

doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc.
Policejní akademie České republiky v Praze
Fakulta bezpečnostního managementu
Katedra krizového řízení

Rizika ozáření a zajištění adekvátní radiační ochrany při aplikaci INAA pro detekci a identifikaci drog

Úvod

Radiační a jaderné technologie nacházejí rozsáhlé uplatnění v mnohých oblastech v medicíně, průmyslu, vědě a v řadě dalších odvětví včetně jejich využití v takovém specifickém oboru, jakým jsou *forenzní vědy*, které slouží při vyšetřování a dokazování v trestních i civilních řízeních před státními orgány. V širším slova smyslu sem patří i *analýza vzorků drog* a dalších narkotik zachycených příslušnými orgány s cílem identifikace jejich složení. Tyto poznatky mohou velice efektivně posloužit k získání věrohodných informací o původu těchto látek, producentech a také technologii. Na základě zastoupení stopových prvků v analyzovaných vzorcích lze poměrně spolehlivě určit, jestli například zabavený kokain pochází z Kolumbie nebo ze Srí Lanky.

K těmto účelům se používají různé chemické a fyzikální metody, z nichž v některých aplikacích se osvědčuje zejména *instrumentální neutronová aktivační analýza (INAA)*, zejména pro svou vysokou citlivost a spolehlivost. Tento způsob analýzy využívá interakce neutronů s látkou, kde dochází k vyzáření fotonů, nabitých částic a sekundárních neutronů, jejichž vlastnosti unikátním způsobem odrážejí prvkové složení prověřovaného vzorku.¹ Příslušná informace o zastoupení jednotlivých prvků se získává na základě detekce a spektrometrie těchto částic. Tato metoda je přitom nedestruktivní a nevyžaduje prakticky žádnou specifickou přípravu vzorků.

Jako zdroj neutronů pro účely INAA může posloužit jeden z následujících *neutronových zdrojů*: radionuklidový zdroj neutronů, jaderný reaktor nebo neutronový generátor. Každý z těchto zdrojů má určité specifické vlastnosti, zejména pokud jde o emisi neutronů (počet neutronů za jednotku čas) a energetické spektrum, které je rozhodující z hlediska interakčních procesů a parametrů produkovaného záření. Z uvedených zdrojů produkují jaderné reaktory nejvyšší neutronový výstup, ale jsou velmi omezeny svou dostupností, velikostí a vysokou logistickou režíí. Radionuklidové zdroje zahrnují takové zdroje jako AmBe a PuBe, kde neutrony jsou produkovány interakcí alfa částic s jádery beryllia. Další radionuklidový zdroj, kalifornium 252, produkuje neutrony jako výsledek spontánního štěpení. U všech radionuklidových zdrojů se musí brát v potaz jejich kontinuální produkce neutronů a rovněž přihlídnout k poločas rozpadu, což vede k neustálému poklesu emise. Fúzní neutronové zdroje,

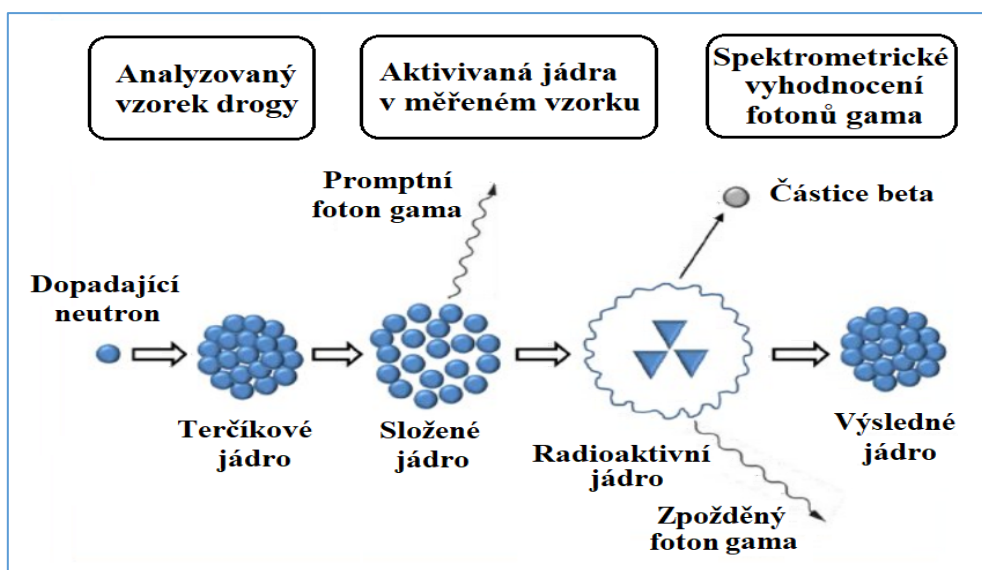
¹ MICHÁLEK, Luděk a Jozef SABOL. Možnosti využití neutronové aktivační analýzy v oblasti kontroly omamných a psychotropních látek. *Drugs & Forensic Bulletin Národní protidrogové centrály*. 2022, č. 02. ISSN 1211-8834.

kteřé produkují neutrony slučováním jader deuteria nebo tritia, mají celou škálu, jak pokud jde o velikost, tak i co se týká výsledné emise. Pro některé účely je tento typ zdrojů vzhledem k malým rozměrům velmi výhodný. Určitou nevýhodou, např. proti reaktoru, je jeho menší emisní schopnost.

Vzhledem k tomu, že použití INAA je spojeno s přítomností neutronů a výskytem i dalších druhů záření, tato technika vyžaduje zavedení relevantních opatření vztahujících se na práci se zdroji ionizujícího záření. Jedná se zejména o dodržování příslušných předpisů a vyhlášek, které mají zajistit adekvátní ochranu pracovníků obsluhujících příslušná zařízení. Za tímto účelem byla zavedena určitá opatření, která by za normálních podmínek měla zajistit, aby příslušné limitní dávky ozáření nejenom nebyly překročeny, ale aby byly co nejnižší, jakých je možné za daných podmínek dosáhnout. Role radiační ochrany je proto neoddělitelnou součástí celého analytického procesu. Úroveň radiace a ozáření osob přicházejících do styku se zářením musí být monitorovány v souladu s příslušnými přísnými požadavky radiační ochrany.

Princip INAA a její přístrojové zabezpečení

Podstata metody INAA se opírá o ozáření vzorku drogy neutronovým zdrojem a následné vyhodnocení parametrů a vlastností produkovaného záření. Na základě tohoto měření lze získat prvkové složení daného materiálu. To potom poslouží k identifikaci neznámé drogy s ohledem na charakteristický obsah přítomných stopových prvků. Zjednodušený pohled na interakční proces neutronů s drogou včetně produkovaného záření je přiblížen na obr. 1.

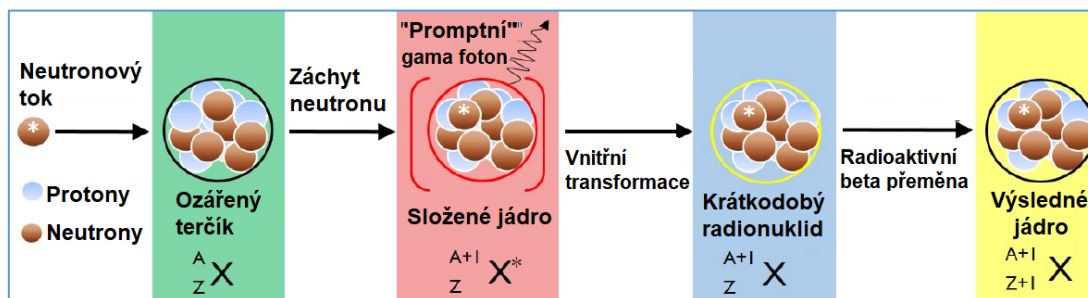


Obr. 1. Ilustrace procesů při INAA, informace o prvkovém složení vzorku se získá na základě detekce a spektrometrie emitovaného záření gama (na základě¹).

Jak je vidět na výše uvedeném obrázku, neutrony ze zdroje dopadají na jádra prvků v analyzovaném vzorku. Tento proces vede ke vzniku složeného jádra, které se

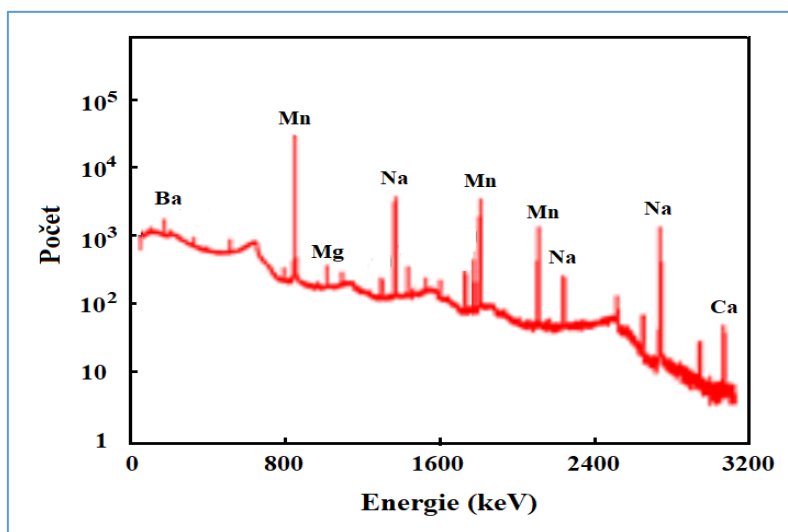
¹ SCHMETS, A. J. M. et al., 2015. *Determining trace elements in bitument by neutron activation analysis*. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/272388331>. DOI: 10.13140/ 2.1.2222.9280.

po emisi vyzářeného kvanta gama stává radioaktivním s následnou emisí zpožděného fotonu gama a částice beta. Zpožděné fotony jsou potom spektrometricky vyhodnoceny pomocí polovodičového detektoru a příslušných elektronických bloků, které zahrnují předzesilovač, lineární zesilovač a mnohokanálový amplitudový analyzátor. Jeho údaje jsou potom zpracovány počítačem a výsledkem je energetické spektrum, z něhož potom lze identifikovat jednotlivé prvky obsažené ve vzorku. Alternativní ilustrace celého tohoto procesu je na obr. 2.



Obr. 2. Pohled na jednotlivé procesy probíhající po záchytu neutronu terčickým jádrem analyzovaného vzorku.

Příklad konkrétního spektra záření gama emitovaného radioaktivními jádry po ozáření neutrony je na obr. 3.



Obr. 3. Spektrum záření gama produkované vzbuzenými jádry prvků vzorku keramiky.

Spektrum záření gama prokazuje přítomnost několika krátkodobých prvků měřených ve vzorku keramiky ozářeného po dobu 5 s získané polovodičovým detektorem HPGe.¹ Na základě takového měření lze selektivně identifikovat jednotlivé prvky obsažené ve vzorku libovolného vhodného materiálu.

¹ GLASCOCK, Michael D. 2008. *NAA technical overview*. University of Missouri, USA. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: https://archaeometry.missouri.edu/naa_technical.html

Aplikační potenciál INAA je velmi rozsáhlý a sahá od použití v biologii, botanice, chemii, geologii, průmyslu, jaderné oblasti, farmakologii až po forenzní vědy. Jedná se o absolutní metodu, která nepotřebuje žádné vnější standardy na rozdíl od většiny ostatních analytických technik.

Metoda INAA představuje užitečný nástroj pro kontrolu metodických šetření, např. výtěžky chemických separací. Používá se často jako nezávislá kontrola různých dalších principů analýzy. Její aplikace nachází významné místo i při certifikaci standardů referenčních materiálů.

Za výhodu lze považovat rovněž to, že INAA nepotřebuje žádnou chemickou přípravu vzorků. Limit detekce souvisí se schopností detekovat píků gama záření za přítomnosti rušení přírodní radioaktivitou a další radioaktivitou vyvolanou neutronovou aktivací. Přitom detekční limit závisí na:

- a) množství materiálu, které má být ozářeno a měřeno,
- b) neutronovém toku,
- c) době trvání ozařování,
- d) celkové indukované aktivitě,
- e) trvání doby měření,
- f) účinnosti detektoru, geometrie a stínění pozadí.

Detekční limit při ozařování vzorku v jaderném reaktoru se u jednotlivých prvků pohybuje od 1 pg do 10 µg. Představu o tom, na jaké úrovni můžeme detekovat jednotlivé prvky při hustotě toku neutronů $10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, si můžeme udělat z hodnot uvedených v tab. 1.¹

Tab. 1. Detekční limity pro jednotlivé prvky, které lze v analyzovaném vzorku zjistit.

Detekční limit	Detekovatelné prvky
1 pg	Dy, Eu
(1 – 10) pg	In, Lu, Mn
(10 – 100) pg	Au, Ho, Ir, Re, Sm, W
(0,1 – 1) ng	Ag, Ar, As, Br, Cl, Co, Cs, Cu, Er, Ga, Hf, I, La, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, Yb
(1 – 10) ng	L, Ba, Cd, Ce, Cr, Hg, Kr, Gd, Ge, Mo, Na, Nd, Ni, Os, Pd, Rb, Rh, Ru, Sr, Te, Zn, Zr,
(10 – 100) ng	Bi, Ca, K, Mg, P, Pt, Si, Sn, Ti, Tl, Xe, Y
(0,1 – 1) µg	F, Fe, Nb, Ne
10 µg	Pb, S

¹ ULLAH, S., 2019. *Neutron activation analysis*. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/msakhan61/neutron-activation-Analysis-naa-129447779>.

Kromě současných analýz vybraných drog, které probíhají v rámci projektu VI20192022162¹ byla již dříve tato metoda úspěšně použita pro analýzu vzorků heroinu a vzorků kokainu zachycených na území ČR.² Alespoň v jednom z analyzovaných vzorků heroinu jsme stanovili 16 stopových prvků, ve vzorcích kokainu se jednalo o 9 stopových prvků. Pozoruhodné rozdíly, až v rozmezí několika řádů, jsme zjistili v obsazích prvků Na, Cl, Cr, Zn a Br, zejména ve vzorcích heroinu. Výsledky stanovení stopových prvků v heroinu byly porovnány s výsledky zahraničních autorů. Dosažené výsledky potvrdily vysoký potenciál metody INAA pro prvkovou charakterizaci drog za účelem zjištění jejich původu, způsobu výroby a způsobu ředění pro konečné uživatele.

Charakteristika zdrojů neutronů využívaných v INAA

Vzhledem k tomu, že INAA využívá různých zdrojů, které produkují neutrony s velmi odlišným energetickým spektrem, bude na místě uvést některé typické vlastnosti těchto zdrojů. To má velký význam také pro pochopení opatření k zajištění bezpečné práce s těmito zdroji. Je třeba si uvědomit, že některé z těchto zdrojů emitují neutrony nepřetržitě, a proto je zapotřebí je odstínit, a to i v případě, že se nepoužívají. Na druhé straně neutronové generátory emitují neutrony pouze v pracovním režimu, jinak se produkce neutronů zastaví. Proto opatření na zabezpečení radiační ochrany se v obou případech poněkud liší.

Každý typ neutronového zdroje má určité výhodné vlastnosti, pro které je vhodný pro určité konkrétní aplikace, kam mimo jiné, řadíme emisi zdroje, spektrum emitovaných neutronů, cenu, rozměry a také přítomnost doprovodného záření.

Radionuklidové neutronové zdroje

Mezi radionuklidové zdroje neutronů řadíme následující zdroje:

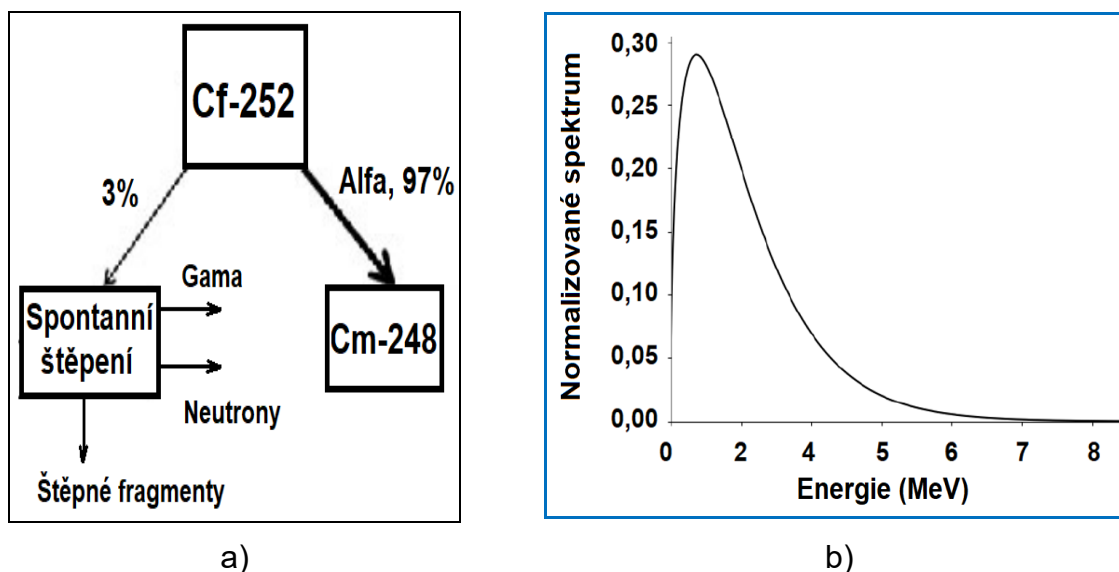
- a) spontánní zdroj Cf-252,
- b) zdroje využívající reakce (α, n),
- c) radionuklidové zdroje na bázi reakce (γ, n).

Ze *spontánních zdrojů neutronů* se v aplikacích osvědčuje zejména *kalifornium 252* (Cf-252). Při štěpení se jeho jádro samovolně rozdělí na dvě nebo více menších fragmentů. Toto probíhá s poločasem rozpadu 2,645 let. Teoreticky, čistý nuklid Cf-252 je charakterizován emisí neutronů na úrovni $2,314 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, což odpovídá celkové aktivitě na úrovni 19,8 TBq·g⁻¹. U reálných zdrojů je však emise mnohem menší a je v rozmezí maximálně v rozsahu 10^9 až 10^{10} s^{-1} .

¹ Výzkumný projekt VI20192022162 „Prvková charakterizace mikrostop a omamných a psychotropních látek jadernými analytickými metodami“. Program MV ČR BV III/1-VS.

² KUČERA, Jan; KAMENÍK, Jan; SABOL, Jozef et al. Stanovení prvkového složení drog neutronovou aktivační analýzou pro zjišťování jejich původu – studie proveditelnosti. *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké kriminalistické konference Pokroky v kriminalistice 2017*. Vol. 2017. Praha: Kriminalistický ústav Praha, 2018, s. 101-110. ISBN 978-80-7251-485-4.

Principiální poměry probíhající ve zdroji Cf-252 jsou ilustrovány na obr. 4 (modifikovaný na základě¹). I zde, konečně jako u všech neutronových zdrojů, musí se počítat s poměrně intenzivním doprovodným zářením gama.

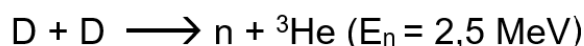


Obr. 4. Cf-252 zdroj neutronů, a) uplatňující se procesy, b) spektrum neutronů.

Zatímco u kalifornia se neutrony produkují v důsledku spontánního štěpení, princip dalších často používaných neutronových radionuklidových zdrojů spočívá v *reakci (alfa, n)*. Zdroje částice alfa, nejčastěji Pu-238 a Am-241, jsou smíchány s nuklidem s nízkou atomovou hmotností, kde potom v důsledku zmíněné reakce se generují neutrony v poměrně širokém energetickém rozsahu. K těmto účelům slouží zejména Be. Tyto zdroje, známé jako PuBe a AmBe, se vyznačují *spojitým* neutronovým spektrem a také poměrně intenzivním doprovodným zářením gama, což někdy komplikuje jejich aplikační potenciál. Emise těchto zdrojů neutronů se pohybuje v rozmezí od 10^6 do 10^8 neutronů za sekundu.

Neutronové generátory

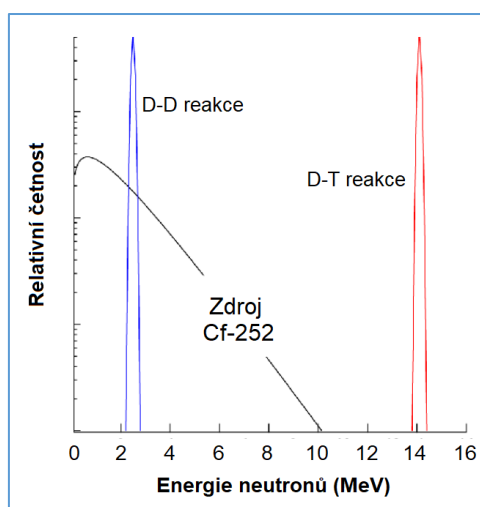
V různých průmyslových a vědeckých aplikacích se s výhodou uplatňují neutronové generátory typu D-D a D-T. Princip těchto zdrojů spočívá ve využití reakce $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ resp. $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$. To znamená, že v jednotlivých případech dopadají urychlené deuterony na terčík obsahující deuterium a tritium, přičemž dochází k emisi monoenergetických neutronů. V případě D-D generátorů produkované neutrony mají energii 2,5 MeV, zatímco generátory D-T se vyznačují energií 14,1 MeV, neboli



¹ BERCHETTO, F. D. *Cf-252 fission-neutron spectrum using a simplified time-of-flight setup: An advanced teaching laboratory experiment*. Am. J. of Phys., Feb. 2013, 81(2), pp. 112-119. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236876482_Cf-252_fission_-_neutron_spectrum_using_a_simplified_time-of-flight_setup_An_advanced_teaching_laboratory_experiment.

Malé generátory neutronů využívající fúzní reakce deuteria ($D, {}^2H$) a tritia ($T, {}^3H$) jsou nejběžnějšími zdroji neutronů na bázi urychlovače. Přitom D-T reakce se používá více než D-D reakce, protože výtěžek D-T reakce je 50–100krát vyšší než u D-D reakce.

Zatímco zdroj Cf-252 emituje neutrony se spojitým spektrem, od těch nejnižších až po energie kolem 10 MeV, neutronové generátory produkují monoenergetické neutrony o energii 2,5 MeV (D-D generátor) resp. 14,1 MeV (D-T generátor). Tyto značně rozdílné vlastnosti neutronů jsou důležité z hlediska jejich aplikací, ale musí, se k nim přihlídnout, i pokud jde o zajištění radiační ochrany. Porovnání průběhů energetických spekter neutronů Cf-252 a neutronových generátorů je vidět na obr. 5.



Obr. 5. Srovnání průběhů spekter neutronových generátorů D-D a D-T s Cf-252.

Jaderný reaktor

Jaderné reaktory fungují na principu jaderného štěpení, což je proces, při kterém se těžké atomové jádro rozdělí na dva menší fragmenty. Jaderné fragmenty jsou ve velmi excitovaných stavech a emitují neutrony, další subatomární částice a fotony. Emitované neutrony pak mohou způsobit nová štěpení, která zase poskytují více neutronů, a tento proces dále nepřetržitě pokračuje. Taková kontinuálně probíhající série pochodů představuje štěpnou řetězovou reakci. Při tomto procesu se uvolňuje velké množství energie a tato energie je základem systémů jaderné energetiky, jejímž základem jsou vysoce výkonné jaderné reaktory dosahující výkonů i přes 3000 MW tepelné energie. Tato energie, pomocí parogenerátoru, turbíny a generátorů elektrického proudu, se nakonec mění v elektrickou energii.

Česká republika patří přední země ve světě s podílem výroby elektrické energie z jaderných zdrojů podílející se kolem 33 % na celkové produkci této energie. Přispívají k tomu dvě naše jaderné elektrárny: JE Dukovany (1385 MW_t) a JE Temelín (3000 MW_t). Pohled na areály obou těchto elektráren je na obr. 6.¹ Na JE Dukovany 4 energetické jaderné reaktory produkují celkem 1720 MW_e, zatímco na JE Temelín dva reaktory vyrábějí 1962 MW_e.

¹ KUSALA, Jaroslav. *Jaderná energetika*. Miniencyklopedie, 2004. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/nuklear.htm>.

K 1. březnu 2022 bylo ve 32 státech světa podle statistik WNA (World Nuclear Association – Světová jaderná asociace) v provozu 439 jaderných reaktorů s celkovou instalovanou kapacitou 392 279 MW_e.¹ Ve výstavbě je jich 56 v 17 zemích. Nejvíce jaderných reaktorů je v provozu v USA (93), ve Francii (56), Číně (53), Rusku (37), Japonsku (33), Jižní Koreji (24), Indii (23), Kanadě (19), Ukrajině (15) a Velké Británii (11). V zemích EU se většinou používají tlakovodní reaktory PWR (65 %), co do četnosti jsou na druhém místě varné reaktory BWR (22 %). Využívány jsou také reaktory těžkovodní, grafitové, plynem chlazené, rychlé a další typy.



a)



b)

Obr. 6. Pohled na areály jaderných elektráren v ČR, a) JE Dukovany, b) JE Temelín.

Největší podíl jaderné energie na celkové výrobě elektrické má Francie (70,6 %), Slovensko (53,1 %), Ukrajina (51,2 %), Maďarsko (48 %), Bulharsko (40,8 %), Belgie (39,1 %), Slovinsko (37,8 %) a také ČR (37,3 %). Na druhé straně, u některých zemí s velkým instalovaným výkonem je tento podíl podstatně menší: Rusko – 20,6 %, USA – 19,7 %, Velká Británie – 14,5 % a Německo – 11,3 %.

Na bezpečný provoz jaderných elektráren se kladou mimořádné požadavky. Preventivní opatření jsou vesměs na tak vysoké úrovni, že by se již neměly opakovat nehody podobné těm, které postihly 4. blok JE v Černobylu (nynější Ukrajina) v r. 1986 a tří bloky JE ve Fukušimě (Japonsko) v r. 2011. Aktuální hrozbou se však stává potenciální nebezpečí poškození JE v důsledku cílených teroristických útoků, nebo, v případě Ukrajiny, také vyvolané probíhajícími vojenskými operacemi ruské armády.

Vzhledem k velmi vysokým nákladům na postavení nových JE, v posledních letech se zaměřila pozornost na konstrukci a využívání malých modulárních jaderných reaktorů s výkonem do 300 MW_t, které, kromě výroby elektrické energie, mohou posloužit i jako lokální zdroje tepelné energie.² Do tohoto moderního přístupu k využívání jaderných reaktorů se aktivně zapojila i ČR, kde v Centru výzkumu Řež,

¹ *Jaderná energetika ve světě*. Skupina ČEZ, 2022. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete>.

² FARMER, Matthew. *Where will the first small modular nuclear reactors be?* Power Technology, March 24, 2022. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/analysis/where-will-the-first-small-modular-nuclear-reactors-be/>

s.r.o., které je dceřinou společností Ústavu jaderného výzkumu, a.s. úspěšně dokončují prototyp prvního modulárního jaderného reaktoru v Evropě.¹

Kromě nesporných předností jaderných reaktorů pro výrobu elektrické energie, nacházejí velké uplatnění i experimentální či výzkumné jaderné reaktory. Tento typ reaktorů se významně podílí na výrobě radionuklidů, používaných v průmyslu a medicíně, a také jako zdroj neutronů v základním a aplikovaném výzkumu. Důležitou roli hraje tento typ reaktorů i ve forenzních aplikacích a ve výuce. Výzkumné reaktory jsou jednodušší než energetické reaktory a pracují při nižších teplotách. Potřebují mnohem méně paliva a při používání paliva se hromadí mnohem méně štěpných produktů. Mají také velmi vysokou hustotu výkonu v jádru, což vyžaduje speciální konstrukční vlastnosti. Stejně jako energetické reaktory potřebuje aktivní zóna chlazení, obvykle pasivně a pouze testovací reaktory s vyšším výkonem potřebují nucené chlazení. Ke zpomalení neutronů a zvýšení štěpení je obvykle vyžadován moderátor. Protože produkce neutronů je jejich hlavní funkcí, většina výzkumných reaktorů potřebuje také reflektor, aby se snížily ztráty neutronů z aktivní zóny.

V ČR jsou v provozu tři výzkumné jaderné reaktory, dva z nich (LVR-15 a LR-0) pracují v Centru výzkumu Řež a jeden (VR-1) na ČVUT v Praze na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské. Všechny tyto reaktory používají jako palivo obohacený uran a lehkou vodu pro moderaci a chlazení aktivní zóny. Výzkumné reaktory se využívají také pro testování jaderného paliva, materiálové inženýrství, validaci výpočetních kódů a testování detektorů neutronů a měřících aparatur. Reaktory se liší podle výkonu a konstrukce, která je navrhována s ohledem na jejich požadované využití.

V případě LVR-15 se jedná o lehkovodní výzkumný reaktor, který byl v ÚJV Řež spuštěn v roce 1989, jako zmodernizovaná verze jednoho z prvních výzkumných reaktorů ve světě (VVR-S). Tento reaktor poskytuje dostatečně vysoké emise neutronů pro experimenty s neutrony včetně INAA. Zde proběhla ozařování vzorků drog a vybraných narkotik v souladu se zaměřením výzkumného úkolu VI20192022162, řešeného na Katedře krizového řízení, PAČR v Praze.² Inovovaný reaktor LVR-15 produkuje tepelný výkon max. 10 MW, používá palivo s obohacením 19 % ^{235}U a je moderován demineralizovanou vodou. Kvůli dosažení vyššího toku neutronů (až $10^{13}\text{ s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$) je obklopen beryliovým reflektorem. Pro výzkum a komerční zakázky jsou k dispozici horizontální a vertikální ozařovací kanály, přičemž je vybaven také potrubní poštou pro krátkodobé ozařování. Pohled na LVR-15 je na obr. 7.

¹ ÚJV Řež, a.s. *První český malý modulární jaderný reaktor byl právě patentován*. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/aktuality/prvni-cesky-maly-modularni-jaderny-reaktor-byl-prave-patentovan-11655>.

² Výzkumný projekt VI20192022162 „Prvková charakterizace mikrostop a omamných a psychotropních látek jadernými analytickými metodami“. Program MV ČR BV III/1-VS.



Obr. 7 Pohled na výzkumný jaderný reaktor LVR-15 v Centre výzkumu v Řeži.
Na jeho snímku jsou rozeznatelné jednotlivé kanály.

Zajištění adekvátní ochrany osob a životního prostředí

Vzhledem k tomu, že neutronová aktivační metoda používá několik různých zdrojů neutronů, celý tento proces prvkové analýzy vyžaduje pozornost i z hlediska radiační ochrany. Platí zde požadavky pro práci s ionizujícím zářením, které mají zajistit adekvátní ochranu osob a minimalizovat dopad na životní prostředí, který se může projevit jeho radioaktivní kontaminací. Ta může v konečném důsledku vést k přídavnému nežádoucímu ozáření obyvatelstva. Proto je nezbytné postupovat v souladu s příslušnými vyhláškami Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB),¹ které vycházejí z Atomového zákona² a ten je v souladu s relevantními mezinárodními standardy, jakož i s příslušnými doporučeními MAAE (IAEA – International Atomic Energy Agency)³ a směrnicemi Evropské unie.⁴

V souladu s výše uvedenými standardy a všemi dalšími relevantními požadavky na adekvátní zajištění radiační ochrany při využívání zdrojů ionizujícího záření, a to jak ve formě uzavřených, tak i otevřených záříčů, je nezbytné provést příslušná

¹ SÚJB, 2022. *Radiační ochrana*. Státní úřad jaderné bezpečnosti, Praha, 2022. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana>.

² Zákon č. 263/2016 Sb (Atomový zákon, ve znění účinném k 1. 2. 2022). [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: https://www.fulsoft.cz/33/263-2016-sb-zakon-atomovy-zakon-ve-zneni-ucinnem-k-1-2-2022-_hFd-jrpTpFGweyQ867F-PdUPgFc7IkCD-vMUnwPlw/.

³ IAEA, 2014. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>.

⁴ EU, 2013. *Council Directive 2013 /59 / Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation*, Official Journal of the European Union L 13, 17 Jan. 2013, pp. 1-73. [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z: <https://leap.unep.org/countries/eu/national-legislation/council-directive-201359euratom-laying-down-basic-safety>

bezpečnostní opatření. Ochrana je přitom zaměřena na pracovníky se zářením a obyvatelstvo, jakož i pacienty podrobující se radiodiagnostickým vyšetřením nebo radioterapeutické léčbě. Zvláštní pozornost musí věnovat i minimalizaci radioaktivní kontaminace pracovního a životního prostředí. K tomu, aby se příslušné požadavky mohli plnit, je zapotřebí zavést jednoznačnou kvantifikaci stupně ozáření osob i radioaktivního zamoření prostředí. Zde je nutno rozlišovat normální (plánované) situace, kdy ozáření nepřekročí stanovené (tolerované) úrovně a mimořádnými událostmi, které mohou vést k nadměrnému ozáření.

První skupina je charakterizována velmi nízkým ozářením, které se může projevit pouze v podobě *stochastických* (pravděpodobnostních) účinků, jejichž zdravotní dopady mohou vést k přídatnému výskytu rakovinového onemocnění. Frekvence tohoto onemocnění je oproti spontánnímu výskytu rakoviny velmi nízká, přičemž se s úrovní ozáření zvyšuje. Onemocnění se přitom projevuje během života ozářené osoby se značným zpožděním (i několik desítek let). I když pro jednotlivce dopad takového nízkého ozáření je s ohledem na jiná vyskytující se nebezpečí prakticky zanedbatelný, snahou je, aby toto ozáření bylo na co nejnižší úrovni. Totiž, při ozáření velkého počtu osob se mezi nimi již může vyskytnout určitý konkrétní počet případů onemocnění, takže z těchto důvodů ochrana populace v podobě minimalizace ozáření má svůj význam.

Další kategorie účinků záření na člověka souvisí s vysokým stupněm ozáření, které vyvolá viditelné poškození ozářených orgánů, přičemž k tomu dojde hned po ozáření nebo během několika dní či týdnů. Tyto účinky jsou známé jako *deterministické* nebo také jako tkáňové reakce. Dochází k nim pouze v případech nehod, havárií nebo cíleného teroristického útoku.

Vzhledem k tomu, že reakce lidských tkání na jejich nízké a vysoké ozáření je značně odlišná, musí se tyto okolnosti zohlednit i při zavedení odpovídajících veličin a jednotek, kterým se vyjádří stupeň zdravotního rizika a závažnosti poškození zdraví ozářené osoby.

Kvantifikace stochastických účinků

Při hodnocení stochastických účinků se vychází z fyzikální veličiny *orgánová dávka* (D_T), což je střední hodnota dávky v uvažované tkáni nebo orgánu.^{1,2} Tato veličina je obecně definována jako podíl energie ε_T sdělené tkáni nebo orgánu T a hmotnosti m_T uvažované tkáně nebo orgánu, tj.

$$D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}$$

¹ KUBINYI, Jozef; SABOL, Jozef; VONDRÁK, Andrej. *Princípy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami*. Praha, Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0168-9.

² SABOL, Jozef. Basic radiation protection related to the assessment of remediation measures in radioactively contaminated areas. In: *Remediation measures for radioactively contaminated areas* (Eds.: D. K. Gupta, A. Voronina). Springer International Publishing AG, Cham (Switzerland), 2029. pp. 291-314. ISBN 978-3-319-73397-5.

Pokud uvažovaný objem není homogenně prozářen, orgánovou dávku lze rigorózněji vyjádřit vztahem integrací (sečtením) příspěvků v elementárních hmotnostních elementech, tj.

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_0^{m_T} D \, dm$$

kde $D \, dm$ je dávka v hmotnostním elementu dm . Jednotkou orgánové dávky je Gy.

Stochastické účinky v dané tkáni nebo orgánu T lze vyjádřit *ekvivalentní dávkou* ($H_{T,R}$), vyvolanou zářením R, pro kterou lze psát

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot w_R$$

kde $D_{T,R}$ je hodnota orgánové dávky v orgánu nebo tkáni T v důsledku záření typu R, a w_R je *radiační váhový faktor* pro záření R.

Při zahrnutí příspěvků od všech druhů záření R lze ekvivalentní dávku H_T vyjádřit ve formě součtu

$$H_T = \sum_T w_T \cdot D_{T,R}$$

Jednotkou ekvivalentní dávky je Sv; tato jednotka je však příliš vysoká, a tak se v praxi používá spíše jednotka mSv. Nakonec, použití jednotky Sv je stejně omezeno do úrovně kolem 500 mSv, neboť při vyšším stupni ozáření již začíná docházet k deterministickým účinkům, pro které jednotku Sv nelze použít.

Hodnoty radiačního váhového faktoru, jako bezrozměrné veličiny, pro daný druh a energii záření byly ICRP (International Committee on Radiation Units and Measurements) vybrány tak, aby reprezentovaly biologickou účinnost pro příslušné záření s ohledem na stochastické účinky tohoto záření (při nízkých dávkách).

Nejdůležitější veličinou v radiační ochraně je *efektivní dávka*, která nejlépe aproximuje stochastické biologické účinky. Již dříve bylo zjištěno, že vztah mezi pravděpodobností stochastických biologických účinků závisí na celkovém ozáření organismu, kde se musí brát v úvahu příspěvky jednotlivých orgánů nebo tkání s přihlédnutím k jejich radiosenzitivitě. Bylo proto snahou zavést univerzální veličinu, odvozenou z ekvivalentní dávky, která by pro různé dávky ve vybraných (nejvíce citlivých) tkáních a orgánech byla v co nejlepší korelaci s celkovými stochastickými účinky na celý organismus.

Efektivní dávka představuje součet vážených ekvivalentních dávek ve všech významných tkáních a orgánech lidského těla. Je dána výrazem

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

kde H_T je ekvivalentní dávka v orgánu nebo tkáni T a w_T je *tkáňový váhový činitel (faktor)* vztahující se ke stejnému orgánu nebo tkáni T. Sčítání se provádí přes všechny orgány a tkáně lidského těla, u nichž se předpokládá významná vnímavost na indukci stochastických účinků. Tyto hodnoty w_T jsou zvoleny tak, aby představovaly relativní příspěvek jednotlivých orgánů a tkání k celkové radiační újmě ze stochastických

účinků. Přitom jak radiační váhový faktor, tak i tkáňový váhový faktor jsou bezrozměrné parametry.

Jednotkou efektivní dávky je Sv, stejně jako je to u ekvivalentní dávky. Pokud je orgánová dávka D_T udána v jednotkách Gy, potom jednotkou pro obě veličiny je Sv.

Kvantifikace deterministických účinků

Cílem současného systému veličin a jednotek v radiační ochraně je posoudit biologické účinky vyplývající z vnějšího a vnitřního ozáření ionizujícím zářením, v případě stochastických účinků (vznikem rakoviny, dědičné účinky), jakož i deterministické účinky (tkáňové reakce) s cílem implementace dostatečně účinné mechanismy pro kontrolu, a hlavně maximální omezení těchto účinků.

Efektivní dávka je užívána jako prostředek pro snížení pravděpodobnosti výskytu stochastických účinků, včetně rakoviny a dědičných abnormalit. Tato veličina však není vhodná pro hodnocení důsledku vysokého ozáření, kde u ozářených osob dochází k deterministickým účinkům nebo v novější terminologii, ke škodlivým tkáňovým reakcím. V rozsahu dávek pod ročním limitem efektivní dávky by se tkáňové reakce neměly vyskytovat. Jen v několika málo případech (např. akutně lokalizovaná expozice jednotlivého orgánu s nízkým tkáňovým váhovým faktorem, jako je kůže) by mohlo použití ročního limitu efektivní dávky být nedostatečné k tomu, aby zabránilo tkáňové reakci. V takových případech bude nutné hodnotit lokální tkáňové dávky (ICRP 103).

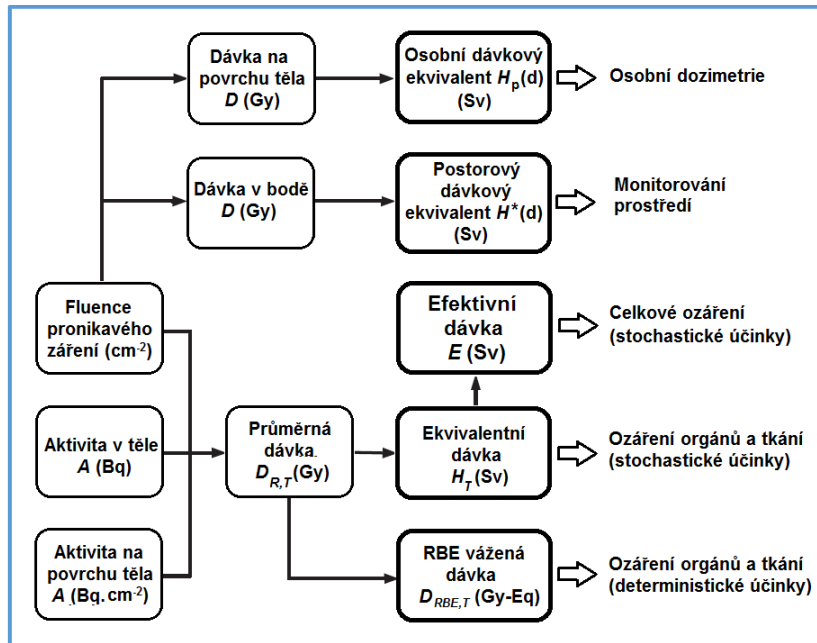
V případě mimořádných situací, které by mohly vést ke vzniku tkáňových reakcí, je nezbytné odhadovat absorbovanou dávku a dávkový příkon na orgány a tkáně a vzít v úvahu vztah dávka-odezva. Cílem je zde stanovit potenciál pro takové radiační efekty, které se mohou vyskytovat nad dávkovým prahem. Též je nutno připomenout, že v případech nehod se zářením s vysokým lineárním přenosem energie (LET) není možné k hodnocení tkáňových reakcí použít radiační váhové faktory (w_R), které jsou vhodné pouze pro stochastické efekty. V tomto případě je žádoucí použít spíše hodnoty relativní biologické účinnosti (RBE) relevantní ke tkáňové reakci. Čím je RBE vyšší tím je u daného záření při stejné dávce i vyšší deterministické poškození. Přitom bychom neměli zaměňovat radiační váhový faktor s hodnotou RBE, i když tyto veličiny spolu určitým způsobem souvisí.

Na rozdíl od relativně dobře propracované kvantifikace ozáření vztahujícího se ke stochastickým účinkům, neexistuje dosud jasně definovaný formalismus a speciálně pojmenované veličiny, které by podobným způsobem řešily přístup k hodnocení deterministických účinků. V této souvislosti představuje faktor RBE určitou analogii s radiačním váhovým faktorem w_R , který slouží pro definování ekvivalentu dávky. Rozdíl oproti stochastickým účinkům však spočívá i v tom, že v tomto případě je RBE pro určitý biologický ukazatel (end-point) měřitelnou veličinou, čemuž tak není, pokud jde o kvantifikaci váhových faktorů pro hodnocení stochastických účinků.

Vzhledem k tomu, že tato veličina, a nakonec ani jednotka pro takovou veličinu, vycházející z RBE nemají dosud žádný speciální název, dává to podnět k určitým nedůslednostem ve správném chápání a využívání konceptu opírajícího se o RBE jako váhového faktoru pro ozáření deterministického charakteru. Tato nedorozumění způsobují určité zmatky, které lze dokumentovat i tím, že v řadě publikací týkajících se deterministických účinků se ještě stále používá jednotka Sv. Hodnota RBE vychází

ze srovnání působení daného záření s referenčním zářením. Dočasně se pro veličinu kvantifikující deterministické účinky používá poněkud těžkopádný název *RBE-vážená dávka* a pro jednotku *gray-ekvivalent* (Gy-Eq).

Celkový přehled veličin v radiační ochraně je na obr. 7, kde jsou ilustrovány vzájemné vztahy a souvislosti mezi jednotlivými veličinami charakterizující zdroj záření, pole záření, absorpci energie, jakož i zavedení příslušných váhových faktorů.



Obr. 7. Přehled veličin, které slouží pro kvantifikaci jak stochastických, tak i deterministických účinků.

Principy a zásady radiační ochrany

Oblast radiační ochrany prodělala několik etap, než se dospělo k současné *filozofii ochrany* před škodlivými účinky ionizujícího záření ve smyslu jak externího, tak i vnitřního ozáření. V předešlých dvou kapitolách byl uveden přehled současného stavu hlavních veličin a jednotek používaných pro kvantifikaci fyzikálních vlastností samotného záření a jeho působení na látku (dozimetrie) a také na jeho schopnosti narušit biologické procesy v buňkách, orgánech, tkáních i v živém organismu jako celku. Na základě zavedených a všeobecně přijatých veličin bylo možné přistoupit k důslednější kontrole ozáření s cílem minimalizovat jeho účinky na zdraví člověka.

K udržení ozáření na *akceptovatelné úrovni*, bylo nezbytné vyvinout i metody jeho měření, resp. monitorování. Tím se vlastně ověřují stanovené úrovně ozáření zejména se snahou zamezit jejich *překročení*. K tomu slouží různá měřidla a senzory záření, kde úsilí bylo zaměřeno na možnosti interpretace naměřených výsledků pomocí veličin, určených k popisu biologických účinků ozáření.

V případě zajištění adekvátní radiační ochrany při využívání radioanalytických metod na základě *neutronové aktivační analýzy*, se musí přihlídnout k tomu, že se zde setkáváme se směsným polem n-gama. Odezva dozimetrů nebo detektorů na takové směsné záření není jednoduchá, protože příslušná čidla reagují na stejnou

dávku těchto dvou druhů záření rozdílně. Proto je nutno počít s vhodným stíněním nebo jiným způsobem (včetně tvarové diskriminace) rozlišit mezi odezvou na neutrony a záření gama. Toto je důležité zejména s ohledem na zohlednění naprosto odlišných váhových faktorů.

Novodobá éra radiační ochrany začala základními doporučeními ICRP (Publikace 26)¹ v r. 1977 a potom jejich postupnou aktualizací v r. 1990 (Publikace 60)² a nakonec v r. 2007 (Publikace 103)³. Poslední doporučení ICRP se promítla do Směrnice EU.⁴ v podobě základních bezpečnostních standardů EU BSS (Basic Safety Standards) a také do posledního vydání doporučení IAEA, které nesou taktéž název BSS.⁵ Z doporučení ICRP vychází také legislativa většiny zemí světa. V této souvislosti je třeba zmínit, že zatímco doporučení IAEA nejsou pro členské země závazná (s výjimkou situací, kdy IAEA poskytuje svým členům technickou pomoc), závěry směrnic EU musí členské země EU transponovat do svých národních zákonů a příslušných vyhlášek ve stanovené době (obvykle 3-4 roky).

Jakýkoli systém radiační ochrany má na jedné straně umožnit využívání radiačních a jaderných technologií v oblastech, které jsou pro lidstvo užitečné a potřebné, na straně druhé však musí zajistit, aby se předešlo *deterministickým účinkům* vyvolaným ozáření osob a současně přijmout účinná opatření k tomu, aby riziko *stochastických účinků* bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při respektování hospodářských a sociálních hledisek. Tento princip ochrany je všeobecně známý jak ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Zásady radiační ochrany se důsledně opírají nejenom o výsledky vědeckého bádání v oblasti radiobiologie, ale také se řídí úrovní ozáření v jednotlivých oblastech aplikací záření, přičemž se musí brát v potaz zkušenosti získané z dosavadní praxe. Tato filozofie v rozpracování zásad radiační ochrany v podobě mezinárodních doporučení a standardů je východiskem pro práci příslušných mezinárodních odborných komisí, asociací, agentur a organizací.

Řešení mimořádných radiačních událostí

Při aplikacích radiačních a jaderných technologií je nezbytné zajistit, aby jejich dopad na ozáření osob byl co nejmenší a v souladu s příslušnými limity či referenčními úrovněmi. Ve velmi ojedinělých případech však může dojít k mimořádné situaci, kdy se kontrola nad zdrojem záření naruší a může dojít k radiační havárii. K tomu může dojít v důsledku poruchy na zdroji nebo zařízení, neodbornou manipulací ale i teroristickým útokem nebo sabotáží. K těmto situacím dochází velmi zřídka a musíme

¹ ICRP 26, 1977. *Recommendations of the ICRP*. Annals of the ICRP Vol. 1, No. 3.

² ICRP 60, 1991. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP, Vol. 21, No. 1-3.

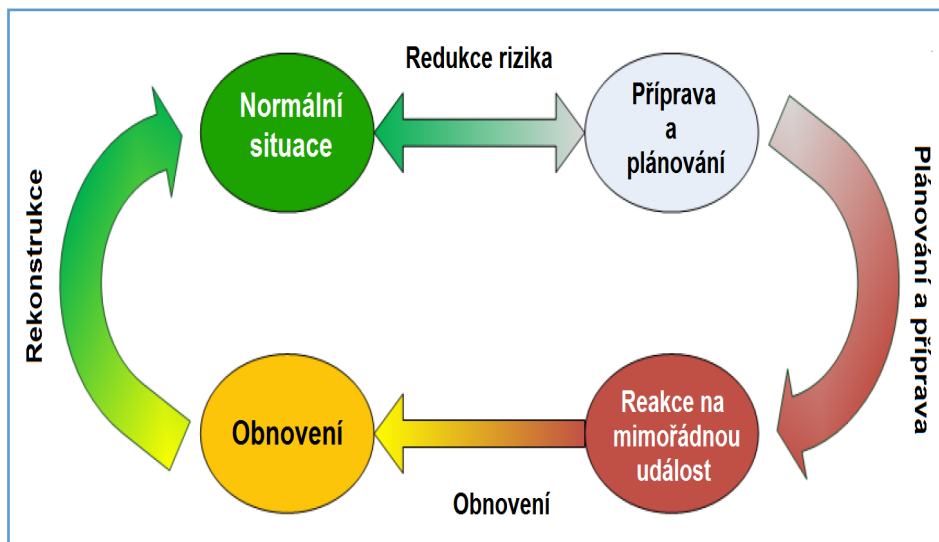
³ ICRP 103, 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP, Vol. 37, No. 2-4.

⁴ EU, 2013. *Directive 2014/59/Euratom – protection against ionising radiation*. Online (4.8.2022): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02013L0059-20140117>.

⁵ IAEA, 2014. *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards*. International Atomic Energy Agency Agency, Vienna, 2014. Online (4. 8. 2022): <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>.

být na ně adekvátně připraveni, aby se mohly co nejdříve vrátit narušené poměry zpět do původního stavu.

Na jakékoli radiační nebo jaderné nehody a havárie se musíme náležitě připravit, abychom mimořádnou situaci mohli co nejdříve vrátit do původního stavu. K tomu slouží havarijní plánování, které je vypracované k tomu, aby se efektivními opatřeními dostala situace pod kontrolu a obnovily se normální podmínky v souladu s příslušnými požadavky na zajištění ochrany osob i okolního životního prostředí. Jednotlivé fáze zahrnující přípravu a reakci na mimořádnou situaci, zahrnující přípravu, plánování, reakce a obnovení původních poměrů, ilustruje obr. 8.



Obr. 8. Ilustrace jednotlivých fází, které souvisí s reakcí na mimořádnou radiační situaci, kde je snahou vrátit havarijní poměry do původního kontrolovatelného stavu.

Závěr

Metoda INAA slouží pro stanovení složení daného analyzovaného vzorku v širokém rozsahu zastoupení jednotlivých hlavních prvků až po stopové prvky. Dosahuje se toho vystavením vzorku neutronům a následnou spektrometrickou analýzou aktivovaných prvků. Ozařování obvykle probíhá v reaktoru, ale ke stejnému účelu slouží i jiné zdroje neutronů včetně urychlovačů (využití fúzní reakce DT a DD) a také radionuklidových zdroje neutronů (jako je PuBe a AmBe) resp. zdroje Cf-252, kde se produkují neutrony na základě samovolného štěpení. Neutrony, jimiž je vystaven vzorek, vyvolají interakce, které vedou k přeměně stabilních prvků v radioaktivní. Vzorek pak prochází jaderným β^+ nebo β^- rozpadem, při kterém se uvolňují částice a gama záření, dokud se radionuklidy nevrátí do stabilního stavu. Uvolněné gama paprsky jsou jedinečné signatury pro každý z izotopů přítomných ve vzorku. Pomocí gama detektoru lze kvantifikovat různé gama paprsky, aby se určilo, co je přítomno ve vzorku.

Vzhledem k tomu, že při využívání INAA se používá zdrojů ionizujícího záření, je nezbytné zajistit spolehlivou ochranu pracovníků před nadměrným ozářením. Je rovněž nutno věnovat pozornost i možné kontaminaci prostředí v důsledku aktivovaných vzorků. Z hlediska radiační ochrany a monitorování pole záření

a osobních dávek je třeba věnovat zvláštní pozornost problému, který souvisí s tím, že se obvykle jedná o směsné pole neutronů a záření gama. Je proto potřebné použít taková detekční čidla, které mohou odpovídajícím způsobem selektivně reagovat na jednotlivé složky radiačního pole.

Pro efektivní činnost orgánů pro vynucování práva je nezbytná analýza složení nelegálních drog. Stanovení obsahu hlavních i stopových prvků poskytuje důležité informace, které umožňují identifikaci specifických vlastností drog, což lze využít i pro zjištění místa jejich původu. Tyto poznatky jsou velkým přínosem pro forenzní aplikace této nedestruktivní analytické metody. Vzorky heroinu, kokainu a metamfetaminu byly testovány pomocí INAA pro stanovení přítomnosti několika stopových prvků. Výsledky potvrdily vhodnost tohoto postupu v praxi.

Poděkování: Práce vznikla za částečné podpory MV ČR v rámci projektu č. VI20192022162 „Prvková charakterizace mikrostop a omamných a psychotropních látek jadernými analytickými metodami“ řešeného na Policejní akademii ČR v Praze jako součást programu bezpečnostního výzkumu MV ČR.

Literatura

- KUCHAŘ, Martin; KUČERA, Jan; SABOL, Jozef a Ivana KRAUSOVÁ. *Potential of INAA in elemental analysis of heroin, cocaine, and methamphetamine*. RadChem 2022 Conference, Mariánské Lázně, May 15. – 20., 2022. Online (8.8.2022): <https://indico.fjfi.cvut.cz/event/195/>.
- KUČERA, Jan; KAMENÍK, Jan; SABOL, Jozef et al. *Stanovení prvkového složení drog neutronovou aktivační analýzou pro zjišťování jejich původu – studie proveditelnosti*. In: Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké kriminalistické konference „Pokroky v kriminalistice 2017“ (J. Němec, J. Suchánek, editoři), Praha, 12. -13. 9. 2017. ISBN 978-80-7251-485-4.
- KUBINYI, Jozef; SABOL, Jozef a Andrej VONDRÁK. *Principy radiační ochrany v nukleární medicíně*. Praha, Grada Publishing, a.s., 2018. ISBN 978-1-78985-973-7.
- HAMIDATOU, L. A. Overview of neutron activation analysis. In: *Advanced technologies and applications of neutron activation analysis* (HAMIDATOU, L. A., Ed.). IntechOpen Limited, London, UK, 2019. ISBN 978-1-78985-973-7.
- Advances in neutron activation analysis*. IAEA, TECDOC Series, Vienna, 2018. ISBN 978-92-0-100618-9.
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP, 2007. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 2007, 37(2-4).
- Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.
- Determining elemental composition with neutron activation analysis*. Bureau Veritas, New York, 26 June 2019. Online (8.8.2022): <https://www.bvna.com/insight/determining-elemental-composition-neutron-activation-analysis>.
- Neutron activation analysis*. Ústav jaderné fyziky, ČAV, Husinec-Řež, ČR, 2012. Online (8. 8. 2022): <https://www.ujf.cas.cz/en/research-development/large-research-infrastructure-and-centres/canam/laboratories/Laboratory2/neutron-activation-analysis.html>.

RESUMÉ

Článek shrnuje některé specifické postupy související se zajištěním adekvátní ochrany osob a životního prostředí při aplikacích instrumentální neutronové analýzy pro detekci a identifikaci drog a dalších narkotik, která umožňuje získat informace o charakteristickém složení těchto látek. Na základě těchto poznatků je potom možné usuzovat o místě jejich původu, což příslušným orgánům umožní efektivněji posuzovat okolnosti spojené s jejich nezákonnou přepravou, distribucí a užíváním zachycených těchto nebezpečných látek. Jsou také popsány vybrané neutronové zdroje, přehled základů radiační ochrany včetně příslušných veličin pro kvantifikaci ozáření za normálních a mimořádných situací.

Klíčová slova: Detekce drog, neutronová aktivační analýza, INAA, zdroje neutronů, radiační ochrana.

SUMMARY

SABOL, Jozef: ENSURING ADEQUATE PROTECTION WHEN APPLYING INAA FOR DRUG DETECTION AND IDENTIFICATION

The paper summarizes some specific procedures related to ensuring adequate protection of people and the environment during applications of instrumental neutron analysis for detecting and identifying drugs and other narcotics, which allow obtaining information about the characteristic composition of these substances. Based on this information, it is then possible to deduce the place of their origin, enabling the relevant authorities to more effectively assess the circumstances associated with their illegal transport, distribution and use of the seized dangerous substances. In addition, the article discusses the properties of some selected neutron sources. It also presents an overview of the basics of radiation protection, including the relevant quantities for quantifying exposure in routine cases and emergencies.

Keywords: drug detection, neutron activation analysis, INAA, neutron sources, radiation protection.