra (protonové číslo v řádu desítek) a při tom se často uvolní i jeden nebo více rychlých neutronů (energie v řádu MeV). Zároveň má uran-235 také vysoký účinný průřez pro štěpnou reakci s termálními neutrony (energie $\lesssim 0,5 \text{ eV}$), kdy interakce s termálním neutronem zapříčiní spontánní štěpení jádra uranu-235. Proto se v jaderných reaktorech používají moderátory (voda, těžká voda, grafit, ...) pro zpomalení rychlých neutronů. Tlakovodní reaktory v českých jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín moderované vodou používají palivo obohacené na 1,3–3,8 % uranu-235.³ Například ale reaktory moderované mnohem účinnější těžkou vodou (D_2O) můžou pracovat i s přírodním uranem, ale toto je vyváženo vysokou cenou těžké vody. Při štěpení uranu-235 vznikají vedlejší radioaktivní produkty jako například jod-131, cesium-137 a stroncium-90.

Energie uvolněná při štěpení

Při štěpení jednoho atomu U-235 se uvolní přibližně 200 MeV energie. Kolik se ale uvolní při štěpení 1 kilogramu? Nejprve musíme spočítat počet atomů U-235 v 1 kg. To uděláme pomocí rovnice (1)

$$N_U = \frac{1000 \text{ g}}{235 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2,56 \cdot 10^{24}.$$

Poté potřebujeme zjistit celkovou energii uvolněnou při štěpení takového množství atomů. Pokud při štěpení jednoho atomu U-235 vznikne energie 200 MeV, celková energie uvolněná štěpením 1 kilogramu uranu bude

$$E_U = 2,56 \cdot 10^{24} \cdot 200 \text{ MeV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}\cdot\text{MeV}^{-1} = 8,2 \cdot 10^{13} \text{ J}.$$

To je absurdně velké množství energie, které by způsobilo masivní výbuch, pokud by bylo uvolněno najednou. Naštěstí ale v jaderných reaktorech je štěpná energie uvolňována stabilně a kontinuálně a v konstrukci jaderných reaktorů bývají negativní zpětné vazby, které mají bránit neřízené štěpné reakci.

¹https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/ICRP103_dokument.pdf

²<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

³<https://www.cez.cz/nextcez/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1>

Poločas rozpadu a radiaktivita

Jak už víme tak v 1 kilogramu je $2,56 \cdot 10^{24}$ atomů. Poločas rozpadu izotopu U-235 je $T_{1/2}^U = 704$ milionů let. Celková aktivita jednoho kilogramu z rovnice (1) tedy bude

$$A_U = \frac{2,56 \cdot 10^{24} \cdot \ln 2}{2,2 \cdot 10^{16} \text{ s}} \approx 8 \cdot 10^7 \text{ Bq}.$$

Tento výpočet ukazuje, že uran-235, i když má velmi dlouhý poločas rozpadu, může stále uvolnit značné množství záření v případě havárie.

Zdravotní účinky

Pokud dojde k vdechnutí nebo požití uranu, může to vést k vážným zdravotním problémům, zejména kvůli alfa záření a chemické toxicitě (uran je těžký kov). Ačkoliv alfa záření nemá dlouhý dosah a zastaví ho několik centimetrů vzduchu, list papíru, nebo vrstva mrtvých buněk na povrchu lidské kůže, právě v tom tkví jeho nebezpečnost při požití či vdechnutí alfa zářiče. Zatímco ve vrstvě mrtvých buněk alfa záření neškodí, v těle je naopak veškerá energie alfa částice v řádu MeV uvolněna do živých buněk. Dlouhodobé vystavení alfa záření může způsobit rakovinu plic (například při vdechování vysokých koncentrací radonu) nebo jiné závažné nemoci.

Plutonium-239

Plutonium-239 je uměle připravený radioaktivní izotop, který vzniká z uranu-238 po záchytu neutronu a následně dvojitě beta přeměně. Jedná se o významný alfa zářič s vysokou toxicitou. Tento izotop má zásadní význam jak v jaderné energetice, tak ve vojenských aplikacích – je jednou ze základních složek jaderných zbraní a zároveň může sloužit jako palivo pro jaderné reaktory.

Poločas rozpadu a radiaktivita

Poločas rozpadu Pu-239 je přibližně $T_{1/2}^{Pu} = 24\,100$ let. To znamená, že jeho radioaktivní záření přetrvává po tisíce let. Pro výpočet aktivity jednoho kilogramu plutonia nejdříve spočítáme množství atomů v 1 kilogramu

$$N_{Pu} = \frac{1000 \text{ g}}{239 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2,52 \cdot 10^{24},$$

a dosazením do vzorce (1) získáme aktivitu

$$A_{Pu} = \frac{2,52 \cdot 10^{24} \ln 2}{7,6 \cdot 10^{11} \text{ s}} \approx 2,3 \cdot 10^{12} \text{ Bq}.$$

V porovnání s $A_U \approx 8 \cdot 10^7 \text{ Bq}$ vidíme žádově větší aktivitu způsobenou kratším poločasem života plutonia.

Zdravotní účinky

Plutonium-239 je extrémně toxické zejména při vdechnutí nebo požití. Alfa částice sice nepronikají pokožkou, ale uvnitř organismu mohou způsobit vážné poškození plicní tkáně, kostní dřevě a dalších orgánů. Expozice vede ke zvýšenému riziku rakoviny, genetických mutací a dalších závažných onemocnění.

Díky dlouhému poločasu rozpadu představuje plutonium-239 dlouhodobou hrozbu pro životní prostředí i zdraví lidí. V kontaminovaných oblastech zůstává nebezpečné po celá staletí.

Cesium-137

Cesium-137 je štěpný produkt vznikající při jaderném štěpení uranu-235 nebo plutonia-239. Díky svým chemickým vlastnostem se v organismu chová podobně jako draslík – snadno se vstřebává a ukládá do měkkých tkání, zejména svalů. To z něj činí významnou hrozbu pro lidské zdraví.

Poločas cesia je $T_{1/2}^{Cs} = 30,2$ let, což po přepočtu odpovídá aktivitě $A_{Cs} = 3,2 \cdot 10^{15}$ Bq, tudíž daleko nejvyšší z dosud diskutovaných izotopů.

Zdravotní účinky

Cesium-137 je nebezpečné především díky kombinaci pronikavého gama záření a biologické dostupnosti. Po vnitřním vniknutí do organismu se distribuuje podobně jako draslík a může poškozovat měkké tkáně i kostní dřevě. Dlouhodobé vystavení zvyšuje riziko rakoviny, zejména leukémie a nádorů kostní dřevě.

Biologický poločas v lidském těle činí přibližně $T_b \approx 110$ dní, což znamená, že izotop se v těle udržuje relativně dlouhou dobu. V prostředí je cesium-137 vysoce mobilní – snadno kontaminuje vodu, půdu i potravní řetězec a vzhledem k poločasu 30 let zůstává významnou hrozbou pro ekosystémy po celé dekády.

Jód-131

Jód-131 je jedním z hlavních produktů štěpení uranu-235. Vyniká svou biologickou aktivitou, protože se selektivně hromadí ve štítné žláze, kde může vážně poškodit tkáň a zvýšit riziko vzniku rakoviny. Nebezpečný je zejména krátce po jaderné havárii, protože se rychle uvolňuje do prostředí a díky krátkému poločasu rozpadu dosahuje vysoké aktivity.

Poločas jodu je pouze $T_{1/2}^I = 8$ dní, což po přepočtu odpovídá velmi vysoké aktivitě $A_I = 5 \cdot 10^{18}$ Bq.

Zdravotní účinky

Jód-131 se koncentruje ve štítné žláze, kde jeho beta a gama záření poškozují buňky a zvyšuje riziko vzniku rakoviny štítné žlázy. Největší ohrožení představuje pro děti a mladistvé, u nichž je metabolismus jódu nejintenzivnější.

Nebezpečí je akutní zejména v prvních dnech po havárii, kdy je aktivita jódu-131 nejvyšší. Preventivně se proto podávají tablety stabilního jodidu draselného, které saturují štítnou žlázu neaktivním jódem a blokují akumulaci radioaktivního izotopu. Tyto tablety je nutné užít co nejdříve, ideálně do 6 hodin od expozice.

Díky krátkému poločasu rozpadu nebezpečnost jódu-131 relativně rychle klesá. Po několika měsících od havárie již prakticky nepředstavuje radiologické riziko.

Shrnutí

Izotop	A [Bq]	Zdraví	Časové riziko	Typ záření
U-235	8e8	rakovina, genetické mutace	velmi dlouhodobé	α
Pu-239	2e12	rakovina, genetické mutace	dlouhodobé	α
Cs-137	3e15	poškození kostní dřene	dlouhodobé	β, γ
I-131	5e18	rakovina štítné žlázy	krátkodobé	β, γ

Tabulka 1: Shrnutí vlastností jednotlivých radionuklidů.

Další radionuklidy

Výše zmíněné radionuklidy nejsou samozřejmě všechny, se které by se mohli u jaderné nehody uvolnit, ale představují výběr těch pro lidi nejnebezpečnějších. Obdobně bychom mohli probrat např. i radioaktivní izotop stroncium-90, kobalt-60 nebo americium-241.

Závěr

Na základě provedených výpočtů a rešerše lze konstatovat, že mezi nejnebezpečnější izotopy uvolněné při jaderné havárii patří především jód-131 a cesium-137. Jód-131 je vysoce aktivní radionuklid s krátkým poločasem rozpadu osmi dní, což znamená, že představuje akutní riziko zejména v prvních dnech po havárii. Jeho schopnost selektivně se hromadit ve štítné žláze z něj činí závažnou zdravotní hrozbu, obzvláště pro děti a mladistvé, jejichž metabolismus jódu je intenzivnější. Naštěstí jeho nebezpečnost poměrně rychle klesá a po několika měsících od havárie již prakticky nepředstavuje významné riziko.

Cesium-137 má naopak poločas rozpadu přibližně třicet let a jeho nebezpečí spočívá především v dlouhodobé perzistenci v životním prostředí. Tento izotop se snadno váže v půdě i ve vodě, proniká do potravního řetězce a díky své chemické podobnosti s draslíkem se ukládá v měkkých tkáních, zejména ve svalech. Následkem toho může působit škody po celá desetiletí a představuje tak dlouhodobou environmentální i zdravotní hrozbu.

Plutonium-239 a uran-235 nejsou bezprostředně tak nebezpečné, protože jejich záření je převážně alfa, které neproniká pokožkou. Přesto jsou oba prvky vysoce toxické při vdechnutí nebo požití, kdy se dostávají přímo do organismu a mohou vyvolat závažné zdravotní komplikace, včetně rakoviny plic a kostní dřene. Jejich velmi dlouhé poločasy rozpadu znamenají, že představují trvalou zátěž pro životní prostředí a lidské zdraví.

Patrik Kašpárek

patrik.kasperek@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.