



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Studies

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta
Katedra radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva

Diplomová práce

**Rizika spojená s uvolněním radioaktivních látek při
transportech na pracoviště nukleární medicíny**

Vypracoval: Bc. Jiří Helešic
Vedoucí práce: prof. Dr. rer. nat. Friedo ZÖLZER

České Budějovice 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou, rozbořem a vyhodnocením rizik spojených s uvolněním radioaktivních látek během transportů, eventuálních dopravních nehod a radiačních zátěží osob při manipulaci, během celého řetězce přepravy na pracoviště nukleární medicíny, v návaznosti na platnou legislativu a technické zabezpečení přepravovaných látek. Teoretická část se zaměřuje na popis současného stavu této problematiky, důvodů využití radionuklidů v České republice, na popis transportů radiofarmak a legislativy s tím spojené. Ve výzkumné části je provedena analýza a rozbor zdravotních rizik osob, které by přišly do kontaktu s uvolněnou radioaktivitou, výpočet radiačního zatížení osoby v blízkosti uvolněné radioaktivity a řešení následků úniku ionizujícího záření. V této práci je mapována výroba a využití umělých radionuklidů, způsoby přepravy a její technické zabezpečení a manipulace s radionuklidy během transportu. Dále výzkum v oblasti případné dopravní nehody během přepravy a připravenost a postupy záchranných složek integrovaného záchranného systému. V diskusi je komentářem porovnáván zjištěný stav legislativy bezpečnosti přepravy, radiační zátěže a rizika transportů. V závěru je zjištěno, že úroveň legislativy a radiační zátěže je na přijatelné úrovni. Práce přichází s vlastním návrhem vylepšení bezpečnosti přepravy radionuklidů v České republice, a to zavedením práva přednosti v jízdě přepravujícím vozidlům.

Klíčová slova

Bezpečnost

Legislativa

Nehoda

Přeprava

Radionuklid

Riziko

Záření

Abstract

This thesis deals with analysis and evaluation of risks associated with the release of radioactive materials during the transport, eventual accidents and radiation load handling throughout the all transport chain to nuclear medicine workplace in relation to current legislation and technical support for the transported substances. The theoretical part is focused on describing the current state of these issues, the reasons for using the radionuclides in the Czech Republic, their transport and description of legislation associated with that all. The research part shows the analysis of the health risks of people who might come in contact with the release of radioactivity. Then the analysis solves such consequences. In this work we mapped out the production and use of artificial radionuclides, modes of transportation and its technical security and handling of radionuclides during the transport. We also present the research in some possible accident during the transport. As well as emergency readiness and procedures of the Integrated Rescue System. In discussion there are throughout the commentary compared the following: determined state laws transport safety, radiation burden and risks of transports. In conclusion we found out that the level of legislation and the radiation burden is at an acceptable level. The work comes with its own proposal for improving transportation safety of radionuclides in the Czech Republic and that is to introduce the rights-of-way to vehicles described above.

Keywords

Accident

Legislation

Radiation

Radionuclide

Risk

Safety

Transportation

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 17. 5. 2015

Bc. Jiří Helešic

Poděkování

Touto cestou děkuji prof. Dr. rer. nat. Friedo Zölzerovi, za vedení a odbornou konzultaci, Dr. Luboši Moravcovi za odbornou pomoc z oblasti přepravy radiofarmak, Ing. Adamu Pavelkovi z Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s., Ing. Zuzaně Paškové, MBA ze Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, pplk. Ing. Vladimíru Šulcovi Ph.D., pplk. Mgr. Michalu Hodbořovi z Policejního prezidia Policie ČR a por. Bc. Janu Kubešovi z Hasičského záchranného sboru z Chemické laboratoře Třemošná a kpt. Ing. Michalu Haladovi z HZS České Budějovice, rodině a Bohumile Jirouškové, za poskytnutí spolupráce a informací pro zpracování této práce.

Obsah

1	SOUČASNÝ STAV	13
1.1	Přepravy radioaktivních látek a jejich kontrola	13
1.1.1	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA)	13
1.1.2	Evropská unie ve vztahu k využívání jaderné energie	15
1.1.3	Situace v České republice k využívání jaderné energie	15
1.1.4	Státní ústav radiační ochrany - SÚRO	15
1.2	Legislativa přepravy radioaktivních látek	16
1.2.1	Atomový zákon č. 18/1997 Sb. – vybraná ustanovení	16
1.2.2	Povinnosti při přepravě a dopravě jaderných položek a radioaktivních látek	17
1.2.3	Státní úřad pro jadernou bezpečnost - SÚJB	18
1.2.3.1	Povolování přeprav radioaktivních materiálů	19
1.2.4	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě ADR	22
1.3	Radionuklidy v nukleární medicíně	26
1.3.1	Zobrazovací metody nukleární medicíny	26
1.3.2	Radiostopová diagnostika in vivo	29
1.3.3	Využití radionuklidů v lékařství v nukleární medicíně - scintigrafie	30
2	CÍL PRÁCE A VÝZKUMNÁ OTÁZKA	32
3	VÝZKUMNÁ OTÁZKA	32
4	METODIKA	33
5	VÝSLEDKY	36
5.1	Analýza a rozbor rizik s uvolněním radioaktivních látek během transportů	36
5.1.1	Fyzikální charakteristika záření alfa, beta a gama	36
5.1.2	Modelace a výpočet radiačního zatížení osob při uvolnění radiace	38
5.1.2.1	Výpočet dávkového příkonu při vnějším ozáření	38
5.1.2.2	Příklad radiačního zatížení při vdechnutí uvolněného radionuklidu	43
5.1.3	Biologické účinky ionizujícího záření	45
5.1.3.1	Vnitřní kontaminace	53
5.1.3.2	Vnější kontaminace	54
5.1.4	Akutní nemoc z ozáření	55
5.1.5	Způsoby řešení při zasažení uvolněným ionizujícím zářením	55

5.2	Výroba umělých radionuklidů	57
5.2.1	Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s. – výrobce radiofarmak	58
5.2.2	Výroba umělého radionuklidu fluoru - ¹⁸ F	61
5.2.2.1	Výroba radiofarmaka Fludeoxyglukósy FDG	61
5.3	Bezpečnost přepravy radioaktivních materiálů	62
5.3.1	Přepravní schránky pro radiofarmaka	63
5.3.2	Podmínky bezpečné přepravy	64
5.4	Rozbor legislativní a technické připravenosti IZS	65
5.4.1	Simulace dopravní nehody vozidla převážející radioaktivní látky	65
5.4.1.1	Postup IZS při zjištění, ohlášení dopravní nehody převážející radionuklidu	65
5.4.1.2	Postup Policie ČR při nehodě s radioaktivním materiálem	66
5.4.1.3	Postup HZS ČR při nehodě s radioaktivním materiálem	67
5.4.1.4	Radiační ochrana při vytýčení bezpečnostních zón	71
5.4.1.5	Dopravní nehoda s označením ADR – specifika postupu IZS	71
5.4.1.6	Koncepce chemické služby HZS	75
5.4.1.7	Chemické laboratoře Hasičského záchranného sboru České republiky	75
5.5	Statistika dopravních nehod vozidel ADR	78
5.5.1	Zhodnocení nehod z hlediska přeprav radioaktivních látek	80
6	DISKUZE	82
6.1	Zhodnocení výzkumné otázky	82
6.2	Návrh vlastního řešení v oblasti snížení rizik přepravy radionuklidů	83
6.2.1	Vyjádření vybraného přepravce radionuklidů – charakteristika firmy	83
6.2.2	Výsledek ztrát vzniklých při zpoždění přepravy	84
6.2.3	Ekonomický pohled ztrát	85
6.2.4	Zdravotní pohled ztrát	86
6.3	Slovenská legislativa v oblasti přeprav radiofarmak	86
6.4	Návrh snížení rizika transportům zavedením práva přednosti v jízdě	87
7	ZÁVĚR	89
8	SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	90
9	PŘÍLOHY	93

Seznam obrázků

Obrázek 1- Pozitronový emisní tomograf pro vyšetření např. nádorů, za využití radionuklidů	28
Obrázek 2 - Scintigrafické vyšetření - zobrazení distribuce radioindikátoru v organismu	31
Obrázek 3 - Schématické znázornění účinků ionizujícího záření na živou tkáň	50
Obrázek 4 - Cyklotron Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s.	59
Obrázek 5 - Silné magnety usměrňující tok ionizujícího záření po terčích v kolimátoru viz obr. 7	60
Obrázek 6 - Kolimátor cyklotronu s ukázkou terčiku pro absorpci usměrněného paprsku záření	60
Obrázek 7 - Chemický vzorec využití glukózy s ^{18}F , čisté výrobní prostory, laboratoř ÚJV Řež, a. s.	61
Obrázek 8 - Gamaspektrometr – měření vzorku radiofarmaka v kontejneru	62
Obrázek 9 - Převážná schránka pro radiofarmakum např. Deoxyglukózu FDG s fluorem F^{18}	63
Obrázek 10 - Ukládání radiofarmak do přepravních schránek a přepravního kontejneru	64
Obrázek 11 - Ukázka označení vozidla převážející	72
Obrázek 12 - Ukázka tabulky Kemlerova kódu	72
Obrázek 13 - Zásahový dozimetr HZS označení URAD 115	74
Obrázek 14 - Osobní dozimetr HZS, označení SOR/R-20 verze DMC	74
Obrázek 15 - Radiometr používaný u jednotek HZS	75
Obrázek 16 - Rozmístění chemických laboratoří HZS v ČR s vyznačením působnosti	77
Obrázek 17 - Ukázka části konkrétního povolení k užívání přednosti v jízdě pro vozidla převážející radioaktivní materiály, vydáno Slovenskou republikou pro českého přepravce	87

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Zařazení jaderných materiálů do kategorií pro účely fyzické ochrany	21
Tabulka 2 - Obrázek výpočtu dávkového příkonu u zdroje záření z naměřené hodnoty	39
Tabulka 3 - Porovnávací tabulka doby pobytu u zdroje ionizujícího záření s hodnotami vzdáleností	40
Tabulka 4 - Odhad aktivity bodového zdroje ionizujícího záření ve vzdálenosti 10 m	42
Tabulka 5 - Odhad aktivity bodového ZIZ F_{18}	44
Tabulka 6 - Koeficienty pravděpodobnosti výskytu stochastických účinků podle ICRP	53
Tabulka 7 - Rozdělení radiačních událostí	73

Seznam grafů

Graf 1 - Závažnost deterministických biologických účinků ozáření	51
Graf 2 - Vývoj dopravních nehod přepravujících nebezpečné látky podle ADR	79
Graf 3 - Přehled kontrol vozidel přepravujících nebezpečné látky	80

Seznam použitých zkratk

ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)
BSS	Mezinárodní základní bezpečnostní standardy (International Basic Safety Standards)
BZ	Bezpečnostní zóna
CT	Počítačová tomografie neboli výpočetní tomografie
COTIF	Úmluva o mezinárodní silniční dopravě
ČR	Česká republika
CHL	Chemická laboratoř
CHS	Chemická služba
EHK	Evropská hospodářská komise
EHS	Evropské hospodářské společenství
EU	Evropská unie
FDG	Radiofarmakum – fluordeoxyglukóza
HZS	Hasičský záchranný sbor České republiky
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
ICRP	Mezinárodní organizace radiační ochrany
IMDG	Mezinárodním námořní řád pro nebezpečné věci
IOO	Institut ochrany obyvatelstva
IRU	Mezinárodní unie silniční dopravy
IQ	Inteligenční quocient
IZS	Integrovaný záchranný systém
LD	Letální dávka
LET	Lineární přenos energie (Linear Energy Transfer)
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MGP	Společnost s ručením omezeným – přepravce radionuklid

MRI	Magnetická rezonance
MU	Mimořádná událost
NZ	Nebezpečná zóna
PČR	Policie České republiky
PO	Požární ochrana
RaL	Radioaktivní látky
PET	Pozitronová emisní tomografie
RBE	Relativní biologická účinnost
RID	Mezinárodní železniční přeprava nebezpečných věcí
RMS	Radiační monitorovací síť České republiky
RTG	Rentgenové vyšetření
SI	Mezinárodně smluvená soustava jednotek fyzikálních veličin
SPECT	Jednofotonová emisní tomografie – diagnostické lékařské zařízení
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu (Řež, a. s.)
UN	Čtyřčíselný kód charakterizující látku při přepravě
UNSCEAR	Vědecký výbor Spojených národů pro účinky atomového záření
UV	Ultrafialové záření
WP EHK OSN	Pracovní skupina pro přepravu nebezpečných věcí Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů
ZIZ	Zdroj ionizujícího záření

Úvod

Vývojem civilizace a objevením ionizujícího záření, vyspěla společnost v léčbě nemocí lidí na takovou úroveň, že tuto oblast vědy začlenila do praktického využití diagnostik a léčby chorob lidstva. Česká republika patří mezi země s nejlepší zdravotnickou péčí na světě, s čímž souvisí také úroveň diagnostiky a úspěšnosti léčby nemocí. Dnes je obecně známá léčba s diagnostikou pomocí rentgenu počítačové tomografie, či pozitronové emisní tomografie. Při některých typech vyšetření se podávají pacientům radioaktivní látky, ve formě diagnostického léčiva, které slouží například pro lokalizaci zhoubných útvarů. Pro praktickou realizaci využití radionuklidů v medicíně je nezbytný transport těchto látek z míst výroby lékařských radionuklidů používaných při diagnostice nádorů a dalších onemocnění. Proces přepravy radionuklidů je často limitován krátkým obdobím rozpadu, řádově několika hodin. Přepravy těchto látek sebou nesou určitou dávku rizika při případné nehodě a uvolnění radiace. Případ uvolnění ionizujícího záření do okolního prostředí z přepravních schránek radiofarmak, je téma, kterým se tato práce zabývá. Cílem práce je analyzovat, rozebrat a vyhodnotit rizika spojená s uvolněním radioaktivních látek během transportů, eventuálních dopravních nehod a radiačních zátěží osob při manipulaci, během celého řetězce přepravy na pracoviště nukleární medicíny v návaznosti na platnou legislativu České republiky, za podpory a součinnosti jednoho z významných přepravních v České republice firmy – M.G.P., spol. s r.o., která se mimo jiné zabývá distribucí a smluvní přepravou radioaktivních preparátů a chemikálií pro medicínské využití a za podpory a získání praktických poznatků řešení radiačních událostí Chemických laboratoří a Chemické služby Hasičského záchranného sboru České republiky, které tuto činnost prakticky provádí. Práce po rozboru a zmapování problematiky navrhuje vlastní řešení ke snížení rizika uvolnění ionizujícího záření do okolního prostředí, po případné dopravní nehodě, při transpotech na pracoviště nukleární medicíny.

1 Současný stav

1.1 Přepravy radioaktivních látek a jejich kontrola

V oblasti využívání jaderné energie v celosvětovém měřítku jsou věcně i legislativně zapojeny zejména Mezinárodní agentura pro atomovou energii (dále jen IAEA)², Evropská unie (dále jen EU) a Evropské společenství pro atomovou energii (dále jen Euratom). Okolnosti přeprav radioaktivních látek zastřešuje zejména Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (dále jen ADR).¹

1.1.1 Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA)

IAEA svou činností podporuje mírové využití jaderné energie ve prospěch lidstva a dohlíží, aby nebyla využívána na vojenské účely. IAEA je hlavním světovým mezivládním fórem pro vědeckou a technologickou spolupráci při mírovém využívání jaderné energie. Zároveň slouží jako mezinárodní inspekční orgán, jenž dohlíží na uplatňování bezpečnostních standardů a prověřuje civilní jaderné programy.¹

IAEA byla založena v roce 1957 jako autonomní orgán v rámci systému Organizace spojených národů. Poskytuje technickou pomoc přibližně 140 členským státům a podporuje využití jaderného výzkumu a technologií ve prospěch udržitelného rozvoje.¹

Monitoruje a prověřuje dodržování bilaterálních a mezinárodních úmluv o nešíření jaderných zbraní a zajišťuje, aby jaderný materiál a zařízení nebyly zneužívány pro vojenské účely. Na všech kontinentech se více než 900 projektů, které spadají do bezpečnostního programu IAEA, účastní přibližně 250 inspektorů.¹

Řídícími orgány jsou generální konference, v níž jsou zastoupeny všechny členské státy (schází se jednou za rok), a Rada guvernérů, která zasedá v průběhu celého roku. Rada guvernérů je agenturním politickým orgánem, který se skládá ze zástupců 35 členských států vybraných podle regionálního klíče (guvernérů). ČR patří v souladu se Stanovami IAEA do východoevropské regionální skupiny. Rada guvernérů se schází pětkrát ročně - v březnu, v červnu, v září (před a po Generální konferenci IAEA – vrcholný řídicí

orgán IAEA) a v listopadu nebo v prosinci po jednání Výboru pro technickou pomoc a spolupráci. ¹

Hlavní sídlo IAEA je ve Vídni. Česká republika se aktivně podílí na práci IAEA formou účasti na vypracovávání různých dokumentů a materiálů v oblasti radiační ochrany a jaderné bezpečnosti. Řada odborníků z ČR působila jako experti IAEA zapojení do implementace programu agentury. ¹

IAEA se v rámci programu technické kooperace významně zasloužila o zvýšení úrovně radiační ochrany a jaderné bezpečnosti v členských zemích, z nichž některé neměly v minulosti prakticky žádné kontrolní mechanismy pro zabezpečení zdrojů ionizujícího záření a jaderných zařízení. Stejná situace se s pomocí agenturních projektů řešila, i pokud jde o budování infrastruktury, zejména pokud jde o systém oznamování, povolování, inspekce a dalších nástrojů zaměřených na kontrolu zdrojů záření a ozáření pracovníků, obyvatel i pacientů. ¹

Kromě základních bezpečnostních standardů IAEA – BSS (Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards) vydává agentura celou řadu dalších dokumentů, které napomáhají členským zemím IAEA jednak implementovat tyto standardy v rámci svého kontrolního systému a jednak podporují rozvíjení radiačních a jaderných technologií pro mírové využití v různých oblastech. ¹

Kromě toho IAEA organizuje řadu kurzů, seminářů a školení, které rovněž přispívají ke zvýšení efektivnosti uvádění nových postupů zaměřených na zvýšení úrovně radiační ochrany a jaderné bezpečnosti. ¹

V poslední době věnuje IAEA mimořádnou pozornost zajištění bezpečnosti silných radioaktivních zářičů, kde je odůvodněná hrozba jejich možného použití pro teroristické útoky. Za tímto účelem rozpracovala IAEA systém kategorizace radioaktivních zdrojů podle stupně jejich nebezpečnosti. V souladu s tímto systémem byly zdroje rozděleny do pěti kategorií, od těch nejnebezpečnějších, používaných v radioaktivních termoelektrických generátorech a průmyslových ozařovačích (kategorie 1), až po méně nebezpečné, které se využívají v takových aplikacích, jako jsou rentgen-fluorescenční analyzátoři nebo hromosvody. ¹

1.1.2 Evropská unie ve vztahu k využívání jaderné energie

Všechny členské země EU jsou také členy Euroatom, jehož dokumenty upravují obecně problematiku ochrany zdraví před účinky ionizujícího záření. Požadavky na radiační ochranu jsou obsaženy v řadě směrnic a doporučení, které dotvářejí komunitární právo v dané oblasti a sjednocují praxi radiační ochrany ve všech státech EU. ¹

1. Základní principy radiační ochrany (směrnice Rady 96/29/Euratom, kterou se stanovují základní bezpečnostní standardy na ochranu pracovníků a obyvatelstva před riziky vyplývajícími z ionizujícího záření);
2. Lékařské ozáření (směrnice Rady 97/43/Euratom o ochraně jednotlivců před riziky ionizujícího záření v souvislosti s lékařským ozářením);
3. Radiační ochrana pracovníků se zdroji (směrnice Rady 90/641/Euratom o operační ochraně smluvních pracovníků vystavených riziku ionizujícího záření při jejich činnostech v kontrolovaných pásmech);
4. Kontrola uzavřených zářičů a opuštěných zdrojů (směrnice Rady 2003/122/Euratom o kontrole vysokoaktivních uzavřených zdrojů záření a opuštěných zdrojů);
5. Přeprava radioaktivních odpadů a radioaktivních látek (směrnice Rady 92/3/Euratom o dozoru a kontrole přepravy radioaktivních odpadů mezi členskými státy, dovnitř nebo ven ze Společenství). ¹

1.1.3 Situace v České republice k využívání jaderné energie

Česká republika přistoupila ke všem klíčovým mezinárodním smlouvám a úmluvám, které se vztahují k oblasti mírového využívání jaderné energie. Aplikuje je buď přímo, nebo prostřednictvím přijaté jaderné legislativy. Česká republika je v dané oblasti vázána rovněž řadou bilaterálních dohod. Partnerem EU v otázkách radiační ochrany a jaderné bezpečnosti je za Českou republiku Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB). ¹

1.1.4 Státní ústav radiační ochrany - SÚRO

Státní ústav radiační ochrany (dále jen SÚRO) je veřejnou výzkumnou institucí zabývající se odbornou činností v oblasti ochrany obyvatelstva a pověřenou institucí SÚJB

se sídlem v Praze. Ústav se zabývá výzkumnou činností, která je orientována na výzkum ochrany před ionizujícím zářením, včetně zajištění infrastruktury tohoto výzkumu a to v oblastech bezpečnostního výzkumu, výzkumu radiační monitorovací sítě a výzkumu expozic umělým zdrojům ionizujícího záření a výzkumu expozice přírodním zdrojům radioaktivního záření. SÚRO se podílí na činnosti všech stálých složek celostátní radiační monitorovací sítě ČR (dále jen RMS) a zabezpečuje také funkci Centrální laboratoře monitorovací sítě, která koordinuje měření vzorků odebraných laboratorními a mobilními skupinami, zajišťuje vybraná měření těchto vzorků a celorepublikové hodnocení výsledků měření a koordinuje a zajišťuje měření vnitřní kontaminace osob. SÚRO se také v rámci RMS účastní havarijních cvičení a mezilaboratorních porovnání pořádaných SÚJB nebo jinými našimi i zahraničními organizacemi. Srovnávací měření pořádané SÚJB spoluorganizuje a vyhodnocuje. Někteří zaměstnanci SÚRO pracují ve skupině specialistů radiační ochrany Krizového štábu SÚJB a ve službách Styčného místa SÚRO.²

1.2 Legislativa přepravy radioaktivních látek

Transporty radioaktivních látek na pracoviště nukleární medicíny od dodavatelů jsou ošetřeny legislativou České republiky, mezinárodní legislativou a jsou realizovány vybranými firmami, které využívají převážně automobilovou dopravu.

1.2.1 Atomový zákon č. 18/1997 Sb. – vybraná ustanovení

O mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ze dne 24. ledna 1997, včetně změn až po 250/2014 Sb.³

Část I. Mírové využívání jaderné energie a ionizujícího záření (§1)

- a) způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření,

- b) systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření,
- c) povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod,
- d) zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod,
- e) podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady,
- f) výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami. ³

1.2.2 Povinnosti při přepravě a dopravě jaderných položek a radioaktivních látek

Držitel povolení podle § 9 odst. 1 písm. m) nebo osoba předávající radioaktivní látku k přepravě, uvedená jako odesílatel v přepravních dokladech, (dále jen "přepravce") je povinna (§20):

- a) přesvědčit se, že příjemce je oprávněn k nakládání s jaderným materiálem nebo radioaktivní látkou podle tohoto zákona,
- b) zabezpečit přepravu a dopravu jaderných materiálů a prováděcím předpisem stanovených radioaktivních látek způsobem podle prováděcího předpisu a v souladu s požadavky stanovenými ve zvláštních předpisech,
- c) předávat k dopravě jaderné materiály a prováděcím předpisem stanovené radioaktivní látky jen v obalových souborech typově schválených Úřadem podle tohoto zákona,
- d) zajistit, aby během přepravy a dopravy únik radionuklidů ani ozáření osob nepřekročily limity a směrné hodnoty stanovené v prováděcím předpise, a zajistit fyzickou ochranu přeprav jaderných materiálů v souladu s prováděcím předpisem.

Související zákony a právní normy:

- Zákon č. 111/1994 Sb., o silniční dopravě
- Vyhláška Ministerstva dopravy č. 187/1994 Sb., kterou se provádí zákon o silniční dopravě
- Zákon č. 266/1994 Sb., o dráhách, příloha I. k vyhlášce ministra zahraničních věcí č. 8/1985 Sb., o Úmluvě o mezinárodní železniční přepravě (COTIF)
- Zákon č. 114/1995 Sb., o vnitrozemské plavbě
- Vyhláška Ministerstva dopravy č. 17/1966 Sb., o leteckém přepravním řádu, ve znění vyhlášky č. 15/1971 Sb.
- Čl. 4/13 nařízení Rady (EHS) č. 2913/92 ze dne 12. října 1992, kterým se vydává celní kodex Společenství, v platném znění
- Čl. 4 nařízení Rady (Euratom) č. 1493/93 ze dne 8. června 1993 o přepravě radioaktivních látek mezi členskými státy
- § 10 vyhlášky č. 317/2002 Sb., o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě).³

1.2.3 Státní úřad pro jadernou bezpečnost - SÚJB

Firmy, které provádějí distribuci radiofarmak, resp. zdrojů ionizujícího záření obecně, musí být držiteli povolení SÚJB k dovozu, vývozu nebo distribuci zdrojů ionizujícího záření. V případě, že zdroj ionizujícího záření je radioaktivní látka, musí držitel povolení zajistit, aby jejich doprava probíhala v souladu s požadavky na přepravu nebezpečných látek, tj. v tomto případě třída 7 – Radioaktivita. Pro silniční dopravu je to tzv. ADR.³

Působnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (§4):

- a) vykonává státní dozor nad jadernou bezpečností, jadernými položkami, fyzickou ochranou, radiační ochranou, havarijní připraveností a technickou bezpečností vybraných zařízení a kontroluje dodržování povinností podle tohoto zákona,
- b) vykonává kontrolu nešíření jaderných zbraní a státní dozor nad jadernými položkami a fyzickou ochranou jaderných materiálů a jaderných zařízení,
- c) vydává povolení k výkonu činností podle tohoto zákona a typově schvaluje obalové soubory pro přepravu a skladování jaderných materiálů a radioaktivních látek stanovených prováděcím právním předpisem, zdroje ionizujícího záření a další výrobky.³

1.2.3.1 Povolování přeprav radioaktivních materiálů

Povolení přeprav SÚJB (§ 9 a § 7 vyhlášky č. 317/2002 Sb.)

Povolení SÚJB je nutné k přepravám:³

- jaderných materiálů,
- radioaktivních látek (o aktivitě nad 3000 A1 nebo 3000 A2 nebo 1000 TBq, podle toho, co je menší),
- radioaktivních materiálů v obalových souborech typu B (M), které nejsou vyrobeny pro rozsah teplot od -40 °C do +70 °C nebo umožňují občasné kontrolované větrání,
- za zvláštních podmínek,
- plavidlem zvláštního účelu se stanoveným programem radiační ochrany,
- radioaktivních materiálů, jejichž hodnoty A1 a A2 byly stanoveny výpočtem.

Podmínky povolení:

SÚJB vydá rozhodnutí o povolení přepravy, pouze pokud byla již vydána rozhodnutí o typovém schválení obalového souboru pro přepravu daných radioaktivních materiálů.

Náležitosti přepravy radioaktivních látek – uzavřených záříčů:

- informace, zda se jedná o jednu nebo více přeprav,
- specifikace místa určení záříče (záříčů),

- identifikace držitele zářiče (zářičů),
- popis zářiče (zářičů) - obsažené radionuklidy, aktivita, počet, forma (v přístrojích nebo výrobcích),
- prohlášení statutárního nebo odpovědného zástupce příjemce uzavřených zářičů o správnosti vyplnění formuláře a o tom, že je držitelem povolení k nakládání s příslušnými uzavřenými zářiči,
- potvrzení kompetentního úřadu země příjemce uzavřených zářičů, že zaregistroval uvedené prohlášení příjemce uzavřených zářičů. Tento administrativní požadavek vyplývá z přímého účinku Nařízení Rady EU Council Regulation (Euratom) No. 1493/93 of 8 June 1993 on shipments of radioactive substances between Member States. ³

Pro účely fyzické ochrany musí být jaderné materiály zařazeny do I., II. nebo III. kategorie. Zařazení jaderného materiálu se provádí podle jeho druhu, hmotnosti, obohacení a z hlediska závažnosti důsledků v případě jeho zneužití. Podrobnosti k zařazení jaderných materiálů do příslušné kategorie a ke způsobu a rozsahu zajištění jejich fyzické ochrany stanoví prováděcí předpis. ³

Zařazení jaderných materiálů do kategorií					
Poř. č.	Materiál	Druh	Kategorie		
			I.	II.	III.
1	Pluto-nium. a)	Neozářené. b)	2 kg a více.	Méně než 2 kg, ale více než 500 g.	500 g nebo méně, ale více než 15 g.
2	Uran-235	Neozářený. b):			
		- bohatý uran na 20 % U-235 nebo více.	5 kg a více	Méně než 5 kg, ale více, než 1 kg.	1 kg nebo méně, ale více, než 15 kg.
		-obohacený uran na 10 % U-235, ale na méně než 20%.		10 kg nebo více.	Méně, než 10 kg, ale více, než 1 kg.
		-obohacený uran nad přírodní, avšak na méně, než 10 % U-235			10 kg a více.
3	Uran-233	Neozářený. b)	2 kg a více.	Méně, než 2 kg, ale více, než 500g.	500 g nebo méně, ale více, než 15 g.
4	Ozářené palivo			Ochuzený nebo přírodní Uran, Thorium nebo nízko obohacené palivo (méně než 10 % štěpitelného obsahu) d), e)	

Tabulka 1 - Zařazení jaderných materiálů do kategorií pro účely fyzické ochrany ³

1.2.4 Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě ADR

Odpovědnost za „bezpečnou“ dopravu radiofarmak na pracoviště nukleární medicíny má tedy distributor (resp. dovozce) a řídí se pravidly ADR. Tyto předpisy věcně spadají pod gesci ministerstva dopravy. ⁴

Český překlad příloh ADR 2015

Kompletní znění příloh A a B dohody ADR se všemi změnami a doplňky, platné od 1. 1. 2015, bylo uveřejněno v anglickém originálu a jeho českém překladu ve Sbírce mezinárodních smluv, částce 5, jako sdělení Ministerstva zahraničních věcí 11/2015 Sb. m. s. ⁴

Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) byla sjednána v Ženevě dne 30. září 1957 pod patronací EHK OSN a vstoupila v platnost dne 29. ledna 1968. Dohoda byla pozměněna Protokolem pozměňujícím článek 14, který vstoupil v platnost dne 19. dubna 1985. ⁴

Podle článku 2 dohody nesmějí být nebezpečné věci, jejichž přeprava je přílohou A zakázána, přijímány k mezinárodní přepravě, zatímco mezinárodní přeprava jiných nebezpečných věcí je povolena, pokud jsou splněny podmínky stanovené v příloze A pro dotyčné věci, zejména pokud jde o jejich balení a označování a podmínky stanovené v příloze B, zejména pokud jde o konstrukci, výbavu a provoz vozidel přepravujících dotyčné věci. ⁴

Avšak podle článku 4 si každá smluvní strana ponechává právo regulovat nebo zakázat vstup nebezpečných věcí na své území z jiných důvodů, než je bezpečnost během přepravy. Smluvní strany si také ponechávají právo se dohodnout dvoustrannými nebo mnohostrannými dohodami, že určité nebezpečné věci, jejichž přeprava je přílohou A zakázána, mohou být na jejich území mezinárodně přepravovány za dodržení určitých podmínek, nebo že nebezpečné věci, jejichž mezinárodní přeprava je podle přílohy A povolena, mohou být na jejich území přepravovány za méně přísných podmínek, než jsou podmínky uvedené v přílohách A a B. ⁴

Přílohy A a B jsou od vstupu v platnost ADR pravidelně pozměňovány a novelizovány.

Struktura příloh A a B

Pracovní skupina pro přepravu nebezpečných věcí (WP. 15) Výboru pro vnitrozemskou dopravu EHK OSN rozhodla na svém 51. zasedání (26. – 30. října 1992) restrukturalizovat přílohy A a B na základě návrhu Mezinárodní unie silniční dopravy (dále jen IRU). Hlavními cíli bylo učinit předpisy přístupnějšími a jednoduššími pro uživatele tak, aby mohly být snadněji použitelné nejen pro mezinárodní silniční přepravy, ale i pro vnitrostátní přepravy ve všech evropských státech prostřednictvím vnitrostátní legislativy nebo legislativy Evropského společenství a tím zajistit konzistentní právní rámec na evropské úrovni. Považovalo se za nutné vymezit jasněji povinnosti různých účastníků přepravního procesu, seskupit systematictěji požadavky týkající se různých účastníků a oddělit právní požadavky ADR od evropských nebo mezinárodních norem, které by mohly být použity ke splnění takových požadavků.⁴

Nová struktura je konzistentní s Doporučeními OSN pro přepravu nebezpečných věcí, Vzorovými předpisy, Mezinárodním námořním řádem pro nebezpečné věci (IMDG Code) a Řádem pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí (dále jen RID). Je členěna do 9 částí a 2 příloh, aby se dodrželo ustanovení článku 2 vlastní Dohody. Struktura je následující:⁴

Příloha A

Všeobecná ustanovení a ustanovení týkající se nebezpečných látek a předmětů.

Část 1 Všeobecná ustanovení

Část 2 Klasifikace

Část 3 Vyjmenování nebezpečných věcí, zvláštní ustanovení a vynětí z platnosti pro omezená množství

Část 4 Ustanovení o používání obalů a cisteren

Část 5 Postupy při odesílání

Část 6 Požadavky na konstrukci a zkoušení obalů, velkých nádob pro volně ložené⁴

látky, cisteren a kontejnerů pro volně ložené látky

Část 7 Ustanovení o podmínkách přepravy, nakládky, vykládky a manipulace

Příloha B

Ustanovení o dopravních prostředcích a o přepravě

Část 8 Požadavky na osádky vozidel, jejich výbavu, provoz a průvodní doklady

Část 9 Požadavky na konstrukci a schvalování vozidel.

Část 1, která obsahuje všeobecná ustanovení a definice, je podstatnou částí, neboť obsahuje všechny definice pojmů používaných v dalších částech, a přesně definuje rozsah platnosti ADR, včetně možnosti vynětí z platnosti jejích ustanovení, jakož i platnosti jiných předpisů. Obsahuje rovněž ustanovení týkající se školení, odchylek, přechodných ustanovení, příslušných povinností různých účastníků přepravy nebezpečných věcí, kontrolních opatření, bezpečnostních poradců a zabezpečení přepravy nebezpečných věcí. Do této verze ADR byla zahrnuta nová ustanovení zaměřená na harmonizaci zákazů průjezdu vozidel přepravujících nebezpečné věci silničními tunely. ⁴

Ústřední částí pro používání restrukturalizované ADR je tabulka A kapitoly 3.2, která obsahuje seznam nebezpečných věcí v numerickém pořadí UN čísel. Jakmile se určí UN číslo určité nebezpečné látky nebo předmětu(ů), a lze v této tabulce nalézt odkazy na zvláštní požadavky, které platí pro přepravu této látky nebo předmětu(ů), a na kapitoly a oddíly, v nichž je možno tyto zvláštní požadavky nalézt. Je však třeba mít na paměti, že kromě těchto zvláštních požadavků je třeba dodržet i všeobecné požadavky a specifické požadavky pro příslušné třídy uvedené v různých částech ADR. ⁴

Sekretariát vypracoval abecední seznam nebezpečných látek a předmětů, který obsahuje UN čísla přiřazená k jednotlivým nebezpečným věcem, a zařadil jej jako tabulku B kapitoly 3.2 za účelem usnadnění přístupu k tabulce A, pokud UN číslo konkrétní nebezpečné látky nebo předmětu(ů) není známo. Tato tabulka B není z právního hlediska součástí ADR a slouží jen jako pomůcka pro snadnější orientaci. ⁴

Jestliže věci, o nichž je známo, že jsou nebezpečné, nebo existuje důvod předpokládat, že by mohly být nebezpečné, nemohou být v tabulce A, ani v tabulce B nalezeny,

musí být zatříděny podle části 2, která obsahuje všechny příslušné postupy a kritéria pro určení, zda jsou takové věci nebezpečné, a pokud jsou nebezpečné, ke kterému UN číslu by měly být přiřazeny. ⁴

Územní platnost ADR

ADR je dohodou mezi státy a neexistuje tudíž žádný nadnárodní orgán, který by mohl vynucovat její dodržování. V praxi jsou silniční kontroly prováděny smluvními stranami ADR a nedodržení jejich ustanovení může vyústit v uložení sankce národními orgány podle jejich vnitrostátních právních předpisů. Vlastní ADR žádné sankce nestanoví. K 1. 1. 2015 byly smluvními stranami ADR tyto státy: ⁴

Albánie, Andora, Ázerbajdžán, Belgie, Bělorusko, Bosna a Hercegovina, Bulharsko, Česko, Černá Hora, Dánsko, Estonsko, Finsko, Francie, Chorvatsko, Irsko, Island, Itálie, Kazachstán, Kypr, Lichtenštejnsko, Litva, Lotyšsko, Lucembursko, Malta, Maďarsko, Makedonie, Maroko, Moldavsko, Německo, Nizozemsko, Norsko, Polsko, Portugalsko, Rakousko, Rumunsko, Rusko, Řecko, Slovensko, Slovinsko, Spojené království Velké Británie a Severního Irska, Srbsko, Španělsko, Švédsko, Švýcarsko, Tádžikistán, Tunis, Turecko a Ukrajina. ⁴

ADR se vztahuje na přepravy prováděné po území nejméně dvou z výše uvedených smluvních stran. Kromě toho je třeba připomenout, že v zájmu jednotnosti a volného obchodu v EU byly přílohy A a B k ADR přijaty členskými státy EU jako základ pro právní úpravu silniční přepravy nebezpečných věcí po jejich území a mezi jejich územími (Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/68 z 20. října 2008 o pozemní přepravě nebezpečných věcí). Některé nečlenské státy EU rovněž přijaly přílohy A a B k ADR jako základ pro svou vnitrostátní legislativu. ⁴

Všechny dotazy týkající se aplikace ADR by měly být směřovány k odpovídajícímu příslušnému orgánu. Dodatečné informace je možno nalézt rovněž na webových stránkách dopravní divize EHK OSN – United Nations Economic Commission For Europe. ⁵

Tyto informace, které jsou průběžně novelizovány, zahrnují:

- dohodu ADR (bez příloh),

- protokol o podepsání,
- status ADR,
- depozitní oznámení,
- informace států (příslušné orgány),
- mnohostranné dohody,
- publikace (korigenda).

Aktualizace souborů a změn k roku 2015 ⁴

1.3 Radionuklidy v nukleární medicíně

Nukleární medicína je obor zabývající se diagnostikou a terapií pomocí otevřených radioaktivních látek aplikovaných do vnitřního prostředí organismu. Její metody jsou založeny na dvou základních vlastnostech radionuklidů: ⁶

- emise pronikavého ionizujícího záření při radioaktivních přeměnách jader,
- shodné chemické chování isotopů. Radioaktivní isotopy reagují chemicky stejně jako stabilní isotopy téhož prvku. ⁶

Radioaktivní atomy a jejich molekuly - sloučeniny "označené" radioaktivními prvky, se v organismu distribuují stejně tak, jako kdyby byly neradioaktivní, avšak při radioaktivních přeměnách příslušných jader je emitováno pronikavé záření. Toto záření je tak umožňují "zviditelnit", sledovat, indikovat, "stopovat", a měřit jejich množství detekčními přístroji při diagnostice, nebo svými radiobiologickými účinky toto záření může být využíváno k léčebným účelům. ⁶

Odtud obecný název indikátorové nebo stopovací (angl. tracer) metody, které se používají nejen za pomoci radionuklidů a nejen v medicíně, ale i v laboratorních a průmyslových aplikacích. ⁶

1.3.1 Zobrazovací metody nukleární medicíny

Nukleární medicína se zabývá diagnostikou a léčbou pomocí otevřených radioaktivních zářičů, které jsou ve formě radiofarmak aplikovány do vnitřního prostředí organi-

zmu. Využití těchto látek je založeno na indikátorovém principu, který na počátku 20. století objevil chemik maďarského původu György Hevesy (d'erd' heveši). Hevesyho objev oceněný v roce 1943 Nobelovou cenou za chemii umožnil neinvazivní sledování osudu látek v organismu pomocí jejich značení radionuklidy a detekce záření gama.⁷

Jedná se o zobrazovací metodu nukleární medicíny. Název je odvozen od scintilačního detektoru, ve kterém absorpce fotonů záření gama vyvolává světelné záblesky, scintilace, které jsou dále elektronicky zpracovány a vyhodnoceny. Scintilační kamera pořizuje snímky v oboru záření gama, podobně jako fotografická kamera pořizuje snímky v oboru viditelného záření. Výsledné scintigrafické snímky zobrazují mapy rozložení radiofarmak v organismu.⁷

Scintigrafie může být statická (obdoba fotografie) nebo dynamická (obdoba videa nebo filmu). Statická scintigrafie zobrazuje rozložení radiofarmaka ve tkáni, dynamická scintigrafie zachycuje jeho změny v čase. Snímky se pořizují buď ihned po aplikaci radiofarmaka (dynamická scintigrafie) nebo s různě dlouhým časovým odstupem (statická scintigrafie).⁷

Tomografické zobrazení se ve scintigrafii označuje jako emisní tomografie (záření je emitováno ze zdroje uvnitř organismu). Emisní tomografie se dělí na jednofotonovou (SPECT z anglického názvu Single Photon Computed Emission Tomography) a pozitronovou (PET - Positron Emission Tomography). SPECT je tomografickou variantou běžné planární scintigrafie, podobně jako je výpočetní tomografie CT tomografickou metodou v radiodiagnostice. PET je speciální svébytnou metodou, která ve vyspělých zemích patří k základním metodám onkologické diagnostiky. Velkou předností scintigrafie (včetně obou metod emisní tomografie) je možnost provedení celotělového vyšetření. Při stejné radiační zátěži pacienta je tak možné odhalit patologická ložiska i v předem neznámé lokalizaci.⁷

Množství radionuklidů, aplikovaných do organismu pro diagnostické účely jsou velmi malá (doslova stopová) – výsledné koncentrace ve tkáni jsou nano až piko molární (tj. 10^{-9} až 10^{-12} m). To je nezbytné nejen pro minimalizaci možných škodlivých účinků ionizujícího záření, ale také proto, aby vyšetření nijak neovlivnilo vyšetřovanou funkci.

Radioaktivní indikátory a radiofarmaka se velmi liší od kontrastních látek používaných v radiodiagnostice, které svým objemem, koncentrací a chemickým složením mohou funkci vyšetřovaných orgánů v průběhu vyšetření ovlivnit. Radiační zátěž pacientů při scintigrafickém vyšetření je v průměru stejná jako při rentgenovém vyšetření.⁷

Česká věda má v nukleární medicíně jednu významnou světovou prioritu. Nejčastěji používaným radiofarmakem v PET je v současné době fluorodeoxyglukóza (FDG) označená pozitronovým zářičem fluorem osmnáct – ^{18}F . Je to látka podobná glukóze, která se hromadí v místech zvýšeného metabolismu glukózy, mimo jiné ve tkáni zhoubných nádorů. Doyen americké nukleární medicíny prof. Henry N. Wagner, Jr., označil FDG za "molekulu století", protože zásadně změnila onkologickou diagnostiku a budoucnost zobrazovacích metod. Málokdo ví, že poprvé v historii FDG syntetizoval český chemik prof. RNDr. Josef Pacák, DrSc., na Přírodovědecké fakultě University Karlovy v roce 1968, který se v sedmdesátých letech 20. století podílel i na vývoji FDG značené ^{18}F pro pozitronovou emisní tomografii.⁷



Obrázek 1- Pozitronový emisní tomograf pro vyšetření např. nádorů, za využití radionuklidů⁷

1.3.2 Radiostopová diagnostika in vivo

Jde o ústřední metodu nukleární medicíny v radiostopové diagnostice in vivo. Aplikujeme vhodnou chemickou látku s navázaným radionuklidem - tzv. radioindikátor či radiofarmakum - do organismu, tato látka vstoupí do metabolismu a distribuuje se v organismu podle farmakokinetiky daného radioindikátoru. Chemická skladba radiofarmaka určuje jeho začlenění do kinetiky nebo do určitých metabolických procesů – cílený vstup (targeting) do relevantních tkání, orgánů, buněk či sub-buněčných elementů. Zabudovaný radionuklid svým vyzařováním pak umožňuje buď zevní detekci distribuce této látky (zářením gama u scintigrafie), nebo sledování jeho množství v odebraných vzorcích (biologických tekutin, většinou krve nebo moči). V případě terapie pak záření radionuklidu vykonává biologické účinky na buňky tkáně, v němž se radiofarmakum akumuluje (např. likviduje nádorové buňky).⁶

Radioaktivní jód ^{131}I v jodidu sodném NaI_{131}

Nejznámějším příkladem je aplikace radioaktivního jodidu sodného NaI_{131} , který se jako každý jód vychytává (akumuluje) ve štítné žláze. Zevní detekcí záření gama emitovaného při radioaktivních beta přeměnách jader ^{131}I pak lze změřit akumulaci tohoto jódu nebo zobrazit jeho distribuci ve štítné žláze (v případě potřeby záření beta může při aplikaci vyšších aktivit vykazovat biologické účinky na buňky, využívané v terapii).⁶

Byla vyvinuta řada druhů radiofarmak s afinitou k ledvinám, játrům, kostem, myokardu, některým nádorovým či zánětlivým tkáním, signálními receptory, pro jejichž funkci je daná látka indikátorem. Míra lokální akumulace radiofarmaka záleží na intenzitě místních metabolických a funkčních dějů v orgánech a tkáních. Případné poruchy funkce lze pomocí scintigrafického zobrazení lokalizovat, analyzovat a příp. i kvantifikovat.⁶

Nebo se radionuklid vstříkne do krevního oběhu a sleduje se dynamika jeho průchodu srdcem, plicemi a velkými cévami - v tomto případě bez metabolické vazby na konkrétní orgán, či opět s možností analýzy a kvantifikace.⁶

Molekulární zobrazení

S rozvojem organické chemie, biochemie a buněčné biologie byla vyvinuta některá radiofarmaka, jejichž značené molekuly mají afinitu ke zcela určitým specifickým druhům buněk či procesům na subcelulární úrovni. Pomocí scintigrafie a vhodného radiofarmaka tak lze cíleně vyšetřit nejen funkci určitého orgánu či tkáně, ale selektivně postihnout i zcela určitý typ metabolické nebo transportní cesty, např. enzymové či receptorové vazby nebo reakce antigenu s protilátkou. Pro tento účel byla vyvinuta a stále se vyvíjejí speciální radiofarmaka (jak pro diagnostiku, tak pro terapii), která jsou charakterizována svými účinky na molekulární úrovni. S trochou nadsázky se tyto metody lokálního měření a zobrazení fyziologické odezvy označují jako "biochemie in vivo".⁶

Pozn: Název "molekulární zobrazení" samozřejmě neznámá, že bychom snad zobrazovali přímo samotné molekuly (to bohužel nedokážeme), ale zobrazujeme takovou distribuci radioindikátoru, která je důsledkem a odrazem specifických biochemických reakcí na molekulární úrovni.⁶

1.3.3 Využití radionuklidů v lékařství v nukleární medicíně - scintigrafie

Scintigrafie, podstata a metody.

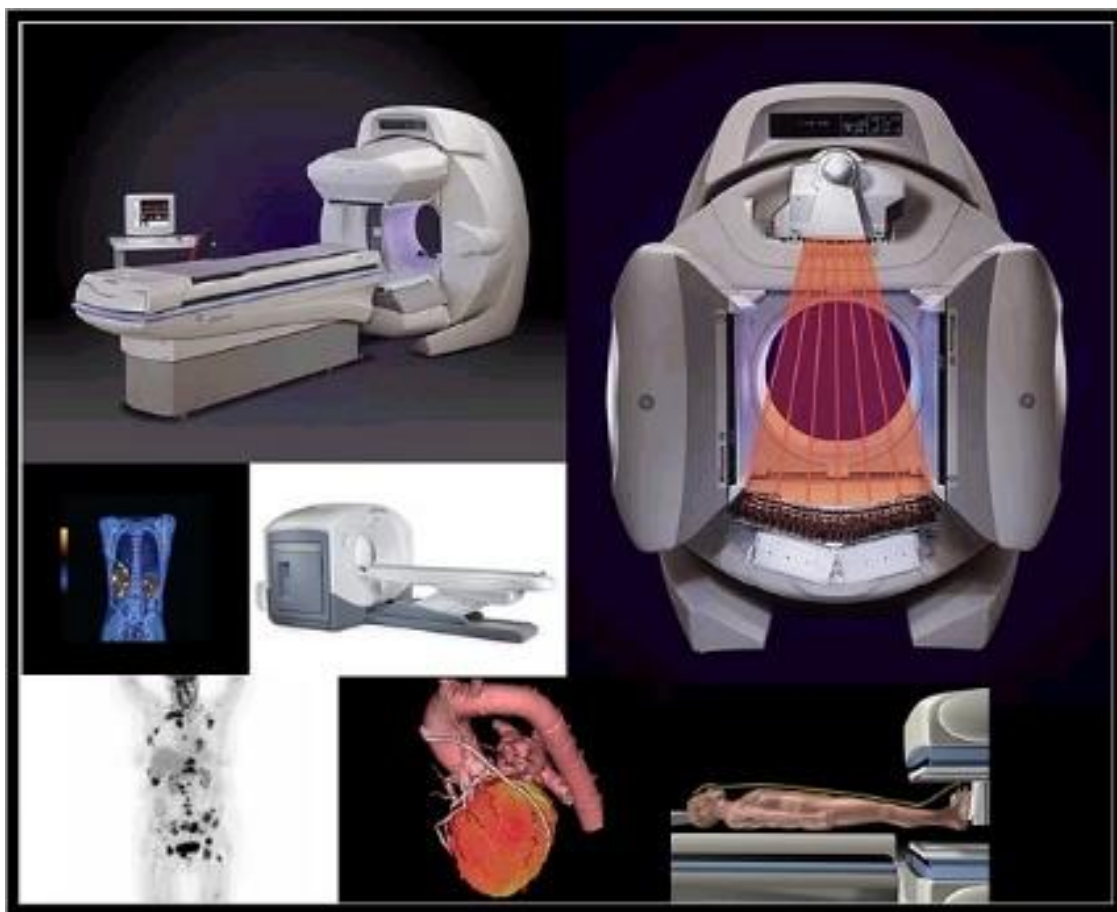
Scintigrafie či gamagrafie je fyzikálně-elektronická metoda zobrazení distribuce radioindikátoru v organismu na základě zevní detekce vycházejícího záření gama.⁶

Průchod a distribuce radioindikátoru tedy odráží konkrétní fyziologický či patologický stav nebo funkci příslušných orgánů a tkání. Pro jeho posouzení v nejjednodušších případech stačí prosté změření intenzity záření gama vycházejícího z určitého místa (např. ze štítné žlázy - pro stanovení její akumulace) kolimovanou sondou. Pro komplexnější diagnostiku však potřebujeme změřit - zmapovat - zobrazit - celou distribuci radioindikátoru, včetně lokálních detailů a anomálií. K tomu slouží metoda zvaná scintigrafie či gamagrafie.⁶

Terminologická poznámka: Výstižnější název gamagrafie (zobrazování pomocí záření gama) se bohužel používá poměrně zřídka; převládá méně přesný název scintigrafie

pocházející z toho, že technicky se nyní používá scintilačních detektorů. V budoucnu budou scintilační detektory pravděpodobně vytlačeny detektory polovodičovými (viz níže "Alternativní fyzikální a technické principy gamakamer"), čímž název "scintigrafie" již ztratí opodstatnění; bude však nepochybně přetrvávat. ⁶

Scintigrafie či scintigrafické vyšetření se v "hantýrce" nukleární medicíny často též nazývá scintigrafická studie. Pochází to z dob, kdy scintigrafie byla nová experimentální výzkumná metoda, umožňující studovat fyziologické děje v organismu. ⁶



Obrázek 2 - Scintigrafické vyšetření - zobrazení distribuce radioindikátoru v organismu na základě zevní detekce vycházejícího záření gama ⁷

2 Cíl práce a výzkumná otázka

Analýza, rozbor a vyhodnocení rizik spojených s uvolněním radioaktivních látek během transportů a eventuálních dopravních nehod a radiačních zátěží osob při manipulaci během celého řetězce přepravy na pracoviště nukleární medicíny v návaznosti na platnou legislativu.

3 Výzkumná otázka

Je současná legislativa související s riziky uvolnění radioaktivních látek při transportech na pracoviště nukleární medicíny v České republice na dostatečné úrovni pro minimalizaci rizika na přijatelnou úroveň?

4 Metodika

Předmětem výzkumu této práce je analýza, rozbor a vyhodnocení rizik spojených s uvolněním radioaktivních látek během transportů a eventuálních dopravních nehod, radiačních zátěží osob při manipulaci během celého řetězce přepravy na pracoviště nukleární medicíny v návaznosti na platnou legislativu. Radionuklidy, které jsou využívány ve zdravotnictví, jsou převážně radiofarmaka, tedy léčiva, která obsahují jeden nebo více atomů umělého radionuklidu. Při jejich výrobě a manipulaci je třeba s nimi zacházet jako s jakýmkoli jiným otevřeným zářičem a zároveň dbát obecných zásad při práci s farmaky.

Popisná část současného stavu byla vytvořena zmapováním zastřešující legislativy a institucí v České republice i ve světě. Je zde zkoumán stav návaznosti kompetentních orgánů v této problematice, jak a čím se která instituce zabývá v oblasti radiační ochrany, legislativního a technického zabezpečení transportů umělých radionuklidů. Při soustředění těchto dat byla provedena konzultace s ředitelkou odboru zdrojů Státního úřadu pro jadernou bezpečnost – Ing. Zuzanou Paškovou MBA, zejména o zmapování mechanismu legislativy povolování přeprav radioaktivity třídy 7 podle Evropské dohody ADR pro automobilové přepravce, kterým je toto povolení vydáváno. Dále byla provedena konzultace na Ministerstvu dopravy ČR, Oddělení silniční dopravy, kde byla konzultována novelizace Evropské dohody ADR 2015, avšak beze změn pro zájmovou třídu radioaktivity 7. Z webových zdrojů Státního úřadu radiační ochrany byly shromážděny informace o náplni činností tohoto úřadu. Studium Atomového zákona byla vybrána dotčená ustanovení k analyzované problematice se zaměřením na povinnosti přepravců radioaktivních látek a vydávání povolení a zajištění legislativního rámce bezpečnosti přeprav radionuklidů. Z webových stránek Ministerstva dopravy byl zpracován výtah ustanovení k transportům radionuklidů, označování vozidel a povinnosti plynoucí z Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě ADR. Z internetových zdrojů nukleární medicíny byla provedena analýza používaných radionuklidů ve zdravotnictví a charakterizovány nejpoužívanější umělé radionuklidy a jejich využití v medicíně s popisem některých diagnostických a léčebných metod tohoto odvětví ve zdravotnictví. Shromáždění těchto informací mapuje

opodstatněnost používání radionuklidů s přijetím určitých rizik při převozech s cílem lidského prospěchu v léčbě a diagnostice chorob.

Výzkumná část se zabývá rozborem fyzikálních charakteristik jednotlivých druhů ionizujícího záření z knižních zdrojů lékařské biofyziky a klinické radiobiologie a statí webových zdrojů Státního úřadu radiační ochrany. Je zde zkoumán soubor rizik na lidské zdraví v souvztažnosti na konkrétní typy ionizujícího záření a popsány mechanismy účinků ionizujícího záření na lidský organismus. Byla zde provedena modelace postupu HZS po nehodě vozidla se zdrojem ionizujícího záření a proveden praktický výpočet radiačního zatížení osob při uvolnění radiace nehodou. Tato modelace výpočtu byla převzata z reálné praxe a postupů Chemické laboratoře HZS Třemošná s odborným vedením výjezdového analytika laboratoře Bc. Jana Kubeše. V této části je demonstrován výpočet radiačního zatížení zasahujícího hasiče u ZIZ, a to za modelového příkladu vnějšího a vnitřního ozáření uvolněnou radiací. Návštěvou Chemické laboratoře Třemošná byla také zmapována dozimetrická vybavenost této složky a pořízena fotodokumentace s uplatněním gamaspektrometrů v praxi. Předmětem výzkumu bylo také technické zmapování rizik radiofarmak. Byla provedena konzultace a exkurze v Ústavu jaderné fyziky Řež, a. s., jakožto předního výrobce umělých radionuklidů a radiofarmak. V ústavu byla provedena podrobná konzultace s operátorem cyklotronu Ing. Adamem Pavelkou z divize Radiofarmak z pracoviště PET Centra Praha, které je zároveň přepravcem radionuklidů. V ústavu byl demonstrován výklad postupu výroby radiofarmaka fludeoxyglukosy. Cílem zkoumání byla radiační zátěž během přepravy i výroby radioaktivního léku emitující beta plus záření – radioaktivním Fluorem¹⁸. Bylo zde umožněno pořízení fotografií pro potřeby výzkumu diplomové práce při výrobě radiofarmaka a k praktickému prozkoumání přepravních schránek a kontejnerů. V další části práce bylo přistoupeno k navození simulace dopravní nehody silničního vozidla přepravující radioaktivní látku podle ADR třídy 7. V této kapitole je proveden rozbor v časové posloupnosti s cílem popsat legislativní připravenost zasahujících složek IZS a kompetentních orgánů. Je zde kladen důraz na prvotní zásah HZS s cílem zmapovat rizika a připravenost složky HZS – chemické služby a celkový postup složek. K této problematice byla provedena konzultace u Ing. Michala Halady, který poskytl informace k zásahu složek HZS Jihočeského kraje ČR, při

postupu jednotek HZS a Chemické služby u příkladu simulované nehody. Bylo zde analyzováno dozimetrické vybavení základních jednotek HZS a připravenost součinnosti složky chemických laboratoří HZS. V dalším kroku byla provedena konzultace s vedoucím pracovníkem Chemické laboratoře Kamenice Ing. Karlem Musilem ke statistikám a vybavení laboratoře a dále byla popsána činnost laboratoří HZS z internetových zdrojů. V dalším kroku výzkumné práce byla provedena analýza statistik dopravních nehod zaznamenaných a statisticky vyhodnocených Policií ČR. Ing. Vladimír Šulc Ph.D. z Policejního prezidia poskytl interní grafy a statistiky nehodovosti a kontrol vozidel s přepravou nebezpečných věcí podle ADR evropské dohody. V diskusní části této práce je porovnáván současný stav dané problematiky a výsledky provedené analýzou a rozborem s argumentačně podloženými výsledky práce s odpovědí na výzkumnou otázku a na základě zjištěných skutečností z vlastního výzkumu je zde navrhován i vlastní způsob řešení problematiky v oblasti rizik přepravy radionuklidů.

5 Výsledky

5.1 Analýza a rozbor rizik s uvolněním radioaktivních látek během transportů

K analýze a rozboru rizik případným uvolněním radioaktivních látek při transportech je zapotřebí popsat fyzikální podstatu jednotlivých druhů záření a biologické účinky na lidský organismus. Následně je nutné analyzovat zdravotní rizika a následky kontaminace ozáření radionuklidy a zmapovat schopnost a připravenost kompetentních orgánů a složek Integrovaného záchranného systému, pro jejich odvrácení, minimalizaci následků, či záchranně lidských životů a životního prostředí.

5.1.1 Fyzikální charakteristika záření alfa, beta a gama

Alfa (α) záření vydává většina přírodně radioaktivních izotopů. Částic α se označuje jádro hélia (2 He^4). Alfa částice je tedy tvořena ze dvou protonů a dvou neutronů, což znamená, že alfa částice je kladně nabitá, a to s nábojem e^{+2} . Proud těchto částic se nazývá alfa zářením. Alfa záření vzniká tak, že původní jádro ztrácí dva protony a dva neutrony. Příkladem izotopu, který generuje α záření je izotop uranu ^{238}U . Nově vzniklý prvek je posunutý v periodické tabulce prvků o dvě místa doleva. Záření α silně ionizuje prostředí, kterým prochází a dá se velmi snadno odstínit, a to i např. listem papíru. Z hlediska využití je alfa záření nejméně důležité. Alfa záření vzniká jen z „těžkých“ jader, navíc má malou pronikavost. Příkladem použití jsou hlásiče požárů, v medicíně použití nemá.⁸

Beta (β) záření rozlišujeme na dva druhy. Záření β^- je tvořeno proudem záporných elektronů e^{-1} , vznikajících v jádře radioaktivního prvku. Během beta rozpadu dochází k přeměně neutronu na proton. Nové jádro má o jednotku zvýšený kladný náboj, přičemž hmotnost jádra zůstává přibližně zachována. Nově vzniklý prvek je posunut v periodické tabulce prvků o jedno místo doprava. Druhý typ záření je označován jako β^+ a je tvořen proudem kladných pozitronů, což je antičástice k elektronu. Při záření β^+ dochází k posunutí nově vzniklého prvku v periodické tabulce o jedno místo doleva.

Oproti záření α má záření β větší pronikavost. Záření β^+ se využívá v medicíně v systému PET – pozitronová emisní tomografie. V systému PET se využívá efekt anihilace elektronů za vzniku gama záření.



Vzniklé dvě kvanta gama záření o energii 511 keV opouští místo anihilace v protilehlých směrech (pod úhlem 180°).⁸

Gama (γ) záření je vysokoenergetické elektromagnetické záření. Na rozdíl od předchozích typů α a β záření nenesou γ záření žádný náboj. Neexistuje čistý přírodní γ zářič. Záření γ vzniká často spolu s α nebo β zářením při radioaktivním rozpadu jader. Dceřiné jádro, které vzniká po vyzáření α nebo β záření, se v mnoha případech nachází v excitovaném stavu. Jádro pak může přejít do stavu s nižší energií, což je doprovázeno vyzářením fotonu γ . Při vyzáření γ fotonu nevzniká jiný izotop, jádro pouze ztratí část své energie. Záření γ je velmi pronikavé, ale méně ionizující. Odstínit se dá jen velmi silnými vrstvami kovu nebo betonu. Často se používá k podobným účelům jako rentgenové záření, protože má podobné vlastnosti. Pokud chceme získat čistý γ zářič, musí být vyroben. Pro získání čistého γ zářiče je často používán radionuklid molybdenu ^{99}Mo , který se mění β^- rozpadem s poločasem rozpadu $T_{1/2} = 2,66$ dne na izotop technecia ^{99m}Tc do jeho vybuzeného stavu, (hladina o energii 140 keV), který je metastabilní s poločasem rozpadu $T_{1/2} = 6,02$ hodin.⁸

Pokud se oddělí produkt ^{99m}Tc od mateřského molybdenu ^{99}Mo , získáme čistý γ zářič, který postupně vyzařuje záření γ o energii 140 keV, tedy ^{99m}Tc je nejdůležitějším radionuklidem v nukleární medicíně. Představuje čistý zářič γ fotonů s krátkým poločasem rozpadu 6 hodin, což umožňuje, bez rizika významně zvýšené radiační zátěže, aplikovat pacientům značně vysokou aktivitu ^{99m}Tc (řádu stovek MBq až jednotek GBq) a poté využít u SPECT či dynamické scintigrafie.⁸

Při těchto vyšetřeních je radiační zátěž relativně nízká, protože není přítomno korpuskulární záření, které by se pohltilo v tkáni a odevzdalo svou energii. Naopak záření γ díky své pronikavosti většinou vylétá z organismu ven, jen část je pohlcena. Z generátoru ^{81}Rb ($T_{1/2} = 4,85$ h) se získává plynný radioaktivní krypton ^{81m}Kr ($T_{1/2} = 13$ s).

Při vyšetření odnáší proud vzduchu vedený trubičkou přes nádobku obsahující vrstvičku mateřského radionuklidu ^{81}Rb uvolňovaný dceřiný $^{81\text{m}}\text{Kr}$, který pacient vdechuje a scintilační kamera pomocí zevní detekce záření γ zobrazuje distribuci tohoto $^{81\text{m}}\text{Kr}$ v plicních alveolech. Jedná se o ventilační scintigrafii plic. ⁸

Gama záření může být také použito jako účinný prostředek hubení bakterií. Této vlastnosti se využívá např. při sterilizaci lékařských nástrojů. Přestože γ záření může způsobit rakovinu, používá se při jejím léčení. Známým použitím v této oblasti je gama nůž, který využívá několika paprsků záření zaměřených na místo nádoru. V místě nádorů se paprsky protínají a jejich účinek je tak v oblasti nádoru největší a dochází k ničení zasažených buněk. V ostatních místech, kudy prochází jen jeden paprsek, je účinek menší a zdravé buňky přežijí. ⁸

5.1.2 Modelace a výpočet radiačního zatížení osob při uvolnění radiace

V následující stati budeme modelovat případné uvolnění ionizujícího záření při dopravní nehodě. Cílem simulace bylo zjistit radiační zatížení zasahujících hasičů. Zasahující jednotka hasičů přichází ke zdroji ionizujícího záření. Jednotka má pouze informaci, že jde o zdroj ZIZ z poškozených schránek a dle přijatých zpráv mohlo dojít k uvolnění radiace. Při radiologickém průzkumu hasiči změří dávkový příkon D ve vzdálenosti 50 metrů od zdroje. Cílem je zjistit, jakému záření bude osoba vystavena ve vzdálenosti jednoho metru od zdroje.

5.1.2.1 Výpočet dávkového příkonu při vnějším ozáření

Veličiny (D = dávkový příkon, D_n = skutečná naměřená hodnota ve vzdálenosti x od zdroje záření, D_x = dávkový příkon ve vzdálenosti x metrů od zdroje, x = vzdálenost od zdroje v metrech, A = aktivita radionuklidu, γ = konstanta).

1. Vztah pro výpočet dávkového příkonu pro přibližování ke zdroji záření

Výpočet dávkového příkonu pro vzdálenost 1 m od zdroje ZIZ:

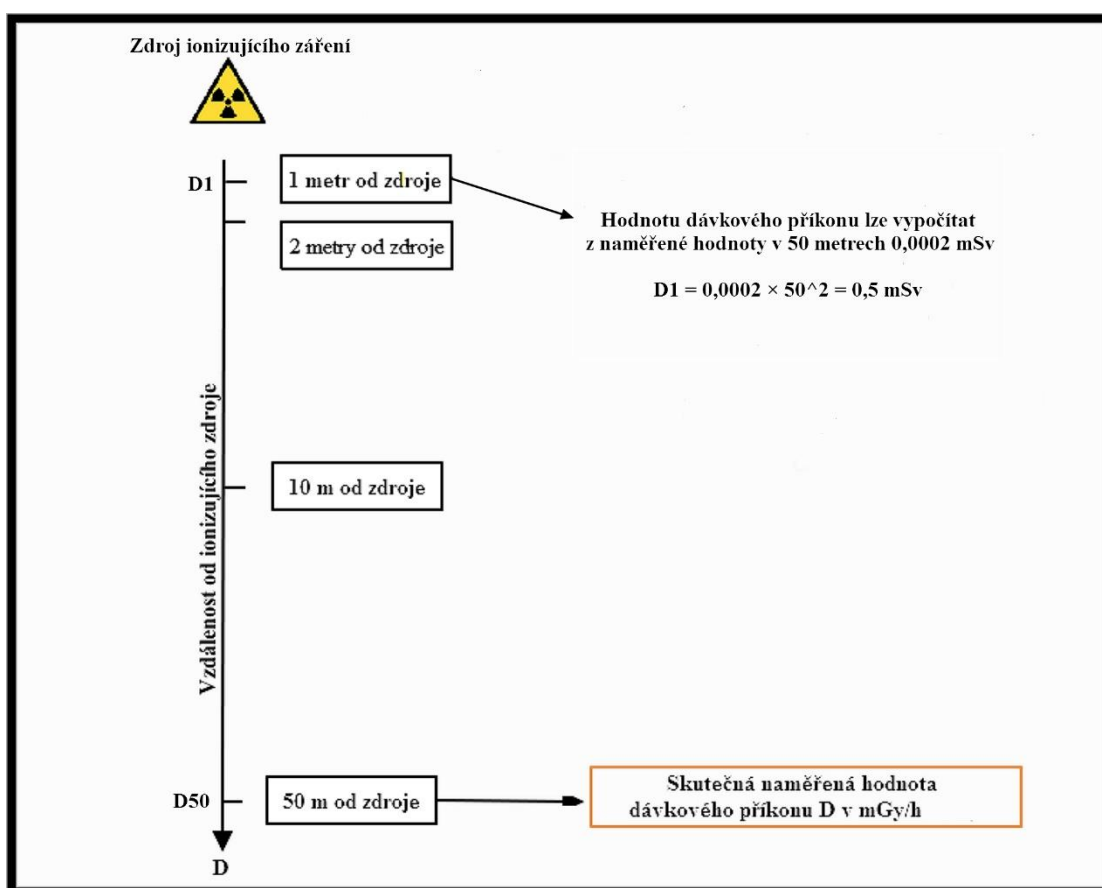
Přiblížení ke zdroji záření – s přiblížením ke zdroji záření hodnota roste podle následujícího vztahu:

$$Dx = Dn \times x^2$$

Při skutečné naměřené hodnotě v 50 metrech např. 0,0002 mSv je vypočtena hodnota dávkového příkonu pro vzdálenost 1 metru od zdroje ionizujícího záření následujícím vztahem:

$$D1 = 0,0002 \times 50^2 = 0,5 \text{ mSv}$$

Tedy změřením hodnoty v dostatečné vzdálenosti od zdroje lze vypočítat hodnotu v blízkosti zdroje záření – např. v jednom metru, kde by zasahující hasiči byli vystaveni účinkům ionizujícího záření. V tomto případě je hodnota v 1 m = 0,5 mSv.



Tabulka 2 - Obrázek výpočtu dávkového příkonu u zdroje záření z naměřené hodnoty

2. Vztah pro výpočet dávkového příkonu pro vzdalování od zdroje záření

Výpočet dávkového příkonu pro vzdálenost 50 m od zdroje ZIZ:

Vzdalování od zdroje záření – se vzdáleností od zdroje záření hodnota klesá podle vztahu:

$$Dx = \frac{D n}{x^2} \qquad D50 = \frac{0,5}{50^2} = 0,0002 \text{ mSv}$$

Při vzdalování od zdroje při uvedených hodnotách lze dopočítat slábnutí dávkového příkonu v 50 metrech od zdroje výpočtem z naměřené hodnoty z jednoho metru od zdroje ionizujícího záření. Podle vztahu vzdalování od zdroje je v tomto případě v 50 metrech vypočtena hodnota = 0,0002 mSv.

Odhad dob pobytu a dávkových příkonů																
Doby pobytu při zásahu pro tolerovatelnou dávku $D_L = 1 \text{ mGy}$																
Doba pobytu (hod)	100	50	20	10	5	3,3	2,5	2	1							
Doba pobytu (min)									60	40	30	15	6			
P ($\mu\text{Gy/h}$)	10	20	50	100												
P (mGy/h)					0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,5	2	4	10		
Doby pobytu při zásahu pro tolerovatelnou dávku $D_L = 50 \text{ mGy}$																
Doba pobytu (hod)	5000	2500	1000	500	250	100	50	25	10	5	2,5	1				
Doba pobytu (min)												60	30	15	6	3
P ($\mu\text{Gy/h}$)	10	20	50	100												
P (mGy/h)				0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Odhad dávkových příkonů P v různých vzdálenostech od zdroje na otevřeném terénu																
Vzdálenost od zdroje	Naměřený dávkový příkon P ($\mu\text{Gy/h}$)						Naměřený dávkový příkon P (mGy/h)									
P ve vzdálenosti 1m	10	20	50	100	200	500	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
2 m	2,5	5	12,5	25	50	125	250	500	1,25	2,5	5	12,5	25	50	125	250
5 m	0,4	0,8	2	4	8	20	40	80	200	400	0,8	2	4	8	20	40
10 m	0,2		0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1	2	5	10
20 m				0,25	0,5	1,25	2,5	5	12,5	25	50	125	250	500	1,25	2,5
50 m					0,2	0,4	0,8	2	4	8	20	40	80	200	400	
100 m							0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	
LEGENDA:																
Bezpečnostní zóna	P \geq 10 $\mu\text{Gy/h}$															
Nebezpečná zóna	P \geq 1 mGy/h															

Tabulka 3 - Porovnávací tabulka doby pobytu u zdroje ionizujícího záření s hodnotami vzdáleností dávků a dávkového příkonu 9

Výsledek:

V jednom metru od zdroje ionizujícího záření je výpočtem ze skutečné naměřené hodnoty v 50 metrech 0,0002 mSv zjištěna hodnota dávkového příkonu 0,5 mSv/h.

Dávku ionizujícího záření, které bude zasahující hasič vystaven lze vypočítat jako násobek času pobytu hasiče u zdroje a dávkového příkonu ve vzdálenosti jednoho metru. V tomto případě tedy $0,5 \text{ mSv/h} \times \text{délka pobytu hasiče u zásahu}$. Tedy, pokud by hasič zasahoval u zdroje 10 minut, byl by vystaven dávce 80,0 μSv . Pobytem dvou hodin by byl vystaven roční přípustné dávce běžného obyvatele – 1 mSv. Jako profesionál by mohl u zdroje zasahovat 100 hodin, kdy by obdržel roční limitní dávku 50 mSv.

Odhad aktivity bodového zdroje ionizujícího záření				
Radio-nuklid	Vzdálenost (metr)	Dávkový příkon ($\mu\text{Gy/h}$)	Dávková konstanta	Odhad aktivity (GBq)
F-18	10	1 000	0,154585	647
Na-22	10	1 000	0,282000	355
Na-24	10	1 000	0,501251	200
K-40	10	1 000	0,021622	4 625
Cr-51	10	1 000	0,004459	22 427
Mn-54	10	1 000	0,126757	789
Fe-59	10	1 000	0,168919	592
Co-60	10	1 000	0,308000	325
Zn-65	10	1 000	0,073400	1 362
Se-75	10	1 000	0,052432	1 907
Kr-85	10	1 000	0,000351	284 900
Sr-85	10	1 000	0,079459	1 259
Mo-99	10	1 000	0,022000	4 545
Tc-99m	10	1 000	0,016000	6 250
Ag-110m	10	1 000	0,357000	280
Cd-109	10	1 000	0,037500	2 667
I-125	10	1 000	0,001000	100 000
I-129	10	1 000	0,000541	184 843
I-131	10	1 000	0,056000	1 786
Xe-133	10	1 000	0,003919	25 517
Cs-134	10	1 000	0,208000	481
Cs-137	10	1 000	0,076800	1 302
Ir-192	10	1 000	0,109000	917
Ra-226	10	1 000	0,201000	498
U-235	10	1 000	0,020030	4 993
Am-241	10	1 000	0,003760	26 596

Tabulka 4 - Odhad aktivity bodového zdroje ionizujícího záření ve vzdálenosti 10 m při naměřené hodnotě dávkového příkonu 1 mGy/h^{10}

5.1.2.2 Příklad radiačního zatížení při vdechnutí uvolněného radionuklidu

Pro hodnocení vnitřního ozáření (vnitřní kontaminace) se používají veličiny:

- příjem radioaktivní látky a úvazek efektivní dávky
- příjem radioaktivní látky

I - aktivita radionuklidu přijatá do lidského organismu z vnějšího prostředí, obvykle požitím nebo vdechnutím. Z naměřených hodnot aktivity radionuklidu v těle, v orgánu nebo ve vzorku exkret se příjem vypočte ze vztahu:

$$I = \frac{A}{m(t)} \quad \text{Jednotkou příjmu je becquerel (Bq)}$$

$m(t)$ retenční nebo exkrecní funkce v čase t , vyjádřená v Bq nebo Bq/d na 1 Bq příjmu

I příjem radioaktivní látky

A aktivita v těle, orgánu nebo v exkretech

Úvazek efektivní dávky $E(\tau)$, popřípadě i úvazek ekvivalentní dávky $HT(\tau)$, časové integrály efektivní dávky, popřípadě ekvivalentní dávky odpovídající po dobu τ od příjmu radionuklidu. Není-li uvedeno jinak, činí doba τ pro dospělé 50 roků a pro děti 70 roků. Úvazky se pak vztahují k příjmu za dané období – podle typu ozáření a z toho vycházející metody monitorování vnitřní kontaminace (pro roční, čtvrtletní příjem).¹

Z vypočteného příjmu se pak vypočte úvazek efektivní dávky E (50):

$$E_{50} = I \cdot h_{inh}(50) \cdot 5 \times 10^{-11}$$

$$E_{50} = I \cdot h_{ing}(50)$$

I - příjem radioaktivní látky;

$h_{inh}(50)$ úvazek efektivní dávky po inhalaci 1 Bq daného radionuklidu,

$h_{ing}(50)$ úvazek efektivní dávky po ingestci 1 Bq daného radionuklidu.

Jednotkou úvazku efektivní i ekvivalentní dávky je sievert (Sv).

Konverzní faktory, které udávají vztahy mezi příjmem radioaktivní látky požitím (h_{ing}) nebo vdechnutím (h_{inh}) a úvazkem efektivní dávky v těle jsou pro radiační pracovníky a obyvatelstvo v závislosti na věku uvedeny v tabulkách Vyhlášky Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb. ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. Konverzní faktory jsou číselně rovny efektivní dávce připadající na příjem 1 Bq daného radionuklidu. ¹

Jednotkou konverzního faktoru je Sv.Bq-1.

Typ absorpce v plicích pro různé chemické látky.

Absorpce v plicích je vyjádřena typem F, M nebo S charakterizujícím v modelových výpočtech rychlost, se kterou látka přechází z plic do tělesných tekutin (F - rychle, M - středně, S - pomalu), a koeficientem f_1 charakterizujícím frakci, která přechází v trávicím ústrojí do tělesných tekutin. ¹¹

V následujícím textu se budeme zabývat příkladem vnitřní kontaminace, kdy při dopravní nehodě došlo k úniku radiofarmaka s radioaktivním Fluorem ^{18}F a zasahující osoba – hasič by se nadýchal transportované radioaktivity.

V tabulce 3 příloh Vyhlášky Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., můžeme zjistit aktivitu radionuklidu $^{18}\text{F} = 106\text{Bq}$ a hmotnostní aktivitu vyjádřenou v hodnotě 10 kBq/kg pro nuklid ^{18}F a faktor pro inhalaci vdechnutím radionuklidu. ¹¹

Postup rychlého řešení z praktického přístupu profesionálních hasičů

Odhad aktivity bodového ZIZ F₁₈				
Radionuklid	Vzdálenost (metr)	Dávkový příkon (mikroGy/h)	Dávková konstanta	Odhad aktivity (MBq)
F-18	0,05	1 000,0	0,154585	16,17

Tabulka 5 - Odhad aktivity bodového ZIZ F₁₈ ¹⁰

Gamaspektrometrem by podle povahy křivky peaku byl zjištěn konkrétní inhalovaný radionuklid, v našem případě F₁₈. Na plicích postižené osoby by byla změřena aktivita ozáření. Na příkladu by mohla aktivita vykazovat hodnotu 20 MBq.

„Celková přijatá (naměřená) aktivita vynásobená konverzním faktorem pro inhalaci a vynásobena faktorem $F; M; S$ ve výsledku po vynásobení udává celkovou dávku. Pokud je přijatá aktivita cca do jednotek gigabeqerel, tak budou dávky relativně malé. To vychází z energie a krátkého poločasu rozpadu ^{18}F . Tato dávka je celoživotní. Minimálně s účinkem po dobu 5 let.“¹²

Vzhledem k porovnání tabulek SÚJB Vyhlášky 307 o nejvyšší přípustné úrovni např. radioaktivní kontaminace potravin, kde jsou povolené hodnoty radionuklidů v rozmezí řádově desítky až tisíce Bq/l nebo na Bq/kg¹¹ je radiační zátěž osoby této modelové situace zanedbatelná neboť vzhledem k poločasu rozpadu umělých radionuklidů obecně a s krátkým poločasem rozpadu je v případě radioaktivního fluoru po deseti rozpadech – cca 17 hodinách mizivá hodnota. Za předpokladu, že by zasahující hasič nadýchal 10 % radioaktivity, by hodnoty ozáření byly zanedbatelné

5.1.3 Biologické účinky ionizujícího záření

Absorpce energie ionizujícího záření v látce má kvantový charakter; dochází k excitacím a ionizacím atomů či molekul, tj. energie je předávána elektronům. Pro některé druhy záření a určité energie mohou nastat primárně i jiné jevy (např. rozptyl nebo jaderné reakce u neutronů, Comptonův jev nebo materializace fotonů gama záření apod.), avšak ve svém důsledku sekundárně vzniklé částice také ztrácejí energii excitacemi a ionizacemi. Tím se ionizující záření principiálně liší od jiných fyzikálních a chemických faktorů, které rovněž mohou negativně ovlivňovat biologické systémy (např. zvýšená teplota, UV záření, jedy apod.).¹³

Kvantový charakter přenosu energie záření hmotě vede k tomu, že i v homogenně ozářeném vzorku lze nalézt mikroskopické objemy (objekty, místa) s větším počtem ionizací a excitací, nebo naopak místa, kde k žádnému předání energie prakticky nedošlo. Pomocí pravděpodobnosti vzniku ionizací (která je pochopitelně úměrná dávce záření) lze charakterizovat počet nezasažených, tj. přežívajících mikroskopických objektů (buněk) v závislosti na dávce záření – na základě tohoto byl formulován tzv. zásahový model/teorie k dosažení biologického efektu je nutno zářením zasáhnout (jednou nebo několikrát) určitou citlivou strukturou. Taková citlivá struktura v biologických objektech

existuje – je to molekula DNA. Zásah nemusí odpovídat jedné excitaci nebo ionizaci, může to být také shluk ionizací, průchod částice citlivou strukturou apod. ¹³

Se vznikem a rozvojem mikrodozimetrie se očekávalo, že se podaří objasnit rozdíly v biologické účinnosti různých druhů záření právě odlišným rozdělením specifické energie, tj. předpokládalo se, že buňka reaguje podle množství energie v ní deponované. Toto očekávání se však nesplnilo, neboť biologická reakce závisí nejen na množství energie, ale také na jejím rozložení uvnitř biologického objektu. ¹³

Biologické systémy obvykle obsahují vysoké procento vody a značná část energie záření se proto absorbuje ve vodě. Je tedy důležité vědět, jak působí ionizující záření na molekuly vody. Radiolýzou vody vznikají vysoce reaktivní produkty, jako je hydroxylový radikál OH^\cdot , vodíkový radikál H^\cdot , hydratovaný elektron e_{aq}^- a v přítomnosti kyslíku vzniká také značné množství peroxidu vodíku H_2O_2 . ¹³



Všechny tyto produkty mohou vyvolávat další (sekundární) reakce s biologickými molekulami, a mluvíme proto o nepřímém účinku záření – na rozdíl od přímého, kdy je energie záření přenesena bezprostředně na biologickou molekulu. Ve vodném roztoku závisí podíl nepřímého účinku záření na koncentraci biologických molekul, v nichž účinek sledujeme. Čím je menší koncentrace (tzn. že na jednu biomolekulu připadá více molekul vody), tím je nepřímý účinek záření větší. Buňky představují prostředí s poměrně vysokou koncentrací biologických molekul a je zde nutno brát v úvahu jak přímý, tak i nepřímý účinek záření. ¹³

Molekula DNA je v buňkách unikátní a je pro existenci buňky velmi důležitá, neboť je v ní obsažena základní informace o struktuře a funkci buňky. U vícebuněčných organismů je navíc v molekule DNA obsažena základní informace o struktuře a funkci organismu jako celku, a to v každém okamžiku jeho vývoje – počínaje od zárodečných buněk a konče smrtí dospělého jedince. Ionizující záření je typické tím, že produkuje ve vysoké míře zlomy DNA. Obecně jsou však radiační změny DNA velmi různorodé – kromě jednoduchých a dvojitých zlomů vznikají také poškození basí, cross-linky uvnitř

DNA, lokální denaturace DNA, apod. Často vznikají tato poškození dohromady s jednoduchými nebo dvojitými zlomy.¹³

Řada studií se věnuje souvislosti mezi vznikem dvojitých zlomů (DSB) a letálním nebo mutagenním účinkem záření. Proporce nereparovaných DSB se zvětšuje při vyšším LET záření, z čehož plyne, že kvalita DSB se může lišit. V poslední době je stále více pozornosti věnováno tzv. komplexním poškozením DNA. Jedná se o poškození vzniklé jako následek vydělení většího množství energie záření ve formě klastru. Takové jevy nastávají i pro gama záření, a přestože je jejich četnost malá, mohou významně přispívat k výslednému radiobiologickému efektu. Komplexní poškození vznikají s podstatně větší četností pro hustě ionizující záření; kyslíkový poměr pro jejich vznik je menší než pro zlomy DNA (jejich modifikovatelnost na fyzikálně-chemické úrovni je menší) a jejich reparovatelnost enzymatickými systémy je rovněž menší.¹³

Molekuly DNA jsou uspořádány v buňce do chromosomů; zlomy DNA mohou vést ke vzniku chromosomových aberací. Chromosomové aberace jsou považovány za hlavní příčinu letálního účinku záření. To se potvrzuje podobnou nebo shodnou závislostí vzniku aberací a letálního účinku záření na různých podmínkách ozáření, jako jsou např. přítomnost kyslíku, dávková závislost, závislost na fázi buněčného cyklu, fyzikální vlastnosti záření apod. Frekvence vzniku chromosomových aberací závisí nelineárně na dávce. Lineárně-kvadratická závislost pro vznik dicentrických aberací u buněk ozářených slabě ionizujícím zářením se vysvětluje touto skutečností, že pro vznik této aberace jsou zapotřebí dva DSB, jejichž výtěžek závisí na dávce lineárně. Lineární komponenta je způsobena vznikem shluků ionizací a excitací i pro slabě ionizující záření. Pro silně ionizující záření (neutrony nebo α -záření) je lineární komponenta dominantní.¹³

Zlomy DNA a následně chromosomální aberace jsou většinou neslučitelné s životními funkcemi buňky. Nejčastěji dochází k zániku buňky při pokusu o dělení, kdy neproběhne zdárně separace chromosomů do dceřiných buněk. Zůstane tedy jedna buňka, která následně zahyne. Některé typy aberací zachovávají v buňce prakticky všechny geny ve funkčním stavu a ty se pak mohou dále dělit, i když jejich vlastnosti mohou být

pozměněné. Buňky s pozměněnými vlastnostmi jsou nebezpečné pro organismus, neboť mohou vést k nádorovému bujení.¹³

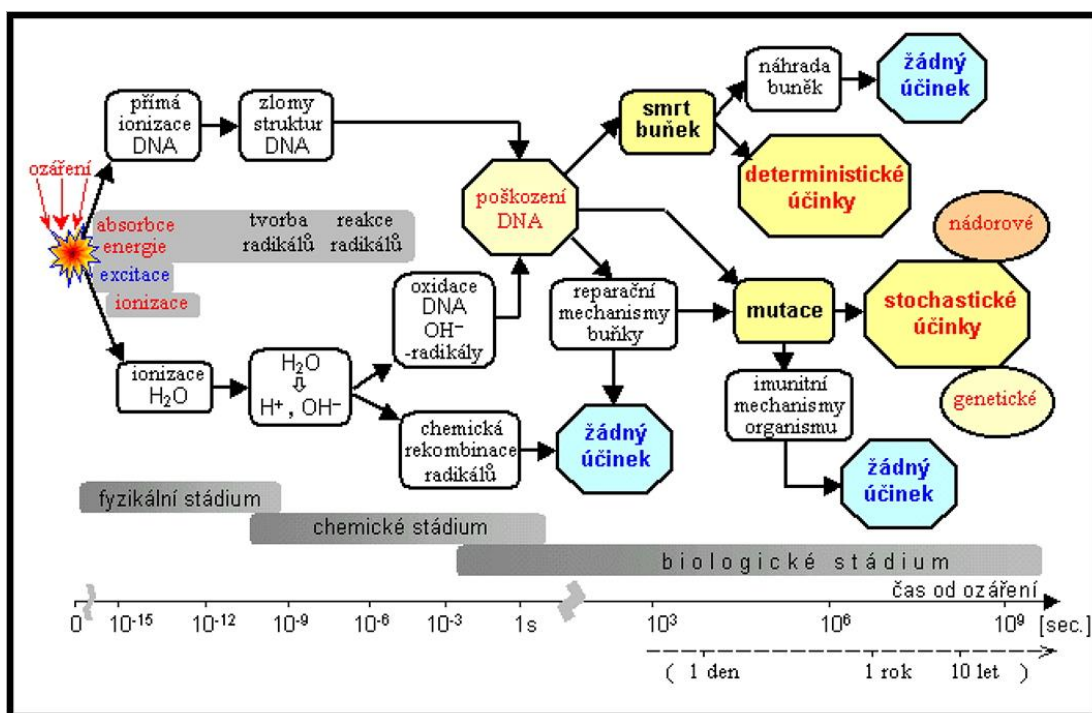
Kromě reprodukční smrti buňky se často setkáváme s pojmem “programovaná smrt” neboli apoptóza. Tento typ smrti se od nekrózy liší koordinovaným působením určitých enzymů na počátku procesu. Apoptóza indukovaná zářením je závislá na přítomnosti funkčního genu p53, který nemusí být potřebný pro apoptózu indukovanou jinými prostředky. Programovaná smrt buňky je zřejmě určitou ochranou organismu před nádorovým bujením, neboť podnětem k apoptóze je určitý typ poškození DNA. Jestliže buňka nedokáže včas opravit vzniklé poškození, stává se pro organismus rizikovou a je vhodnější tuto buňku nahradit doplněním ze zdravé populace; dochází proto k jejímu sebezničení. Je otázkou, zda by nebylo možné v některých případech zvýšit účinnost radioterapie využitím apoptózy. Programovaná buněčná smrt je v současné době předmětem intenzivního výzkumu.¹³

Kromě letálních účinků způsobuje záření také vznik dědičných změn v živých systémech, tj. změn v genetickém kódu. Může se jednat o genové mutace, ale také o chromosomové aberace slučitelné s životem buňky. V důsledku genetických změn mohou buňky např. změnit svoji schopnost růstu v určitém prostředí.¹³

Velká pozornost byla věnována porovnání různých typů záření z hlediska jejich mutagenní účinnosti. Účinnost různých typů záření se porovnává pomocí tzv. relativní biologické účinnosti (dále jen RBE) záření. RBE určitého (testovaného) typu záření je koeficient, který udává, nakolik je tento typ záření biologicky účinnější než tzv. referenční záření (obvykle x nebo γ záření). Čím je větší účinnost záření, tím menší dávka je potřebná pro dosažení určitého biologického efektu. RBE je tedy poměr dávek D_g/D_z , kde D_g je dávka referenčního záření a D_z je dávka testovaného záření pro stejný biologický efekt. RBE závisí na dávce, dávkové rychlosti, typu záření (na LET, energii, u neutronů také na spektru sekundárních částic) a může se lišit pro různé sledované biologické efekty. V oblasti malých dávek záření je při lineárních dávkových závislostech veličina RBE na dávce nezávislá. Pro mutagenní účinky záření u savčích buněk

ozářených urychlenými těžkými ionty RBE roste se vzrůstající hustotou ionizace, dosahuje maxima při LET (100-200) keV/mm a pro ještě větší LET hodnoty RBE opět klesá. Uvedená závislost společně s dalšími radiobiologickými výsledky vedly k doporučení zavést multiplikačních koeficientů pro záření různé kvality.¹³

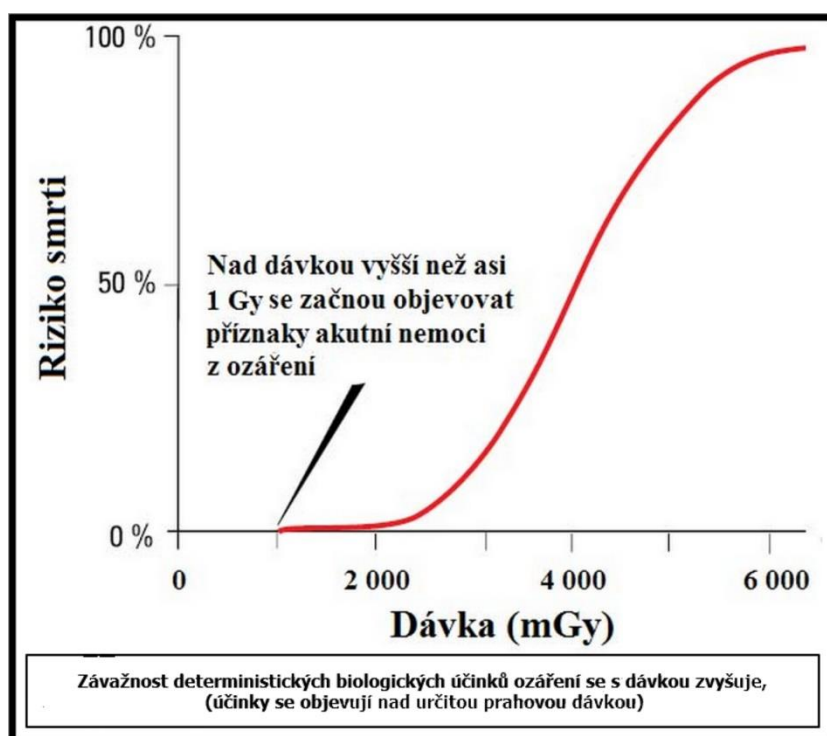
Vhodným modelem lidského organismu pro popis účinků záření na člověka je představa lidského těla jako souhrnu sebeobnovných buněčných populací. Sebeobnovné buněčné populace jsou plně rozvinuty v organismu plodu a novorozence, později se diferencují a plně jsou zachovány po celý život jen v některých tkáňových a buněčných systémech, např. v systému červené krvetvorby. V periferní krvi člověka cirkulují bezjaderné erythrocyty, které jsou plně vybavené svým tvarem a obsahem hemoglobinu pro transport kyslíku. Vliv ionizujícího záření na červenou krvetvorbu lze zjednodušeně vysvětlit tím, že vnímavými populacemi jsou kompartmenty buněk schopných dělení. Po jednorázovém ozáření se velikost těchto kompartmentů v závislosti na výši dávky zmenší. Přijmeme-li představu, že lidský organismus je souborem buněčných populací různých růstových charakteristik, pak při znalosti prostorové a časové distribuci dávky můžeme patogenetické pochody vedoucí ke klinickým projevům poměrně výstižně rekonstruovat. Pro komparativní posuzování účinků ionizujícího záření na biologické systémy je zaveden pojem radiosenzitivita.¹³



Obrázek 3 - Schématické znázornění významných procesů a jejich časové posloupnosti při účincích ionizujícího záření na živou tkáň⁶

Ozáření člověka může vyvolávat některé chorobné změny projevující se v průběhu dnů až týdnů, jiné v průběhu roků a desetiletí. To vedlo v minulosti k rozlišování časných a pozdních následků ozáření. V posledních desetiletích bylo zavedeno jiné třídění opírající se o základní typy vztahu dávky a účinku. Poznání tohoto vztahu a jeho popis vhodným kvantitativním parametrem je hlavním cílem biologických a medicínských studií zaměřených na ochranu před ionizujícím zářením. Na základě těchto znalostí lze pro činnosti za kontrovaných podmínek vymezit cíle a kritéria radiační ochrany a pro případy mimořádných situací spojených s ozářením lidí odhadnout možné následky i úkoly zdravotnické pomoci. Účinky ionizujícího záření se z hlediska integrovaného savčího organismu dělí na deterministické, (viz graf 1), kdy při dosažení určité dávky ionizujícího záření efekt zákonitě nastává, a stochastické, kdy se stoupající dávkou stoupá pravděpodobnost poškození.¹³

Pro deterministické účinky je charakteristická prahová závislost na dávce. Kvantitativním ukazatelem, pomocí něhož lze odhadnout možné následky ozáření, je prahová dávka pro ten který účinek, popřípadě hodnota 50% efektivity vztažená ke zvolené referenční době po ozáření, tedy např. LD 50/30. Důležitým rysem této skupiny účinků je měnící se klinický obraz se stoupající dávkou, jinak řečeno, intenzita projevů a jejich zdravotní závažnost je závislá na dávce.¹³



Graf 1 - Závažnost deterministických biologických účinků ozáření¹

Akutní nemoc z ozáření vniká typicky po jednorázovém celotělovém ozáření vyšší dávkou pronikavého záření. Takové případy nejsou časté a v denní praxi radiační ochrany se s nimi nesetkáváme. Přesto je rozbor takových případů velmi instruktivní pro pochopení patogenetických představ o rozvoji deterministických účinků. Akutní nemoc z ozáření u člověka byla podrobně popsána u obětí jaderného útoku na japonská

města v roce 1945, později se vyskytla řada jednotlivých případů ozářených při nehodách reaktorů nebo při ztrátě kontroly nad radionuklidovými zdroji; rovněž černobylská havárie přispěla k poznání tohoto syndromu pro rozsáhlou skupinu jednorázově ozářených pracovníků elektrárny a záchranářů.¹³

Druhým typem významných biologických změn v důsledku ozáření jsou stochastické účinky, jež jsou důsledkem změn v buňkách přeživších ozáření. Změněná buňka se může, po značném časovém odstavu, vyvinout v nádor. Obranné a reparační schopnosti organismu činí tento vývoj při malých dávkách velmi nepravděpodobným, nicméně nejsou známy žádné dávky, pod nimiž by ke vzniku nádoru nemohlo dojít.

Kancerogenní účinek záření byl prokázán v epidemiologických studiích u různých ozářených populací, kde byl pozorován zvýšený výskyt nádorů oproti srovnatelné kontrolní populaci. Z hlediska jednotlivce roste s dávkou záření pravděpodobnost vzniku nádoru, nikoliv intenzita či stupeň účinku. Stochastický, tedy náhodný z hlediska určitého jedince, charakter mají i dědičné důsledky ozáření, se projevuje u potomstva ozářených osob.¹³

V návaznosti na studiu biologických účinků záření byly analyzovány poznatky o radiační kancerogenezi – za základ výpočtů byla zvolena data o úmrtích na zhoubný nádor u obětí jaderného bombardování japonských měst. Pomocí těchto analýz byly odvozeny koeficienty objektivní zdravotní újmy, do které jsou zahrnuty koeficienty rizika úmrtí na nádor, koeficienty charakterizující význam vyléčených nádorů a koeficienty dědičných poškození, a to všechno zvláště pro obecnou populaci a zvláště pro pracovníky.¹³

U radioaktivního záření rozeznáváme několik druhů, jejichž vlastnosti se diametrálně liší. Jednotlivé druhy rozeznáváme podle druhu emitovaného záření. Tyto druhy radioaktivity se označují prvními třemi písmeny řecké abecedy – α , β , γ . Paprsky jsou označeny podle pořadí, v němž byly objeveny.¹³

Ozářená populace	Újma (10^{-2} , Sv ⁻¹)			
	Jiné nádory	Závažné dědičné změny	Celkem	
Pracující	4	0,8	0,8	5,6
Obyvatelé	5	1	1,3	7,3

Tabulka 6 - Koeficienty pravděpodobnosti výskytu stochastických účinků podle ICRP¹³

5.1.3.1 Vnitřní kontaminace

Při průchodu záření alfa prostředím vytvářejí tyto částice při srážkách s atomy kladné ionty tím, že z elektronového obalu atomů vyrážejí elektrony, dochází k ionizaci. Vzhledem k tomu, že částice alfa ztrácejí při ionizacích velmi rychle svoji energii, je jejich dosah v prostředí velmi malý. V plynech je to řádově několik centimetrů, ve tkáních jeden mikrometr až desítky mikrometrů.¹⁴

Vnitřní kontaminace je nejnebezpečnější. Alfa (i beta částice), které mají o několik řádů větší ionizační schopnost než fotony a neutrony, a které v orgánech nejsou odstíněny oděvem, kůží apod. Proto se v osobní dozimetrii stanovuje, kromě aktivity, také typ radionuklidu přijatého do organismu a chemická i fyzikální forma jeho molekul nebo absorbentů. Podle toho také radionuklidy procházejí dýchacím nebo zažívacím ústrojím a usazují se v některém orgánu nebo tkáni. Izotopovou výměnou tam nahrazují neaktivní izotopy a obdobnou formou se také s různou rychlostí vylučují. Pro ilustraci si uvedeme čtyři radionuklidy I^{131} , Cs^{137} , H^3 a Sr^{90} , které jsou typické svou depozicí v organismu. Jód se usazuje z více než 90 % ve štítné žláze, a proto se přímo tam detekuje. Na druhé straně, cesium se dopouje v krevním řečišti, kde nahrazuje sodík, a proto se měří v celém těle. Ještě složitější je to s tritiem, které jako tritiová voda je rovněž distribuováno v celém těle a navíc je to nízkoenergetický čistý beta zářič. Může se detekovat pouze po vyloučení v moči. Stroncium je většinou přijímáno do organismu jako malá rozpustná sloučenina a pouze část v konečné fázi deponuje v kostech, kde ho

nelze dobře detekovat. Další část přechází přímo přes zaživací trakt do stolice, kde se po chemické úpravě měří v rovnováze s Y^{90} .¹⁴

Částice beta (elektrony), při průchodu prostředím ztrácejí svoji energii v ionizacích atomů a dále v důsledku brzdného záření. Jelikož elektrony jsou ve srovnání se zářením alfa relativně malé a lehké, jsou rozptylovány s malými ztrátami energie a jejich dráha může být značně klikatá. Jejich dosah závisí na energii. Záření beta s maximální energií 2 MeV, má dolet ve vzduchu přibližně 8 metrů, ve vodě jeden centimetr a v hliníku 4 mm. Energie brzdného záření a výtěžek brzdného záření závisí na atomovém čísle absorbující látky – u těžkých látek jsou výrazně vyšší, než u látek lehkých.¹⁴

Při průchodu pozitronů (elektronů s kladným nábojem) prostředím dochází k tzv. anihilaci. Pozitron se spojí s elektronem, přičemž vzniknou dva fotony záření gama s energií 511 keV, jež z místa anihilace odlétnou opačnými směry.¹⁴

Interakce záření gama s hmotným prostředím se výrazně odlišuje od interakce elektricky nabitých částic. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabitě částice (elektrony), které tím získají energii dostatečnou k tomu, aby byly schopné prostředí ionizovat a excitovat. Záření gama náleží tedy do kategorie nepřímo ionizujícího záření. Záření gama interaguje s prostředím fotoefektem, Comptonovým rozptylem a tvorbou párů elektronů – pozitronů.¹⁴

Jako příklad radiofarmaka z informace výrobce víme, že léčivá látka obsahuje radioaktivní izotop fluoru – ^{18}F , který má poločas přeměny 109,8 min a emituje pozitrony o maximální energii 0,633 MeV s následným anihilačním zářením gama o energii 0,511 MeV.¹⁵

5.1.3.2 Vnější kontaminace

Záření alfa není při vnější kontaminaci nebezpečné (eventuálně s výjimkou oka).

Při dopadu na kůži se záření alfa absorbuje již v horních vrstvách epidermis. Dolet částice alfa v tkáni je řádově v hodnotě mikrometrů, na rozdíl od vnitřní kontaminace, kde se však energie částic alfa absorbuje v malém objemu tkáně, a proto působí biologicky negativně.¹

Důvodem je to, že částice alfa mají vysokou specifickou lineární ionizaci (vznikají řádově desítky tisíc iontů na dráze 1 cm, takže dráha je souvislou stopou). Protože ionizační ztráty jsou velké, dolet částic alfa je velmi malý. Ve vzduchu při energiích kolem 10 MeV se pohybuje kolem 10 cm. Přibližně polovina energetických ztrát ionizující α částice připadá na ionizaci a polovina na excitaci atomů prostředí. Další interakce záření alfa, tj. pružné a nepružné srážky, jsou prakticky zanedbatelné. ¹

5.1.4 Akutní nemoc z ozáření

Při ozáření na 0.7 Gy by docházelo k rozvoji akutní nemoci z ozáření (dále jen ANO), což je charakterizováno jako poškození organismu jednorázovou dávkou ionizujícího záření. ANO zahrnuje tři základní syndromy, jejichž výskyt je závislý na absorbované dávce ionizujícího záření. Jsou to dřeňový syndrom, gastrointestinální syndrom a neurovaskulární syndrom. V kostní dřeni způsobuje ionizující záření úhyn nezralých forem krvetvorných buněk, jejichž radiosenzitivita je velmi vysoká. Více radiorezistentní jsou pak epitelální buňky sliznice střev. Pokles počtu těchto buněk je příčinou vzniku gastrointestinálního syndromu. Nejvíce radiorezistentní se jeví nervové buňky, které jsou plně diferencované a dále se nemnoží. ¹⁵

5.1.5 Způsoby řešení při zasažení uvolněným ionizujícím zářením

Ochrana před ionizujícím zářením.

Základním požadavkem ochrany obyvatelstva je, aby jeho expozice byla nejnižší, jak lze prakticky, tj. s použitím technicky a ekonomicky dostupných metod dosáhnout. Cílem ochrany před ionizujícím zářením je zabránit (nebo alespoň maximálně omezit) radiačnímu poškození exponovaných jedinců, jejich potomstva, jakož i lidstva jako celku, a to při současném umožnění využití zdrojů ionizujícího záření ve prospěch člověka. Využívá biologické, chemické a fyzikální přístupy. ¹⁶

Biologická ochrana spočívá ve zlepšení výživy a v nesespecifickém zvyšování jeho odolnosti, např. zvýšeným přívodem vitamínů. ¹⁶

Chemická ochrana spočívá v podávání radioprotektivních látek, která chrání organismus proti jak proti přímému, tak proti nepřímému účinku ionizujícího záření. Mechanismus ochrany proti přímému účinku spočívá v maskování citlivých skupin vazbou radioprotektivních látek s buněčnými receptory nebo skupinami enzymů a v bránění migrace energie. Radioprotektivní látky proti nepřímému účinku blokují volné radikály, mohou také vyvolávat hypoxii buněk s následným omezením tvorby a účinku toxických produktů radiolýzy. ¹⁶

Fyzikální ochrana před zevním ozářením využívá tři základní faktory ochrany a to vzdálenost, čas a stínění. ¹⁶

Význam ochrany vzdáleností je patrný z pravidla, že pokles dávky je úměrný druhé mocnině vzdálenosti od zdroje ionizujícího záření (nejjednodušší aplikací principu ochrany vzdáleností je používání dlouhých pinzet a kleští, což bylo běžnou praxí už v průkopnických dobách chemických prací s ²²⁶Ra. ¹⁶

Zkrácení času pobytu osob v poli ionizujícího záření je třeba docílit organizačními opatřeními a nácvikem složitějších úkonů mimo oblast ionizujícího záření (např. u uzavřených gama zářičů s využitím neaktivních maket). ¹⁶

Aplikace principu stínění má v ochraně před ionizujícím zářením velmi široké použití a pracovník radiační ochrany musí být seznámen s fyzikálními zákonitostmi, na nichž je stínění založeno. Využívá se také poznatků o interakcích jednotlivých druhů ionizujícího záření s absorbující hmotou. ¹⁶

Ochrana před zářením alfa.

Záření alfa má ve vzduchu dolet několika centimetrů, ve vodě i v tkáních jen několik desítek mikrometrů. Vzhledem k tomu je ochrana před vnějším ozářením velice jednoduchá. K ochraně stačí oděv, papír, tenká fólie z plexiskla apod. ¹⁶

Ochrana před zářením beta.

Energetické spektrum zářičů beta je spojité. Dolet emitovaných beta částic absorbujícím prostředím není stejný. Maximální dolet záření beta se obvykle udává plošnou

hmotností absorbujícího materiálu, která zcela pohltí elektrony daného zářiče. Ve vzduchu uletí několik metrů, ve vodě několik centimetrů. V měkkých tkáních organismu je dolet záření beta u běžných zářičů řádově milimetry. Ke stínění se používají lehké materiály např. plexisklo nebo hliník, protože v nich vzniká méně brzdného rentgenového záření. Pro většinu zářičů beta používaných v medicíně stačí vrstva 3 – 5 mm hliníkového plechu a 5 cm olova za hliníkem. Pro odstínění brzdného rentgenového záření vzniklého v hliníku. ¹⁶

Brzdné záření vzniká i v tkáni, je-li v ní distribuován zářič beta. Vzhledem k nízkému efektivnímu protonovému číslu (např. pro sval $Z 7,6$) je však jeho intenzita nízká, a pro účely výpočtu dávky záření, způsobenou zářiči beta, ztráty energie brzdným zářením zanedbáváme. ¹⁶

Ochrana před zářením gama a rentgenovým zářením.

Aplikace principu stínění je spojena nejčastěji s posouzením kvality stínění proti fotonovému ionizujícímu záření gama nebo rentgenovému záření. Stínění je realizováno použitím materiálů s vysokým protonovým číslem, jakými jsou olovo, ocel apod. S výhodou se používá také betonu s příměsí barytu. Stínění se může instalovat přímo u zdroje, jak tomu je u krytů konstruovaných pro rentgenky nebo uzavřené zářiče. Stínění v prostředí je realizováno stínícími stěnami a závěsy nebo nejčastěji přímo volbou vhodných stínících materiálů pro stavební řešení místnosti, kde se zářič pracuje. Mezi osobní ochranné pomůcky založené na principu stínění patří zástěry a rukavice z olovnaté gumy a brýle s olovnatým sklem. ¹⁶

5.2 Výroba umělých radionuklidů

Ne všechny kombinace počtu protonů a neutronů tvoří stabilní jádra. Prvky s nestabilními jádry se samovolně přeměňují na jádra jiných prvků. Tato přeměna se nazývá radioaktivní přeměna, rozpad a jev – radioaktivita. ¹

Radioaktivními atomy nazýváme atomy, jejichž jádra nejsou v čase stabilní a samovolně se mění na jádra jiná (která opět mohou být radioaktivní nebo jsou již stabilní). Přeměna nestabilních jader obsahujících nadbytek energie je provázána emisí částice,

kvanta elektromagnetického záření nebo zachycením elektronu z elektronového obalu. Snahou radioaktivní přeměny je dosažení stability atomu. ¹

Vedle přirozené radioaktivity existuje také radioaktivita umělá, kdy nestabilita atomového jádra je vyvolána uměle (obvykle jadernou reakcí). Umělá radioaktivita se řídí stejnými zákonitostmi jako přirozená radioaktivita. ¹

V následujícím textu bude provedena analýza výroby umělých radionuklidů, které tvoří většinou část přepravovaných radioaktivních látek v České republice. Tyto radionuklidy jsou radiofarmaky, užívané v lékařství nebo umělé radionuklidy využívané v oblasti výzkumu a vědy.

5.2.1 Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s. – výrobce radiofarmak

Jako příklad výrobce umělých radionuklidů byl vybrán Ústav jaderného výzkumu (dále jen ÚJV Řež, a. s.)

Tato společnost poskytuje širokou škálu služeb – především aplikovaný výzkum a inženýrskou činnost. Působení společnosti představuje zejména převedení výzkumných a vývojových projektů do praxe. ¹⁷

Akciová společnost ÚJV Řež patří k vyhledávaným dodavatelům v takových oborech a činnostech, jako jsou např. bezpečnostní analýzy, modelování, termohydraulické výpočty, analýzy vážných havárií nebo podklady pro technické změny projektů jaderných elektráren, projektování v klasické i jaderné energetice. Patří sem také tvorba dokumentace v rámci povolovacích procesů, projekty LTO a zvyšování výkonu jaderných elektráren, likvidace radioaktivních odpadů a celá řada dalších. ÚJV Řež, a. s., vyrábí i radiofarmaka důležitá pro diagnostiku nemocí. ¹⁷

Oddělení Ústavu jaderného výzkumu – Divize radiofarmaka

Dlouhodobým posláním divize Radiofarmaka akciové společnosti ÚJV Řež je produkovat léčivé přípravky na špičkové evropské úrovni a vyvíjet nové produkty na bázi moderních technologií, v souladu s celosvětovým zaměřením. Sortiment zahrnuje výrobu a kontrolu kvality léčivých látek, léčivých přípravků a léčiv pro klinické zkoušení

včetně preklinických studií. Vyrobená radiofarmaka jsou dodávána celé řadě pracovišť nukleární medicíny v České republice i v zahraničí. ¹⁷



Obrázek 4 - Cyklotron Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s.

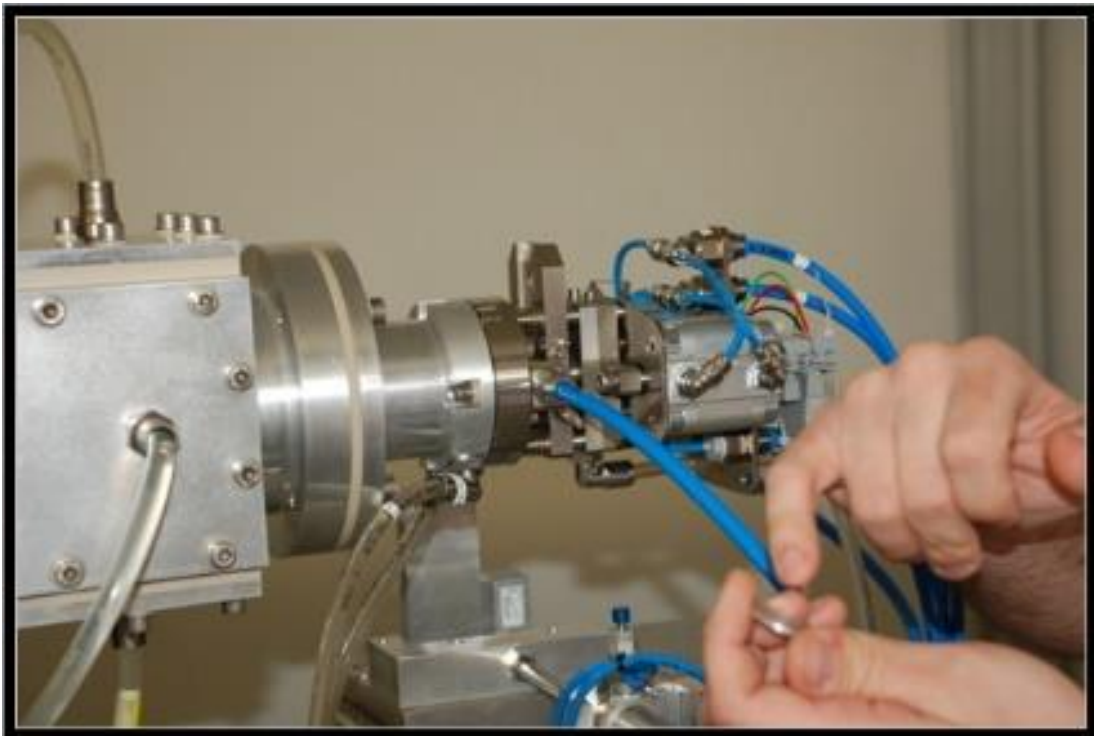
Divize je dále zaměřena na výstavbu a uvádění do provozu Petcenter (pozitronová emisní tomografie, dále jen PET), včetně zaškolení potřebného odborného personálu. V současné době divize provozuje v České republice tři PET centra. ¹⁷

Na obrázku 5 je zobrazen cyklotron ÚJV Řež, a. s., zařízení pro výrobu umělých radionuklidů. Cyklický vysokofrekvenční urychlovač slouží k urychlování nabitých částic pomocí vysokofrekvenčního elektrického pole.

Válcová část je aktivní těleso cyklotronu a po pravé části na podstavci vyústění cyklotronu pro magneticky usměrněný tok ionizujícího záření (viz obr. 6), které může být zachyceno do kovového terčiku, umístěného v kolimátoru (viz obr. 7), který může být využit například jako zdroj ionizujícího záření pro vědecké účely. ¹⁸



Obrázek 5 - Silné magnety usměrňující tok ionizujícího záření po terčích v kolimátoru viz obr. 7



Obrázek 6 - Kolimátor cyklotronu s ukázkou terčiku pro absorpci usměrněného paprsku záření ²⁰

5.2.2 Výroba umělého radionuklidu fluoru - ^{18}F

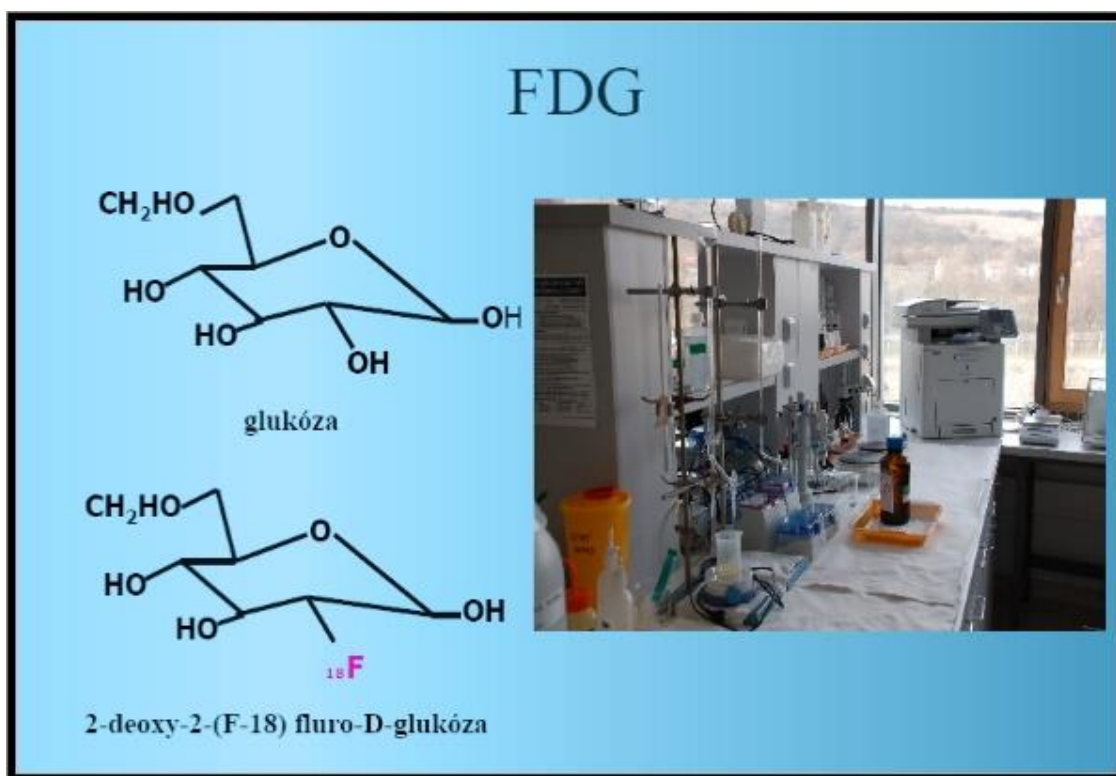
- proton je v cyklotronu urychlen
- dopadne na terč ^{18}O
- spojí se s jádrem ^{18}O
- z jádra je vymrštěn neutron
- je transmutován na ^{18}F

Vyjádřeno rovnicí $^{18}\text{O} + 1\text{p} \longrightarrow ^{18}\text{F} + 1\text{n}$ kyslík ¹⁷

5.2.2.1 Výroba radiofarmaka Fludeoxyglukósy FDG

2-deoxy-2-(F-18) fluoro-D-glukóza (FDG), CH_2HO , (viz příloha obr. 8 – leták léku)

- nejrozšířenější radiofarmakum pro PET
- využití glukózy
- dychtivě vychytávána většinou nádorů



Obrázek 7 - Chemický vzorec využití glukózy s ^{18}F , čisté výrobní prostory, laboratoř ÚJV Řež, a. s. ¹⁷



Obrázek 8 - Gamaspektrometr – měření vzorku radiofarmaka v kontejneru

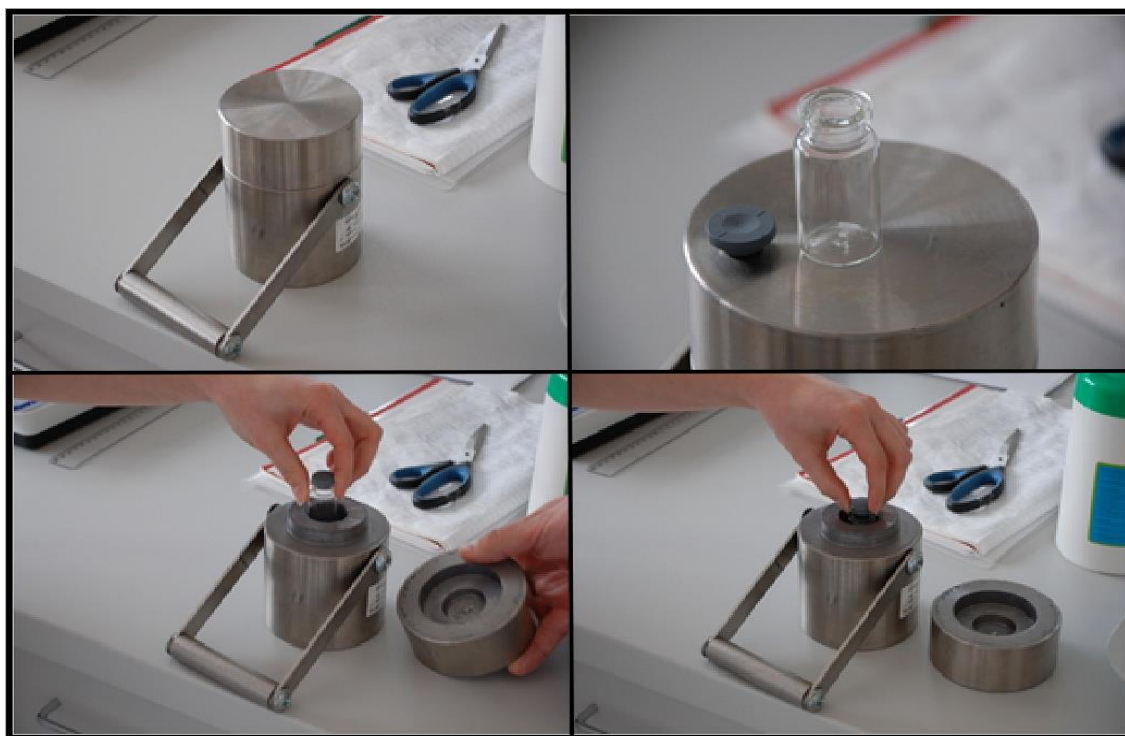
5.3 Bezpečnost přepravy radioaktivních materiálů

- jaderná bezpečnost – schopnost obalového souboru a přepravní obsluhy zabránit rozvoji štěpné řetězové reakce a úniku radioaktivních látek do životního prostředí.
- radiační ochrana – schopnost obalového souboru a přepravní obsluhy zabránit nedovolenému úniku ionizujícího záření a nepřípustnému ozáření osob.
- fyzická ochrana – schopnost Policie ČR a přepravní obsluhy zabránit neoprávněným činnostem s přepravovanými jadernými materiály.
- havarijní připravenost – schopnost přepravní obsluhy rozpoznat vznik radiační nehody, při jejím vzniku podle havarijního řádu maximálně omezit její následky a posléze tyto následky úplně likvidovat. ¹⁹

5.3.1 Přepravní schránky pro radiofarmaka

Přepravní stínící schránka pro radiofarmakum (viz obr. 10) je určena k samotné distribuci a převozu radioaktivní látky na pracoviště nukleární medicíny. Je vyrobena z wolframové slitiny, která dobře odstíní pozitronové záření a chrání uvnitř vloženou lahvičku s obsahem radiofarmaka. Takto uzavřené a odstíněné radiofarmakum je ve schránce bezpečné k přepravě z hlediska technické bezpečnosti a bez zdravotního rizika dopadu ionizujícího záření. Schránky s radiofarmakem jsou poté vloženy do přepravního kontejneru (viz obr. 11).

„Kontejner je přepravován profesionálním dopravcem s povolením SÚJB k převozu radioaktivních látek a s povolením přepravy ADR dopraven na místo určení, např. na pracoviště diagnostiky nádorových onemocnění pozitronové emisní tomografie na pracoviště nukleární medicíny.“¹⁸



Obrázek 9 - Přepravní schránka pro radiofarmakum např. Deoxyglukózu FDG s fluorem F^{18}



Obrázek 10 - Ukládání radiofarmak do přepravních schránek a přepravního kontejneru

5.3.2 Podmínky bezpečné přepravy

- přeprava jaderných materiálů a vybraných radioaktivních látek stanovených prováděcím předpisem (vyhláška č. 317/2002 Sb.) musí být povolena SÚJB podle § 9 odstavec 1 písmeno m) zákona č. 18/1997 Sb. (atomový zákon),
- zařazení jaderných materiálů do kategorií z hlediska fyzické ochrany a způsob zajištění fyzické ochrany jaderných materiálů při přepravě musí být schváleny SÚJB,
- obalové soubory pro přepravu radioaktivních materiálů musí být testovány a, jsou-li určeny k přepravě jaderných materiálů nebo vybraných radioaktivních látek, musí být typově schváleny SÚJB podle § 23 zákona č. 18/1997 Sb.,
- pro každou přepravu musí být zpracován a SÚJB schválen Havarijní řád,
- znalost přepravních instrukcí a havarijního řádu u osob realizujících přepravu radioaktivních materiálů je předmětem pravidelné kontroly prováděné inspektory jaderné bezpečnosti v průběhu přepravy.¹⁹

5.4 Rozbor legislativní a technické připravenosti IZS

V následujícím textu je proveden rozbor postupu Integrovaného záchranného systému České republiky, zmapování závazných právních norem a postupů angažovaných orgánů při řešení rizik spojených s transporty radionuklidů na pracoviště nukleární medicíny.

5.4.1 Simulace dopravní nehody vozidla převážející radioaktivní látky

- příklad převozu radiofarmaka dopravní společností,
- simulace dopravní nehody vozidla,
- průběh takové situace v časové ose.

5.4.1.1 Postup IZS při zjištění, ohlášení dopravní nehody převážející radionuklidy

Po přijetí oznámení o dopravní nehodě na tísňovou linku je na místo vyslána místně a věcně příslušná hlídka Policie ČR a postupuje se podle Katalogu typových činností Integrovaného záchranného systému s označením tzv. Špinavá bomba, což je normativní dokument Ministerstva vnitra – Typová činnost složek IZS při společném zásahu.²⁰

Při řešení mimořádné události tohoto charakteru, je prioritní záchrana osob při zajištění bezpečnosti zasahujících s ohledem na přítomnost radioaktivních látek a zjištění rozsahu kontaminovaného prostoru. Činnost složek IZS při řešení mimořádné události lze rozdělit do dílčích etap:²⁰

- a) záchranné a likvidační práce (radiační průzkum, záchrana osob),
- b) poskytnutí přednemocniční neodkladné péče,
- c) opatření na ochranu obyvatelstva (varování, evakuace, dekontaminace),
- d) psychosociální pomoc osobám zasažených mimořádnou událostí,
- e) dekontaminace a radiační průzkum po ukončení likvidačních prací,
- f) předání místa zásahu odpovědným orgánům.

Po ukončení zásahu mohou být na místě zásahu ponechány vybrané síly a prostředky, např. rozvinuté dekontaminační a monitorovací kapacity, současně může Policie ČR plnit další úkoly jako např. bezpečnostní uzávěru.²⁰

5.4.1.2 Postup Policie ČR při nehodě s radioaktivním materiálem

„Při příjezdu hlídky policie, tato postupuje podle Závazného pokynu policejního prezidenta č. 160/2008, konkrétně čl. 41:

Zvláštnosti postupu policistů při šetření dopravních nehod vozidel přepravujících nebezpečné věci v souladu s Evropskou dohodou ADR:

- 1) Dopravní nehoda, při které dojde k úniku přepravované nebezpečné věci (látky) z vozidla přepravujícího nebezpečné věci v souladu s Evropskou dohodou ADR, se zaznamenává na „Protokol o nehodě v silničním provozu“.*
- 2) Při provádění prvotních a neodkladných opatření policista do „Protokolu o nehodě v silničním provozu“ (případně do „Protokolu o nehodě v silničním provozu s projednáním“ nebo „Záznamu o dopravní nehodě zaviněné zvěří“) zaznamená i způsob, jakým bylo vozidlo (souprava) označeno (oranžové tabule s identifikačním číslem nebezpečnosti a UN číslem, a čísla vzorů bezpečnostních značek). Do protokolu zaznamená skutečnost, zda došlo či nedošlo k úniku přepravované látky.*
- 3) U každé dopravní nehody s účastí vozidla přepravujícího nebezpečné věci podle dohody ADR, policista zpracuje vždy CHECK List, ve kterém řádně uvede množství a druh přepravované látky (zejména UN číslo a pojmenování přepravované látky).*
- 4) Útvar nebo organizační článek policie, který šetří dopravní nehodu, je povinen vyrozumět krajské ředitelství policie o takovéto dopravní nehodě tak, aby bylo možné odeslat prvotní informaci do LOTUS NOTES databáze. Vlastní odeslání do databáze ADR zabezpečí krajský administrátor LOTUS NOTES. Po ukončení šetření dopravní nehody vozidla přepravujícího nebezpečné věci útvar nebo organizační článek policie, který šetří dopravní nehodu, o této skutečnosti vyrozumí krajské ředitelství policie, které zabezpečí aktualizaci dat v databázi ADR.*

5) *V případě dopravní nehody vozidla přepravujícího výbušné látky nebo předměty dle Evropské dohody ADR policista vždy cestou operačního střediska operačního odboru Policejního prezidia České republiky vyrozumí Pyrotechnickou službu pro posouzení stavu přepravovaného materiálu pro jeho další manipulaci a převoz za účelem zajištění bezpečnosti, případně odstranění vzniklého nebezpečí vzhledem k nestandardním procesům, kterým byl vystaven. V případě potřeby si stejnou cestou může vyžádat konzultaci za účelem zjištění, zda se na přepravované výbušné látky nebo předměty Evropská dohoda ADR vztahuje a vozidlo podle tohoto předpisu označeno není.*

V případě převozu radioaktivní látky nebo podezření na únik ionizujícího záření je o dopravní nehodě vyrozuměn Hasičský záchranný sbor, a to cestou Operačního střediska, které po přijetí odesílá informaci v podobě datové věty nebo bude na místo přivolána jednotka HZS přímo hlídkou Policie ČR.“²¹

5.4.1.3 Postup HZS ČR při nehodě s radioaktivním materiálem

Po vyslání HZS na místo dopravní nehody vozidla s ADR přepravovaným radioaktivním materiálem se postupuje podle:²²

1. Bojového řádu jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu, metodický list číslo N4 – Nebezpečí ionizujícího záření, vydané Ministerstvem vnitra – generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru České republiky v r. 2004, výťah řádu, předpokládaný výskyt (bod II – Bojového řádu, odst 7, písm c), g)):
 - Bod II. Možná místa s nebezpečím ionizujícího záření jsou:

Přepravní prostředky, ve kterých se dopravují ZIZ v přepravních kontejnerech a obalech. Přepravní prostředky přepravující radioaktivní látky nebo jiné zdroje ionizujícího záření (dále jen ZIZ) musí odpovídat příslušným předpisům.

Pravděpodobnou možnost vzniku nebezpečí ozáření a kontaminace pro jednotky představuje i dopravní nehoda přepravního prostředku s nákladem radioaktivních látek (dále jen RaL), či jiného ZIZ, při které dojde k porušení obalu zářiče.

- Bod III. Ochrana

Z hlediska taktiky jednotek při zásahu spočívá ochrana životů a zdraví hasičů před nebezpečím ionizujícího záření a kontaminace RaL zejména v následujících zásadách:

- a) minimálně 50 m od předpokládaného zářiče na místě události vytýčit předběžnou ochrannou zónu a zahájit průzkum a měření dávkového příkonu ionizujícího záření a plošné aktivity zářiče (při rozptýleném zdroji ionizujícího záření),
- b) hasiči provádějící průzkum musí být vystrojeni tak, jako při činnosti v prostředí kontaminovaném rozptýlenými RaL,
- c) vytýčit hranici tzv. bezpečnostní zóny (dále jen BZ) v úrovni dávkového příkonu záření 10 $\mu\text{Gy/h}$ (10 $\mu\text{Sv/h}$, 1 mR/h) nebo v úrovni plošné aktivity 10 Bq/cm^2 . Bezpečnostní zóna je prostor, ve kterém je třeba zavést režimová opatření, dodržovat zásady radiační ochrany a na obvodu této zóny omezit pohyb jednotlivé zasahující osoby na dobu nižší než 30 až 100 hodin za rok (100 hodin pobytu v této zóně může způsobit dávku odpovídající ročnímu limitu ozáření jednotlivců z obyvatelstva, tzn. 1 mSv/rok,
- d) režimovými opatřeními jsou zamezení vstupu nepovolaných osob, omezení doby pobytu zasahujících osob, měření a sledování obdržených dávek pro každou jednotlivou zasahující osobu pomocí vydaných dozimetrů (dávka je součin hodnoty dávkového příkonu a doby ozáření), zavedení evidence těchto osob, provádění dozimetrické kontroly na hranici BZ, provádění dekontaminace osob a věcných prostředků,²²
- e) zásady radiační ochrany - respektování přípustné dávky
 - dostatečnou vzdáleností od zářiče (dávkový příkon klesá s druhou mocninou vzdálenosti),
 - minimální dobou ozařování (zkrátit pobyt v BZ nebo v blízkosti zářiče na nejkratší možnou míru; kolikrát se zkrátí doba ozařování, tolikrát se sníží dávka),

- stíněním zářiče nebo osob (např. zeslabení pro „běžné“ záření gama 2 krát pro 2 cm oceli, 100 krát pro 12 cm oceli nebo 30 cm cihelné zdi),
- f) místo dislokace jednotek musí být vždy mimo BZ, tzn. ve vnější zóně,
- g) po vytýčení BZ pokračovat v radiačním průzkumu vytýčením hranice nebezpečné zóny (dále jen NZ), tj. hranice s naměřeným dávkovým příkonem rovným 1 mGy/h (1 mSv/h, 100 mR/h) nebo naměřenou plošnou aktivitou rovnou 1 kBq/cm². Nebezpečná zóna je prostor, ve kterém pobyt znamená potenciální ohrožení zasahujících osob. Pohyb jednotlivé zasahující osoby na hranici NZ třeba omezit na max. 50 hodin za rok a 100 hodin za 5 let (50 hodin pobytu při příkonu 1 mSv/h odpovídá ročnímu limitu dávky pro radiační pracovníky 4). V NZ smějí pracovat zasahující jednotky jen v případě nezbytnosti za podmínek uvedených pod písmeny h) a i), a to s nezbytně nutným počtem hasičů a při dodržování režimových opatření a zásad taktiky zásahů jednotek na radioaktivní látky a dalších předpisů,
- h) v případě vstupu do NZ je nutné změřit dávkový příkon v místě zásahu a stanovit (vypočítat) dobu pobytu s ohledem na přípustné dávky,
- i) přípustná dávka pro hasiče, jakožto jednotlivce z obyvatelstva, je 1 mSv ročně 4; připustit lze za předem stanovených podmínek dávky odpovídající limitům ozáření pro radiační pracovníky, tzn. 50 mSv/rok, příp. 100 mSv za 5 let. Výjimečně lze jednorázově připustit dávku 200 mSv 5 a ve zdůvodněných případech při záchraně života nebo při zabránění rozvoje radiační mimořádné situace s rozsáhlými společenskými a hospodářskými důsledky je ospravedlnitelné ozáření zasahujících osob na úroveň prahu deterministických účinků (1 až 2 Sv celotělové ozáření, 5 až 10 Sv lokální ozáření kůže),
- j) o vzniklé radiační události je nutno informovat Státní úřad pro jadernou bezpečnost a Policii ČR. SÚJB je nutno navíc informovat o pobytu zasahujících osob při zásahu v BZ i NZ,
- k) evidenci osobních dávek je nutno archivovat v souladu s platnými předpisy,
- l) v případě potřeby při ozáření přivolat odborníky SÚJB a zakreslit polohu zasahujících ozářených osob a polohu zdroje ionizujícího záření,²²

- m) v případě důvodného podezření na ozáření zasahující osoby je třeba zajistit její přesun do „Střediska speciální zdravotnické péče o osoby ozářené při radiačních nehodách“,
- n) v případě požáru, kdy není potvrzen rozptyl radioaktivních látek, vést zásah tak, aby nedošlo k zasažení zářiče požárem případně k poškození ochranného obalu zářiče.

Ochranné prostředky a další zařízení:

- a) jako ochrana před rozptýlenými RaL, kdy hrozí povrchová a vnitřní kontaminace osob vdechnutím nebo požitím RaL, se používají izolační dýchací přístroje a protichemické oděvy, které chrání proti kontaminaci, neposkytují však ochranu proti vnějšímu ozáření zářením gama a neutrony,
- b) radiometry pro měření dávkového příkonu (např. DC-3E-98) a měřiče kontaminace pro stanovení plošné kontaminace,
- c) osobní diagnostické dozimetry pro evidenci obdržených dávek u jednotlivých hasičů nebo osob (jsou vyhodnocovány nezávislou dozimetrickou službou) a skupinové elektronické dozimetry pro měření dávek a dávkových příkonů s nastavitelnou úrovní signalizace (používá se pro regulaci pobytu osob v radiačním poli).²²

2. Katalogový soubor typové činnosti (dále jen STČ). STČ- 01/IZS, Společný list složek integrovaného záchranného systému, Typová činnost složek IZS při společném zásahu „Špinavá bomba“, vydané Ministerstvem vnitra, Generálním ředitelstvím HZS ČR, Číslo jednací: MV-102562/PO-IZS-2014, Gestor typové činnosti: MV – generální ředitelství HZS ČR.²⁰

Tento dokument obsahuje postup složek integrovaného záchranného systému při mimořádné události (dále jen MU), při níž došlo k rozptýlení radioaktivních látek (dále jen RaL) výbuchem1. Jednotka HZS při výjezdu na dopravní nehodu s převozem radioaktivní látky vyjíždí a řídí se pokyny této normy.²⁰

5.4.1.4 Radiační ochrana při vytýčení bezpečnostních zón

Podle Sbírkky interních aktů řízení generálního ředitele HZS ČR, Ročník: 2006 V Praze dne 22. prosince 2006, Částka: 30 – Řád chemické služby Hasičského záchranného sboru České republiky, který stanovuje bezpečnostní zóny. ⁹

Bezpečnostní zóna se vytyčuje v případě zásahu při mimořádné události způsobené zdrojem ionizujícího záření. Hranice bezpečnostní zóny je definována naměřenými hodnotami příkonu dávkového ekvivalentu, popř. plošné aktivity. Je to prostor, ve kterém je třeba zavést režimová opatření a dodržovat zásady radiační ochrany. ⁹

Nebezpečná zóna je vymezený prostor bezprostředního ohrožení života a zdraví účinky mimořádné události; prostor této zóny ohraničuje hranice nebezpečné (bezpečnostní) zóny; vymezuje se zpravidla při ohrožení nasazených sil a prostředků účinky nebezpečných látek nebo jiných charakteristických nebezpečí (pád předmětů); je to zóna, kde platí z hlediska ochrany životů a zdraví režimová opatření, např. ochranné prostředky, stanovená doba pobytu včetně řízeného vstupu a výstupu z této zóny. Prostor regulovaného vstupu je prostor s omezeným pohybem osob, se zamezením vstupu nepovolaným osobám, který je uzpůsoben k manipulaci s prostředky nasazenými v nebezpečné (bezpečnostní) zóně po jejich dekontaminaci. Je součástí vnější zóny. Vnější zóna je prostor, který obklopuje nebezpečnou zónu (v případě zdrojů ionizujícího záření bezpečnostní a zónu). V této zóně se zřizuje nástupní prostor a jsou zde soustředěny zasahující síly a prostředky; na hranici nebezpečné (bezpečnostní) a vnější zóny se zřizuje dekontaminační pracoviště. ⁹

5.4.1.5 Dopravní nehoda s označením ADR – specifika postupu IZS

Pokud je vozidlo označeno znakem o převozu radioaktivních látek, je při řešení dopravní nehody tato nehoda označena HZS jako „Radiační událost“ (viz obrázek 11).

Obrázek 12 demonstruje příklad označení vozidla přepravující radioaktivní látku podle ADR, třídy 7. ⁴ *O nehodě je vyrozuměn cestou operačního střediska HZS tzv. dosahový pracovník Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, který se dostaví na místo nehody.* ²⁴



Obrázek 11 - Ukázka označení vozidla převážející radioaktivní látku třídy 7 C podle ADR ²³

Z údajů označení vozidla – Kemlerova kódu je patrné, jakou látku vozidlo převáží. Kemlerův kód značí nebezpečnost nebezpečné látky pro potřeby přepravy podle dohod ADR a RID (viz obr. 13). Z průvodních dokumentů o převozu radionuklidů dle ADR, je možnost od řidiče vyžádat a zjistit konkrétní převáženou látku – zářič, radiofarmakum, ke kterému má průvodní dokumentaci převozu a také jí vyčíst ze spodního čísla Kemlerova kódu, tzv. UN čísla charakterizující konkrétní látku.



Obrázek 12 – Ilustrační ukázka tabulky Kemlerova kódu ²³

Rozdělení radiačních událostí z hlediska zásahu jednotek požární ochrany			
Radiační událost	Popis události	Tolerované dávky pro zásah DL	
		μSv	mSv
I.	Událost nevede k ohrožení života, zdraví lidí a majetku; např. záchyty a nálezy zdrojů ionizujícího záření.	1000	1
II.	Událost vede k ohrožení života, zdraví lidí a majetku; např. požáry a zásahy na pracovištích se zdroji ionizujícího záření, dopravní nehody apod.	50000	50
III.	Událost vede k ohrožení života většího počtu osob a vzniku rozsáhlých majetkových škod; např. radiační havárie, teroristický útok, kontaminace rozlehlých území.	20000	200 *)
*) Ve zvlášť odůvodněných případech při záchraně životů nebo zabránění rozvoje radiační mimořádné situace s rozsáhlými společenskými a hospodářskými důsledky je ospravedlnitelné ozáření zasahujících osob až na úroveň prahu deterministických účinků – tj. 1 až 2 Sv celotělového ozáření.			

Tabulka 7 - Rozdělení radiačních událostí ²⁰

Na místě je změřena úroveň ionizujícího záření a na základě těchto hodnot je vytýčena tzv. Nebezpečná zóna s hraniční úrovní hodnot 1 mGy/h a bezpečná zóna s úrovní naměřených hraničních hodnot 1 uGy/h. Dále je definováno rozdělení radiačních událostí z hlediska zásahu jednotek požární ochrany (viz tabulka 3). ²⁴



Obrázek 13 - Zásahový dozimetr HZS označení URAD 115



Obrázek 14 - Osobní dozimetr HZS, označení SOR/R-20 verze DMC

Hasičský záchranný sbor na místě použije „Zásahový dozimetr“, který umožňuje změřit dávkový příkon P a dávku D (viz obr. 14).

Na těle zasahujícího hasiče se použije „Osobní dozimetr“, zavěšený na šňůrce na krku a umístěný na těle pod oblečením – tzv. referenčním místě – předem stanoveným umístěním na těle (viz obr. 15).

Dále jednotky HZS disponují Radiometrem (viz obr. 16), kterým je na místě možné měřit dávkový příkon a plošnou aktivitu v jednotkách Bq/cm².



Obrázek 15 - Radiometr používaný u jednotek HZS

5.4.1.6 Koncepce chemické služby HZS

Dosavadní zkušenosti ze zásahů jednotek požární ochrany (dále jen jednotek PO) ukazují, že ze zhruba 5500 zásahů na nebezpečné látky je cca 4500 zásahů na látky ropné povahy; ostatní jsou průmyslové chemické látky. Zásahy na zdroje ionizujícího záření jsou vedeny výjimečně. Přibývá však zásahů s podezřením na bojovou chemickou nebo biologickou látku, zejména v kombinaci s nástražnými výbušnými systémy.²⁵

5.4.1.7 Chemické laboratoře Hasičského záchranného sboru České republiky

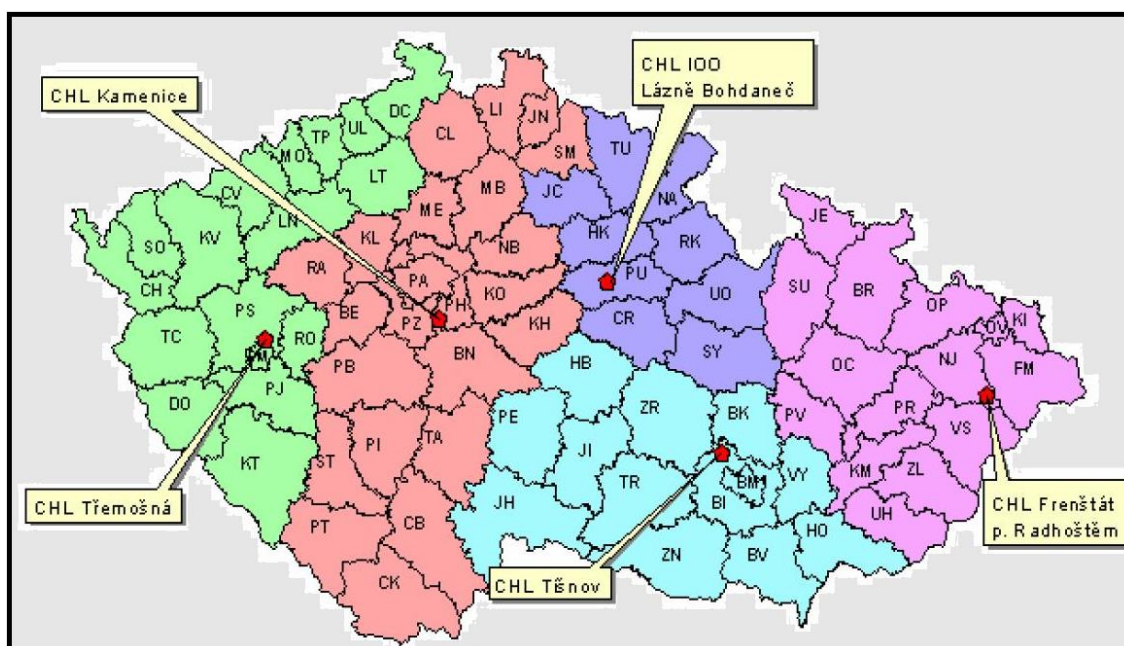
V současné době se veškeré chemické analýzy provádí ve stacionárních (kamených) laboratořích na vzorcích, které byly dodány Policií ČR. V souvislosti s převedením civilní ochrany z působnosti Ministerstva obrany do působnosti Ministerstva vnitra začal sbor od roku 2001 plnit úkoly ochrany obyvatelstva. HZS ČR mimo jiné převzal pět chemických laboratoří, které plní úkoly nejen stacionárních laboratoří, ale rovněž úkoly výjezdových skupin s rozšířenou detekcí. Jsou to Institut ochrany obyvatelstva Lázně Bohdaneč, který je součástí MV-GR HZS ČR, chemická laboratoř Kamenice

(HZS Středočeského kraje), chemická laboratoř Třemošná (HZS Plzeňského kraje), chemická laboratoř Tišnov (HZS Jihomoravského kraje) a chemická laboratoř Frenštát pod Radhoštěm (HZS Moravskoslezského kraje), které mají teritoriálně rozděleno celé území ČR. Kromě účinné územní působnosti získal HZS ČR významný lidský a přístrojový potenciál, který se zúročuje zejména radiačním a chemickým průzkumem při řešení událostí s výskytem nebezpečných látek. ²⁵

Na rozdíl od většiny evropských zemí disponují chemické laboratoře stacionární laboratoři, což nemá v evropském měřítku obdoby; dokázat si odebrané vzorky analyzovat ve vlastní laboratoři nebo potvrdit analýzy provedené v terénních podmínkách přenosnými přístroji není ani v Evropě obvyklé. Chemická služba je dynamicky se rozvíjející službou HZS ČR. Díky investicím v posledních letech, změnách ve vzdělávacím systému a pravidelném odborném výcviku, ale také zodpovědným úsilím příslušníků HZS ČR se podařilo povýšit profesionální úroveň sboru v oblasti problematiky nebezpečných látek na úroveň nejvyspělejších států Evropy a podílet se tak na výrazném zlepšení zajištění chemické a radiační bezpečnosti ČR. ²⁵

Nejvýznamnější krok posledního desetiletí byl realizován v souvislosti s předsednictvím ČR Evropské unii, kdy se uskutečnil nákup prostředků chemického a radiačního průzkumu, což znamenalo plošné pokrytí ČR zásahovými a osobními dozimetry a vybavení opěrných jednotek pro likvidaci havárií nebezpečných látek a výjezdových jednotek s rozšířenou detekcí nejmodernějšími přenosnými detekčními přístroji a analyzátory nebezpečných chemických látek. ²⁵

Odborná činnost Chemických laboratoří Hasičského záchranného sboru České republiky (dále jen CHL HZS ČR) na místě zásahu bude zaměřena zejména na zabezpečení speciálních úkolů v oblasti chemického a radiačního průzkumu, dozimetrické, laboratorní chemické i radiologické kontroly, zjišťování kontaminace a účinnosti dekontaminace k zabezpečení ochrany zasahujících hasičů, složek IZS a obyvatelstva v případě mimořádných událostí s únikem nebezpečných látek (s výjimkou biologických agens), při teroristických útocích nebo při použití zbraní hromadného ničení. ²⁵



Obrázek 16 - Rozmístění chemických laboratoří HZS v ČR s vyznačením působnosti⁹

CHL HZS ČR ve stacionárních laboratořích a jejich výjezdové skupiny budou zajišťovat zejména následující činnosti:

- rychlou detekci, identifikaci, přesné analytické stanovení a rozborů chemických látek a bojových chemických látek,
- kvalitativní a kvantitativní analýzy odebraných vzorků životního prostředí emitujících záření gama, beta a alfa a identifikaci radioaktivních látek,
- zabezpečovat nezbytná radiační monitorování vedoucí k zajištění radiační ochrany osob v místě zásahu,
- plnit úkoly mobilních monitorovacích skupin RMS,
- na místě zásahu zjištěné údaje interpretovat do podkladů a návrhů protichemických a protiradiačních opatření pro rozhodovací proces velitele zásahu, příslušných orgánů nebo krizových štábů a pro ochranu obyvatelstva (nutnost evakuace, způsob ochrany apod.) a pro vytýčení nebezpečných oblastí se zvláštním režimem života a pro optimální postup dekontaminace zasahujících složek IZS i obyvatelstva a stanovením zbytkové kontaminace hodnotit účinnost dekontaminace,²⁵

- provádět expertní činnost pro potřeby CHS a ostatní spolupracující složky IZS,
- pro výkon státní správy, zejména při zjišťování příčin vzniku požárů, odebrat vzorky a provádět analýzu z hlediska jejich chemických vlastností,
- zvyšovat svoji odbornou úroveň v rámci instrukčně metodických zaměstnání,
- kontrolovat správnou laboratorní praxi v rámci okružních rozborů a mezilaboratorních porovnání,
- v určeném rozsahu zabezpečovat vzdělávání a výcvik v jednotkách HZS krajů spolupracovat při vypracovávání osnov odborných a profilačních kurzů,
- provádět výcvik a praktické školení určených příslušníků jednotek HZS krajů,
- provádět konzultační, poradenskou a informační činnost pro potřeby CHS v jednotkách HZS ČR, pro příslušná operační střediska a velitele zásahu,
- zabezpečit pohotovost specialistů pro potřeby mezinárodních skupin humanitární pomoci poskytované v rámci Úmluvy o zákazu chemických zbraní na základě dohody o spolupráci mezi GŘ HZS ČR a SÚJB,
- k získání povolení SÚJB pro nakládání se zdroji ionizujícího záření, zvláště důležitých z hlediska radiační ochrany.

Nadále se předpokládá začlenění CHL HZS krajů (viz obr. 17) do úseku IZS a operačního řízení jako součást chemické služby. V dalším období bude třeba, aby jejich činnost byla více podpořena standardizovanou mobilní laboratoří umožňující provádět i odborné činnosti v místě zásahu.²⁵

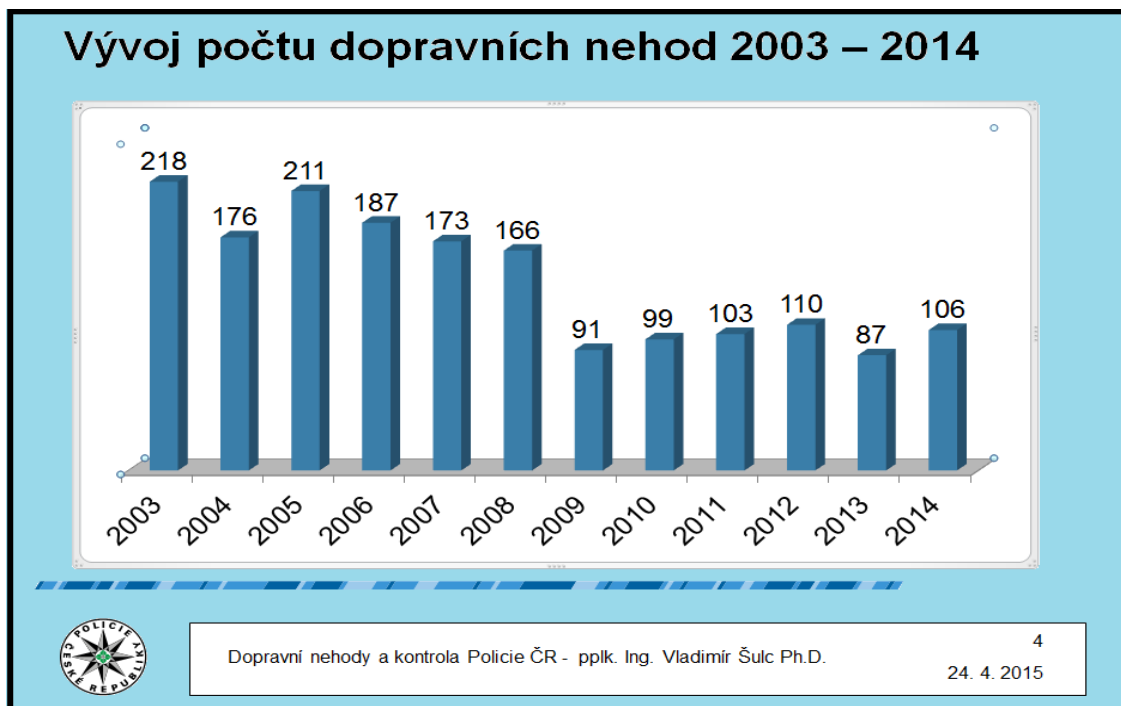
Odborné vedení laboratorní praxe i odborná úroveň personálu CHL HZS ČR při tom bude v kompetenci IOO Bohdaneč, který při této činnosti bude usměřňován podle působnosti GŘ HZS ČR úsekem prevence a plánování a úsekem IZS a operačního řízení. Metodické usměřňování CHL HZS ČR zůstane v kompetenci GŘ HZS ČR.²⁵

5.5 Statistika dopravních nehod vozidel ADR

Vývoj dopravních nehod za období let 2003 – 2014 (viz graf 2).²⁶

- počet dopravních nehod vozidel přepravujících nebezpečné věci podle dohody ADR

- počet dopravních nehod, kde došlo k úniku
- dopravní nehody v roce 2003 a od počátku roku 2014 podle jednotlivých UN čísel



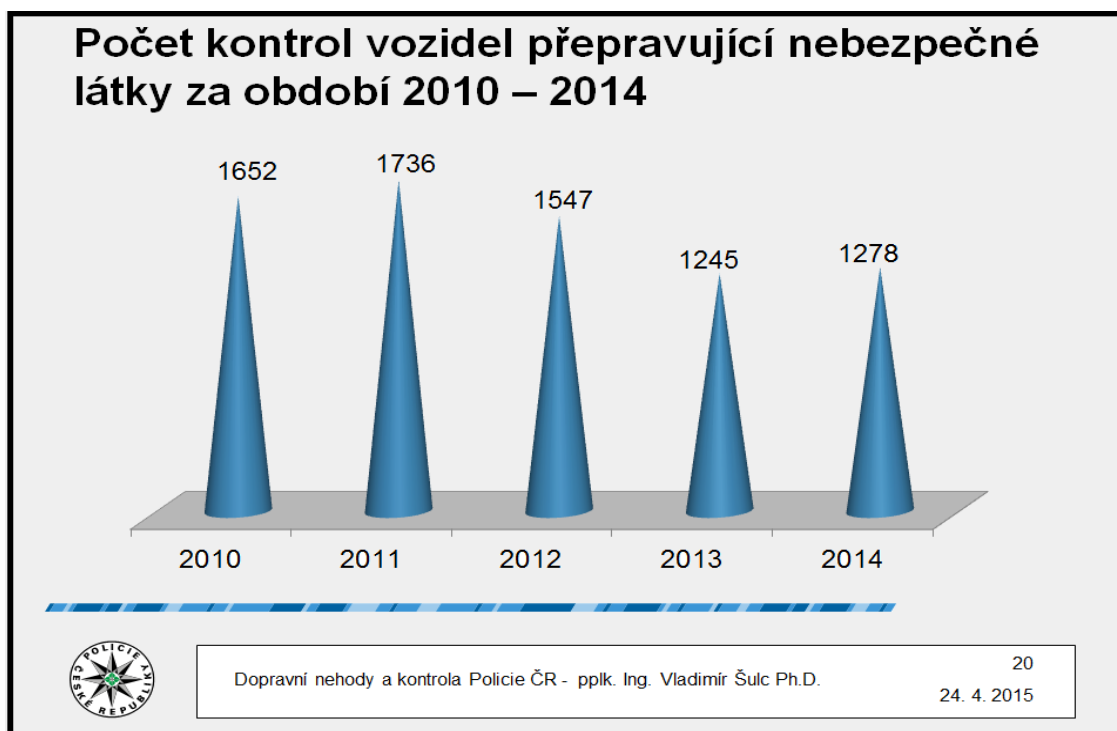
Graf 2 - Vývoj dopravních nehod přepravujících nebezpečné látky podle ADR ²⁶

Počet kontrol vozidel přepravujících nebezpečné látky za období 2010 – 2014

Policie ČR provádí kontrolu podle zákona č. 111/1994 Sb. (viz graf 3) o silniční dopravě, kontrolu povinností:

- řidiče
- dopravce
- odesílatele

Policie oznamuje porušení ze strany dopravce nebo odesílatele. ²⁶



Graf 3 - Přehled kontrol vozidel přepravujících nebezpečné látky ²⁶

Nehody podle UN čísla přepravované látky

Statistika za rok 2014 ²⁶

- 26x benzín (UN 1203)
- 18x nafta motorová (UN 1202)
- 8x propan butan (UN 1965)
- 6x látky ohrožující ŽP (UN 3082)
- 6x dusík (UN 1977)
- 4x dusík (UN 1073)

5.5.1 Zhodnocení nehod z hlediska přeprav radioaktivních látek

Z prozkoumaných statistik Policie České republiky, z informačního zdroje Policejního prezidia – Dopravních nehod a kontrol, bylo zjištěno, že nehody vozidel s převozem radioaktivních látek nejsou evidovány z těchto důvodů:

1. Dopravní nehody vozidel převážející radioaktivitu neměly ve sledovaném období za rok 2003 až 2014 závažnou nehodu.
2. Podle platných předpisů a závazného pokynu policejního prezidenta Policie ČR, jsou tyto nehody zpracovávány jako tzv. Malé nehody s postupem administrativního zpracování vyplněním tzv. euroformuláře dopravní nehody, který nespadá do statistik významných nehod.

„Ze zjištěných výsledků vyplývá, že nehody transportů radioaktivních látek jsou velmi vzácné. Pokud k nehodě transportu docházelo ve sledovaném období, jde o dopravní nehody sice vozidla převážejícího radioaktivní materiál třídy 7 podle ADR přepravních podmínek, ale bez úniku ionizujícího záření, či porušení přepravních schránek. Tedy jde o dopravní nehody malého významu, kdy není dotčen převážený radioaktivní materiál a nedošlo k úniku ionizujícího záření a ve sledovaných statistikách ADR přeprav se tudíž neprojevily.“²⁶

6 Diskuze

6.1 Zhodnocení výzkumné otázky

Z analýzy, rozboru a vyhodnocení rizik spojených s uvolněním radioaktivních látek během transportů na pracoviště nukleární medicíny bylo dosaženo následujícího shrnutí.

Shromážděním dat z legislativního prostředí dané problematiky a provedenými konzultacemi a faktickým rozбором funkčnosti a součinnosti jednotlivých institucí a složek, v oblasti transportů radionuklidů bylo zjištěno, že legislativní rámec České republiky ve velmi dobré míře pokrývá rizika spojená s eventuálním uvolněním radioaktivních látek během jejich přeprav. Jako vypovídající ukazatel může být konkrétní statistika Policejního prezidia zanesená ve výsledcích této práce, kdy nebyla zaznamenána ani jedna dopravní nehoda významného charakteru při přepravě umělých radionuklidů v období od roku 2009 do roku 2014. Telefonickou konzultací s pplk. Ing. Vladimírem Šulcem Ph.D. z Policejního prezidia Policie České republiky, Ředitelství služby dopravní policie ze dne 28. 4. 2015, pro upřesnění aktuální statistiky, nebyla dosud zaznamenána žádná dopravní nehoda s uvolněním – únikem radioaktivity. Dále se můžeme opřít o telefonickou konzultaci z Hasičského záchranného sboru Středočeského kraje z Chemické kanceláře Kamenice, kde bylo dne 7. 5. 2015 zjištěno, že HZS ve svých statistikách také nevede v uvedeném období žádný případ dopravní nehody s únikem radioaktivity. Z policejních kontrol dále vyplývá, že k porušování předpisů a závazných norem přepravců nedochází. Přepravci striktně dodržují značení svých vozidel a stanovené předpisy přeprav radioaktivních látek třídy 7 podle Evropské dohody ADR. Z těchto důvodů s oporou dat ve výzkumné části se dá konstatovat, že legislativa v České republice je na dostatečné úrovni pro minimalizaci rizika na přijatelnou úroveň.

Při rozboru rizik spojených s uvolněním radioaktivních látek během transportů na pracoviště nukleární medicíny bylo zjištěno, že Česká republika disponuje celou škálou preventivních opatření k minimalizaci radiační zátěže během celého přepravního řetězce. Rozborem v časové ose simulované dopravní nehody byl zjištěn adekvátní postup složek IZS s dobrým technickým vybavením a součinností Policie ČR, HZS a Zdravotní zá-

chranné služby. Základní jednotky HZS vyjíždějící na místo jsou vedeny legislativní oporou Chemickým řádem, Souborem typové činnosti a dalšími normami, přesně vytyčující účinný postup pro prevenci rizik, zvládnání mimořádných událostí s eventuálním únikem ionizujícího zařízení, radiačním průzkumem a účinnou dozimetrií. Jako unikátní složka se jeví síť tzv. Chemických laboratoří HZS, které pokrývají ve svém dojezdu z několika míst v ČR případné místa havárie v reálném čase. Tyto jsou vybaveny kvalitním zařízením pro detekci zdrojů ionizujícího záření a v případě potřeby k podrobnějšímu měření a zásahu při povolání prvotně zasahujícími složkami jednotek plošného pokrytí HZS jednotlivých krajů. Technické zabezpečení převážených radiofarmak má důsledný právní rámec zastřešený SÚJB s technickým povolováním přepravních schránek, které jsou předimenzovaně odstíněna proti úniku záření z umělých radionuklidů a takto zhotovené schránky jsou bezpečně uloženy v kvalitních přepravních kontejnerech, které odolávají případným dopravním haváriím, což dokazují statistické údaje ve výzkumné části této práce.

6.2 Návrh vlastního řešení v oblasti snížení rizik přepravy radionuklidů

Mapováním problematiky rizik přepravy radionuklidů byl zjištěn podnět ke zlepšení přepravy a snížení rizika od přepravce firmy M.G.P., spol. s r. o. Tato transportní společnost převáží radiofarmaka i ze Slovenska. Konzultací s vedoucím pracovníkem této společnosti, Dr. Lubošem Moravcem, bylo zjištěno, že firma disponuje povolením používat právo přednosti v jízdě a k účelu transportů radionuklidů obdržela na žádost příslušné povolení. K této problematice a jako zajímavému podnětu byl požádán vedoucí firmy o písemné sdělení, kterému vyhověl a napsal stanovisko k transportům radiofarmak.

6.2.1 Vyjádření vybraného přepravce radionuklidů – charakteristika firmy

V dopise uvádí Dr. Luboš Moravec informace z praktického převážení radionuklidů v ČR následující:

„Hlavní náplň M.G.P., spol. s r.o. Zlín

Společnost byla založena 9. 10. 1991 a od roku 2003 pracuje pod ISO 9001 od Lloyds.

- a) hlavní činností společnosti je dovoz a distribuce farmak, preparátů a přístrojů pro oblast medicíny, vědeckého výzkumu, průmyslových aplikací a zajišťování přepravy nebezpečných látek,
- b) v oblasti farmak se jedná hlavně o skupinu preparátů - Kontrastních látek, sloužících ke zvýšení diagnostického přínosu při RTG, CT a MRI vyšetření, preparátů pro invazivní kardiologii a angiologii,
- c) pro diagnostiku resp. paliativní terapii na Klinikách a Odděleních Nukleární medicíny jsou využívána radiofarmaka, která jsou buď neaktivní nebo jsou značena různými radionuklidy,
- d) v oblasti vědeckého výzkumu jsou dodávány radioaktivně značené sloučeniny a chemikálie (preparáty určené hlavně pro molekulární biologii a molekulární genetiku) na různá pracoviště Akademie věd, Univerzit, Vysokých škol a výzkumných institucí,
- e) pro průmyslové aplikace jsou dodávány různé typy uzavřených zářičů a zařízení se zářiči, které jsou využívány hlavně v defektoskopii, dále jako hladinoměry, tloušťkoměry a elektrostatické neutralizátory,
- f) společnost dodává také přístroje pro detekci ionizujícího záření jak pro monitorování prostředí, tak k osobnímu monitorování resp. detekci aktivity využitelnou pro diagnostické úkony v medicíně,
- g) pro oblast medicíny dále dodává etalony a kalibrační standardy pro seřizování a kontrolu přístrojů převážně v medicínské diagnostice.

Dále společnost provádí přijímací zkoušky a zkoušky dlouhodobé stability ZIZ.

Hlavní přepravní aktivitou je zajištění přepravy nebezpečného zboží, hlavně třídy 7, které je prováděno pro vlastní potřebu i nabízeno jako komerční servis.

Servisní provádění služeb soustavného dohledu nad radiační ochranou.“²⁷

6.2.2 Výsledek ztrát vzniklých při zpoždění přepravy

„Největším problémem při přepravě je obtížná průchodnost hlavních dálničních tahů při zajišťování přepravy rychle se rozpadajících nuklidů pro zdravotnické aplikace.

Jedná se hlavně o nuklid F_{18} , který je využíván k diagnostice převážně onkologických onemocnění ve formě různých preparátů (Fluoroglukóza, Fluorothymidin, Fluorocholin), kdy poločas rozpadu je 111 minut. Uvedený nuklid se vyrábí na území ČR v Praze a Brně, ale používají jej nemocnice po celé ČR. Mimo Prahy a Brna se jedná o Olomouc, Nový Jičín, Hradec Králové, Plzeň a v letošním roce byla schválena nová instalace přístrojů využívajících nuklid F_{18} do Českých Budějovic, Jihlavy a Ostravy.“²⁷

6.2.3 Ekonomický pohled ztrát

Cena jednoho vyšetření na pacienta se pohybuje okolo 28.000,- Kč a při zpoždění dodávky o jeden poločas dochází k vyšetření pouze poloviny objednaných pacientů. Protože se jedná o poměrně drahé vyšetření na specializovaných pracovištích, jsou i dlouhé objednávací lhůty cca 1 měsíc (dle pracoviště) a na dané vyšetření jsou svázeni pacienti ze vzdálenosti až 100 km. Zde vzniká další ztráta při zpožděném dodání. U pacientů, kteří nemohli být pro zpoždění dodávky vyšetřeni, se jejich vyšetření odkládá i cca o 30 dní s možností zhoršení průběhu onemocnění a současně vznikají dodatečné náklady na přepravu pacienta do specializovaných pracovišť a jeho zpětný odvoz bez absolvování vyšetření.

Druhým problémem je přeprava preparátů značených I_{123} s poločasem rozpadu 13,2 hod.

Tyto preparáty se v ČR nevyrábějí a jsou objednávány na pacienta u výrobce v zahraničí.

Celková doba dodání od podání objednávky v ČR, objednání v zahraničí, jeho výroby, výstupní kontroly, proclení, letecký dovoz do ČR Praha a dodání na pracoviště konečného uživatele je do 27 hodin. Jinak se preparát nesmí použít. Doprava do ČR je realizována do půlnoci ode dne objednání a během noci je prováděn jeho rozvoz do všech nemocnic v České a Slovenské republice.

Preparát, jehož cena je cca 25.000,- Kč na pacienta je dovážen jako individuální dávka a musí být použit nejpozději do 12 hodin dne po objednání. V případě nedodání v uvedeném termínu vznikají škody obdobné jako u F_{18} .“²⁷

6.2.4 Zdravotní pohled ztrát



„Vznikají zbytečné náklady na svoz pacienta např. cca 130 km sanitní služby a prodloužená doba diagnostiky cca o 30 dní (dle pracoviště), vedoucí k potenciálnímu rozvoji pozdě diagnostikovaného onemocnění.“²⁷

6.3 Slovenská legislativa v oblasti přeprav radiofarmak

Slovenská republika ve svém Zákoně o cestnej premávke z.č.8/2009, § 40 odst. 3 umožňuje vozidlům přepravujícím radiofarmaka využívat práva přednosti v jízdě:⁸

„Ministerstvo vnútra môže v osobitných prípadoch, najmä ak je to potrebné na ochranu života, zdravia alebo majetku, na základe písomnej žiadosti vydať povolenie na používanie zvláštnych výstražných znamení aj na iných vozidlách, ako sú uvedené v odseku 2; v takom prípade môže byť zvláštné výstražné svetlo modrej farby umiestnené na vozidle len pomocou prenosného zariadenia.“²⁸

Zákon má logický dodatek a umožňuje zhodnotit a přidělit právo přednosti v jízdě i dalším subjektům, než které přímo v zákoně ustanovuje, čímž otevírá možnost kompetentnímu orgánu své země udělit konkrétní povolení ve smyslu citovaného zákona, pro použití modrých majáků s právem přednosti v jízdě za daných podmínek (viz obr 17).

	OPIS PREZÍDIUM POLICAJNÉHO ZBORU odbor dopravnej polície Račianska 45, 812 72 Bratislava	
PPZ-ODP [redacted] 2012		povolenie č. [redacted] 2012
POVOLENIE		
v zmysle ustanovenia § 40 ods. 3 zákona č. 8/2009 Z. z. o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov na používanie zvláštnych výstražných znamení vozidla s právom prednostnej jazdy		
držiteľ vozidla: [redacted] spol. s r.o.		
ev. číslo a typ vozidla: [redacted] / OPEL Astra		
územný rozsah: na cestách v Slovenskej republike		
dôvod: prevoz rádioaktívnych žiaričov a liekov		
<p>Vodič vozidla je povinný mať toto povolenie na používanie zvláštnych výstražných znamení pri sebe a na výzvu ho predložiť príslušníkovi PZ.</p> <p>Dalšie podmienky</p> <p>Držiteľ vozidla s právom prednostnej jazdy je povinný:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Používať na vozidle len schválené zvláštne modré výstražné svetlo umiestnené na vozidle pomocou prenosného zariadenia. 2. Zabezpečiť, aby vodičom takéhoto vozidla bola len osoba, ktorá spĺňa stanovené podmienky v zmysle § 40 ods. 6 a § 89 zákona č. 8/2009 Z. z. o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov 		

Obrázek 17 - Ukázka časti konkrétního povolení k užívání přednosti v jízdě pro vozidla převážející radioaktivní materiály, vydáno Slovenskou republikou pro českého přepravce

6.4 Návrh snížení rizika transportům zavedením práva přednosti v jízdě

Využití radiofarmaka je vzhledem k jeho poločasů rozpadu dočasné. Proto je jeho výroba i dodání přesně stanoveno. Pacienti jsou nasmlouváni na daný termín a nedoručení radiofarmaka je velkou ztrátou. Z hlediska pohledu rizika přepravy je logické, že řidiči při zpoždění (které vzniká v husté dopravní zátěži v České republice, včetně rekonstrukce dálnice D1 a mnoho dalších dopravních komplikací), podléhají zátěžovému stresu, který

zvyšuje riziko dopravní nehody. Řidič se snaží na pracoviště nukleární medicíny přijet v daný čas a uvědomuje si ztráty, které přinese zpoždění.

Z těchto důvodů by bylo vhodné zažádat o doplnění, změnu Zákona o silniční dopravě 361/2000Sb. s novelou, která by přinesla vozidlům převážející radiofarmaka, využívat právo přednosti v jízdě.

7 Závěr

Mapováním problematiky převozu radioaktivních látek na pracoviště nukleární medicíny bylo dospěno k závěru, že v oblasti legislativy na všech úrovních nebylo zjištěno žádného nedostatku a odpovědné instituce se v této oblasti dostali na mezinárodní špičku. Výroba i převozy a předání radionuklidů jsou dobře normativně ošetřeny. Po technické stránce je minimalizováno riziko úniku ionizujícího záření a případné kontaminace na přijatelnou úroveň. Převážní schránky i kontejnery jsou velmi dobře technicky zpracovány a pod dohledem Státního úřadu pro jadernou bezpečnost testovány. Ani hledisko statistik dopravních nehod převozů radionuklidů neukázalo, že by došlo k selhání legislativního rámce, či technického zabezpečení. Naopak. Nehody vozidel ADR radioaktivní přepravy jsou velmi vzácné a ve sledovaném období od roku 2009 do 2015 nebyl zjištěn žádný únik při transportu.

Práce bude poskytnuta firmám zabezpečující transport radioaktivních látek do pracovišť nukleárních lékařů, Hasičskému záchrannému sboru České Budějovice a Policii ČR – Policejní prezidium, k využití poznatků ohledně informovanosti o radionuklidech a rizik přeprav radioaktivních látek.

Bude podána žádost Ministerstvu dopravy a po jejím připomínkování bude postoupena zákonodárným orgánům České republiky, za účelem udělení práva přednosti v jízdě vozidlům přepravující radioaktivní látky na pracoviště nukleární medicíny. Po konzultacích na Ministerstvu dopravy, Poslanecké sněmovně České republiky a přepravní společností MGP s.r.o., je podání žádosti možné a reálné. Výsledek procesu žádosti už bude záviset na kompetentních orgánech.

8 Seznam informačních zdrojů

1. FREITINGER SKALICKÁ, Zuzana, Jiří HALAŠKA, Renata HAVRÁNKOVÁ, Jiří KUBEŠ, Leoš NAVRÁTIL, Václav NAVRÁTIL, Josef SABOL, Ladislav SIROVÝ a Friedo ZÖLZER. 2015. *Radiobiologie: MEZINÁRODNÍ AGENTURA PRO ATOMOVOU ENERGIÍ* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/>
2. IAEA INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 2015. *Atoms for Peace: Our Work* [online]. Vienna International Centre, PO Box 100 A-1400 Vienna, Austria [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/>
3. Česká republika. O mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In: *Zákon č. 18/1997 Sb.* Praha, 1997. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/>
4. MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. Přeprava nebezpečných věcí: ADR [online]. 2015. vyd. Praha, 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.mdcr.cz/cs/Silnicni_doprava/Nakladni_doprava/adr/Preprava_nebezpecnych_veci.htm
5. UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. 2015. *About the ADR: ADR applicable as from 1 January 2015* [online]. Geneva [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr_f.html
6. VOJTĚCH, Ullmann. *Jaderná fyzika a fyzika ionizujícího záření: Radioisotopová scintigrafie* [online]. 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.sweb.cz/Scintigrafie.htm>
7. KUPKA, Karel. VŠEOBECNÁ FAKULTNÍ NEMOCNICE V PRAZE A 1. LÉKAŘSKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY. Ústav nukleární medicíny: Specializovaná centra [online]. Praha, 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.vfn.cz/pracoviste/kliniky-a-oddeleni/ustav-nuklearni-mediciny/specializovana-centra/>
8. *Biomedicínské inženýrství: Identifikace typů záření* [online]. 2015. Praha [cit. 2015- 5-11]. DOI: CZ.04.1.03/3.2.15.3/0444. Dostupné z: <http://www.fbmi.cvut.cz/e/04-identifikace-typu-zareni/1937.pdf>

9. 30/2006. *Sbírka interních aktů řízení generálního ředitele hasičského záchranného sboru České republiky: Řád chemické služby*. 2006. Praha: Hasičský záchranný sbor České republiky.
10. HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR PLZEŇSKÉHO KRAJE. *Chemická laboratoř Třemošná: Výpočtové dokumenty*. 2015. Plzeň - Třemošná: HZS, 2015 [cit. 2015].
11. Vyhláška SÚJB: O radiační ochraně. 307/2002 *Sb.* Praha: SÚJB, 2002.
12. KUBEŠ, Jan. 2015. *Výklad k výpočtu ozáření radionuklidy* [Ústní sdělení]. Třemošná [cit. 2015].
13. STÁTNÍ ÚSTAV RADIAČNÍ OCHRANY. 2015. *Radiační ochrana: Biologické účinky ionizujícího záření* [online]. Praha [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>
14. KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL. 2005. *Klinická radiobiologie*. Liberec: Spolisk. ISBN 80-86571-09-2.
15. STÁTNÍ ÚSTAV PRO KONTROLU LÉČIV. 2006. *Fludeoxyglukosa příbalová informace* [online]. 2006. Husinec - Řež [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: www.sukl.cz/download/pil/PI28650.doc
16. NAVRÁTIL, Leoš a Josef ROSINA. 2000. *Lékařská biofyzika: Kolektiv autorů*. Praha: Manus. ISBN 80-902318-5-3.
17. ÚJV ŘEŽ, A.S. 2015. *O společnosti* [online]. Husinec - Řež u Prahy [cit. 2015-05-0]. Dostupné z: <http://www.ujv.cz/cz/o-spolecnosti>
18. PAVELKA, Adam. 2015. *Ústní výklad exkurze v divizi Radiofarmak ÚJV Řež, a.s.* [online]. Husinec - Řež u Prahy, Ústní výklad [cit. 2015].
19. STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST ČESKÉ REPUBLIKY. 2015. *Jaderná bezpečnost* [online]. Praha [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost>
20. STČ - 01/IZS. *Katalogový soubor typové činnosti: Typová činnost složek IZS při společném zásahu Špinavá bomba*. 2015. Praha: Ministerstvo vnitra GŘ HZS ČR.
21. HODBOŇ, Michal. 2015. *Šetření dopravních nehod v režimu ADR* [Email]. 2015. 2015, 1 s. [cit. 2015].

22. *Metodický list 4 N. Bojový řád jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu: Nebezpečí ionizujícího záření.* 2004. Praha: Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky.
23. MILETÍN, Jiří. 2011. *ADR: Přeprava nebezpečných věcí po silnici.* 1. Praha: M Konzult s.r.o. Praha. ISBN 97880902202-1-8.
24. HALADA, Michal. 2015. *Chemická služba HZS* [Ústní výklad, sdělení]. České Budějovice [cit. 2015].
25. MATĚJKA, 2012. *Jak fungují chemické laboratoře HZS ČR* [online]. Praha: HZS ČR [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.hzscr.cz/clanek/jak-funguji-chemicke-laboratore-hzs-cr.aspx>
26. ŠULC, Vladimír. 2015. *Přeprava nebezpečných věcí podle ADR: Dopravní nehody a jejich následky a kontroly přeprav.* Praha.
27. MORAVEC, Luboš. 2015. *Výklad k legislativě a rizikům transportů umělých radionuklidů* [Ústní sdělení]. Zlín [cit. 2015].
28. Slovenská republika. Zákon o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov. In: 49/2014. 8/2009, roč. 2014, č. 49, 16. Dostupné z: <http://www.epravo.sk/top/zakony/zbierka-zakonov/zakon-uplne-znenie-zakona-c-82009-z-z-o-cestnej-premavke-a-o-zmene-a-doplneni-niektorych-zakonov-561.html>

9 Přílohy

Obrázek - 1 - Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s.	94
Obrázek - 2 - Velín cyklotronu v Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s. výroby radiofarmak	94
Obrázek - 3 - Cyklotron ÚJV Řež, a. s.	95
Obrázek - 4 - Část cyklotronu - magnety pro usměrnění ionizujícího záření a kolimátor s terčíkem	95
Obrázek - 5 - Převážní kontejnery radiofarmak	96
Obrázek - 6 - Detail uložení schránek radiofarmak v přepravním kontejneru	96
Obrázek - 7 - Detailní snímek stíněné schránky pro uložení radiofarmaka, např. Deoxyglukózy	97
Obrázek - 8 - Ukázka měření gamaspektrometry	97
Obrázek - 9 - Určení detekovaných radionuklidů	98
Obrázek - 10 - Mobilní gamaspektrometr	98
Obrázek - 11 - Příbalový leták radiofarmaka	99



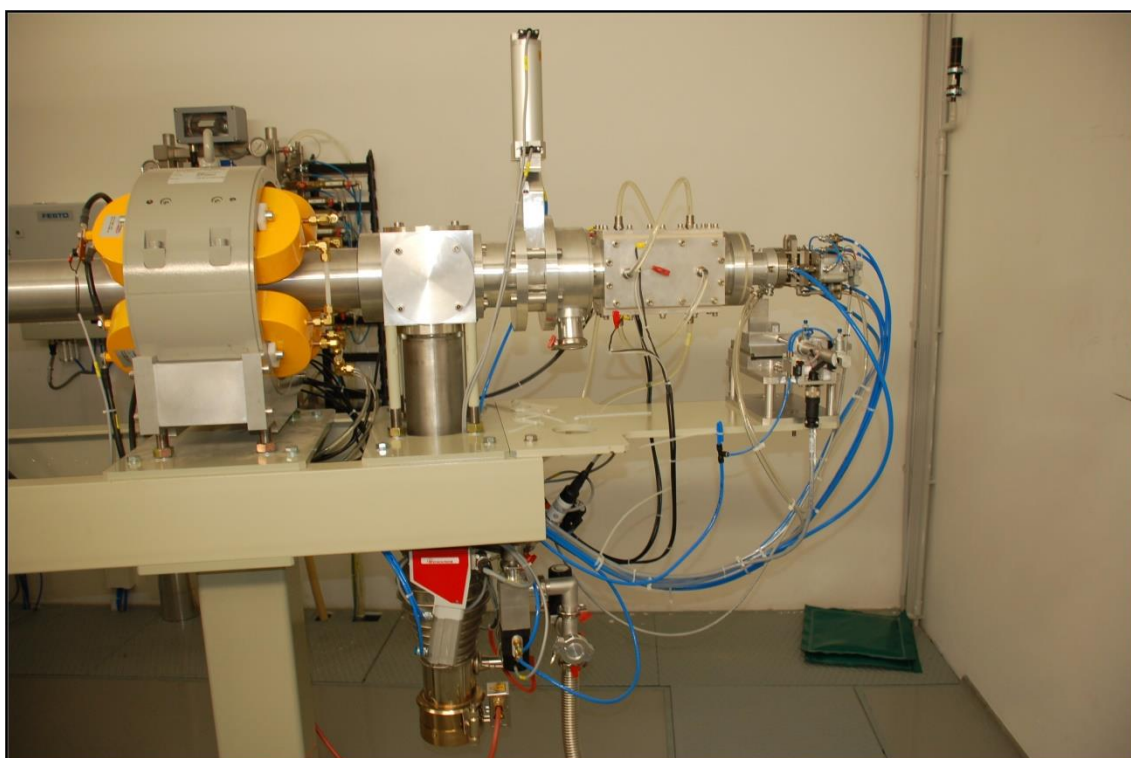
Obrázek - 1 - Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s.



Obrázek - 2 - Velín cyklotronu v Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s. výroby radiofarmak



Obrázek - 3 - Cyklotron ÚJV Řež, a. s.



Obrázek - 4 - Část cyklotronu s magnety pro usměrnění ionizujícího záření a kolimátor s terčíkem



Obrázek - 5 - Přepravní kontejnery radiofarmak



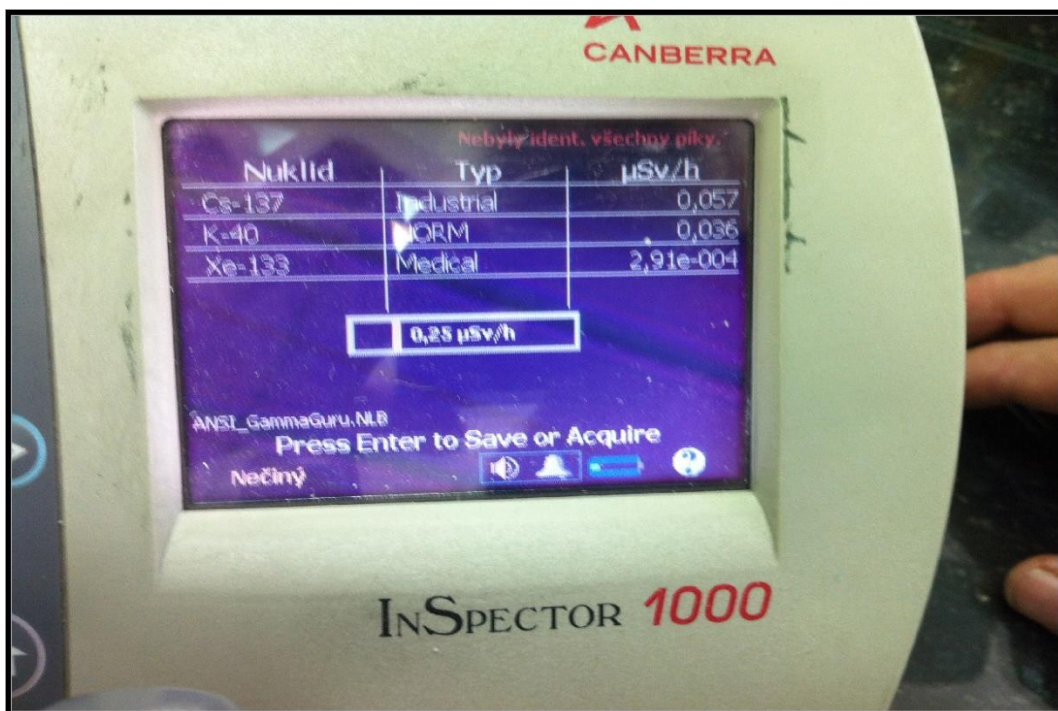
Obrázek - 6 - Detail uložení schránek radiofarmak v přepravním kontejneru



Obrázek - 7 - Detailní snímek stíněné schránky pro uložení radiofarmaka, např. Deoxyglukózy



Obrázek - 8 - Ukázka měření gamaspektrometry



Obrázek - 9 - Určení detekovaných radionuklidů



Obrázek - 10 - Mobilní gamaspektrometr

PŘÍBALOVÁ INFORMACE

Informace pro použití, čtěte pozorně

Fludeoxyglukosa inj.
(Fludeoxyglucosum (¹⁸F))
radiofarmaka – injekce

Složení: léčivá látka: Fludeoxyglucosum (¹⁸F) 100 - 1500 MBq
(2-(¹⁸F)fluor-2-deoxy-D-glukopyranosa, 2-(¹⁸F)fluor-2-deoxy-D-glukosa)
pomocné látky: Natrii chloridum 9,0 mg
Aqua pro iniectiōne ad 1,0 ml

Léková forma a velikost balení: injekce, balení: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12 nebo 15 GBq v injekční lahvičce k opakovanému odběru.

Ochranný obal: olověný kontejner, plechovka

Indikační skupina: radiofarmaka - radionuklidové diagnostikum

Sterilní roztok 2-(¹⁸F)fluor-2-deoxy-D-glukopyranosy (2-(¹⁸F)fluor-2-deoxy-D-glukosy) izotonizovaný chloridem sodným. Fludeoxyglukosa je radiodiagnostikum vhodné pro sledování regionální utilizace glukosy metodou PET nebo PET/CT jako indikátoru viability tkání. Látka se dostává do buňky úměrně utlizaci glukosy pomocí aktivních transportních mechanismů a je fosforylována, ale není dále metabolisovaná. Koncentrace (¹⁸F)-fluordeoxyglukosy ve tkáni je závislá i na enzymatickém vybavení buněk a na jejím prokrvení.

Léčivá látka obsahuje radioaktivní izotop fluoru – fluor-18, který má poločas přeměny 109,8 min a emituje pozitrony o maximální energii 0,633 MeV s následným anihilačním zářením gama o energii 0,511 MeV.

Po intravenózním podání přípravku je vychytávání léčivé látky z krevního řečiště velmi rychlé (poločas menší než 1 minuta), distribuce v organismu sleduje metabolismus D-glukosy. Celotělová retence může být popsána multiexponenciální funkcí s poločasy 12 minut, 1,5 hodiny a nekonečno.

Kolem 30% aplikované aktivity se vyloučí ledvinami.

Výrobce a držitel rozhodnutí o registraci: Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., Husinec-Řež čp. 130, 250 68 Řež, ČR

Indikace: lokalizace primárních nádorů a metastáz většiny zhoubných novotvarů, hodnocení biologického chování tumorů, posouzení rozsahu nádorového postižení, hodnocení účinnosti protinádorové léčby, odhad prognózy onemocnění, detekce recidivy onemocnění, určení oblasti, v níž je přítomna epileptogenní zóna, vyšetření regionální utilizace glukosy v mozku u pacientů s neurologickou poruchou, diagnostika degenerativních postižení mozku, diagnostika zánětu, lokalizace příčiny febrilních stavů, posouzení viability myokardu (v této indikaci lze výjimečně použít pro detekci i SPECT).

Kontraindikace: absolutní kontraindikace: žádné, relativní: v těhotenství a při známé alergii na přípravek.

Přestože je vlastní tomografické vyšetření zcela neinvazivní, může poloha vleže na zádech ve stísněných podmínkách skeneru nepříznivě ovlivnit stav pacientů (např. se srdeční či plicní insuficiencí, se záchvatovitým onemocněním nebo s velkými bolestmi). Proto je nutný zdravotnický dohled, který je schopen poskytnout kvalifikovaný zázrak v emergentních situacích.

Zvláštní upozornění a opatření pro použití: Přípravek je z hlediska klasifikace rizika otevřeným radioaktivním zářičem, může se zpracovávat a aplikovat pouze v prostorech, pro které bylo vydáno odpovídající povolení k provozu podle platných předpisů o ochraně zdraví před ionizujícím zářením.

Radiofarmaka mohou být používána pouze oprávněnými osobami. Povolení k jejich získávání a aplikaci podléhají příslušným předpisům České republiky. Manipulaci a aplikaci přípravku obsahujícího ^{18}F pacientům může provádět jen provozovatel na základě příslušného povolení vydaného Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Přitom musí být dodržovány zásady bezpečnosti práce s radioaktivními látkami a opatření snižující radiační zátěž pacientů i personálu. Podle příslušných zákonů a vyhlášek, podle zásad uvedených v provozních pokynech, vnitřním havarijním plánu a v programu monitorování. Vzhledem k vysoké energii záření gama musí být personál poučen o možném zvýšení radiační zátěže a o nutnosti dodržovat opatření přijatá ke snížení této zátěže.

Efektivní dávky z diagnosticky aplikovaného množství radioaktivní látky obsažené v přípravku jednotlivým pacientům jsou v rozmezí cca 3 - 12 mSv a jsou tedy srovnatelné s dávkami při běžných scintigrafických vyšetřeních.

Nejexponovanějším orgánem při aplikaci Fludeoxyglukosy inj. je močový měchýř. Dávka na tento orgán závisí na nakumulované aktivitě a na době zádrže (^{18}F)-fluordeoxyglukosy v močovém měchýři. Pro obvykle aplikované aktivity 150 - 500 MBq ^{18}F činí dávka na orgán u dospělých 25 - 50 mGy při době zádrže v měchýři 2 hodiny. Při vyprázdnění močového měchýře po jedné hodině může být absorbovaná dávka ve stěně měchýře snížena až na polovinu.

Jako u všech radiofarmak, i u tohoto přípravku musí diagnostický přínos vyšetření převážit nad rizikem vystavení pacienta radiační zátěži a aplikovaná aktivita musí být zvolena tak, aby zajistila požadovanou diagnostickou informaci při co nejnižším radiačním zatížení pacienta.

Předávkování u lidí v běžném pojetí vzhledem k nízkému obsahu fluordeoxyglukosy nepřichází v úvahu; při náhodném podání přebytku radioaktivní látky může být radiační riziko sníženo zvýšenou diuresou a častým močením.

Interakce: (^{18}F)-fluordeoxyglukosa je analogem glukosy se shodnou primární utilizací a při její metabolizaci tedy dochází ke kompetici (^{18}F)-fluordeoxyglukosy s D-glukosou. Účinnost přenosu (^{18}F)-fluordeoxyglukosy do buňky může být výrazně ovlivněna abnormální hladinou insulinu a/nebo cukru v plasmě. Proto se doporučuje provádět vyšetření pomocí (^{18}F)-fluordeoxyglukosy při hodnotách koncentrace cukru v krvi pod 8,3 mmol/l (150 mg/100 ml), aby nebyla významně snížena frakce metabolizované účinné látky přípravku.

Utilizaci (^{18}F)-fluordeoxyglukosy mozkem mohou také snížit léky s obsahem látek ovlivňujících cerebrální látkovou výměnu glukosy (např. valproát, karbamazepin, fenytoin, fenobarbital apod.).

Další lékové interakce nejsou zatím známy a popsány.

Interakce dané radiačně-chemickými změnami v organismu jsou nepravděpodobné vzhledem k nízkým absorbovaným dávkám (3 - 12 mSv).

Dávkování: v závislosti na indikaci a typu skeneru je pro aplikaci dospělým o hmotnosti 70 kg obvyklé dávkování

150 - 300 MBq - pro zobrazení mozku a myokardu

300 - 600 MBq - pro vyšetření trupu, popř. i s končetinami

Při podání se musí vyhodnotit poměr mezi očekávanou diagnostickou informací a rizikem spojeným s radiační expozicí. Zvláště přísně je toto zapotřebí posuzovat u dětí a mladistvých. Dávku aplikovanou dětem je nutno příslušným způsobem redukovat.

Zvláštní podmínky používání: Nejsou známy žádné speciální studie o aplikaci přípravku těhotným nebo kojícím ženám, nejsou popsány ani studie o vlivu přípravku na reprodukci u zvířat. Před každým vyšetřením za použití radiofarmak je nutné se informovat o možném těhotenství. Každá žena, u níž

došlo k vynechání menzes, musí být považována za těhotnou, pokud se neprokáže opak. V případě nejistoty je nutné posoudit důležitost a nezbytnost očekávané klinické informace ve vztahu k radiační dávce, kterou by obdržel plod; absorbovaná dávka v děloze po aplikaci (¹⁸F)-fluorodeoxyglukosy je udávána kolem 23 μGy/MBq a představuje tedy pro plod potenciální riziko. V těhotenství by proto měla být prováděna pouze zcela nutná vyšetření, jejichž diagnostický přínos převáží riziko pro matku i plod. Je-li odhad ekvivalentní dávky plodu menší než 1 mSv, je podání radiofarmaka ve zdůvodněných případech přijatelné.

Protože (¹⁸F)-fluorodeoxyglukosa může přecházet do mateřského mléka, doporučuje se před nezbytným vyšetřením kojících žen dočasné převedení kojence na náhradní výživu a po aplikaci vyloučení kontaktu matky s dítětem na dobu několika hodin. Kojení může být obnoveno, až radiační dávka obdržená dítětem v důsledku požívání mléka a pobytu v blízkosti matky bude nižší než limity dané radiačně-hygienickými předpisy (odhad ekvivalentní dávky obdržené dítětem menší než 1 mSv).

Způsob podávání: Fludeoxyglukosa inj. se aplikuje jednorázově v intravenózní injekci. Musí být vyloučeno paravenózní podání, aby nedošlo k nežádoucímu lokálnímu ozáření.

Cerebrální metabolismus glukosy závisí na aktivitě mozku; proto se doporučuje provést vyšetření mozku po zklidnění pacienta, v pološeru v klidném prostředí s nízkým pozadím hluku.

Po dobu asi šesti hodin před podáním (¹⁸F)-fluorodeoxyglukosy by pacienti neměli přijímat potravu, protože zvýšená glykémie a inzulinémie zhoršuje kontrastní poměry a v důsledku toho citlivost diagnostiky. Hladina cukru v krvi by neměla převyšovat 8,3 mmol/l (150 mg/100 ml). U diabetiků je možno glykémii opatrně korigovat intravenózním podáním několika jednotek nedepotního inzulínu podaného alespoň jednu hodinu před aplikací (¹⁸F)-fluorodeoxyglukosy. Výjimku z tohoto pravidla tvoří vyšetření viability myokardu, kde se naopak používá různých metod vedoucích k hyperinzulinémii při zachování euglykémie..

Pacient musí být instruován, aby před a po vyšetření hodně pil nesladké a nekalorické tekutiny a často močil pro snížení radiační zátěže močových cest.

Nežádoucí účinky: specifické nežádoucí účinky nejsou známy

Doba použitelnosti: 8 hodin od data a hodiny standardizace. Údaj o ukončení použitelnosti je uveden na vnitřním i vnějším obalu (olověný kontejner). Přípravek nesmí být používán po uplynutí vyznačené doby použitelnosti.

Zvláštní opatření pro uchovávání a zacházení s přípravkem (a k jeho likvidaci): uchovávejte při teplotě 15 °C – 25 °C, v uzavřených obalech, v souladu s předpisy o ochraně zdraví před ionizujícím zářením. Uchovávejte mimo dosah a dohled dětí.

Veškerý nepoužitý přípravek a materiály které byly v kontaktu s přípravkem, musí být zlikvidovány v souladu s požadavky na likvidaci radioaktivních látek.

Datum revize textu: 20. 9. 2006