

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta

Vysokoaktivní zářiče ionizujícího záření – „HASS“

diplomová práce

Autor práce: Bc. Václav Matějka
Studijní program: Ochrana obyvatelstva
Studijní obor: Civilní nouzová připravenost

Vedoucí práce: Ing. Pavel Beran, CSc.

Datum odevzdání práce: 20. května 2013

Abstrakt

Práce je celkově zaměřena na primární sumarizaci informací týkajících se obecně tzv. vysokoaktivních zářičů ionizujícího záření, v anglickém jazyce označovaných zkratkou HASS (high activity sealed sources), které jsou v České republice a státech EU, jakož i státech celého světa hojně využívány, a to v nejrůznějších lékařských, průmyslových a dalších odvětvích. V práci jsou dosti podrobně pojednány konkrétní případy stávajícího využívání HASS, vysvětleny základní pojmy fyziky umožňující jejich technickou specifikaci a popsány druhy vyskytujících se radionuklidů, včetně jejich konkrétních vlastností a příkladů využití. Jsou popsány základní biologické účinky ionizujícího záření na člověka, které jsou logicky vždy adekvátní obdržené dávce a v případě vysokoaktivních zářičů dosahují fatálních následků. Stručně jsou v práci obsaženy i některé konkrétní nežádoucí události s HASS, které zákonitě vedly k negativním účinkům na zdraví osob. V intencích autora, primárně vedoucích k vypracování této práce z pohledu oboru radiační ochrany, bylo mj. i pokusit se definovat veškerá rizika spojená s relativně značným množstvím HASS v EU i ČR a vzít tak v potaz, kromě rizik plynoucích z chybné manipulace obsluhou i rizika spojená se zneužitím třetí osobou – zejména působením obávaného mezinárodního terorismu. Z těchto důvodů jsou v práci nastíněny základní problémy se zabezpečením HASS, citovány mezinárodní požadavky na toto téma spojené s nutnou kategorizací HASS a tak i následným odstupňováním jejich zabezpečení. Je nastíněn stávající a platný legislativní rámec způsobů nakládání a zabezpečení HASS v ČR a z porovnání současných mezinárodních doporučení organizací zabývajících se radiační ochranou jsou vyvozeny dílčí výzkumné otázky a metodika výzkumu.

Autor se dále pokusil na základě již popsaných rešeršních poznatků podrobněji precizovat návrhy na zabezpečení hypotetických pracovišť s HASS dle příslušné rizikové kategorie. Jsou uvedeny mj. jednoduché výpočty pro kategorizaci daného HASS dle IAEA, analýzy možností neautorizovaného přemístění a zneužití pro dvě vybrané kategorie. Dále jsou pak představeny návrhy kvalitního zabezpečení na těchto příkladových pracovištích s vysokoaktivními zářiči a to v návaznosti na zásady popsané

v mezinárodních doporučeních. Tyto návrhy zabezpečení zahrnují popisy existujících zařízení s vysokoaktivními zářiči, způsoby jejich použití, výpočty kategorizace zařízení, analýzy možností přemístění a zneužití a dále plánky umístění zařízení zahrnující konkrétní zabezpečení. Jako příkladová pracoviště byla uvedena celkem dvě – pracoviště s krevním ozařovačem a pracoviště defektoskopie (průmyslové radiografie), přičemž pracoviště defektoskopie bylo vybráno zejména proto, že se jedná pravděpodobně o jedno z nejrozšířenějších pracovišť s vysokoaktivními zářiči vůbec a zároveň způsob nakládání se zářiči na těchto pracovištích je jeden z nejnebezpečnějších, jak z hlediska možné ztráty nebo odcizení zářiče, tak z hlediska potenciální nevědomé nebo chybné manipulace se zářičem, a tím způsobení situace nehodového charakteru. Dále je v práci pro doplnění čtenářovy reálné představy na problematiku vysokoaktivních zářičů na území České republiky zpracován statistický přehled všech vysokoaktivních zářičů, které se na území ČR nacházejí. Tento přehled zahrnuje celkový počet zářičů a nejpočetnější oblasti využití, rozdělení do jednotlivých oblastí využití (lékařství, průmysl, výzkum/školství, ostatní), zastoupení nejčastěji používaných radionuklidů v zářičích, geografické rozdělení zářičů na území ČR a rozdělení z hlediska nejčastěji se vyskytujících aktivit. Při zpracovávání tohoto přehledu bylo využito celostátního registru zdrojů ionizujícího záření, který spravuje Státní úřad pro jadernou bezpečnost. V kapitole 4 (Diskuze) jsou finálně diskutovány reálné možnosti zneužití vysokoaktivních zářičů a také možnosti zisku z pohledu potenciálního osamocenému útočníka nebo širší teroristické organizace.

Jedním z hlavních cílů práce bylo zejména definovat a shrnout celkovou problematiku využívání vysokoaktivních zářičů a s tím spojená společenská rizika z pohledu jejich zabezpečení. Dále zhodnotit zda vysokoaktivní zářiče využívané na území ČR (zejména jejich celkové množství, rozsah a způsoby použití) představují potenciální hrozbu z hlediska jejich možného zisku a následného zneužití například teroristickou organizací a dále, zda je účelné se úrovní zabezpečení na území ČR nadále zabývat. Závěr práce stručně sumarizuje poznatky, které autor pokládá za základě celkově v práci shromážděných informací za doložitelné.

Celkově je níže uvedená práce logickou syntézou relevantních získaných informací a dílčích myšlenek autora a umožňuje tak čtenáři získat relativně ucelený náhled na celou problematiku HASS zejména z pohledu širšího oboru radiační ochrany, a to s důrazem na dosažení stavu společensky přijatelného zabezpečení všech vysokoaktivních zářičů ionizujícího záření.

Klíčová slova:

vysokoaktivní zářič, uzavřený radionuklidový zářič, HASS, zabezpečení HASS

Abstract

This thesis is generally focused on the primary summarization of the information related to the high activity sources of ionizing radiation, known in English acronym HASS (high activity sealed sources), which are widely used in a variety of medical, industrial and other sectors in the EU and the Czech Republic as well. The thesis discusses in details specific cases of actual use of HASS, explains basic concepts of physics allowing their technical specification and describes types of occurring radionuclides including their specific characteristics and examples of use. The thesis describes basic biological effects of ionizing radiation on humans, which are always related to the received dose and in some cases reach fatal consequences. Briefly, the thesis contains some specific adverse events with HASS, which inevitably led to negative effects on human health. In the intentions of the author primarily leading towards the creation of this thesis from the perspective of the field of radiation protection, was to try to define all the risks associated with a relatively high number of HASS in the EU and the Czech Republic and to take into account not only risks arising from incorrect manipulation but also risks associated with the fault of a third party – in particular, risks associated with actions of international terrorism. For these reasons, the thesis outlines the basic security issues of HASS, cites the international standards on the subject associated with the necessary categorization of HASS and also its security gradation. The thesis also outlines the current legislative framework and effective ways of managing security of HASS in the Czech Republic. The work also draws some specific research questions and research methodology of comparing the current international recommendations from the organizations concerned with radiation protection.

Based on the previously described search knowledge, the author also attempts to further elaborate proposals on security of hypothetical workplaces with HASS according to the appropriate risk category. The work presents simple calculations to categorize the HASS according to IAEA, and analyses of the possibilities of unauthorized removal and abuse for two selected category. Following the principles

outlined in the international recommendations, the thesis also proposes the quality security on these exemplary workplaces with high-activity sources. These proposals include descriptions of the existing security devices with HASS, methods for their use, calculations of device categorization, analyses of the possibility of relocation and abuse, as well as plans of the device placement including the specific security. There are two exemplary workplaces - blood irradiator workplace and defectoscopy workplace (industrial radiography). The workplace of defectoscopy was chosen mainly because it is probably one of the most common sites with HASS, and because the way of dealing with HASS in these workplaces is one of the most dangerous, both in terms of possible loss or theft, and in terms of potential unintentional and incorrect manipulation causing an accident. To supplement the reader's imagination of the real problems of HASS in the Czech Republic, there is created a statistical overview of all HASS located in the Czech Republic. This outline includes the total number of HASS and the largest area of use divided into various areas of application (medicine, industry, research/education, etc.), representation of most commonly used radionuclides in HASS, the geographical distribution of HASS in the Czech Republic and the distribution in terms of the most common activities. The State Office for Nuclear Safety Registry was used as a source for this statistical overview. In the discussion part of the thesis, the real possibility of abuse of HASS and also a possible profit from the perspective of a potential lone striker or a wider terrorist organization is discussed.

One of the main aims of this thesis was to define and summarize the overall issue of the use of HASS and associated social risks in terms of security. Furthermore, to evaluate whether HASS used in the Czech Republic (especially their total amount, range and methods of use) present a potential threat in terms of their possible abuse by terrorist organizations, and whether it is effective to follow up with security in the Czech Republic. The conclusion briefly summarizes the findings which the author considers provable based on the information collected in this thesis.

As a whole, the following thesis is a logical synthesis of relevant information allowing the reader to obtain a relatively comprehensive view on the whole issue of HASS, especially from the perspective of the broader field of radiation protection

emphasized on achieving a socially acceptable security level of all high activity sources of ionizing radiation.

Key words:

high activity sealed source, sealed radioactive source, HASS, security of HASS

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 20. května.2013

.....

Václav Matějka

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Pavlu Beranovi, CSc. za odborné vedení této práce, a dále Mgr. Janu Rybovi a Ing. Petru Shmutzerovi za odborné konzultace a poskytnutí materiálů a informací potřebných ke zpracování.

Václav Matějka

Obsah

ÚVOD.....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	15
1.1 Vymezení pojmu vysokoaktivní zářič – HASS.....	15
1.2 Přehled a způsob použití HASS.....	17
1.2.1 Lékařské použití (lékařské ozařování).....	19
1.2.1.1 Teleterapeutické ozařovače.....	19
1.2.1.2 Vícesvazková teleterapie (gamma nůž).....	21
1.2.1.3 Krevní ozařovače.....	21
1.2.1.4 Brachyterapie.....	22
1.2.2 Nelékařské ozařování.....	23
1.2.2.1 Průmyslové ozařovače.....	24
1.2.2.2 Ozařovače setých semen.....	25
1.2.3 Průmyslová radiografie (defektoskopie).....	26
1.2.3.1 Zařízení v průmyslové radiografii.....	27
1.2.4 Měřicí systémy..	29
1.2.5 Radioizotopové termoelektrické generátory (RTG)	30
1.3 Biologické účinky záření ve vztahu k HASS	31
1.4 Nežádoucí události spojené s využíváním HASS.....	33
1.4.1 Příklady vybraných událostí.....	34
1.5 Problematika zabezpečení HASS.....	41
1.5.1 Mezinárodní požadavky na zabezpečení.....	41
1.5.1.1 Kategorizace radioaktivních zdrojů dle IAEA.....	45
1.5.1.2 Princip kategorizace radioaktivních zdrojů.....	48
1.5.1.3 Bezpečnostní opatření v závislosti na kategorizaci zdrojů.....	50
1.5.2 Požadavky na zabezpečení dle současné legislativy ČR.....	52
2 VÝZKUMNÉ OTÁZKY A METODIKA VÝZKUMU.....	55
3 VÝSLEDKY	57
3.1 Návrhy zabezpečení na pracovištích s HASS.....	57
3.1.1 Postup zabezpečení pro hypotetické pracoviště s HASS (I. kategorie)	57
3.1.1.1 Typ, popis zařízení a způsob jeho použití	57
3.1.1.2 Výpočet kategorizace dle IAEA a bezpečnostní skupiny	58
3.1.1.3 Analýza možnosti neautorizovaného přemístění a zneuzítí zdroje	58
3.1.1.4 Umístění zařízení a návrh zabezpečení	60
3.1.2 Postup zabezpečení pro hypotetické pracoviště s HASS (II. kategorie).....	63
3.1.2.1 Typ, popis zařízení a způsob jeho použití.....	64

3.1.2.2	Výpočet kategorizace dle IAEA a bezpečnostní skupina	65
3.1.2.3	Analýza možnosti neautorizovaného přemístění a zneužití zdroje ...	66
3.1.2.4	Umístění zařízení a návrh zabezpečení.....	67
3.2	Vysokoaktivní zářiče na území ČR	70
4	DISKUZE	82
4.1	Diskuze k možnostem zneužití HASS.....	83
4.2	Diskuze k možnostem zisku HASS teroristickou organizací.....	88
4.3	Diskuze k zabezpečení HASS obecně.....	89
5	ZÁVĚR.....	91
6	SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	93

Úvod

Když na přelomu 19. a 20. století docházelo k prvním objevům v oboru přírodní i umělé radioaktivity a ionizujícího záření obecně, v hlavách fyziků a širší technické inteligence jistě paralelně započal i proces hledání praktického využití tohoto, dosud nevídaného a tajemstvími opředeného, fenoménu. Pozdější objev štěpení atomů a řetězové reakce posunul představy o potenciálním využití atomové energie ještě daleko významněji. Málokdo z objevitelů však mohl tušit, jak neuvěřitelně široká oblast poznání se před nimi opravdu otevírá, a v kolika různých oborech a formách najdou poznatky o složitostech atomárního i subatomárního světa hmoty a záření možná praktická uplatnění. Celkovým výsledkem těchto procesů je zatím současné, velmi široké uplatnění ionizujícího záření v nejrůznějších oborech. Od velmi širokého a různorodého využití v medicíně, přes energetiku, až po méně známé oblasti jako jsou průmysl a strojírenství, ale také potravinářství, zemědělství nebo například výroba plastů. Negativním jevem je, že bohužel také docházelo, a ve světle historické zkušenosti lidstva stále dochází, ke zneužívání tohoto fenoménu jako prostředku k výrobě zbraní nebo prostředků teroristické povahy. Zejména z tohoto důvodu a také z důvodu relativní složitosti fyzikální podstaty a vlastností, jsou laické veřejnosti pojmy radioaktivita a neviditelné záření zahaleny rouškou určitého tajemna a tedy i neurčitých obav z tušených rizik. K tomuto přístupu veřejnosti dále značně přispělo množství zaznamenaných nehod a havárií, zejména v oblasti jaderné energetiky, přičemž společenskou odezvou k těmto událostem je obvykle primární absolutistická tendence k nastavení té nejvyšší úrovně bezpečnosti.

Nejen v oblastech jaderné energetiky však vznikaly při využívání ionizujícího záření nehody a události, které měly za následek často fatální dopady na životy, zdraví osob, popřípadě životní prostředí. Jak již bylo řečeno, ionizující záření se využívá v nejrůznějších oblastech lidské činnosti, přičemž i u těchto činností zákonitě vznikaly nežádoucí události havarijní povahy a je tedy velmi důležité u nich udržovat bezpečnost nakládání na společensky přijatelné a tudíž dostatečně vysoké úrovni. Přehled oblastí využití ionizujícího záření, které spojuje skutečnost používání tzv. „vysokoaktivních

zářičů“ (v podstatě radionuklidových zářičů s vysokou aktivitou) a charakterizování a přiblížení těchto oblastí čtenáři, je pak jeden z hlavních cílů této práce.

Kromě radioaktivity a ionizujícího záření je pro 20. století a zejména pro začátek 21. století charakteristický nárůst událostí, které lze shrnout pod staronový pojem-terorismus, tedy užívání organizovaného násilí určité skupiny lidí zejména proti civilnímu obyvatelstvu, za účelem prosazování jejich politických, náboženských nebo ideologických cílů. Teroristických činů bylo na přelomu 20. a 21. století zaznamenáno relativně velké množství a celý svět byl a nadále bude nucen věnovat této problematice zvýšenou pozornost. Některé z teroristických činů také podnítily strach z terorismu zejména ve spojitosti s potenciálním zneužitím život a zdraví ohrožujících látek, což nejčastěji zahrnuje škodlivé látky na úrovni chemické, biologické nebo právě i radiologické. Plánovaná obrana proti teroristickým útokům pak zahrnuje zejména účelnou prevenci spočívající v zabezpečení všech těchto potenciálně zneužitelných látek tak, aby ze strany teroristů nebylo v žádném případě možné je získat. Radioaktivní látky jsou navíc v této oblasti považovány za látky s vysokým potenciálem ohrožovat životy, zdraví, životní prostředí a neméně zhoubné může být jejich působení psychologické. Proto se zejména v posledních letech objevují názory, které poukazují na možnost zneužití radioaktivních látek k teroristickému útoku například v podobě kontaminace potravin, vody nebo prostředí tzv. špinavou bombou. Vysokoaktivní zářiče a místa, kde je s nimi nakládáno pak představují potenciální zdroj radioaktivních látek, které by mohly být zneužity ke zlovolným činům, a tak je jejich zabezpečení i ve smyslu fyzické ochrany velmi aktuálním tématem. Z tohoto důvodu byla v posledních letech vydána řada konkrétních doporučení na úrovni mezinárodních společností, jež se zabezpečení vysokoaktivních zářičů zabývají, přičemž se očekává odezva od jednotlivých členských států, které mají požadavky na zabezpečení vysokoaktivních zářičů na svých územích následně aplikovat. S tím souvisí i další cíl této práce, jímž je stručně sumarizovat požadavky mezinárodních doporučení a následně je konfrontovat s doposud aplikovanými požadavky v ČR a poté na základě mezinárodních doporučení zpracovat návrh zabezpečení na příkladovém pracovišti.

S využitím celostátních registrů Státního úřadu pro jadernou bezpečnost je dále v této práci zpracován orientační přehled všech evidovaných vysokoaktivních zářičů nacházejících se na území České republiky, jejich rozdělení do různých oblastí využití, počty, aj., aby byla čtenáři dána možnost vytvoření základní představy o celkové společenské relevanci zpracování zadaného tématu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Vymezení pojmu vysokoaktivní záříč – HASS

Pro správné pochopení pojmu *vysokoaktivní záříč* je nejdříve nutné vymezit následující pojmy legislativy ČR, tedy z atomového zákona č. 18/1997 ve znění pozdějších předpisů a vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění pozdějších předpisů:

- a) *zdroj ionizujícího záření* - látka, přístroj nebo zařízení, které může vysílat ionizující záření nebo uvolňovat radioaktivní látky,
- b) *radionuklidový záříč* - zdroj ionizujícího záření obsahující radioaktivní látky, (kde součet podílů aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1 a současně součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní hmotnostních aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1)
- c) *uzavřený radionuklidový záříč* - radionuklidový záříč, jehož úprava, například zapouzdřením nebo ochranným překryvem, zabezpečuje zkouškami ověřenou těsnost a vylučuje tak, za předvídatelných podmínek použití a opotřebování, únik radionuklidů ze záříče.

Pro účely práce je mj. nutné definovat pojmy:

- d) *aktivita* - nepřímo definuje potenciální schopnost radioaktivní látky podléhat samovolnému rozpadu, a tedy vysílat záření. Jednotkou aktivity je becquerel [Bq], který je definován jako jeden rozpad za 1 sekundu – odpovídá s^{-1} .
- e) *dávka záření* - Dávka je definovaná jako poměr střední energie předané ionizujícím zářením látce o dané hmotnosti. Základní jednotkou absorbované dávky je gray [Gy] - odpovídá $J.kg^{-1}$.

Výše zmíněné pojmy byly zavedeny v české legislativě ještě před zavedením pojmu vysokoaktivní záříč. Tento pojem bylo nutné zavést po roce 2003, kdy vyšla směrnice Rady EU 2003/122/EURATOM ze dne 22. prosince 2003 o kontrole vysokoaktivních uzavřených zdrojů záření a opuštěných zdrojů (Control of high-activity sealed radioactive sources and orphan sources). V roce 2005 bylo v ČR nutné novelizovat stávající vyhlášku o radiační ochraně a byl tedy zaveden pojem *vysokoaktivní záříč*, což je uzavřený radionuklidový záříč, jehož aktivita v době výroby

nebo, není-li tato doba známa, v době jeho prvního uvedení na trh je rovna nebo vyšší než příslušná úroveň aktivity uvedená v tabulce 1.

Pojmem vysokoaktivní zářič se tedy rozumí uzavřený radionuklidový zářič, který je vysoce aktivní a plyne z něj vyšší riziko ohrožení života nebo zdraví člověka.

V mezinárodních dokumentech je pro radionuklidový zářič užíván termín *radioactive source (radioaktivní zdroj)*, chápáno jako zdroj, který obsahuje radioaktivní látky. Pro uzavřený radionuklidový zářič je pak používán termín *sealed source (uzavřený zdroj)*.

Pro vysokoaktivní zářič je tudíž používáno spojení *High-activity sealed source (zkr. HASS)*, což v doslovném překladu znamená vysokoaktivní uzavřený zdroj. Pro účely této práce, ale i celosvětové terminologie která je v současné době užívána tedy chápeme označení „HASS“ jako ekvivalentním označením pro „vysokoaktivní zářič“, někdy také uváděn jako „vysokoaktivní zdroj“. (1, 2, 3)

Tabulka 1 - Úrovně aktivity vymezující vybrané vysokoaktivní zářiče. (2)

Prvek (atomové číslo)	Radionuklid	Úroveň aktivity vymezující vysokoaktivní zářič [Bq]
Železo (26)	Fe-55	4×10^{11}
Kobalt (27)	Co-60	4×10^9
Selen (34)	Se-75	3×10^{10}
Krypton (36)	Kr-85	1×10^{11}
Stroncium (38)	Sr-90 ^{a)}	3×10^9
Paladium (46)	Pd-103 ^{a)}	4×10^{11}
Jod (53)	I-125	2×10^{11}
Cesium (55)	Cs-137 ^{a)}	2×10^{10}
Prometheum (61)	Pm-147	4×10^{11}
Gadolinium (64)	Gd-153	1×10^{11}
Thulium (69)	Tm-170	3×10^{10}
Iridium (77)	Ir-192	1×10^{10}
Thalium (81)	Tl-204	1×10^{11}
Radium (88)	Ra-226 ^{b)}	2×10^9
Plutonium (94)	Pu-238 ^{a)}	1×10^{11}
Americium (95)	Am-241 ^{b)}	1×10^{11}
Kalifornium (98)	Cf-252	5×10^8

a) Úroveň aktivity zahrnuje příspěvky dceřiných radionuklidů s poločasem rozpadu kratším než 10 dnů.

b) Zahrnuje neutronové zdroje s beryliem.

1.2 Přehled a způsob použití HASS

Vysokoaktivní zářiče nachází poměrně široké využití v různých odvětvích lidské činnosti. Ve většině případů je však i přes jejich rozmanité použití spojuje několik vlastností.

Jednou z takových vlastností je například kovový vzhled. Radionuklidy, které jsou zdrojem ionizujícího záření se v zářičích vyskytují v různých formách. Mohou to být například pevné kovové kapsle, prášek, nebo malé pelety (1x1 mm). Tyto různé formy radionuklidů by mohly jednoduše kontaminovat prostředí, proto je nutné tyto uchovávat v pevném a nepropustném plášti, který není možné za běžných podmínek otevřít. Vhodným materiálem splňujícím všechny předpoklady pro takový plášť je nerezová ocel, která zároveň zajistí odolnost proti vnějším vlivům. Většina zářičů má proto kovový vzhled, který je způsoben vnějším pláštěm z nerezové ocele uvnitř kterého se nachází radionuklid jako zdroj ionizujícího záření. (4)

Obecně lze říci, že jako vysokoaktivní zářiče nacházejí využití většinou zářiče emitující záření gamma. Toto záření je velmi nebezpečné životu a zdraví člověka a je nutné ho dále odstínit a kolimovat. Stínění ovšem nebývá z ekonomických důvodů neoddělitelnou součástí zářiče tak jak je tomu u nerezového pláště, ale je součástí takzvaného zařízení, což je stroj, přístroj nebo stíněný blok, ve kterém je zářič umístěn během používání. Záření gamma je nutno stínit kovy s vysokým atomovým číslem jako je například olovo, ochuzený uran nebo wolfram přičemž vysokoaktivní zářiče jsou zdrojem velmi intenzivního gamma záření a k jejich odstínění je zapotřebí relativně silných vrstev takovýchto těžkých kovů. Z těchto důvodů má zařízení vzhledem ke své velikosti nepoměrně vysokou hmotnost, což může být také jedním ze společných znaků HASS. (4, 5)

Zařízení má kromě stínící a kolimační funkce také vliv na další způsob použití zářiče. Vlastnosti zařízení jako například způsob provedení, tvar, velikost aj. hrají zásadní roli při úspěšném a hlavně bezpečném využívání zářiče. Zařízení mohou být přenosná a určená pro manipulaci člověkem jak je tomu u průmyslové radiografie nebo

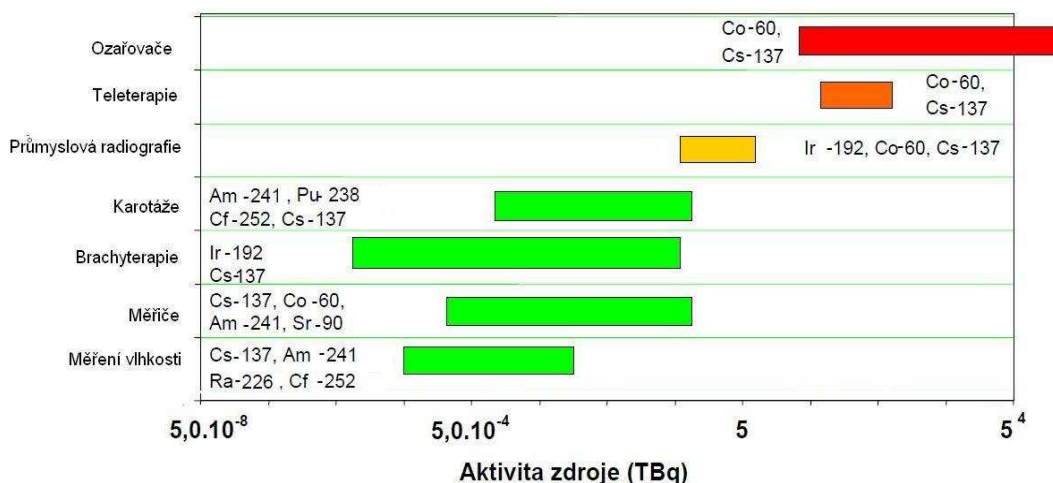
mohou být součástí většího, nepřenosného celku jako je tomu u ozařovačů jak průmyslových tak lékařských. Konkrétními příklady a typy zářičů a zařízení se budeme zabývat níže.

Jak již bylo uvedeno, vysokoaktivní zářiče nacházejí široké spektrum využití. Způsoby jejich využití lze rozdělit do šesti oblastí:

- lékařské použití (ozařovače, brachyterapie)
- nelékařské ozařování (průmyslové ozařovače)
- zobrazovací systémy (průmyslová radiografie)
- měřicí systémy (měření tloušťky, hustoty, vlhkosti, karotáže, hladinoměry)
- ostatní použití (radioizotopové termoelektrické generátory, bleskosvody)

V různých oblastech se používají různé radionuklidy a také různě vysoké aktivity. Obecně lze říci, že nejvyšší aktivity jsou používány v ozařovačích (desítky až stovky TBq), přičemž v průmyslových vyšší než v lékařských. Naproti tomu nižší aktivity jsou například u měřicích systémů, kde může být zářič mnohdy i pod mezní hodnotou určující vysokoaktivní zářič. Přehled radionuklidů a rozsah jejich aktivit používaných v některých oblastech můžeme vidět na obrázku 1. (4, 5)

Obrázek 1 - Přehled radionuklidů a rozsah jejich aktivit ve vybraných oblastech. (4)



1.2.1 Lékařské použití

V lékařství jsou vysokoaktivní zářiče poměrně hojně využívány a tato oblast má silné zastoupení jak v celkovém počtu zářičů tak ve vysokých aktivitách. Převážná část všech zářičů se využívá k léčbě rakoviny, a to dvěma odlišnými způsoby. Jedním způsobem je teleterapie, tzn. ozáření nádoru uvnitř těla kolimovaným paprskem ze zářiče, který se nachází vně těla. Tento způsob je jednodušší, ale významným způsobem zatěžuje okolní zdravou tkáň. Dalším způsobem je brachyterapie, což znamená implantování zářičů dovnitř těla, přímo k nádoru. Tento způsob může být někdy šetrnější k okolní zdravé tkáni, lze ho však použít jen v některých případech. Další využití v lékařství nacházejí vysokoaktivní zářiče jako ozařovače krve. Ozařování krve se využívá při transfuzích. Krev se před transfúzí vystaví určité intenzitě ionizujícího záření, což odbourá lymfocyty a snižuje imunitu. Tím se minimalizuje pravděpodobnost vzniku problémů s imunitní reakcí pacienta po transfúzi.

V lékařských zařízeních je tedy nejvyšší výskyt vysokoaktivních zářičů jednoznačně v onkologických centrech v odděleních radioterapie, dále pak v odděleních transfúze nebo krevních bankách. Kromě dvou výše zmíněných způsobů se ještě v lékařství využívají radionuklidy většinou s krátkým poločasem rozpadu, a to ve speciálním typu diagnostiky (nukleární medicína). Aktivity jednotlivých nuklidů v tomto odvětví sice nedosahují úrovní, které jsou stanoveny pro HASS, avšak celkové množství různých nuklidů, které by se mohlo vyskytovat na určitém místě ve stejném čase, takto vysokých aktivit dosáhnout může. Vzhledem k tomu, že na těchto odděleních se nejedná o uzavřené zářiče, ale tzv. zářiče otevřené a využívají se zde radionuklidy s krátkými poločasy rozpadu, tedy zde probíhá rychlá obměna, není možné tyto zařazovat do kategorie HASS. Bezpečnost, je však třeba dodržovat v každém případě. (4, 5, 6)

1.2.1.1 Teleterapeutické ozařovače

Tato zařízení obvykle obsahují jeden zářič (pozn. gamma nožem, který používá více zářičů se ještě budeme zabývat níže). Vysokoaktivní zářič je umístěn v hlavici ozařovače, která zabezpečuje dostatečné stínění v době, kdy neprobíhá ozařování a zářič

je uzavřen a dále zabezpečuje kolimaci paprsku záření v době, kdy se ozařuje a zářič je otevřen. Zavření a otevření hlavice je zajišťováno elektromechanickou clonou. V případě potřeby výměny zářiče (zejména z důvodu poklesu aktivity) je možné odmontovat a převézt celou hlavici a výměnu zářiče uskutečnit na specializovaném pracovišti. Avšak je možné provést i výměnu na místě provozu a to za pomoci speciálního vybavení, které zahrnuje zejména přepravní a výměnný kontejner. (4, 6)

Obrázek 2 – Teleterapeutický ozařovač.



Hlavice ozařovače:
obvykle tvar válce s 300 – 600 mm průměrem a 300 – 600 mm výškou.
Hmotnost obvykle 200 – 500 Kg.

Celé zařízení :
obvykle 4 m délka, 2 m šířka, 3m výška.
Hmotnost obvykle 500 – 1000 Kg.

Jak již bylo řečeno, uvnitř zařízení se umísťuje obvykle jeden zářič. V naprosté většině se jedná o zářiče obsahující Co-60 nebo Cs-137. Zářiče mají obvykle standardizované rozměry (váleček o průměru 20 mm a výšce 30 mm), ovšem rozměry se mohou i měnit. Radionuklid je zde formou pelet popřípadě kapslí a aktivity zde dosahují velmi vysokých hodnot takže i krátký kontakt (minuty) se zářičem může mít fatální důsledky. (4, 5, 6)

Obrázek 3 – Teleterapeutický zářič.



Obvykle Co-60/Cs-137, Hmotnost desítky gramů.

Váleček o průměru 20 mm a výšce 30 mm.

Aktivita 37 až 550 TBq.

1.2.1.2 Vícesvazková teleterapie (gamma nůž)

Toto speciální zařízení se používá k tzv. radiochirurgii, což zahrnuje léčbu malých nádorů umístěných na nedostupných místech (zejména v hlavě) velkým množstvím (většinou okolo 200) úzce kolimovaných paprsků které jsou soustředěny do izocentra o velikosti jednotek milimetrů. Jde tedy o velice přesnou a intenzivní radioterapii. V zařízení se obvykle nachází okolo 200 zářičů, které jsou uspořádány do polokoule, přičemž paprsky jsou úzce kolimovány, tak vzniká soustředěné izocentrum. Vzhledem k tomu, že jde o velice sofistikovanou metodu, není těchto zařízení ve světě mnoho. (4, 5, 6)

Obrázek 4 – Gamma nůž.



Obvykle 200x Co-60

Rozměry obvykle 4 - 5 m dlouhý, 2 m široký, 2,5 m vysoký.

Hmotnost celého zařízení 20 000 Kg.

Aktivita každého (celk. 200) zářiče uvnitř až 1.1 TBq (celk. 220 TBq)

1.2.1.3 Krevní ozařovače

Tato zařízení se používají k ozařování krve před transfuzí. Obsahují obvykle jeden až dva zářiče. Zařízení bývá velké asi jako běžná kuchyňská chladnička. Na přední straně se nachází dvířka do kterých obsluha vloží krev, obvykle ne více než 2 litry. Ozařovaná krev je poté elektromechanicky přesunuta do dutiny kde se nachází zářič a po uplynutí času určeného k ozáření zase zpět ke dvířkům. Celý proces ozařování se děje uvnitř zařízení a naprosto automaticky bez zásahu obsluhy. V případě potřeby výměny zářiče je obvykle nutné přemístit na specializované servisní pracoviště celé zařízení. (4, 7, 8)

Obrázek 5 – Krevní ozařovač.



Obvykle Cs-137, Co-60

Rozměry obvykle 1 m dlouhý, 1 m široký, 1,5 m vysoký.

Hmotnost celého zařízení 1500 až 3500 Kg.

Aktivita zářiče uvnitř až 370 TBq

1.2.1.4 Brachyterapie

V této oblasti lékařského využití se vyskytují pravděpodobně nejmenší zářiče vůbec. Tyto zářiče jsou uloženy ve stínícím zařízení které zároveň slouží jako zařízení k implantování jednotlivých zářičů přímo k nádoru. Takové transportní zařízení slouží k uchovávání, přepravě a v případě potřeby zároveň implantaci zářiče do těla. Implantování probíhá pomocí katetru, který je zaveden přímo do místa nádoru. Katetr se napojí na transportní zařízení, to uvolní zářič a pneumaticky ho dopraví k nádoru bez kontaktu obsluhy nebo pacienta se zářičem. Zářiče určené k brachyterapii mají obvykle velmi malé rozměry (jednotky milimetrů) a zároveň se manipuluje přímo se zářičem a může tak vzniknout potenciálně riziková situace spíše než v jiných oblastech. (4)

Obrázek 6 - Zařízení k transportu a implantaci zářiče.



Rozměry: délka 300 - 600 mm,
šířka 300 - 600 mm, výška 800 - 1500 mm.

Hmotnost: 50 - 250 Kg.

Obrázek 7 – zářiče pro brachyterapii.



Cs -137/Co-60/Ir-192

Aktivita obvykle
1.5 až 500 GBq

1.2.2 Nelékařské ozařování

Termínem nelékařské ozařování je v tomto dokumentu myšleno ozařování ionizujícím zářením v jakýchkoli jiných odvětvích než v lékařství (pozn. jedná se o ozařování materiálu nebo věcí, nikoli lidí) tuto oblast lze dále rozdělit do několika dalších odvětví:

- sterilizace
- ozařování pro změnu vlastností materiálu
- ozařování pro odstranění škůdců
- ozařování potravin

Například sterilizace se využívá u výrobků používaných v lékařství jako jsou obvazy. Tyto výrobky jsou vystaveny velmi intenzivnímu ionizujícímu záření, které zničí všechny mikroorganismy, jež mohly proniknout do obalu v průběhu výrobního procesu. Samotný výrobek přitom není nijak ovlivněn. Dále se ozařování využívá ke změně vlastností materiálu. Toho se využívá například u výroby plastů, kdy vysoké dávky ionizujícího záření mění stavbu polymerních řetězců a tím zpevňují plast. Ve 2. polovině 20. století se dále ozařovala semena setých rostlin za účelem odstranění škůdců. Tato praxe se již v současnosti neprovádí, avšak v minulosti spadaly zářiče pod méně přísné předpisy, což mohlo vést ke ztrátě, popřípadě ponechání takového zářiče bez dozoru (zapomenutí). V dnešní době by pak v případě nálezu takového zářiče nepovolanými osobami mohlo dojít k fatálním důsledkům. (4)

V oblasti nelékařského ozařování je nejčastěji zastoupeno ozařování potravin. Jedná se o proces odstranění mikroorganismů (virů, bakterií, kvasinek) za účelem zvýšení trvanlivosti a odolnosti a zároveň snížení patogeneze. Potravin jsou vystavovány velmi vysokým dávkám (až desítky tisíc Gy) což vede k rychlému a nenávratnému poškození zejména DNA mikroorganismů a tedy k jejich smrti. Tento způsob ošetřování potravin je velmi efektivní a v některých případech může nahradit jiné procesy při výrobě, jako je například pasterizace. Při tomto ozařování jsou produkty vystaveny vůbec nejvyšším dávkám, například organizace NASA ozařuje potraviny pro

astronauty dávkou 44 KGy. Obvykle se však ozařuje dávkami nižšími, řádově jednotkami KGy, přičemž zářiče, které se při ozařování používají, dosahují aktivit řádově stovky TBq až desítky PBq, většinou se ale nejedná o jeden jediný zářič, ale o více zářičů na jednom místě. Nejčastěji ozařované potraviny jsou různé druhy ovoce, sušené ovoce, zelenina, koření, maso (zejména drůbeží pro odstranění bakterie Salmonella a Escherichia coli), brambory, žabí stehýnka. Mnoha dlouholetými studiemi je prokázáno, že potraviny ozářené takto vysokou dávkou nevykazují žádné nežádoucí vlastnosti a některé chemické změny, jež může záření v potravinách způsobit, jsou srovnatelné s chemickými změnami, které vzniknou například při vystavení stejných potravin teple (vaření). I přes průkaznou nezávadnost však toto ozařování nachází široké spektrum odpůrců a vzhledem k rozšířené radiofobii cítí obyvatelstvo k těmto potravinám nedůvěru. Mnoho států po celém světě, včetně EU má navíc za povinnost ozařované potraviny označovat logem. Současná doba tedy tomuto využití ionizujícího záření příliš nepřeje. I přesto probíhá ozařování potravin ve více než 35 zemích světa, přičemž za rok se ve světě ozáří desítky tisíc tun potravin. Největší množství potravin v EU se ozáří například v Belgii, Francii nebo Nizozemsku. V České republice probíhá ozařování koření a sušeného ovoce v množství řádově desítek tun ročně. (4, 5, 6, 9)

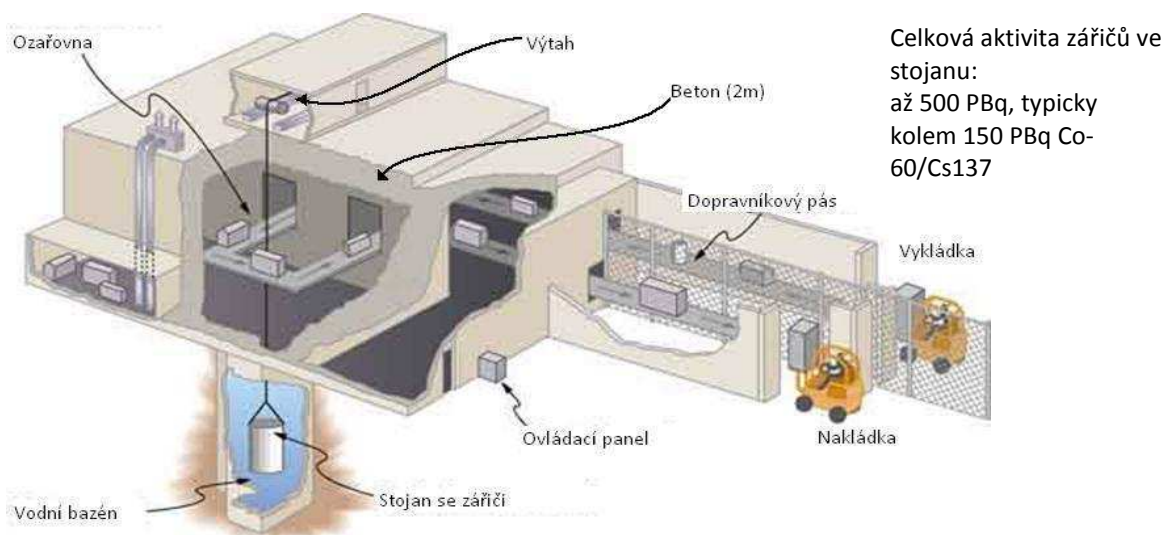
1.2.2.1 Průmyslové ozařovače

Výše zmíněné ozařovače potravin, ozařovače pro sterilizaci, popřípadě ozařovače pro změnu vlastností materiálu mají obvykle společné vlastnosti, jako je způsob ozařování, stavba a provedení zařízení. V této kapitole je tedy popsán tzv. průmyslový ozařovač, který shrnuje všechna tři výše zmíněná použití.

Zářiče využívané v průmyslovém ozařování dosahují jednoznačně nejvyšších aktivit. Neaktivnější zářiče používané v lékařství nemusí dosahovat ani nejnižších aktivit u ozařovačů průmyslových. V této praxi se vyžadují velmi vysoké dávky u koncového produktu, z časového hlediska je tedy nutné ozařovat vysokými dávkovými příkony. To však s sebou nese také velmi vysoké riziko a bezpečnostní prvky musí být na maximální úrovni. V případě nepovolaného vniknutí jakýchkoli osob do prostorů

ozařování by s největší pravděpodobností toto končilo jejich smrtí. Z těchto důvodů se zářiče umísťují do zařízení, která jsou tvořena jednotlivou budovou, popřípadě celým komplexem budov často s podzemním bazénem pro uschování zářiče mimo dobu ozařování. V době ozařování se zářič obvykle výtahem vytáhne z podzemních prostor a ozařování probíhá v odstíněných prostorách budovy, přičemž ozařované produkty jsou k zářiči přesunovány plně automatizovaným systémem, například dopravníkovým pásem. (4, 10, 11, 12, 13, 14)

Obrázek 8 - Schéma průmyslového ozařovače.



1.2.2.2 Ozařovače setých semen

Tato praxe byla využívána zejména v bývalém SSSR a USA do konce 80. let minulého století k odstranění škůdců a zpoždění klíčení semen. Jednalo se o zařízení s vysokoaktivním zářičem (zejména Cs-137, zřídka Co-60) ve kterém probíhalo ozařování přímo v průběhu setí. Zařízení se nacházelo uvnitř nákladního prostoru secího dopravního prostředku, který byl dále vybaven dopravníkovým pásem. Pás dopravoval semena do zařízení vstupním a výstupním otvorem, přičemž za těmito otvory se nacházel labyrint pro zamezení úniku radiace ze zařízení ven. Dnes se již tato praxe nevyužívá, avšak není známo, kolik zařízení přesně bylo v minulosti vyrobeno a kolik jich dosud stále nebylo nalezeno a odborně zlikvidováno. (4)

Obrázek 9 – Ozařovače semen.



Rozměry zařízení:
1,5m x 1,5 m x 2 m

Hmotnost zařízení:
3000 – 6000 kg

Aktivita zářiče:
až 185 TBq

Obrázek 10 – Uložení ozařovače v dopravním prostředku.



1.2.3 Průmyslová radiografie (defektoskopie)

Tato oblast využití ionizujícího záření zahrnuje pravděpodobně nejvíce vysokoaktivních zářičů vůbec. Přestože se nejedná o oblast s neaktivnějšími zářiči, způsob použití a množství takto využívaných zářičů způsobuje, že tato praxe je pravděpodobně i jedna z nejnebezpečnějších, a to jak z hlediska špatné nebo neodborné manipulace tak z hlediska možné ztráty nebo odcizení a případného zneužití zářiče.

Termín radiografie, tedy zobrazování pomocí radiace, je nejznámější z lékařských aplikací. Zde se nejčastěji jedná o zobrazování rentgenem, popřípadě výpočetním tomografem (CT). V průmyslu se této zobrazovací metody využívá podobně, a to při takzvané defektoskopii, tedy vyhledávání povrchových i vnitřních vad materiálu nebo výrobku bez nutnosti jeho poškození. V průmyslu však není vždy možné zobrazit materiál nebo výrobek rentgenem tak, jak se zobrazuje člověk v lékařství. V jistých případech je například nutné zkontrolovat materiál v terénu bez možnosti elektrického napájení. Za tímto účelem se využívají přenosná zařízení obsahující

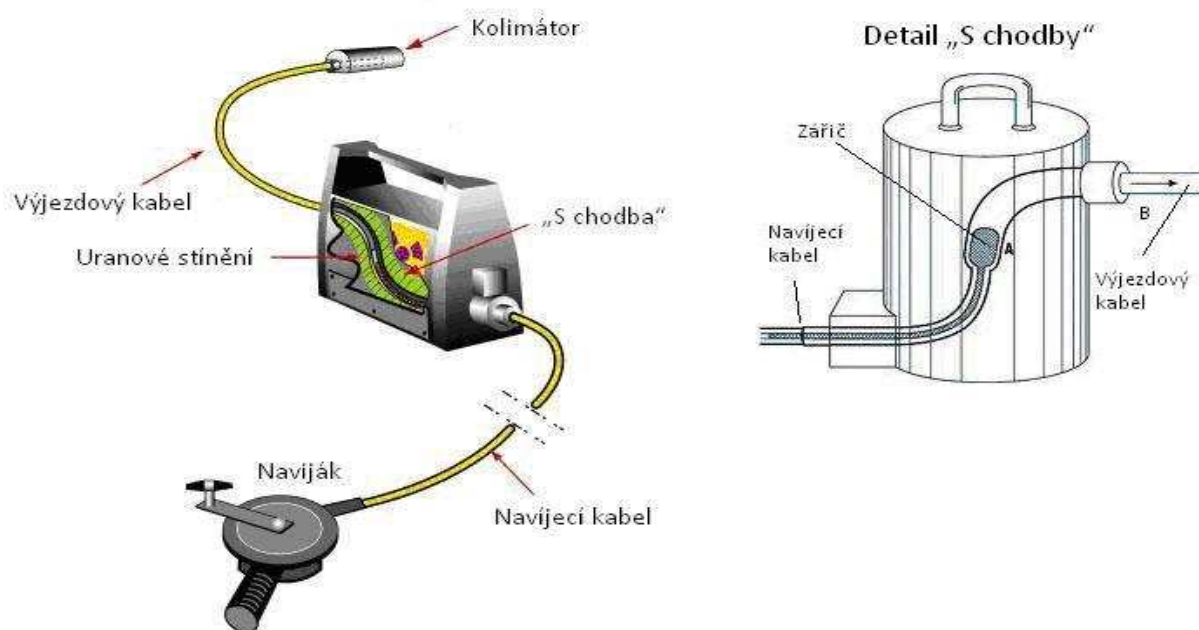
radionuklidové zářiče, která nepotřebují elektrické napájení a poskytnou potřebný zdroj fotonového gamma záření jako náhradu za záření z rentgenu. Obraz je stejně jako u rentgenu zachycen na film, případně paměťovou folii. Této praxe se využívá například při kontrole různých potrubí, která jsou pod vysokým tlakem, a vada materiálu nebo pojicích svarů by v provozu mohla způsobit závažné problémy. Jak již bylo uvedeno, radiografická zařízení obsahující vysokoaktivní zářič jsou pravděpodobně jedna z nejnebezpečnějších, což je způsobeno mnoha faktory. Důležitým faktorem je zde celkový způsob využití zařízení, což často zahrnuje například kontrolu potrubí v obydlených oblastech, například na ulicích, a tím potenciální ohrožení obyvatel nacházejících se v blízkosti zářiče. Dalším nebezpečným faktorem je jednoduchá mobilita zařízení a časté převážení, kde vzniká nebezpečí ztráty, odcizení, popřípadě poškození stínění zářiče například při dopravní nehodě. Mezi potenciální nebezpečí dále patří možnost neodborné manipulace způsobené lidským faktorem, který v této praxi hraje velkou roli. V žádné z oblastí využití vysokoaktivních zářičů, ať už se jedná o ozařování nebo jiné praxe, nevstupuje do procesu lidský faktor tak významně jako zde. U většiny oblastí se jedná o stacionárně využívané zářiče ovládané automaticky nebo na dálku, kde není nutná přímá manipulace se zářičem. V radiografii jde však o mobilní zářič, obsluha manipuluje přímo se zářičem a jeden špatný pohyb, chyba nebo nehoda může způsobit fatální důsledky nejen pro obsluhu, ale i pro obyvatelstvo, které se může nacházet v blízkosti. U této praxe je tedy nutné brát maximální ohled na bezpečnost. (4, 5, 6)

1.2.3.1 Zařízení v průmyslové radiografii

Zařízení používaná v průmyslové radiografii se také někdy označují jako „projektor“ nebo „kamera“. Standardní plně přenosné zařízení bývá velké asi jako příruční zavazadlo a hmotnost se pohybuje v rozmezí 8 – 35 kg. Můžeme se ovšem setkat i s většími pojízdnými zařízeními (typicky vozíky), která dosahují hmotnosti až 200 kg. Nejčastějším způsobem uložení zářiče v zařízení bývá „S chodba“ (obrázek 11). Jedná se o labyrint ve tvaru písmene S, přičemž zářič je mechanicky posunován do různých poloh. Tato manipulace se zářičem se děje za pomoci dlouhého kabelu nebo

lanka tak, aby obsluha byla v době prozařování v bezpečné vzdálenosti. Stínícím materiálem je u těchto zařízení obvykle ochuzený uran, wolfram, olovo popřípadě jejich kombinace. Ve většině případů se používají radioizotopy Ir-192, méně Se-75, Yb-169, zřídka Cs-137. Někdy se využívá Co-60 pro vyšší energii emitovaného záření a tedy pro možnost prozáření větší tloušťky materiálu. To s sebou ale nese nevýhody jako například nutnost silnější vrstvy stínění a tedy zhoršení mobility celého zařízení. Nejčastěji používané izotopy mají relativně krátké poločasy rozpadu (Ir-192 74 dní, Se-75 120 dní, Yb-169 32 dní), zářiče je tedy nutné často měnit což s sebou samozřejmě nese další potenciální rizika. (4, 5, 15, 16)

Obrázek 11 – Schéma radiografického zařízení a detail S chodby.



Obrázek 12 – Moderní radiografická zařízení.



Obvykle Se-75/Ir-192/Yb-169/Co-60

Standardní rozměry: 350x250x200.

Hmotnost až 35 Kg.

Maximální aktivity: 5.5 TBq Ir-192;
5.5 TBq Se-75;
740 GBq Yb-169;
370 GBq Co-60.

1.2.4 Měřicí systémy

Kromě ozařovačů a radiografie nacházejí v průmyslu vysokoaktivní zářiče další uplatnění, a to jako součásti měřících systémů. Jedná se většinou o systémy měřící tloušťku, hustotu, popřípadě výšku hladiny, čehož se využívá v různých odvětvích zpracovatelského průmyslu, například v petrochemickém, uhelném, hutnickém, a jiných. Nejvíce rozšířené jsou hladinoměry. Těch se využívá například v tlakových nádobách, potrubích nebo sýpkách, obecně tam, kde nelze využít jiný způsob než použití radiace. Princip spočívá v umístění zářiče vně nádoby (například tlakové nádoby nebo sýpky) a detektoru ionizujícího záření přesně naproti zářiči na druhé straně nádoby a tím změření výšky hladiny. Dalším způsobem použití je měření tloušťky, čehož se využívá například v metalurgii, ale také v lehkém průmyslu při výrobě textilií nebo plastových folií. Princip je podobný jako u hladinoměru, jen se měří intenzita prošlého záření skrze měřený materiál a tím tloušťka tohoto materiálu. Podobný princip se využívá i při měření hustoty různých materiálů nebo směsí. Kromě měření na základě prošlého záření gamma se dále v této oblasti používá měření na základě záření neutronového. Neutronové záření je na rozdíl od záření gamma snadno absorbovatelné jádry lehkých prvků (vodík, uhlík), naproti tomu těžké prvky neutrony neabsorbují. Tohoto efektu se využívá v těžebním průmyslu při karotážích, zejména při analýze obsahu ropy v průzkumných vrtech, kdy je měřena intenzita zpětného rozptylu a na základě tohoto a dalších měření zjištěna přítomnost uhlovodíkových sloučenin, tedy ropy. Dále se neutronové záření využívá při měření vlhkosti, kdy je ve vlhkém materiálu obsaženo větší množství vodíku, který neutrony absorbuje a na základě této absorpce se počítá vlhkost. Obecně lze říci, že v oblasti měřících systémů jsou používány zářiče s nižšími aktivitami a mnohdy nedosahují ani aktivit vymezující vysokoaktivní zářič, není to však pravidlem a z hlediska bezpečnosti je nutné přihlídnout k poměrně hojnému výskytu takto používaných zářičů, tedy k potenciálnímu riziku ztráty, zapomenutí nebo krádeže. Například hladinoměry patřily často k opomenutým a později nalezeným zářičům, které zůstávaly v areálech opuštěných nebo zkrachovalých továren zejména z dob, kdy tyto činnosti nepodléhaly tak přísným pravidlům. (4, 5, 6)

Obrázek 14 – Schéma hladinoměru tlakové nádoby.

Obrázek 13 – Hladinoměr.

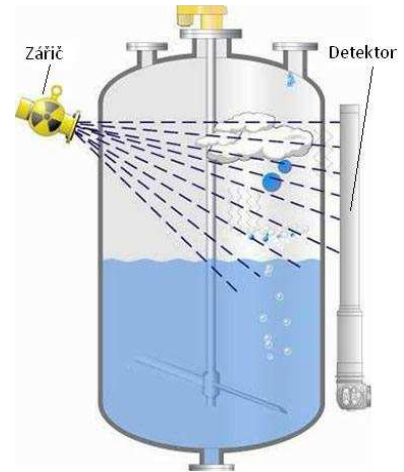


Obvykle Cs137/Co-60

Rozměry: 200-400mm průměr,
300 – 700 mm délka.

Hmotnost: 20 – 400 Kg

Aktivita: až 370 GBq Cs-137
až 37 GBq Co-60



1.2.5 Radioizotopové termoelektrické generátory (RTG)

Tato zařízení se používají na generování elektrického proudu zejména v odlehlých oblastech, kde nelze proud získat jiným způsobem. Termoelektrický generátor využívá tepla indukovaného ionizujícím zářením, které je následně termočlánekem přeměněno v elektrický proud. Tohoto se využívá na vzdálených místech na zemi například pro meteorologické stanice, majáky, radiostanice, popřípadě podmorské sonary atd., ale velmi často také pro vesmírné satelity, družice, kosmické sondy, pro něž jsou RTG a fotovoltaické články jediným zdrojem el. proudu. Do konce 70. let minulého století byly také implantovány malé radioizotopové generátory do těla jako doživotní zdroj el. proudu pro kardiostimulátor. Obecně byly RTG hojně využívány zejména v minulosti, dnes se jejich množství značně snižuje, i přes to se stále objevují případy nálezů generátoru například na opuštěných meteorologických stanicích nebo starých vojenských radiostanicích. Nejčastěji používané radioizotopy jsou Sr-90, Pu-238, v historii i Po-210 přičemž výhodou těchto izotopů je, že nepotřebují silné stínění, protože prakticky neemitují záření gamma (Sr-90 – beta, Pu-238 – alfa, velmi slabá gamma linie). Může se tedy zdát, že RTG jsou méně nebezpečná zařízení než ostatní, což je ale velký omyl. Nejčastěji používané Sr-90 je emitorem záření beta, které má sice krátký dosah avšak v případě, že se zářič dostane do bezprostředního kontaktu s člověkem nebo dojde k vnitřní kontaminaci radionuklidem obsaženým v zářiči vzniknou fatální důsledky, horší než při kontaktu s jinými zářiči. Dalším rizikem je možnost vzniku brzdného záření v případě použití špatného stínění. Zejména z těchto

důvodů představují RTG potenciální hrozbu při zneužití v rukou teroristů, například v podobě špinavé bomby. K tomuto riziku dále přispívá fakt, že v současné době je na světě možná i několik tisíc těchto zařízení, přičemž kolem jednoho tisíce se nachází jen na území Ruska, zejména při severním pobřeží, kde RTG sloužily jako napájení pro majáky a meteorologické stanice. Tato zařízení jsou mnohdy již nefunkční a zapomenutá a mnohá jsou v podstatě volně přístupná a mohou být zneužita. Celkové množství takto opuštěných RTG není známo, protože v historii zařízení nepodléhala příliš přísné evidenci a často o jejich umístění chybí údaje. Radioizotopové termoelektrické generátory tady patří k potenciálně nejnebezpečnějším zařízením vůbec. (4, 5, 6, 17, 18)

Obrázky 15, 16 – Radioizotopový termoelektrický generátor, zářič Sr-90.



Obvykle Sr -90/Pu-238

Rozměry zařízení:

1,5 m x 1,5 m x 1,5 m.

Rozměry zářiče: desítky cm

Hmotnost zařízení:

500 – 1000 Kg

Aktivita: až 25 PBq (Sr-90)

1.3 Biologické účinky záření ve vztahu k HASS

Dříve než-li přistoupíme ke kapitole týkající se nežádoucích událostí spojených s využíváním vysokoaktivních zářičů je třeba pro představu uvést několik informací z hlediska závažnosti biologických účinků těchto zářičů na člověka, resp. gamma záření jež tyto zářiče emitují. Není předmětem této práce vysvětlovat principy účinků ionizujícího záření, způsoby jakým ionizující záření působí na fyzikální (interakce na úrovni částic a atomů), molekulové (tvorba radikálů – radiolýza vody) a následně buněčné úrovni (např. poškození buněčné DNA) nebo zde uvádět základní veličiny jako je dávka, ekv. dávka, ef. dávka, atd. Nejsou zde ani podrobněji uvedeny základní informace o rozdělení účinků na stochastické a deterministické, jejich příklady a

všechny klinické projevy, fáze a formy (akutní nemoc z ozáření, dermatitidy, atd.). Odkaz na tyto základní informace je uveden v informačních zdrojích práce, např. (19, 20). Je zde uvedeno pouze stručné nastínění předpokladů o účincích záření z vysokoaktivních záříčů, pro utvoření potřebného základního informačního náhledu a následného pochopení nutnosti jejich zabezpečení.

Ve vztahu k vysokoaktivním záříčům je v první řadě nutné uvažovat jejich potenciál k bezprostřednímu ohrožení života a zdraví a to zejména na úrovni deterministické, neboť u nestíněných záříčů se dávkové příkony ve vzdálenosti cca jednotek metru mohou pohybovat řádově v jednotkách, ale i desítkách Gy/h (dávkovými příkony v různých vzdálenostech u HASS se částečně zabývá ještě kapitola 4.1). Jako jeden ze základních projevů tzv. deterministických účinků je bezesporu akutní nemoc z ozáření (dále jen „ANO“). V případě, že jako prahovou dávku pro vznik ANO uvažujeme cca 0,7 Gy (přesná hodnota závisí na mnoha faktorech), je zřejmé, že vysokoaktivní záříče jsou schopné v relativně krátkém čase toto poškození vyvolat. Je však velmi důležité zmínit, že klinické projevy akutní nemoci z ozáření jsou závislé na mnoha faktorech jako je geometrie, celková dávka a dávkový příkon, na věku, pohlaví, zdravotním stavu atd. a také na celkové uniformitě, popř. neuniformitě ozáření. S tím souvisí i další projevy deterministických účinků – radiační dermatitida - popáleniny, erytém, event. nekróza, neboť dojde-li např. k ozáření končetiny nebo obecně jen části těla, nemusí vzniknout ANO jako projev celotělového ozáření, ale i přes to bude osoba velmi závažně postižena. Pro ilustraci jsou níže uvedeny předpokládané prahové dávky pro ANO vyvolanou celotělovým ozářením a prahové dávky na kůži pro jednotlivé stupně radiodermatitidy – tabulky 2 a 3. (19, 20)

Tabulka 2 – prahové dávky a stupně ANO (19)

stupeň závažnosti	dávka (± 30%) Gy	klinická forma (postižené tkáně)	prognóza přežití
lehký	1 - 2	dřeňová	zcela příznivá
střední	2 - 4		příznivá
těžký	4 - 6		poměrně příznivá
velmi těžký	6 - 8		poměrně nepříznivá
	8 - 30	střevní	zcela nepříznivá
	30	neurovaskulární	

Tabulka 3 – prahové dávky a stupně poškození kůže (19)

stupeň závažnosti	dávka (± 30%) Gy	projevy	odhad doby hojení
lehký až střední	3 – 6 až 8 8 - 15	časný erytém, epilace, suchý zánět kůže	týdny – měsíce
těžký	15 - 25	časný erytém vystřídán pozdním erytémem, vyšší dávky způsobují později puchýře, zahojená kůže je tenká a zranitelná	měsíce
velmi těžký	Nad 25	již od začátku vzniká nekróza do větších hloubek, vznik vředů hojení velmi špatné	Roky nebo vůbec

Obrázky 17, 18, 19 – Příklady radiačního poškození kůže



Pozn.: Obrázek 18 (uprostřed) ukazuje poškození způsobené zářičem pro průmyslovou radiografii (defektoskopii), jež byl nešťastnou náhodou nošen v kapse kalhot po dobu cca několika hodin.

1.4 Nežádoucí události spojené s využíváním HASS

Od přelomu 19. a 20. století, tedy od doby kdy člověk začal využívat ionizující záření, se v této oblasti vyskytlo značné množství různých událostí, které měly fatální dopady na životy nebo zdraví lidí. Mezi takové nejznámější události jistě patří použití jaderných zbraní nebo jejich testování, popřípadě havárie jaderných elektráren. Tyto události jsou notoricky známé mezi nejširší veřejností a snad každý člověk se s jejich interpretací někdy setkal. Je však opět nutné připomenout, že ionizující záření se využívá v daleko širší oblasti lidské činnosti a že i v těchto činnostech se objevily a

nadále objevují nehody a události, které často způsobují ztráty lidských životů. Níže je zpracován přehled těch nejvýznamnějších či nejznámějších událostí, které se týkaly různých forem uzavřených radionuklidových zářičů respektive HASS z různých oblastí využití. Jedná se výhradně o nehody, ztráty, popřípadě zlovolné činy spojené s uzavřenými radionuklidovými zářiči. Nejsou zde uvedeny například události spojené s radioterapií (myšleno chybnou indikací ozáření), události spojené s generátory záření (rentgeny, urychlovače) ani události týkající se úniku radionuklidů do prostředí (kromě rozptýlení HASS) nebo vnitřní kontaminace.

V tabulce 4 je popsáno několik typů událostí s uzavřenými zářiči, které byly v historii zaznamenány. Je velmi důležité zmínit, že čísla uvedená v tabulce jsou ve skutečnosti zřejmě mnohem vyšší. S vysokou pravděpodobností se totiž předpokládá, že velké množství událostí nebylo v historii vůbec zaznamenáno nebo dokonce záměrně zatajeno, popřípadě se na ně s odstupem času vůbec nepřišlo nebo zapomnělo. (12, 13, 21, 22)

Tabulka 4 - Přehled a počty událostí a jejich obětí. (21)

typy událostí	Počet událostí	Počet úmrtí	Počet zraněných
události v průmyslové radiografii	64	1	79
události spojené se „zapomenutými/ztracenými“ zářiči	28	31	104
události spojené s odcizením zdroje	8	7	17
události v průmyslovém ozařování	24	8	33
zlomyslný čin (vražda, ublížení na zdraví)	9	4	81
vědomé sebepoškození (záměrná expozice sama sebe)	5	3	2
ostatní události	86	8	158
celkem	224	62	474

1.4.1 Příklady vybraných událostí

Níže jsou uvedeny příklady některých mimořádných událostí, přičemž jsou uvedeny zejména ty, které zapříčinily jedno nebo více úmrtí na nemoc z ozáření nebo radiační popáleniny. Je ovšem třeba zdůraznit, že i u událostí, které úmrtí nezapříčinily,

se také jedná o velmi závažné případy, neboť se u jejich obětí často vyskytovaly amputace končetin nebo jiné trvalé následky (často neuniformní ozáření zapříčinilo závažné lokální radiační popáleniny). Za závažné případy je tedy nutné považovat všechny události, ne jen ty smrtelné. (12, 21, 22)

Goiania, Brazílie – 12. – 29. září 1987

zapomenutý zářič

5 úmrtí, 20 zraněných, ekonomické důsledky

Jedná se pravděpodobně o nejznámější a zároveň nejrozsáhlejší událost spojenou se ztrátou zářiče. Došlo k opomenutí radioterapeutického zařízení obsahující zářič Cs-137 o celkové aktivitě asi 51 TBq, které se nacházelo v budově staré nemocnice určené k demolici. Dva muži, pravděpodobně sběrači kovového šrotu při demolici odmontovali hlavici se zářičem a následně ji odnesli domů na zahradu. Uvnitř objevili lesklý kov (kapsli s Cs-137) o kterém si mysleli, že má velkou cenu a snažili se jej základním nářadím (šroubovák, kladivo) z hlavice vyndat, přičemž poškodili obal a došlo k uvolnění Cs-137 ve formě chloridu cesného (krystalický prášek). U obou mužů se objevily zdravotní komplikace do 24 hodin. Poté muži celé zařízení i se zářičem odvezli do sběrný kovů. Zde si jednoho večera povšiml majitel modrého světélkování, které vycházelo z kapsle zářiče a domníval se, že se jedná o nějaký drahokam nebo dokonce nadpřirozený jev a spolu s manželkou tento světélkující prášek chloridu cesného zkoumali a dále ukazovali jiným lidem. Někteří si dokonce prášek, který kapsle obsahovala brali s sebou domů a potírali ho po těle. Tyto události probíhaly od 12. září, přičemž několik lidí již mělo vážné zdravotní problémy. Na pravý původ těchto problémů se přišlo až 29. září, kdy jeden lékař správně pojal podezření na nemoc z ozáření a kontaktoval fyzika pracujícího na nemocničním oddělení radioterapie aby provedl měření pacienta. Ten zjistil kontaminaci a odstartoval tak hledání původního zdroje. Celkem zemřelo 5 lidí s dávkami odhadovanými kolem 5-8 Gy. Přes 20 lidí utrpělo radiační popáleniny, přičemž několika musely být amputovány prsty. Kontaminováno bylo 249 osob, 112 000 osob bylo měřeno. Celá událost měla dále fatální dopady na ekonomiku celé Goianské metropole, neboť bylo nutné

dekontaminovat rozsáhlé oblasti, včetně demolice budov (cca 50). Celkem bylo monitorováno území o rozloze 67 km². Bylo vytvořeno speciální úložiště radioaktivního odpadu (35 000 m³) A dále byl Goianě pozastaven export určitých výrobků, potravin a jiných komodit a vše bylo podrobováno kontrole a velmi podrobnému monitorování. (21, 22, 23)

Mexiko-city, Mexiko – 21. března 1962

ztracený zářič

4 úmrtí, 1 zraněných

Desetiletý chlapec nešťastnou náhodou našel ztracený zářič pro průmyslovou radiografii Co-60 o aktivitě cca 190 GBq. Chlapec údajně nosil zářič v kapse několik dní a poté ho položil na kuchyňskou linku kde zářič setrval cca 110 dní. Celkem zemřeli 4 rodinní příslušníci. Chlapec zemřel za 38 dní ode dne nález, jeho matka za 89 dní, jeho dvouletá sestra za cca 120 dní, a jeho babička cca za 150 dní. Příčina zdravotních problémů byla známá až zhruba po 100 dnech ode dne nález. Jejich otec přežil. Odhadované smrtelné dávky byly údajně až 47-52 Gy, 35 Gy, 30 Gy, a 28 Gy, neboť byly rozloženy v delším čase. Ovšem přesné parametry nejsou známy a uvádí se, že tyto odhady jsou s největší pravděpodobností nadhodnocené. (21, 22)

Casablanca, Maroko – 19. března 1984

ztracený zářič

8 úmrtí, 3 zraněných

Došlo ke ztrátě zářiče pro průmyslovou radiografii s radionuklidem Ir-192 o aktivitě cca 600 GBq. Zářič byl náhodou nalezen dělníkem na stavbě a přenesen do jeho domu, kde byl odložen na stůl do ložnice. V ložnici se bohužel nejčastěji zdržovala celá rodina a došlo tak k vážnému ozáření celkem 11 osob. 8 osob, z toho 4 děti obdrželo smrtelnou dávku a zemřelo cca do 45 dní od dne nález. Další 3 osoby přežily. Skutečná příčina zdravotních problémů a úmrtí byla zjištěna cca 80 dní po první expozici. (21, 22)

Baku, Ázerbájdžán (SSSR) – 5. října 1982

ztracený zářič

5 úmrtí, 13 zraněných

Zářič Cs-137 byl nošen několik dní v kapse bundy, přičemž podrobnosti nejsou známy. 5 lidí zemřelo na radiační popáleniny, 1 na nemoc z ozáření, 12 dalších osob utrpělo zranění. (21, 22)

Kingisepp, Leningrad, Rusko – 1999

zapomenutý zářič

3 úmrtí

Zářič z radioizotopového termoelektrického generátoru byl nalezen nedaleko autobusové zastávky v Kingisepp. Pravděpodobně byl ukraden třemi sběrači kovu z 50 km vzdáleného majáku. Na povrchu zářiče byl dávkový příkon cca 10 Gy/hod. Všichni tři sběrači zemřeli. Podrobnosti nejsou známy, avšak vyskytují se i spekulace o úmyslném umístění zářiče právě do blízkosti autobusové zastávky. (21, 22)

Meet Halfa, Qaluobiya, Egypt – 5. května 2000

ztracený zářič

2 úmrtí, 5 zraněných

Při radiografických pracích na potrubích nedaleko města Meet Halfa v Egyptě se koncem dubna roku 2000 ztratily celkem 4 zářiče Ir-192, každý o aktivitě cca 1,8 TBq. Pracovníci se je snažili najít, ale bez úspěchu a nikoho o tom neinformovali. Jeden zářič byl 5. května nalezen mladým mužem, který ho s podezřením, že se jedná o drahý kov odnesl domů. O 30 dní později muž zemřel (odhadovaná dávka 7,5 Gy). Příčina smrti uváděná v lékařské zprávě byla mylná, ale později z ní byly přečteny příznaky jako úbytek kostní dřevě a popáleniny. 7 dní po smrti mladého muže byl hospitalizován i jeho otec, který zemřel celkem po 43 dnech ode dne nálezů (13 dní po smrti svého syna), odhadovaná dávka 5,5 Gy. Pět dalších rodinných příslušníků obdrželo dávky do 4 Gy. Následně bylo ošetřeno 76 sousedů, u nichž byly objeveny změny krvetvorby. Odhaduje se, že cca 200 lidí obdrželo dávku mezi 25-150 mGy. Zářič byl objeven až

26. června, tedy po 52 dnech ode dne nálezu. Později se našly i 3 zbývající zářiče, které naštěstí nikoho neohrozily. Pracovníci, kteří ztrátu zářičů neohlásili, byli později uvězněni. (21, 22)

Samut Prakarn, Thajsko – 24. ledna 2000

ztracený zářič

3 úmrtí, 7 zraněných

Bývalý teleterapeutický zářič o celkové aktivitě 16 TBq byl spolu se stínícím boxem vykoupen ve sběrných surovinách ve městě Samut Prakarn v Thajsku. V prostorách sběrných surovin byl cca 1 týden, přičemž byl stále ve stínícím boxu. Později byl ovšem převážen na skládku a při převozu vypadl ze stínění. U dvou pracovníků se objevily zdravotní potíže ještě v den převozu, u dalšího o několik dní později. Celkem zemřely 3 osoby, přičemž celotělové odhadované dávky nepřesahovaly 4 Gy, avšak osoby podlely velmi intenzivním lokálním radiačním popáleninám. (21, 22)

Brescia, Lombardie, Itálie – 13. května 1975

událost s průmyslovým ozařovačem

1 úmrtí

Jeden muž byl vystaven záření z Co-60 ve stanici pro ozařování obilovin proti škůdcům. Z nepřesně známých důvodů muž opravoval dopravníkový pás v blízkosti ozařovací místnosti, když byl zářič vytažený. Obdržel dávku cca 12 Gy, zemřel za 13 dnů. (21, 22)

Shandong, Jining, Čína – 21. října 2004

událost s průmyslovým ozařovačem

2 úmrtí

Díky nedostatečné kontrole vstoupili dva pracovníci do ozařovací místnosti u ozařovače zeleniny, přičemž z ní údajně ihned vystoupili. Tři minuty po vstupu cítil jeden pracovník pálení obličeje, bolest břicha a zvracel. Druhý deset minut po expozici

cítil bolest hlavy. Oba byli ihned hospitalizováni a převezeni do nemocnice, kde jim byly 55 hodin po expozici transplantovány kmenové buňky. První dělník zemřel za 33 dnů (odhadovaná dávka 20 Gy), druhý za 75 dnů (odhadovaná dávka 9 Gy). (21, 22)

Grozny, Čečna, Rusko – 13. září 1999

odcizení zdroje

3 úmrtí, 3 zraněných

6 mužů se z neznámých důvodů rozhodlo odcizit zářiče Co-60 z chemické továrny v Grozny. Otevřeli stínící kontejner a vyjmuli několik 12-cm dlouhých Co-60 tyčí, z nichž každá měla aktivitu 900 TBq. Jeden muž, který držel zářič údajně řádově několik minut zemřel do cca půl hodiny od otevření kontejneru, dva další zemřeli později. Zbylí tři přežili. Několik Co-60 tyčí se údajně nikdy nenašlo ovšem informace není potvrzená. Podrobnosti tohoto případu bohužel nejsou známy. Spekulovalo se o možném zapojení čečenských teroristů a přípravě špinavé bomby. (21, 22)

Tammiku, Estonsko – 21. října 1994

odcizení zdroje

1 úmrtí, 4 zraněných

Při vloupání tří bratrů do zařízení na zpracování radioaktivních odpadů byl ukraden kontejner se zářičem Cs-137 pravděpodobně z důvodu sběru kovů. Při nakládání vypadl zářič z krytu a jeden z bratrů ho zvedl a dal do kapsy od bundy. Bundu poté pověsil v domě na chodbě. Když přicházel domů měl již celkovou nauzeu. Muž zemřel o 13 dní později s příčinnou smrti diagnostikovanou jako selhání ledvin. Za dvacet dní ode dne nalezení (7 dní po smrti prvního muže) našel v kapse bundy zářič jeho nevlastní syn a přesunul ho do kuchyňské linky. Za 8 dní od přemístění byl chlapec hospitalizován v nemocnici s diagnózou radiačních popálenin. První muž obdržel údajně dávku až cca 40 Gy. Jeden z jeho bratrů, který pomáhal nakládat kontejner na vůz obdržel dávku kolem 1 Gy avšak lokální dávka na ruce cca 20-30 Gy způsobila popáleniny. Další rodinní příslušníci nacházející se v domě obdrželi dávky do 4 Gy, avšak nevlastnímu synovi muže byly kvůli radiačním popáleninám amputovány prsty.

Dále zemřel pes, který se často pohyboval v chodbě v blízkosti bundy se zářičem. Zajímavostí je, že vyšetřovatelé údajně zpětně rekonstruovali dávky a umístění zářiče v domě na základě termoluminescenčních vlastností keramických hrnců a dlaždic a elektron-spinové resonance cukru a léků. (21, 22, 24)

Zheleznodorozhny, Moskevský region, Rusko – únor 1995

zlomyslný čin/vražda

Zářič Cs-137 o aktivitě cca 50 GBq byl záměrně umístěn do dveří vozu, přičemž řidič byl vystavován záření po celkovou dobu 5 měsíců než byl zářič objeven. V průběhu této doby byl řidič léčen na vypadávání vlasů a ochlupení a aspermií. Celotělová dávka odhadována na 8 Gy. Úmrtí nastalo po téměř 2 letech, v průběhu kterých byl léčen zejména na selhávání krvetvorby. (21, 22)

Moskva, Rusko – 14. dubna 1993

zlomyslný čin/vražda

Zářič, pravděpodobně Cs-137 nebo Co-60 byl umístěn do křesla Vladimíra Kapluna, ředitele společnosti pro výrobu obalů. Kaplun byl po několika týdnech hospitalizován a po dalším měsíci zemřel. Po jeho smrti byl zářič objeven. (21, 22)

Moskva, Rusko - 1960

záměrná „sebeexpozice“ (sebevražda)

Devatenáctiletý pracovník výzkumné radiologické laboratoře spáchal sebevraždu za pomoci zářiče Cs-137. Sebral kapsli obsahující zářič v laboratoři a nosil ji cca 5 hodin v kapse kalhot. Poté ji umístil na břišní oblast kde zářič měl cca 15 hod. Obdržel celotělovou dávku asi 15-20 Gy. Zemřel po 15 dnech. (21, 22)

1.5 Problematika zabezpečení HASS

Dříve, než-li přistoupíme k problematice zabezpečení vysokoaktivních záříčů ionizujícího záření je nutné v této souvislosti definovat pojem *zabezpečení*. V níže uváděném textu se pod tímto pojmem rozumí zabezpečení vysokoaktivních záříčů proti zneužití a tedy „soubor technických a organizačních opatření směřujících k zábraně toho, aby se záříčem bylo svévolně manipulováno“. Dále je třeba zmínit, že zabezpečení je nutné i u ostatních radionuklidových záříčů, tj. záříčů, které nedosahují aktivit vymezujících záříče vysokoaktivní. Vysokoaktivní záříče však ze všech záříčů představují největší hrozbu a jsou tedy hlavním předmětem následujícího textu jako i celé práce.

Iniciativa potřeby vyšší úrovně zabezpečení a také kontroly zabezpečení se v minulých letech objevila zejména na úrovni mezinárodních organizací odkud byla také vydána první doporučení a rady členským státům. Z tohoto důvodu je následující problematika uváděna zejména z pohledu mezinárodních požadavků. Legislativou a doporučeními na území ČR se budeme zabývat později.

Pozn.: V textu níže je namísto pojmů radionuklidový záříč, respektive vysokoaktivní záříč (pojmy z české legislativy) užíváno pojmů radioaktivní zdroj, respektive vysokoaktivní zdroj (vysvětleno také v kapitole 1.1). Toto je způsobeno zejména z důvodu problematického překladu mezinárodních pojmů (radioactive source, respektive high-activity sealed source) do ekvivalentních pojmů v české legislativě. Text níže je převzat zejména z mezinárodních doporučení a tak je užíváno spíše přesnějšího překladu pojmů, tedy radioaktivní zdroj, respektive vysokoaktivní zdroj. V každém případě platí, že pojem radionuklidový záříč = pojem radioaktivní zdroj, pojem vysokoaktivní záříč = pojem vysokoaktivní zdroj.

1.5.1 Mezinárodní požadavky na zabezpečení

Začátkem 21. století se lidstvo dočkalo několika závažných událostí, které ovlivnily chápání bezpečnosti a postavily společnost před několik zásadních otázek. Jednou z takových otázek je zejména rostoucí vliv teroristických skupin či podobných organizací, které se snaží prosazovat své politické, náboženské nebo ideologické názory nelegitimními způsoby často ohrožujícími životy jiných lidí, a to bez ohledu na jejich

vztahy k předmětným zájmům. V této souvislosti je společnost k ochraně před možnými teroristickými útoky nucena neustále inovovat a vylepšovat bezpečnostní prvky ve všech směrech a dále analyzovat nová rizika a hrozby, která mohou z teroristických skupin vyplynout. Již několik desetiletí probíhá na vysoké úrovni zabezpečování jaderného materiálu a jiných surovin, které by mohly být v rukou teroristů využity k výrobě jaderné zbraně. V posledních letech však v této problematice vyvstávají i nové hrozby a to například použití radionuklidů ve špinavé bombě nebo kontaminace vod, potravin atd., ale také umístění radionuklidového zářiče na nějakém veřejném místě. Je tedy nutné se s těmito novými hrozbami a riziky vypořádat a analyzovat jejich potenciální zdroje. Ve všech výše zmíněných případech jsou nejlepším kandidátem na zneužití právě vysokoaktivní zářiče a z těchto důvodů probíhá v posledních letech iniciativa na zvýšení úrovně zabezpečení HASS a tak zamezení možného zneužití, zejména na mezinárodní úrovni.

První mezinárodní impuls o problematice vysokoaktivních zářičů pochází z roku 2003, kdy byla vydána ve spolupráci s Evropským společenstvem pro atomovou energii – EURATOM **směrnice Rady EU 2003/122/EURATOM (3)** (dále „**směrnice 2003/122**“) ze dne 22. prosince 2003 o kontrole vysokoaktivních uzavřených zdrojů záření a opuštěných zdrojů (Control of high-activity sealed radioactive sources and orphan sources). V tomto dokumentu je poprvé zaveden a definován pojem vysokoaktivní zářič (High-activity sealed source) a je zde poprvé uvedena tabulka s mezními aktivitami určujícími vysokoaktivní zářiče (viz kapitola 1.1, tabulka 1). Jedná se o směrnici, tedy závazný dokument členských zemí EU, který rozšiřuje a upřesňuje předešlé směrnice, jimiž se stanovují základní standardy od roku 1959, zejména směrnici Rady 96/29/EURATOM ze dne 13. května 1996, kterou se stanovují základní bezpečnostní standardy na ochranu zdraví pracovníků a obyvatelstva před riziky vyplývajícími z ionizujícího záření. Účelem směrnice 2003/122 je zabránit ozáření pracovníků a veřejnosti ionizujícím zářením v důsledku nedostatečné kontroly vysokoaktivních zářičů a harmonizovat kontroly prováděné v členských státech stanovením zvláštních požadavků, které zajistí udržení každého takového zářiče pod kontrolou. Za tímto účelem je ve směrnici explicitně uvedeno a zdůrazněno, že

vysokoaktivní zářiče představují značná potenciální rizika pro lidské zdraví a pro životní prostředí, a proto musejí být podrobeny přísné kontrole, a to od doby jejich výroby až do doby jejich umístění do schváleného zařízení za účelem dlouhodobého skladování nebo uložení. Jsou zde také rozšířeny požadavky na povolení k nakládání s vysokoaktivními zářiči a na jejich evidenci. Z důvodu předcházení radiačním haváriím a poškození zdraví je nutné, aby umístění každého vysokoaktivního zářiče bylo známo, registrováno a ověřováno od doby výroby zdroje nebo jeho dovozu do doby jeho umístění ve schváleném zařízení za účelem dlouhodobého skladování nebo uložení nebo jeho vyvezení. Změny provozních podmínek vysokoaktivního zářiče, například jeho umístění nebo způsob používání, by také měly být zaznamenávány a oznamovány. Protože zkušenosti ukazují, že i přes existenci příslušného regulačního rámce může dojít v daném státě ke ztrátě kontroly nad vysokoaktivními zářiči, je nezbytné přijmout ustanovení pro identifikaci, označování a registraci každého vysokoaktivního zářiče, jakož i pro zvláštní výcvik a informování všech osob, které se podílejí na aktivitách souvisejících s používáním těchto zářičů. Dále je též vhodné poskytnout příslušný výcvik a informace osobám, které mohou neplánovaně přijít do styku s nějakým opuštěným HASS. Všechny výše zmíněné požadavky jsou ve směrnici 2003/122 rozepsány podrobně a v bodech tak, aby bylo možné je jednoduše importovat do regulačních předpisů a legislativy jednotlivých členských států. (3)

V lednu roku 2003 vydala Mezinárodní agentura pro atomovou energii – IAEA (International Atomic Energy Agency) dokument s názvem **Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources (25)** (Prováděcí kodex bezpečnosti a ochrany radioaktivních zdrojů), (dále jen „**Code of conduct on S a S**“) jako výsledek mezinárodní konference na téma „zabezpečení radioaktivních zdrojů“ konané v roce 2003. Hlavním cílem tohoto „kodexu“ bylo sjednotit přístupy jednotlivých členských zemí k zabezpečení radioaktivních zdrojů, které jsou potenciálně nebezpečné, zejména pak těch vysokoaktivních. Směrnice 2003/122 byla závazným dokumentem pro členské země EU, u dokumentu Code of conduct on S a S se jedná jen o jakési doporučení, které vytváří co nejjednodušší návod pro jednotlivé členské země, u nichž se opět předpokládá (ale není to závazně nutné) import dokumentu do legislativy. Je však třeba

zdůraznit, že tento dokument byl vydán pod hlavičkou IAEA a na rozdíl od směrnice 2003/122 oslovuje mnohem větší počet světových států. Požadavky, které jsou uvedeny v Code of conduct on S a S se v mnoha okolnostech podobají požadavkům směrnice 2003/122. Je zde opět explicitně zmiňována nutnost důsledné kontroly zdrojů regulačními orgány (rozuměj kontrolní orgány, v ČR např. SÚJB), nutnost označování, registrování zdrojů ve státních registrech, zvyšování fyzické ochrany na pracovištích, a další dílčí požadavky, které lze komplexně označit jako požadavky na zvýšení zabezpečení u všech radioaktivních zdrojů. Kromě všech těchto požadavků jsou zde poprvé důraznou formou uváděna doporučení na kategorizaci radionuklidových zdrojů. V této souvislosti a v jisté návaznosti na Code of conduct on S a S byl Mezinárodní agenturou pro atomovou energii vydán další dokument, nesoucí název **Categorization of Radioactive Sources (26)** (Kategorizace radioaktivních zdrojů) ze série Bezpečnostních standardů. Tento dokument byl vydán v srpnu roku 2005 a jeho hlavním cílem je poskytnout jednoduchý a logický systém pro kategorizaci radioaktivních zdrojů (myšleno kategorizaci všech radioaktivních zdrojů, ovšem s důrazem na vysokoaktivní) z hlediska jejich potenciálu způsobovat nežádoucí účinky na zdraví člověka. Tento systém kategorizace má poskytovat potřebné zázemí při určování požadavků a nařízení opět zejména v nových legislativách na úrovni jednotlivých členských států. Hlavní výhoda celé kategorizace spočívá v tom, že na základě zařazení zdroje do určité kategorie je možné stanovit odpovídající stupeň kontroly a regulace celé řady aktivit týkající se zejména bezpečnosti a ochrany. Mezi takové aktivity může patřit například nouzové a havarijní plánování, bezpečnostní opatření a fyzická ochrana proti odcizení, regulace a evidence pohybu zdroje, atd. V praxi je tedy kategorizace spojena s tzv. „odstupňovaným přístupem“ z něhož vyplývá aplikace nejpřísnějších opatření na zdroje představující nejvyšší hrozbu a nižší opatření na zdroje méně nebezpečné. Hlavním cílem tohoto dokumentu je tedy zejména sjednocení různých přístupů členských zemí na jednotný odstupňovaný přístup na základě stejného způsobu kategorizace radioaktivních zdrojů. (25, 26, 27, 28, 29)

1.5.1.1 Kategorizace radioaktivních zdrojů dle IAEA

Jak již bylo uvedeno výše, hlavním dokumentem, který se zabývá systémem kategorizace radioaktivních zdrojů je Categorization of Radioactive Sources ze série Bezpečnostních standardů IAEA. Tento dokument vytváří návod k rozdělení radioaktivních zdrojů do různých kategorií, a to na základě jisté úrovně nebezpečnosti popřípadě úrovně rizika, které ze zdroje vyplývá, přičemž se jedná zejména o riziko spojené s potenciálním vznikem nějakých škodlivých nebo život ohrožujících účinků. Způsobem a výpočtem, na základě kterého jsou zdroje do těchto kategorií rozdělovány, se budeme ještě zabývat níže. Kategorií je celkem 5, přičemž 1. kategorie obsahuje zdroje nejvíce nebezpečné a 5. kategorie zdroje nejméně nebezpečné. Míra rizika, které ze zdroje vyplývá, se uvažuje zejména ve dvou situacích. První situací je riziko spojené s přímým kontaktem se zdrojem (např. s pobytem v jeho těsné blízkosti, jeho držení, atd.), kdy vznikají radiační popáleniny, popřípadě nemoc z ozáření při celotělové expozici. Druhou situací je riziko vyplývající z rozptýlení zdroje do okolí například explozí, únikem nebo ohněm. (26)

1. kategorie - Extrémně nebezpečné zdroje

- a. V případě přímého kontaktu zdroje s osobou je velmi vysoká pravděpodobnost vzniku fatálních zdravotních účinků. Při přímém kontaktu po dobu několika minut vznikají velmi vážná trvalá lokální poranění. Při kontaktu po dobu delší než několik minut (například desítky minut až hodiny) dojde s největší pravděpodobností ke smrti.
- b. V případě rozptýlení zdroje do okolí může toto způsobit potenciální ohrožení života nebo zdraví osob nacházejících se v bezprostřední blízkosti (například desítky metrů) od nejvíce kontaminovaného místa. V případě vzdálenosti několika stovek metrů budou zdravotní rizika na relativně nízké úrovni popřípadě nebudou žádná. Oblast určená k dekontaminaci bude pravděpodobně přesahovat 1 čtvereční kilometr.

Příklady zdrojů: Průmyslové ozařovače ke sterilizaci nebo ozařování, radioizotopové termoelektrické generátory, krevní ozařovače, teleterapeutické ozařovače, vícesvazková teleterapie, ozařovače setých semen

2. *kategorie – Velmi nebezpečné zdroje*

- a. V případě přímého kontaktu zdroje s osobou po dobu několika minut až hodin vznikají velmi vážná trvalá lokální poranění. Při kontaktu po dobu delší než několik hodin (například den) dojde s největší pravděpodobností ke smrti.
- b. V případě rozptýlení zdroje do okolí může toto způsobit potenciální ohrožení života nebo zdraví osob nacházejících se v bezprostřední blízkosti (například desítky až jednotky metrů od místa výbuchu) od nejvíce kontaminovaného místa. V případě vzdálenosti stovek metrů budou zdravotní rizika na relativně nízké úrovni, popřípadě nebudou žádná. Oblast určená k dekontaminaci bude pravděpodobně menší než 1 čtvereční kilometr.

Příklady zdrojů: radioizotopové termoelektrické generátory nižších aktivit, krevní ozařovače nižších aktivit, ozařovače setých semen, teleterapeutické ozařovače nižších aktivit, zdroje pro průmyslovou radiografii (defektoskopii), vysokoaktivní brachyterapeutické zdroje, vysokoaktivní hladinoměry

3. *Nebezpečné zdroje*

- a. Při přímém kontaktu osoby se zdrojem přesahujícím dobu řádově hodin až dnů mohou vznikat lokální poranění. V případě kontaktu po dobu delší než několik dní popřípadě týdny může dojít s větší pravděpodobností ke smrti.
- b. Dojde-li k rozptýlení zdroje do okolí pravděpodobně nevznikne život ohrožující situace, není ovšem zcela vyloučena. Již ve vzdálenosti několika metrů od nejvíce kontaminovaného místa bude pravděpodobně velmi nízké nebo žádné riziko. Oblast určená k dekontaminaci pravděpodobně nepřesáhne několik hektarů.

Příklady zdrojů: zdroje pro průmyslovou radiografii (defektoskopii) nižších aktivit, brachyterapeutické zdroje, hladinoměry, různé zdroje používané v měřicích systémech

4. Méně nebezpečné zdroje

- a. I v případě přímého kontaktu zdroje s osobou nebudou s největší pravděpodobností vznikat nějaká vážná a trvalá poranění. Mohou vznikat přechodná lokální poranění například po kontaktu se zdrojem přesahujícím dobu několika týdnů.
- b. Při rozptýlení zdroje do okolí vzniká jen velmi malé riziko. Možnost vzniku nějakých nežádoucích zdravotních účinků je nepravděpodobná. Oblast určená k dekontaminaci bude pravděpodobně několik desítek až stovek čtverečních metrů.

Příklady zdrojů (tato kategorie většinou nedosahuje aktivit HASS): hladinoměry a jiné měřicí systémy nižších aktivit, brachyterapeutické zdroje nižších aktivit

5. Málo nebezpečné zdroje

- a. I v případě přímého kontaktu osoby se zdrojem nevzniknou žádná poranění.
- b. Při rozptýlení nevzniká riziko nežádoucích účinků

Příklady zdrojů (tato kategorie nedosahuje aktivit HASS): brachyterapeutické zdroje velmi nízkých aktivit, různé kalibrační zdroje, spektrometrické analyzátory

Poznámky k výše zmíněným kategoriím:

- uvažujeme pouze deterministické (akutní) účinky, stochastické účinky se neuvažují
- v případě rozptýlení zdroje do okolí neuvažujeme riziko spojené např. s vlivem konvenčních výbušnin
- velikost oblasti určené k dekontaminaci je proměnlivá a závislá na mnoha faktorech (celková aktivita zdroje, druh radionuklidu, počasí, atd.)

- vznik zdravotních účinků v případě přímého kontaktu se zářičem je závislý na mnoha faktorech (jedná-li se o jeho držení nebo pouze o pohyb v jeho blízkosti, druh radionuklidu, velká závislost na zdánlivě malých vzdálenostech, stínění, atd.) (26, 27)

1.5.1.2 Princip kategorizace radioaktivních zdrojů

Při stanovování principu a systému kategorizace radioaktivních zdrojů bylo nutné přihlédnout k mnoha okolnostem. V praktickém využití se například různé zdroje vyskytují v různých formách, pro stejné oblasti se často používají různé druhy radionuklidů a obecně radioaktivní zdroje provází vysoká variabilita. Nelze tedy zdroje zařazovat do kategorií podle jednoho kritéria. V této souvislosti byla snaha o nalezení nějakého faktoru, na jehož základě by se zdroje v praxi jednoduše kategorizovaly. V dokumentu Categorization of radioactive sources je tento faktor uveden jako tzv. „D value“ (hodnota D), což je faktor pro různé radionuklidy, na jehož základě je spolu s aktivitou možné vypočítat kategorizaci daného zdroje. „D value“ je hodnota uváděná v jednotkách Bq a jedná se vlastně o množství radionuklidu (vyjádřené aktivitou), které je považováno za nebezpečné a může způsobovat nějaké závažné deterministické účinky, které mohou vést k úmrtí osob nebo k jejich zranění s trvalými následky v případě, že by zdroj obsahující takové množství radionuklidu nebyl pod kontrolou. Příklady hodnot „D value“ pro nejznámější radionuklidy jsou v tabulce 5. (26, 30)

Tabulka 5 - Hodnoty „D value“ pro nejznámější radionuklidy.

Radionuklid	„D value“ [TBq]
Co-60	3×10^{-2}
Cs-137	1×10^{-1}
Sr-90	1×10^0
Se-75	1×10^{-1}
Ir-192	8×10^{-2}
Am-241	6×10^{-2}
Pu-238	6×10^{-2}
Ra-226	4×10^{-2}
Cf-252	2×10^{-2}

Hlavním mezinárodním dokumentem, který obsahuje hodnoty „D values“ pro většinu používaných radionuklidů je dokument vydaný IAEA v roce 2006, s názvem *EPR-D-Values* (30). Za pomoci tohoto dokumentu a dokumentu *Categorization of radioactive sources* je poté možná kategorizace všech radionuklidových zdrojů, a to na základě jednoduchého výpočtu. Jedná se o výpočet tzv. poměru A/D, kde A je aktivita daného zdroje (Bq) a D je „D value“ (také Bq). Výsledkem je poměr skutečného množství radionuklidu k množství radionuklidu, které je považováno za nebezpečné – „D value“. Tento poměr může čistě teoreticky na jedné straně nabývat hodnot blížících se nule a na straně druhé hodnot blížících se nekonečnu. Čím vyšší číslo vyjde, tím nebezpečnější zdroj je. V praxi se vyskytují hodnoty od méně než 0.01 do více než 1000. Různé intervaly hodnot A/D poměru spolu s kategoriemi a příklady jsou v tabulce 6. (26, 30)

Tabulka 6 – Kategorizace zdrojů na základě výpočtu A/D poměru (24)

Kategorie	Příklady zdrojů	Hodnota A/D poměru
1	průmyslové ozařovače, radioizotopové termoelektrické generátory, krevní ozařovače, teleterapeutické ozařovače	$A/D > 1000$
2	průmyslová radiografie (defektoskopie), vysokoaktivní brachyterapeutické zdroje, vysokoaktivní hladinoměry	$1000 > A/D > 10$
3	brachyterapeutické zdroje, hladinoměry, různé zdroje používané v měřicích systémech	$10 > A/D > 1$
4	(většinou se nejedná o HASS) hladinoměry a jiné měřicí systémy nižších aktivit, brachyterapeutické zdroje nižších aktivit	$1 > A/D > 0,01$
5	(nejedná se o HASS) brachyterapeutické zdroje velmi nízkých aktivit, různé kalibrační zdroje, spektrometrické analyzátory	$0.01 > A/D$

Výše zmíněný způsob kategorizace je v současné době mezinárodně uznáván a předpokládá se, že právě na základě této kategorizace budou jednotlivé státy vysokoaktivní zdroje rozdělovat a zajišťovat pro ně různé stupně bezpečnostních opatření.

1.5.1.3 Bezpečnostní opatření v závislosti na kategorizaci zdrojů

Základní požadavky na bezpečnostní opatření jsou uvedeny v dokumentu IAEA Security of radioactive sources (31) (Zabezpečení radioaktivních zdrojů). Jak již bylo zmíněno výše, hlavním důvodem k systému kategorizace zdrojů je možnost uplatnění tzv. odstupňovaného přístupu v následných bezpečnostních opatřeních. Jedná se o přístup, který přímo navazuje na výše uvedenou kategorizaci (kapitola 1.5.1.1) a zavádí tři bezpečnostní skupiny (A,B,C). Bezpečností skupina A odpovídá kategorii 1., skupina B odpovídá kategorii 2. a skupina C odpovídá kategorii 3. Pro 4. a 5. kategorii nejsou uváděny bezpečností skupiny, neboť se nejedná o tolik nebezpečné zdroje jako v 1. až 3. kategorii. Než-li přistoupíme k požadavkům jednotlivých bezpečnostních skupin zmíníme několik požadavků a prvků, které platí pro všechny skupiny. Mezi tyto prvky patří:

- technické a organizační prostředky, jež viditelně a zjevně ztěžují přístup ke zdroji a odrazují tak potenciálního narušitele,
- technická a organizační opatření zajišťující včasné rozpoznání neautorizovaného přístupu ke zdroji,
- existence mechanických a jiných zábran, které maximálně prodlouží dobu potřebnou k neautorizovanému přemístění zdroje mimo pracoviště,
- technické a organizační opatření k zabezpečení reakce na potenciální neautorizovaný přístup ke zdroji,
- bezpečností pravidla pro práci s lidmi, informacemi a bezpečnostními prvky,

- zdokumentovaný systém popisující prvky a prostředky ve výše zmíněných bodech.

Všechny tyto body platí pro každou bezpečnostní skupinu, avšak skupiny se liší intenzitou uplatňování těchto požadavků. (31, 32, 33)

Bezpečnostní skupina A - odpovídá kategorii 1. (viz. kapitola 1.5.1.1.)

Nejvyšší bezpečnostní opatření. Zdroje by měly být odděleny od neoprávněného přístupu alespoň dvěma technickými opatřeními. Inventarizace zdrojů by měla probíhat každý den. Cílem zabezpečení této skupiny je:

- zabránit neautorizovanému přemístění zdroje,
- zajistit okamžitou detekci jakéhokoli neautorizovaného přístupu ke zdroji,
- zajistit okamžitou detekci jakéhokoli pokusu o neautorizované přemístění,
- zajistit neprodlené zjištění příčiny poplachu a konkrétní situace v místě zdroje, důležitou roli hraje čas,
- zajistit neprodlenou komunikaci se zásahovou jednotkou,
- zajistit zdržení přístupu potenciálního útočníka s dostatečným časovým prostorem pro přerušení útoku,
- zajistit okamžitý zásah při poplachu a zjištěné situaci k okamžitému přerušení útoku.

Bezpečnostní skupina B - odpovídá kategorii 2,

Vyšší a střední stupeň zabezpečení. Inventarizace zdrojů by měla být prováděna alespoň jednou týdně. Cílem zabezpečení této skupiny je:

- minimalizace pravděpodobnosti neautorizovaného přemístění,
- zajistit okamžitou detekci jakéhokoli neautorizovaného přístupu ke zdroji,
- zajistit detekci jakéhokoli pokusu o přemístění,
- zajistit neprodleně příčinu poplachu,

- zajistí zdržení přístupu potenciálního útočníka s minimalizací pravděpodobnosti neautorizovaného přemístění zdroje,
- zajištění okamžité iniciace zásahu k přerušení útoku.

Bezpečnost skupina C - odpovídá kategorii 3,

Nižší stupeň zabezpečení. Zdroje by měly být odděleny od neoprávněného přístupu alespoň jedním technickým opatřením. Cíle zabezpečení této skupiny je:

- snížit pravděpodobnost neautorizovaného přemístění zdroje,
- zajistit okamžitou detekci jakéhokoli neautorizovaného přístupu ke zdroji,
- zajistit detekci neautorizovaného přemístění zdroje,
- zajistit zdržení přístupu potenciálního útočníka se snížením pravděpodobnosti neautorizovaného přemístění zdroje,
- zajistit vhodná opatření v případě neautorizovaného přemístění.

1.5.2 Požadavky na zabezpečení dle současné legislativy v ČR

Pojem vysokoaktivní zářič byl do české legislativy zařazen v roce 2005 zejména z důvodu explicitního naplnění požadavků směrnice 2003/122. V této souvislosti byla provedena změna vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, vyhláškou č. 499/2005 Sb., přičemž byl jednak zaveden pojem vysokoaktivní zářič a současně byl stanoven určitý soubor pravidel stanovených ve směrnici 2003/122. Do tohoto souboru lze zahrnout zejména § 33 - Zvláštní podmínky bezpečného provozu uzavřených radionuklidových zářičů, zařízení a pracovišť s nimi, kde byly přidány následující odstavce týkající se přímo vysokoaktivních zářičů:

(7) Osoba, která nakládá s vysokoaktivním zářičem, pravidelně ověřuje, zda se vysokoaktivní zářič, popřípadě zařízení jej obsahující nachází na místě svého používání nebo skladování a že je ve zjevně dobrém stavu.

(8) Vysokoaktivní zářiče opatřuje výrobce, popřípadě u dovezených zářičů dodavatel, nezaměnitelným identifikačním číslem. Je-li to proveditelné, toto číslo se vryje nebo natiskne na zářič. Toto číslo se rovněž vryje nebo natiskne na obal zářiče. Není-li to proveditelné nebo v případě přepravních obalů pro vícenásobné použití, uvedou se na obalu alespoň informace o charakteru zářiče. Výrobce, popřípadě u

dovezených záříčů dodavatel, také zajistí, aby obal záříče a, je-li to proveditelné, i záříč byly označeny a opatřeny znakem radiačního nebezpečí a aby součástí dokumentace každého vyráběného nebo dováženého typu vysokoaktivního záříče byla i fotografie nebo jiné obdobné vyobrazení záříče a pro něj obvykle používaného obalu.

(9) Osoba, která má v držbě vysokoaktivní záříč, zajistí, aby tento záříč a jeho obal byl vždy provázen písemnou informací umožňující identifikovat zdroj a jeho povahu a aby byly, je-li to proveditelné, označeny a opatřeny znakem radiačního nebezpečí a aby nápisy a značky zůstaly čitelné. Identifikace a značení mají být v souladu s identifikací a značením podle odstavce 8. Příslušná dokumentace obsahuje také fotografie nebo jiné obdobné vyobrazení zdroje, obalu zdroje, přepravního obalu, zařízení nebo vybavení. Fotografie nebo jiné obdobné vyobrazení zdroje není třeba, nelze-li ji pořídit nebo opatřit bez demontáže zařízení. Ustanovení tohoto odstavce se nevztahují na úložiště radioaktivních odpadů ani na uznávaný sklad.

(11) Osoba, která má v držbě vysokoaktivní záříč, bez zbytečného prodlení oznámí Úřadu krádež, ztrátu nebo neoprávněné použití záříče a zajistí provedení zkoušky dlouhodobé stability podle § 71 po každé události, která mohla záříč poškodit. O této události a přijatých opatřeních informuje Úřad.

Dále je vhodné zmínit § 80 – Evidence zdrojů ionizujícího záření u držitelů povolení, kde v odstavci 2 bylo přidáno písm. j) – Držitel povolení vede o každém zdroji ionizujícího záření, který má ve své držbě tyto údaje: u vysokoaktivních záříčů také fotografie nebo jiné obdobné vyobrazení v případech, kdy je to vyžadováno podle § 33 odst. 8 nebo 9.

Kromě výše uvedených podmínek, ve kterých je pojem vysokoaktivní záříč přímo uveden, tyto záříče dále spadají pod soubor pravidel a podmínek týkajících se zdrojů ionizujícího záření obecně a samozřejmě také uzavřených radionuklidových záříčů, neboť do obou těchto skupin jsou vysokoaktivní záříče logicky zařazeny (viz kapitola 1.1). Podmínky, které jsou stanoveny pro tyto skupiny, tedy zejména podmínky a požadavky pro nakládání a používání zdrojů, jejich evidenci, skladování, likvidaci, atd., a také zabezpečení se vztahují i na HASS, pouze zde pojem vysokoaktivní záříč není přímo zmíněn. Nebezpečí odcizení či ztráty zdroje je například uvedeno v § 24 – Obecné podmínky bezpečného provozu:

(7) Zdroje ionizujícího záření se skladují bezpečně a tak, aby bylo zajištěno, že s nimi nebudou nakládat neoprávněné osoby, a bylo bráněno ztrátě či odcizení zdroje anebo jeho poškození.

Lze tedy říci, že podmínky a požadavky na zabezpečení záříčů, respektive vysokoaktivních záříčů, jako i jiné požadavky z hlediska bezpečnosti, v české legislativě uvedeny jsou. Přesto je však nutné dodat, že ne v takové míře jak jsou uváděny v jednotlivých mezinárodních doporučeních. Zejména požadavky na kategorizaci a následný odstupňovaný přístup k úrovni zabezpečení nikde zmíněn není. Míra zabezpečení tedy v současné době není blíže specifikována a teoreticky je v ČR

aplikovatelný stejný princip zabezpečení na pátou kategorii jako na kategorii první. Z právního hlediska pak může být problematické požadovat na držiteli povolení, který nakládá s HASS 1. kategorie vyšší stupeň zabezpečení, nežli na držiteli povolení, který nakládá s HASS např. 2. nebo 3. kategorie. (1, 2)

2 VÝZKUMNÉ OTÁZKY A METODIKA VÝZKUMU

Vzhledem k tomu, že zkoumaný jev dosud nebyl souhrnným způsobem zpracován a dostupné informace jsou převážně v cizojazyčné literatuře, jedná se o práci spíše teoretického charakteru, přičemž se nestanovuje hypotéza, ale tzv. výzkumná otázka. Pro účely této práce byly stanoveny celkem dvě výzkumné otázky:

1. „Představují vysokoaktivní zářiče využívané na území ČR (zejména jejich celkové množství, rozsah a způsoby použití) potenciální hrozbu z hlediska jejich možného zisku a následného zneužití například teroristickou organizací?“

2. „Je nutné se, vycházejíce ze znalosti současného stavu nakládání s vysokoaktivními zářiči, průběžně nadále zabývat zabezpečením těchto zářičů na území ČR z hlediska prevence jejich potenciálního zneužití například teroristickou organizací?“

Úkolem, který se vázal k první formulované otázce bylo shrnout dostupné informace o vysokoaktivních zářičích nacházejících se na území České republiky, zejména o jejich celkovém množství a o způsobech a rozsahu jejich využití. Výzkum pak probíhal na základě shromáždění dat s využitím celostátních registrů zdrojů ionizujícího záření, který je pod správou Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Takto shromážděná data byla poté zpracována a následně byl vytvořen přehled vysokoaktivních zářičů evidovaných na území ČR zahrnující počty zářičů, oblasti jejich využití, druhy radionuklidů, aktivity, aj. Na základě zjištěných skutečností a také po konzultaci s odborníky bylo možné částečně zhodnotit, zda vysokoaktivní zářiče v ČR mohou představovat hrozbu z hlediska jejich možného zisku a následného zneužití například teroristickou organizací.

Úkolem, vázaným k druhé výzkumné otázce pak byla zejména syntéza dostupných informací o vysokoaktivních zářičích k utvoření potřebného náhledu na tuto problematiku, dále syntéza informací z mezinárodních doporučení a také legislativy ČR v vztahu k těmto doporučením. Po ucelení všech získaných informací a po konzultaci

s odborníky bylo v jisté návaznosti na první výzkumnou otázku možné provést zhodnocení, zda je nutné se průběžně nadále zabývat zabezpečením vysokoaktivních zářičů na území ČR z hlediska prevence jejich potenciálního zneužití například teroristickou organizací.

Pro snadnější pochopení závěrů mezinárodních doporučení a jako demonstraci zde kladených požadavků na zabezpečení byl dále v této práci zpracován návrh na zabezpečení konkrétního pracoviště, které s vysokoaktivními zářiči nakládá.

3 VÝSLEDKY

3.1 Návrhy zabezpečení na pracovištích s HASS

3.1.1 Postup zabezpečení pro hypotetické pracoviště s HASS (I. kategorie)

V této části se budeme zabývat návrhem zabezpečení konkrétního typu zařízení s vysokoaktivním zářičem. Uvažujeme jeho umístění na hypotetickém pracovišti, avšak s reálnými parametry.

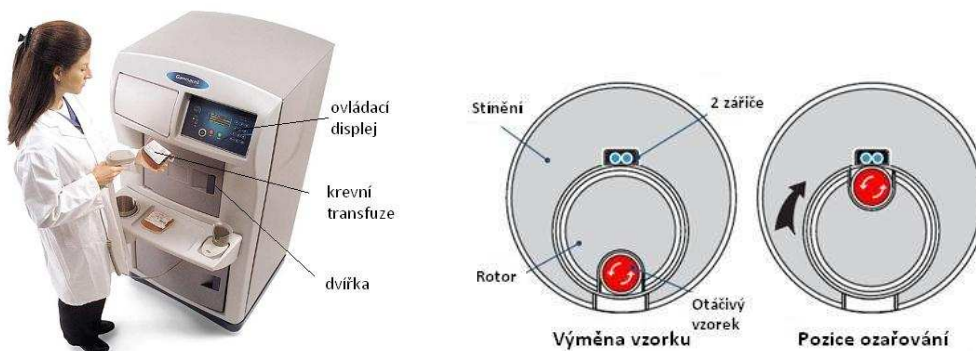
3.1.1.1 Typ, popis zařízení a způsob jeho použití

Uvažujme konkrétní zařízení typu Gammacell 3000 Elan, typ II (obrázek 20) (9). Jedná se o typický ozařovač krve, využívaný k ozáření transfuzí. V zařízení se nachází 2 zářiče s Cs-137 ve formě chloridu cesného (CsCl) o celkové aktivitě v době nákupu 107,4 TBq (každý zářič má aktivitu 53,7 TBq, jsou umístěny těsně vedle sebe). Velikost celého zařízení je 1550 mm (výška) x 800 mm (šířka) x 980 mm (délka). Celková hmotnost 1479 kg. Nádoba pro umístování vzorků je 194 mm vysoká a má 124 mm průměr, objem 2,4 litru. Krevní transfúze se vždy umístí do této nádoby a vloží do dvířek zařízení. Elektromechanicky se pak v dutině zařízení nádoba přemístí k těsné blízkosti zářičů (obrázek 21). Elektronicky je také možné navolit celkovou dávku ozáření, kterou daný vzorek krve obdrží. Toto je regulováno dobou ozařování, která se pohybuje nejčastěji mezi 2 až 6 minutami. Například pro průměrnou dávku 30 Gy ve vzorku, je ozařovací čas cca 3 min. V průběhu ozařování dále dochází k otáčení vzorků z důvodu uniformního rozložení dávky ve vzorku, i tak se přesná dávka v různých oblastech vzorku může lišit +/- 7 Gy.

Zářiče jsou v zařízení pevně uchyceny a v žádném případě nemůže dojít k jejich uvolnění popřípadě k jejich snadnému vyjmutí, aniž by bylo nutné zařízení nějak rozebírat. Při výměně zářičů například z důvodu poklesu aktivity je nutné provádět výměnu celého stínícího kontejneru, tedy v podstatě téměř celého zařízení.

Jako další bezpečnostní prvek je k použití ozařovače nutný klíč, který však v praxi bývá umístěn někde v blízkosti ozařovače.

Obrázky 20, 21 – Krevní ozařovač Gammacell 3000, systém ozařování.



3.1.1.2 Výpočet kategorizace dle IAEA a bezpečnostní skupina

S využitím informací o zařízení je nutné provést kategorizaci zdroje v souladu s dokumentem Categorization of Radioactive Sources ze série Bezpečnostních standardů IAEA (viz. kapitola 1.5.1.2) a tak nalézt adekvátní úroveň zabezpečení.

Zařízení obsahuje radionuklid Cs-137 o celkové aktivitě 107,4 TBq. Dle dokumentu EPR-D-Values je u Cs-137 hodnota D rovna 1×10^{-1} (tabulka 5), z čehož vyháází poměr $107,4 / 0,1 = 1074 > 1000$. Dle tabulky č. 6 zjistíme, že v případě výsledného A/D poměru vyššího než 1000 je zdroj zařazen do I. kategorie, tedy nejnebezpečnější. I. kategorii odpovídá bezpečnostní skupina A (viz. kap. 1.5.1.3), tedy nejvyšší stupeň zabezpečení, přičemž je nutné zabránit neautorizovanému přemístění zdroje a zajistit okamžitou detekci jakéhokoli neautorizovaného přístupu ke zdroji.

3.1.1.3 Analýza možnosti neautorizovaného přemístění a zneužití zdroje

Rozbor možností neautorizovaného přemístění nebo zneužití zdroje vychází z konkrétních mechanických, chemických a fyzikálních vlastností radionuklidu a jeho formy, způsobu jeho uzavření, způsobu umístění zdroje v zařízení, mobility zařízení, možností neautorizovaného přístupu, atd. Úkolem bezpečnostních opatření je vždy

v první řadě zamezit získání zdroje. V tomto případě je zdroj možné získat několika způsoby:

- krádeží celého zařízení. Vzhledem k hmotnosti celého zařízení by musel útočník disponovat technickým zázemím, jako je nakládací technika a technika k přepravě zařízení z budovy ven, a dále nákladní automobil.
- demontáží stínícího kontejneru se zdrojem ze skříně zařízení. Jsou nutné znalosti a opět je třeba speciálního nářadí a technického zázemí, neboť stínící kontejner má velkou hmotnost.
- demontáží zdroje samotného přímo ze stínícího kontejneru. V tomto případě hrají velkou roli znalosti a předpokládá se nutnost vlastnit nějaký menší přepravní kontejner, neboť přeprava nestíněného zdroje by měla pro útočníka brzy fatální následky.

Z bezpečnostních hledisek se dále uvažuje sabotáž, například aplikací výbušnin na zařízení přímo na pracovišti. Výbuchem by mohlo dojít k rozptýlení radionuklidu do prostředí, což může mít teoreticky fatální dopady, neboť toto zařízení se v naprosté většině případů vyskytuje v nemocnicích, kde se pohybuje velké množství lidí. Vzhledem k masivní konstrukci stínícího kontejneru je však nepravděpodobné, že výbušnina poškodí zařízení a stínící kontejner takovým způsobem, aby došlo k úniku radionuklidu.

Jedinou možností jak zdroj zneužít je tedy jeho vyjmutí ze zařízení a následné umístění zdroje například na místě s vysokým počtem osob (hromadná doprava, nákupní centra, atd.), kde může zdroj způsobit značné deterministické poškození, zejména u osob, které by se vyskytovaly v jeho blízkosti delší dobu. Velmi záleží na okolnostech, ale není vyloučeno ani úmrtí. Další cestou zneužití je rozptýlení radionuklidu do prostředí například za pomoci výbušniny (špinavá bomba), nebo chemickou cestou kontaminací vody nebo potravin.

3.1.1.4 Umístění zařízení a návrh zabezpečení

Je nutné mít dostatek přehledných informací o umístění zařízení, což zahrnuje plány a půdorysy nejen místnosti, v níž je zařízení umístěno, ale také celého patra, budovy, popřípadě i komplexu budov. Je třeba zjistit a zhodnotit možnosti vstupů a výstupů nebo příjezdů k zařízení a to i na úrovni celého areálu nemocnice.

Budeme uvažovat, že ozařovač je užíván nemocnicí ve větším okresním městě. Celý komplex budov nemocnice je jasně ohraničen zdmi, budovami a plotem, avšak přes brány stále volně přístupný s osobním vozidlem nebo dodávkou. Budova s ozařovačem se nachází ve středu celého nemocničního komplexu a je součástí menšího areálu ohraničeného plotem (viz obrázek 22). Na jižní straně tohoto areálu se nachází hlavní vjezd a vchod, přičemž oba přístupy jsou kontrolovány vrátnicí. Na západě je budova nemocničního oddělení a vyšetřoven, přičemž přístup z budovy na dvůr je určen pouze pro personál. Na severní a východní straně areálu se nachází drátěný plot. Ozařovač je umístěn v místnosti obsluhujícího personálu, která se nachází v části budovy kam má přístup jen nemocniční personál. Možnosti vstupu do této budovy jsou vchodem A, vchodem B a vchodem ze dvora. O jakémkoli přístupu do budovy je informována vrátnice, kde se musí neustále nacházet minimálně jeden vrátný, který je zároveň příslušníkem bezpečnostní služby. Přes den jsou všechny vchody odemčené, v noci uzamčené. Přístup do místnosti, v níž je umístěn ozařovač (viz obrázek 23) je přes místnost obsluhujícího personálu.

Pro úspěšné provedení správných bezpečnostních opatření pro tento krevní ozařovač je nutné splnit cíle stanovené pro bezpečnostní skupinu A, jak již bylo řečeno výše. Tedy,

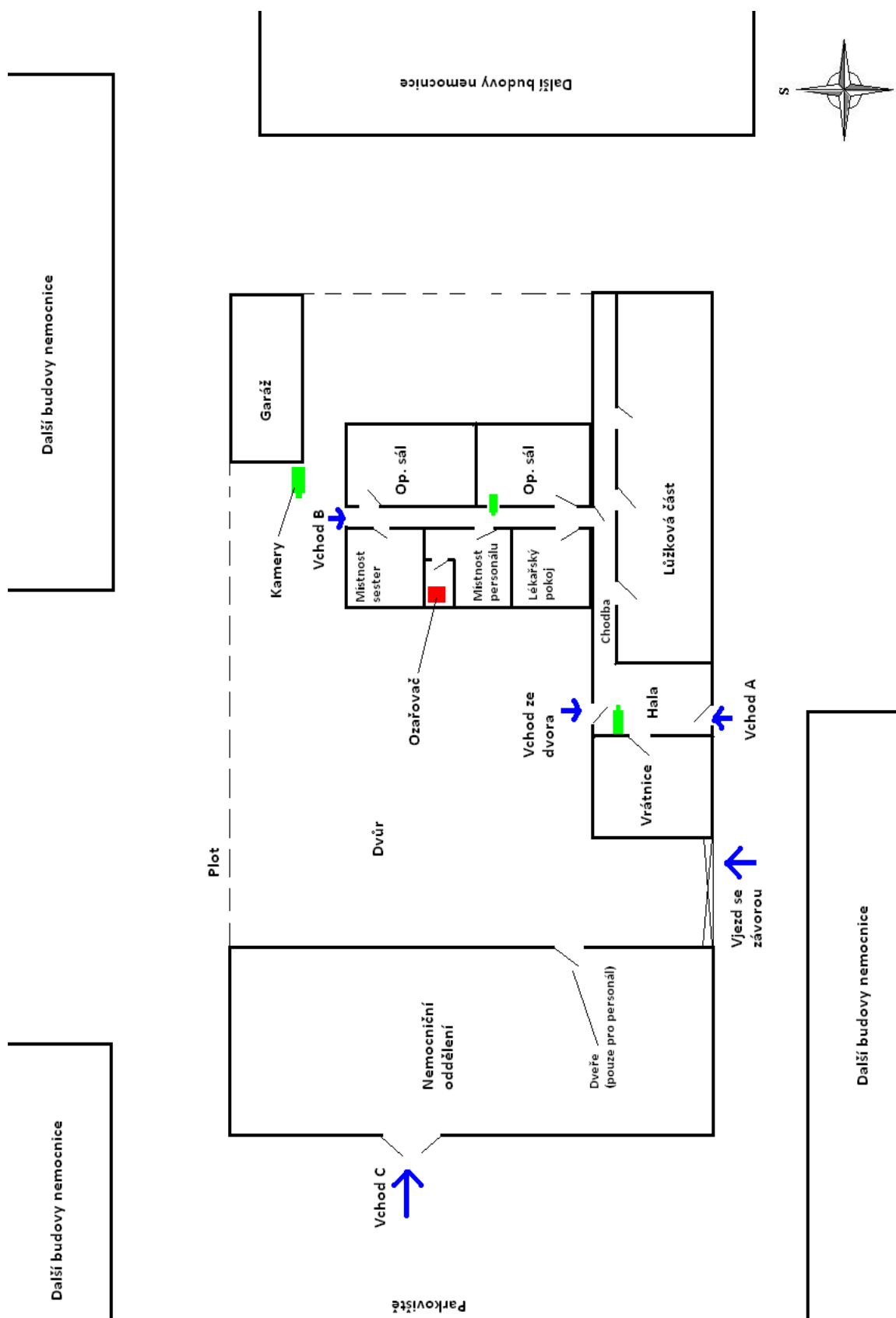
- zabránit neautorizovanému přemístění zdroje,
- zajistit okamžitou detekci jakéhokoli neautorizovaného přístupu ke zdroji,
- zajistit okamžitou detekci jakéhokoli pokusu o neautorizované přemístění,
- zajistit neprodlené zjištění příčiny poplachu a konkrétní situace v místě zdroje, důležitou roli hraje čas,

- zajistit neprodlenou komunikaci se zásahovou jednotkou,
- zajistit zdržení přístupu potenciálního útočníka s dostatečným časovým prostorem pro přerušení útoku,
- zajistit okamžitý zásah při poplachu a zjištěné situaci k okamžitému přerušení útoku.

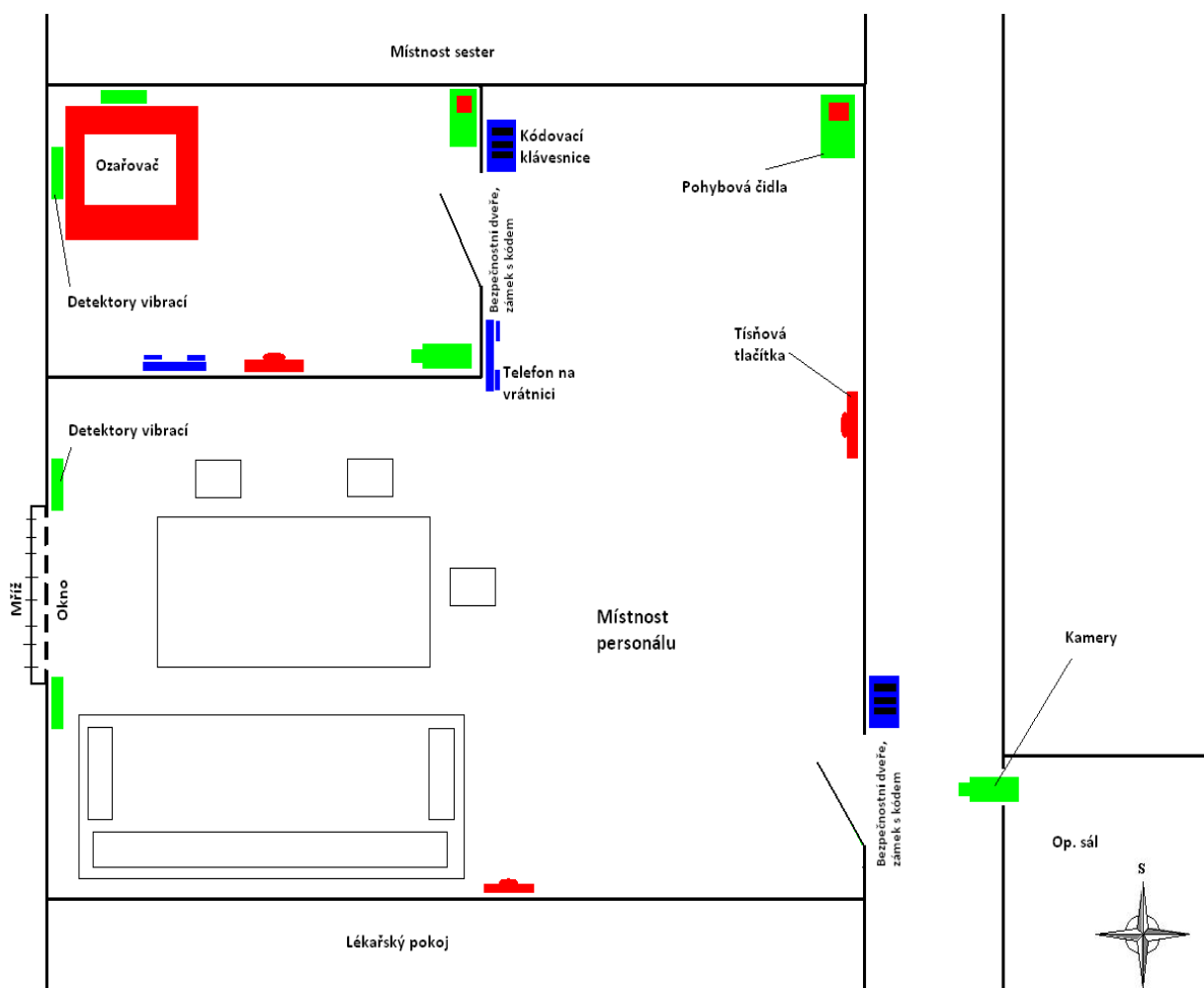
Pro naplnění těchto požadavků je v místnosti ozařovače, ale i přilehlých místnostech a celém areálu, soubor technických a organizačních opatření a prostředků, které na sebe různě navazují a doplňují se.

Okamžitá detekce neautorizovaného přístupu ke zdroji je v tomto případě zajištěna na několika úrovních více druhy senzorů. Signály ze senzorů jsou přijímány ve vrátnici a částečně zároveň u ústředí soukromé bezpečnostní služby nebo policie. Každá příchozí cesta je osazena minimálně jednou kamerou. Přímo k ozařovači je možné se dostat pouze přes bezpečnostní dveře vybavené kódovacím elektromagnetickým zámkem, přičemž při jejich porušení je spuštěn poplachový signál na vrátnici a zároveň na policii. Při nečinnosti ozařovače jsou dveře zakódovány a v ozařovací místnosti je spuštěno pohybové čidlo se signalizací do vrátnice a na policii. V případě nepřítomnosti obsluhujícího personálu v jeho místnosti jsou dveře do této místnosti opět vždy zakódovány a je spuštěno pohybové čidlo stejně jako v ozařovací místnosti. V případě rozbití okna nebo poškození mříží reagují ihned okenní detektory vibrací. O okamžitou detekci jakéhokoli pokusu o neautorizované přemístění zdroje se pak starají detektory vibrací umístěny přímo na ozařovači, v případě jejich spuštění dojde navíc k okamžitému uzamčení dveří do ozařovací místnosti, stejnou funkci mají i detektory instalované uvnitř ozařovače k jejichž spuštění dojde v případě pokusu o narušení krytu. Pro neustálou kontrolu situace a v případě poplachu je možné průběžně zhodnotit jeho příčinu prostřednictvím kamer. V případě, že by došlo k ohrožení obsluhujícího personálu nebo jiných osob, nachází se v ozařovací místnosti a místnosti personálu tísňová tlačítka a také telefony s přímým spojením na vrátnici a na policii. Jako další prostředek ochrany je interní nařízení provádět ozařování vždy minimálně ve dvou.

Obrázek 22 – Plánek nemocničního areálu s umístěním místnosti s ozařovačem.



Obrázek 23 – Přiblížení místnosti s ozařovačem s uvedenými bezpečnostními prvky



3.1.2 Postup zabezpečení pro hypotetické pracoviště s HASS (II. kategorie)

V další části uvedeme nejtypičtější příklad vysokoaktivního zářiče II. kategorie – zařízení pro průmyslovou radiografii (defektoskopický projektor/kamera). Opět budeme uvažovat hypotetické pracoviště s tímto zařízením a předmětem bude návrh zabezpečení dostatečně vysoké úrovně.

3.1.2.1 Typ, popis zařízení a způsob jeho použití

Budeme uvažovat jedno z modernějších zařízení, které je v současné době zároveň jedno z nejrozšířenějších, a to zařízení typu Sentinel, konkrétně 880 Delta (obrázky 24, 25) (15). Jedná se o přenosné zařízení určené k prozařování kovových materiálů zejména na místech bez možnosti přístupu k elektrické energii. Toto zařízení může obsahovat několik druhů radionuklidů, které se volí zejména podle očekávaného způsobu použití, což souvisí s tloušťkami nejčastěji prozařovaných materiálů. Typicky se vyskytují radionuklidy, Yb-167, Co-60, Se-75 nejčastěji však Ir-192. Uvažujme tedy celkem dvě zařízení, přičemž jedno je osazeno Ir-192 o celkové aktivitě v době nákupu 5.55 TBq a druhé Se-75 o celkové aktivitě v době nákupu také 5.55 TBq. Celkové rozměry zařízení jsou 229 mm (výška) x 191 mm (šířka) x 338 mm (délka), celková hmotnost 23,6 kg. Převážnou část zařízení tvoří stínicí kryt, který je vyroben z ochuzeného uranu, dávkový příkon těsně na povrchu zařízení obvykle dosahuje zlomky mSv/hod. Uvnitř zařízení se nachází dutina ve tvaru písmene S („S chodba“) která slouží k bezpečnému uložení zářiče. Vysunutí zářiče se pak provádí z bezpečné vzdálenosti pomocí přípojných kabelů (bowdenů), které typicky dosahují délky několika metrů. Jedná se o tzv. výjezdový kabel, v němž se zářič pohybuje, a o tzv. ovládací kabel, na jehož jednom konci se uchytlí zářič s lankem a na druhém se nachází naviják pro vysouvání a zasouvání zářiče (viz také kapitola 1.2.3.1). Aby nedocházelo k mechanickému opotřebování „S chodby“ při vyjíždění a zajíždění zářiče, je chodba vyrobena z titanové trubice.

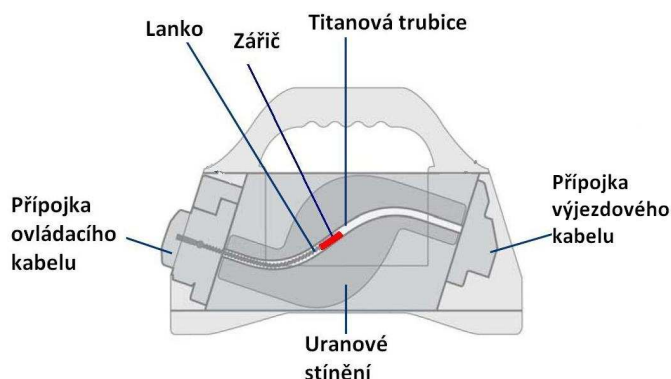
Na rozdíl od výše zmíněného ozařovače krve se tedy u tohoto zařízení se zářičem a zařízením přímo manipuluje a vznikají tak potenciálně nebezpečné situace, které mohou vyústit k nehodě nebo k možnosti ztráty či odcizení zářiče nebo i celého zařízení. Dalším faktorem je, že zařízení není stacionární, ale přenosné a nastávají tak tři různé situace výskytu zařízení. A to:

- skladování v objektech při nečinnosti zařízení,
- přeprava na místo, kde bude se zařízením nakládáno a zpět,
- použití v terénu.

Při každé této situaci opět vznikají potenciální možnosti nehod nebo možnosti odcizení a ztráty mnohem více než při činnostech jiných.

Obrázek 25 – vnitřní struktura Sentinelu 880 Delta

Obrázek 24 – Sentinel 880 Delta.



3.1.2.2 Výpočet kategorizace dle IAEA a bezpečnostní skupina

Jak již bylo řečeno výše, zařízení obsahují radionuklidy Ir-192 o celkové aktivitě 5,55 TBq a Se-75 o celkové aktivitě 5,55 TBq. Jestliže se na jednom pracovišti nacházejí dva a více zářičů, je nutné provést výpočet kategorizace jako celkovou sumu podílů A/D u jednotlivých zářičů. V dokumentu EPR-D-Values přísluší Ir-192 D hodnota 8×10^{-2} a Se-75 hodnota 2×10^{-1} (také tabulka 5). Podíl aktivity A a hodnoty D je $5,55 / 0,08 = 69,375$ pro Ir-192 a $5,55 / 0,2 = 27,75$ pro Se-75. Součet jednotlivých podílů je $69,375 + 27,75 = 97,125$. Výsledný A/D poměr je tedy menší než 1000, ale zároveň větší než 10. Dle tabulky 6 zařadíme zdroje do II. kategorie, přičemž této kategorii odpovídá bezpečnostní skupina B. Nároky na bezpečnostní opatření jsou tedy o něco nižší než u skupiny A, avšak v praxi se ve výsledku příliš neliší. Obecně lze říci, že na zdroje zařazené do bezpečnostní skupiny A se nahlíží, jako na ty nejnebezpečnější, a bezpečnostní opatření u nich musí být dostatečná k tomu, aby se zdroj nemohl v žádném případě dostat do nepovolaných rukou (maximální zabezpečení). U zdrojů spadajících do skupiny B lze říci, že bezpečnostní opatření nemusí dosahovat takové úrovně jako u A (nemusí být maximální). Zdroje skupiny B například nemusí být od neoprávněného přístupu odděleny minimálně dvěma technickými zabezpečeními, aj. Ve výsledku je

však konkrétní nainstalované zabezpečení u obou skupin velmi podobné, neboť většina bodů nutného zabezpečení, které jsou uvedeny u skupiny B se v podstatě shoduje s body ve skupině A.

3.1.2.3 Analýza možnosti neautorizovaného přemístění a zneužití zdroje

Stejně jako v předchozím případě u ozařovače krve, i zde musíme vycházet z konkrétních mechanických, chemických a fyzikálních vlastností radionuklidu a také způsobu jeho uzavření, způsobu umístění zdroje v zařízení, mobility zařízení, atd. V tomto případě se však jedná o diametrálně odlišné zařízení a mohou nastat diametrálně odlišné situace. Chceme-li aplikovat správné bezpečnostní prvky, musíme opět analyzovat možnosti získání zářiče. Ten je možné získat následujícími způsoby:

- krádeží celého zařízení. Tento způsob je pro potenciálního útočníka pravděpodobně nejvýhodnější. Zařízení, ve chvíli kdy se nepoužívá a zářič se nachází uvnitř, je velice kompaktních rozměrů i váhy (viz. výše) a je tedy poměrně snadným cílem. V případě, že je zrovna zařízení využíváno (v průběhu prozařování), jsou k základnímu stínicímu krytu (obrázek 24) připojeny ovládací a výjezdové kabely. Jejich odpojení by potenciálnímu útočníkovi, který zařízení jinak nezná, pravděpodobně mohlo dělat problém. Dále se v průběhu prozařování zářič nachází na konci výjezdového kabelu v tzv. kolimátoru, je tedy nutné s ním nejdříve zajet zpět do krytu, což může neznalému útočníkovi opět činit problémy.
- krádeží samotného zářiče. K tomuto způsobu odcizení je podobně, jako tomu bylo u výše zmíněného ozařovače krve, nutné vlastnit přepravní kontejner a nějaké základní nástroje pro manipulaci, chce-li potenciální útočník zajistit svoji bezpečnost. Jak již bylo řečeno výše, v průběhu nečinnosti zařízení jsou ovládací a výjezdové kabely odpojeny, útočník tedy musí znát způsob manipulace s celým zařízením, protože musí být schopen k zařízení připojit minimálně ovládací kabel, bez něhož nejde se zářičem vyjet. Je však možné zářič odcizit

(například odříznutím) i v průběhu činnosti se zařízením, když se zářič nachází na konci výjezdového kabelu (v kolimátoru).

Na rozdíl od ozařovače krve, který jako celé zařízení jakož i samotný zářič za běžně předvídatelných podmínek odcizit v podstatě nešlo, defektoskopický projektor a jeho zářič lze odcizit daleko snadněji, a to hned několika způsoby.

Možnosti zneužití zářiče jsou pak v podstatě stejné jako u již zmíněného ozařovače krve. Ovšem v tomto případě je celková aktivita zářiče téměř 20x nižší, lze tedy (například při umístění na veřejném místě) očekávat o něco menší riziko úmrtí nebo vzniku deterministických účinků. Je však třeba zdůraznit, že se stále jedná o velmi silný a nebezpečný zářič přímo ohrožující život a zdraví.

3.1.2.4 Umístění zařízení a návrh zabezpečení

Uvažujme, že zařízení využívá střední firma (cca 30 zaměstnanců) zabývající se zejména kovovýrobou, svářením a také radiografickou defektoskopií. Hlavní náplní defektoskopie je kontrola svarů a vnitřní struktury výrobků u nichž se vyžaduje nejvyšší kvalita. Jak již bylo řečeno výše, defektoskopická zařízení se mohou nacházet celkem ve třech stavech:

- 1) skladování při nečinnosti a používání v prostorách firmy
- 2) přeprava na místo, kde bude se zařízením nakládáno a zpět
- 3) použití zařízení v terénu

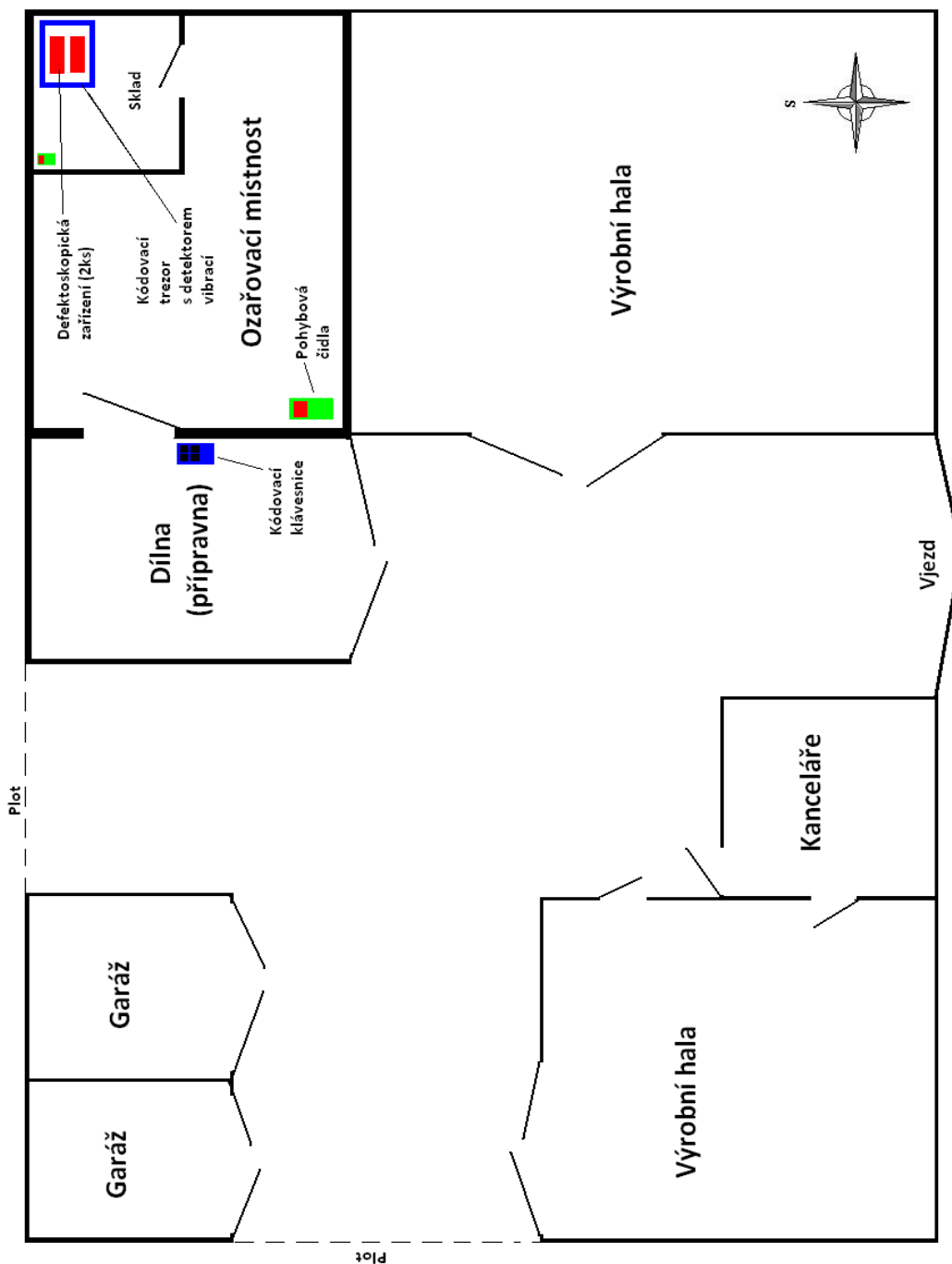
Ad 1) Areál firmy se nachází v průmyslové části na okraji krajského města. Rozměry areálu jsou cca 50m x 40m (viz obrázek 26). Celý prostor areálu je ohraničen budovami a částečně drátěným plotem. Vjezd do areálu je skrze vrata, která jsou přes noc, kdy se v areálu nikdo nevyskytuje, uzamčena. Defektoskopická zařízení nacházející se ve areálu jsou celkem dvě a v případě nečinnosti jsou skladována v severovýchodním rohu areálu v trezoru o hmotnosti cca 600 kg. Dveře trezoru jsou opatřeny

elektromagnetickým kódovacím zámkem a detektory vibrací, které jsou nastaveny na takovou citlivost, aby spustily v případě jakéhokoli pokusu o mechanické probourání se do trezoru nebo pokusu o jeho přemístění. Signály z detektorů jsou vedeny do ústředí soukromé bezpečnostní agentury nebo na policii (platí i pro čidla pohybu – viz. níže). Trezor je umístěn ve skladu, do něhož je umožněn přístup pouze přes ozařovací místnost, kde se opět nachází pohybové čidlo, přičemž vstup do ozařovací místnosti je opatřen bezpečnostními dveřmi s elektromagnetickým kódovacím zámkem. Dále v případě signalizace z pohybového čidla ve skladu a zároveň z detektorů vibrací na trezoru dojde okamžitě k uzamčení těchto bezpečnostních dveří za účelem zadržení potenciálního útočníka. V případě nečinnosti jsou zařízení vždy uložena v trezoru. V případě činnosti dochází k jejich používání pouze v ozařovací místnosti, která je pro tyto účely stavebně vybavena zejména dostatečně silnými zdmi a barytovou omítkou. Z hlediska bezpečnosti je dále nutné provádět defektoskopické práce vždy minimálně ve dvou.

Ad 2) Transport zařízení na místo, kde s ním bude nakládáno a zpět je velmi riziková situace, a to jak z hlediska potenciálního útoku za účelem zmocnění se zařízení, tak z hlediska potenciálních dopravních nehod při kterých může dojít k nežádoucímu ohrožení obyvatel. Firma vlastní celkem dva dodávkové automobily, přičemž k převozu defektoskopických zařízení musí být použity výhradně tyto, jiné automobily nikoli. Převoz musí být uskutečňován minimálně ve dvou. Před zahájením jízdy jsou vždy pracovníci povinni uzamknout defektoskopické zařízení do přepravního kontejneru, který je pevně spojen s vozidlem a z tohoto kontejneru ho vyjmout bezprostředně před zahájením defektoskopických prací na místě, a to pouze na dobu nezbytně nutnou. Dále je zakázáno vzdalovat se od vozidla nebo ho opouštět. Je-li to nutné může se jeden pracovník vzdálit (opět jen na dobu nezbytně nutnou), přičemž druhý vždy zůstává u vozidla. Pracovníci jsou dále povinni při přepravě u sebe neustále nosit mobilní telefon. Automobil je vybaven zařízením GPS, které neustále odesílá informace o poloze na ústřednu soukromé bezpečnostní služby nebo policie. Kromě výše zmíněným opatřením samozřejmě celý transport podléhá pravidlům evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí – ADR.

Ad 3) Samotné použití zařízení v terénu musí být, jak již bylo řečeno výše, prováděno pouze po dobu nezbytně nutnou. Opět je nutná přítomnost minimálně dvou pracovníků, kteří musí mít s sebou mobilní telefony. V průběhu prozařování navíc musí mít pracovníci zařízení neustále na dohled a zbytečně se od něj nevzdalovat.

Obrázek 26 – Areál defektoskopické firmy s umístěním defektoskopických zařízení.

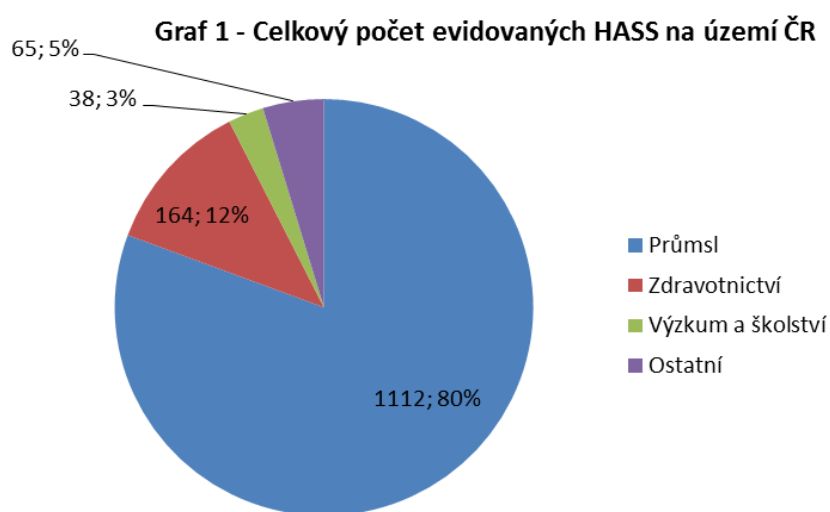


3.2 Vysokoaktivní zářiče na území ČR

V této části je uveden přehled vysokoaktivních zářičů, které se nacházejí na území České republiky, jejich rozdělení, počty, oblasti využití, atd. Zpracovávání tohoto přehledu probíhalo s využitím celostátních registrů zdrojů ionizujícího záření, který spadá pod působnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost podle § 3 odst. 2 písm. o) zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. Všechny níže uvedené údaje jsou platné k datu 1.3.2013 (pozn.: celkový počet zářičů se v historii cca 10 let měnil v rozmezí +/- cca 200 zářičů).

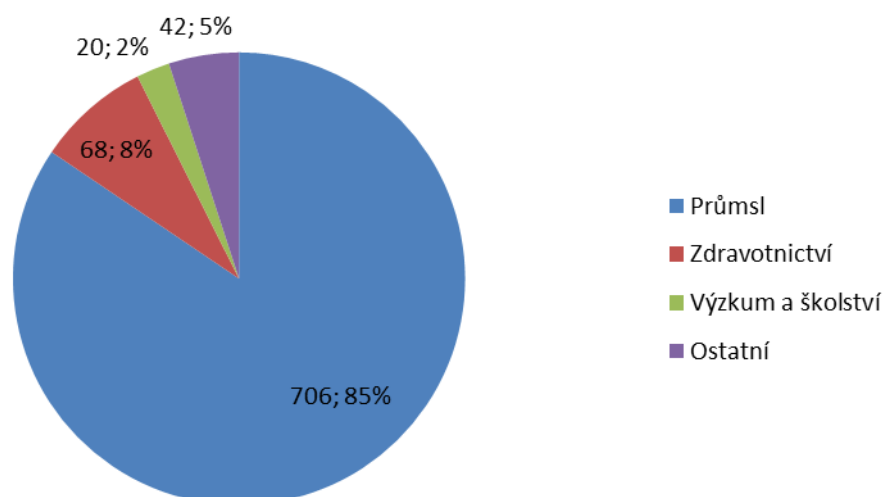
Celkem se na území České republiky k datu 1.3.2013 nachází počet 1379 vysokoaktivních zářičů. Oblasti, ve kterých se v ČR tyto zářiče využívají jsou průmysl, zdravotnictví, výzkum/školení a ostatní oblasti (ostatní oblasti zahrnují většinou kalibrační zářiče v jiných oblastech lidské činnosti nebo blíže nespecifikované zářiče).

V grafu 1 je znázorněno zastoupení jednotlivých oblastí na celkovém počtu HASS. Je patrné, že největší zastoupení 1112 zářičů (80 %) má jednoznačně oblast využití v průmyslu, což je způsobeno zejména často se vyskytujícími defektoskopickými zařízeními. S celkovým počtem 164 zářičů (12%) je dále uvedena oblast zdravotnictví, oblasti výzkumu a školství odpovídá celkem 38 zářičů (2,7%) a oblasti ostatního využití 65 zářičů (4,7%).



Výše zmíněné hodnoty reprezentují celkové počty všech záříčů, které jsou na území české republiky v současné době evidovány. Neshodují se však s počtem záříčů, které jsou reálně aktivně využívány, neboť mnoho záříčů je již například v procesu likvidace nebo dlouhodobě skladováno a nevyužíváno (bude ještě vysvětleno níže). V grafu 2 jsou z tohoto důvodu uvedeny hodnoty tentokrát pouze aktivně využívaných záříčů. Vidíme, že celkové číslo využívaných záříčů je 836, což odpovídá cca 60% z celkového počtu 1379 záříčů evidovaných, dále je patrné, že například ve zdravotnictví se absolutní hodnota celkově evidovaných a skutečně využívaných záříčů liší více než o polovinu.

Graf 2 - Reálně aktivně používané HASS v ČR

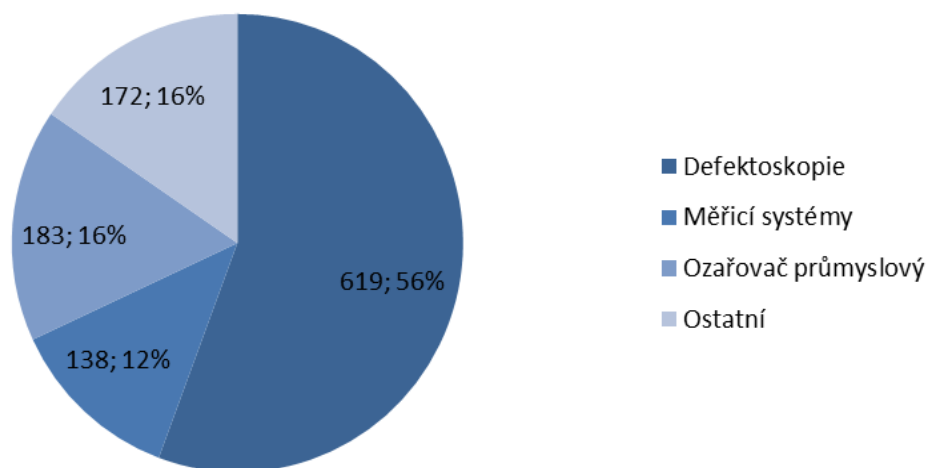


V grafu 3 je podrobněji zobrazeno rozdělení oblasti průmyslu. Vidíme, že 55% této oblasti tvoří záříče využívané v defektoskopii (celkem 619). Toto číslo je však opět mírně zavádějící, neboť všech 619 záříčů není aktivně používáno. V rámci evidence je ke každému záříči přiřazena oblast využití, přičemž tato oblast se do doby zlikvidování záříče nemění. To znamená, že záříč například Ir-192 původně využívaný v defektoskopii, který však již dosáhl nízkých aktivit a není možné ho nadále v defektoskopickém zařízení používat a v současné době je skladován nebo čeká na proces likvidace, je stále označen jako defektoskopický záříč a logicky je tedy v této

skupině stále zařazen. Tyto „již vyřazené zariadení“ tedy mohou tvořit poměrně významnou část z celkového počtu používaných zariadení. Konkrétně radionuklid Ir-192 je v této problematice početně významně zastoupen, neboť jeho poločas je cca 74 dní, jeho aktivita tedy relativně rychle klesá a zejména v defektoskopické oblasti dochází k častým výměnám a likvidacím těchto zariadení. Proces likvidace však může trvat delší dobu a tak vzniká skupina těchto „vyřazených zariadení“, která do celkového počtu Ir-192 významně přispívá. Počet Ir-192 reálně aktivně využívaných je zmíněn níže (graf č. 4)

Jako další oblast využití HASS v průmyslu je zde zmíněna oblast měřicích systémů s celkovým počtem 138 zariadení (12,4%), což zahrnuje zejména hladinoměry, hustoměry, karotáže atd. S celkovým počtem 183 zariadení (16,5 %) jsou dále zmíněny zariadení užívané v průmyslovém ozařování a počet 172 (15,4%) tvoří skupina „ostatní“ obsahující zejména kalibrační, blíže nespecifikované a dlouhodobě uskladněné a nevyužívané zariadení.

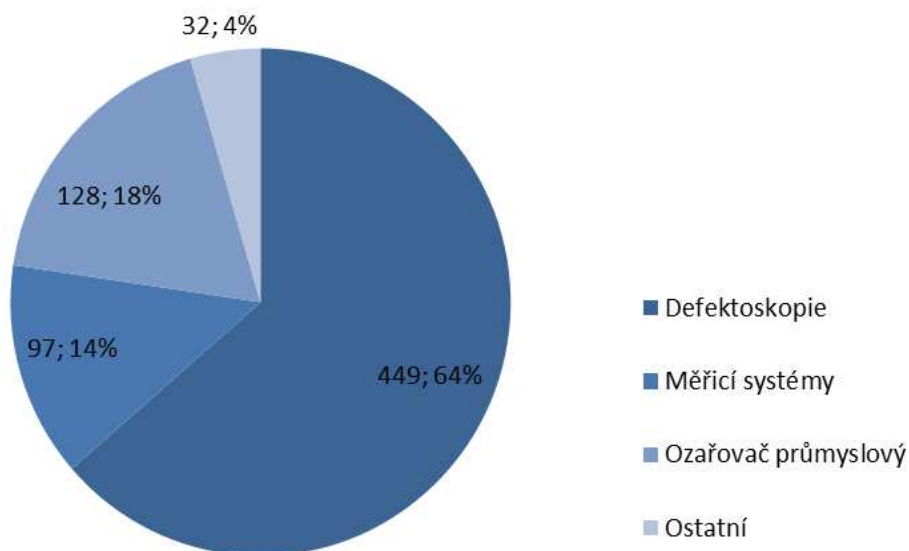
Graf 3 - Celkový počet evidovaných HASS v průmyslu



V grafu 4 jsou uvedeny pouze zariadení průmyslové oblasti, které jsou aktivně používány. Nejmenší podíl skutečně využívaných oproti evidovaným zariadením má oblast ostatní (pouze cca 20% z celkově evidovaných zariadení je skutečně využíváno). Dále je

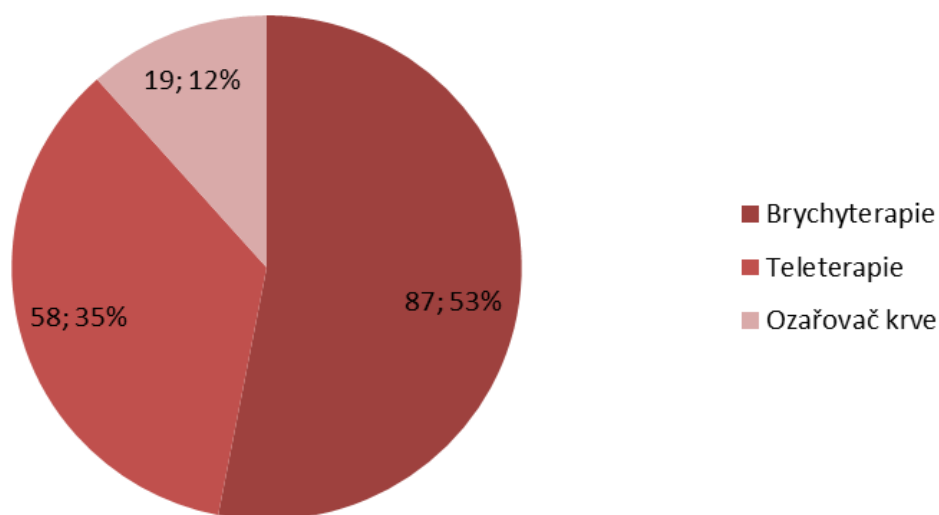
nutné upřesnit hodnotu 183, respektive 128 v oblasti průmyslových ozařovačů. Tato hodnota označuje počet zářičů, kterých se k průmyslovému ozařování využívá, nikoli počet průmyslových ozařovačů jakožto celých zařízení. Průmyslový ozařovač, tak jak je uváděn v kapitole 1.2.2.1, se na území české republiky vyskytuje jen jeden, konkrétně nedaleko Brna. Probíhá zde sterilizace zdravotnických prostředků, ozařování muzejních a jiných exponátů za účelem odstranění červotoče, úprava plastů, ošetřování koření a bylin, aj. Jsou zde využívány zářiče s radionuklidem Co-60, které jsou umístěny ve stojanu. Celkové množství zářičů ve stojanu se pohybuje cca kolem 120, přičemž jejich jednotlivé aktivity se pohybují mezi desítkami až cca tři sta TBq. Celková aktivita tak dosahuje několika (cca 10-20) PBq. Dávky u ozařovaných výrobků dosahují až 25 KGy. Kromě tohoto se ještě jeden průmyslový ozařovač nachází nedaleko Prahy, Zde se nejčastěji ozařuje nábytek napadený červotočem, popřípadě muzejní exponáty. Ozařování probíhá opět zářičem s radionuklidem Co-60, celková aktivita však dosahuje pouze zlomku aktivity ozařovače předchozího.

Graf 4 - Reálně aktivně používané HASS v průmyslu

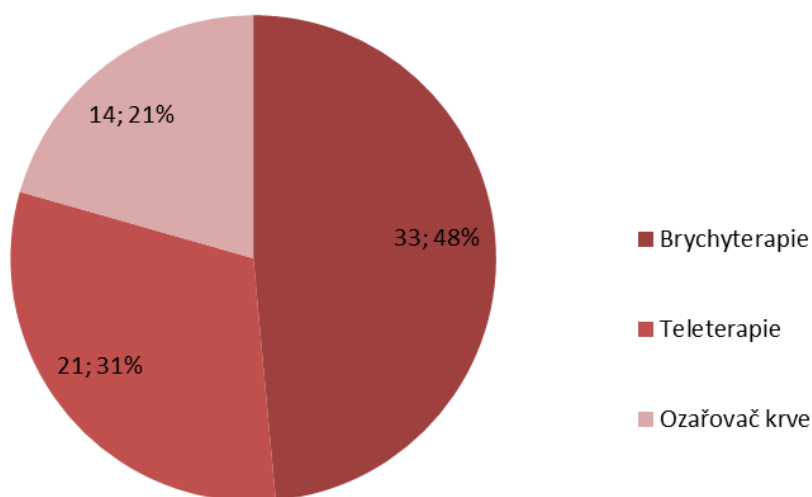


Graf 5 zobrazuje oblasti použití vysokoaktivních zářičů ve zdravotnictví. Celkem 87 zářičů (více než 50% této oblasti) je evidováno v brachyterapii, 58 zářičů (35,4%) v teleterapii a 19 zářičů tvoří ozařovače krve. Z grafu 6 je však patrné, že uvedené hodnoty celkového počtu evidovaných zářičů opět nekorrespondují s počty zářičů skutečně využívanými. V oblasti brachyterapie a teleterapie se aktivně využívá pouze cca 37% všech evidovaných zářičů. Toto souvisí zejména s klesající tendencí využívání radionuklidových zářičů v radioterapii obecně, zejména pak v klasické teleterapii. V současné době se spíše klade důraz na radioterapii generátory záření, tedy zejména urychlovači, a počty radionuklidových terapeutických jednotek tak klesají. Dále je třeba v této oblasti zmínit zařízení pro radiochirurgii – gamma nůž, kde se nachází celkem 200 zářičů Co-60 (každý o aktivitě 1,1 TBq), avšak jsou v tomto případě evidovány jako jeden. Výměna všech těchto zářičů totiž musí být provedena současně, a tak je lze z administrativního hlediska sjednotit. Gamma nůž se v České republice nachází pouze jeden.

Graf 5 - Celkový počet evidovaných HASS ve zdravotnictví



Graf 6 - Reálně aktivně používané HASS ve zdravotnictví



Na dalších grafech 7 a 8 (celkově evidované/opravdu aktivně používané) jsou znázorněny radionuklidy, které se na území České republiky ve vysokoaktivních zářičích vyskytují. Jednoznačně nejrozšířenějším radionuklidem je Ir-192 (657 celkem evidovaných zářičů), které je využíváno v defektoskopii, přičemž logicky se i celkový počet aktivně využívaných Ir-192 téměř shoduje s počtem aktivně používaných defektoskopických zářičů (graf 3). Další početně zastoupenou skupinou je Co-60 (celkem 420 evidovaných zářičů), který nachází široké uplatnění prakticky ve všech směrech, ve kterých se HASS využívají. Je však nutné zmínit, že na celkovém počtu 206 aktivně používaných zářičů se opět významně podílí (cca 120ti zářiči) již zmiňovaný průmyslový ozařovač (viz výše).

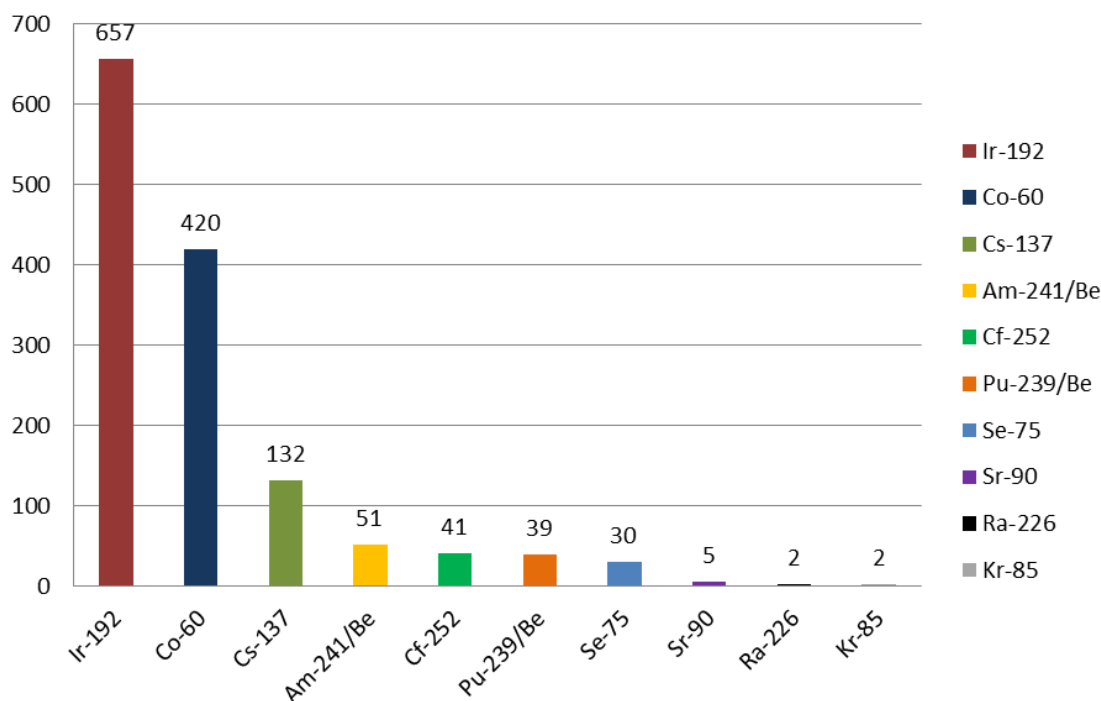
Radionuklid Cs-137 s celkovým počtem 132 evidovaných zářičů, z nichž 97 je aktivně používáno, nachází podobně jako Co-60 dosti široké uplatnění. Nejčastěji je používán v ozařovačích krve, také při teleterapii, ale i jako průmyslové měřidlo.

Am-241 smíšeného s Beryliem se využívá v zářičích jako zdroje neutronů. Toto

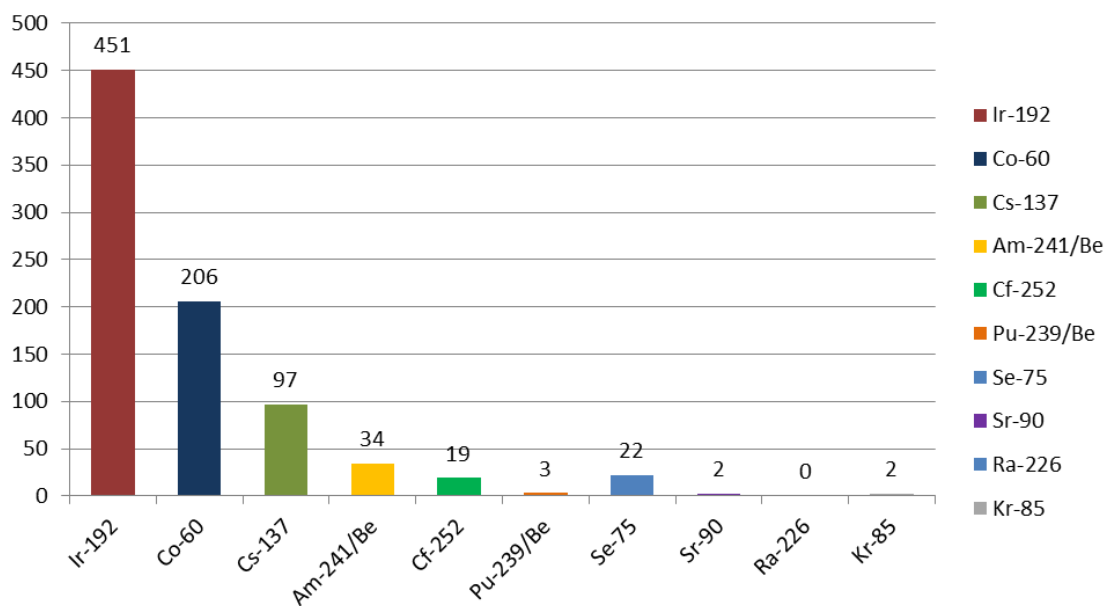
nachází uplatnění zejména v karotážích a geologických průzkumech. Na stejném principu je používáno i směsi Pu-239 s Beryliem, avšak použití této směsi spíše ustupuje, neboť Pu-239, jakožto potenciální materiál pro výrobu jaderné zbraně spadá pod přísnější pravidla evidence a bezpečnosti. Jako zdroje neutronů zejména v různých průmyslových měřidlech se používá také Cf-252.

Dále se v ČR vyskytují v menším množství radionuklidy Se-75, který se v praxi využívá v defektoskopii, přičemž jeho použití není příliš rozšířeno. Dále Sr-90, které nachází uplatnění v jistém druhu průmyslových měřidel. Ra-226, u něhož jsou jako vysokoaktivní zářiče evidované pouze 2, přičemž aktivně používán není žádný a Kr-85, který se také používá jako součást průmyslového měřidla.

Graf 7 - Zastoupení jednotlivých radionuklidů mezi celkově evidovanými HASS

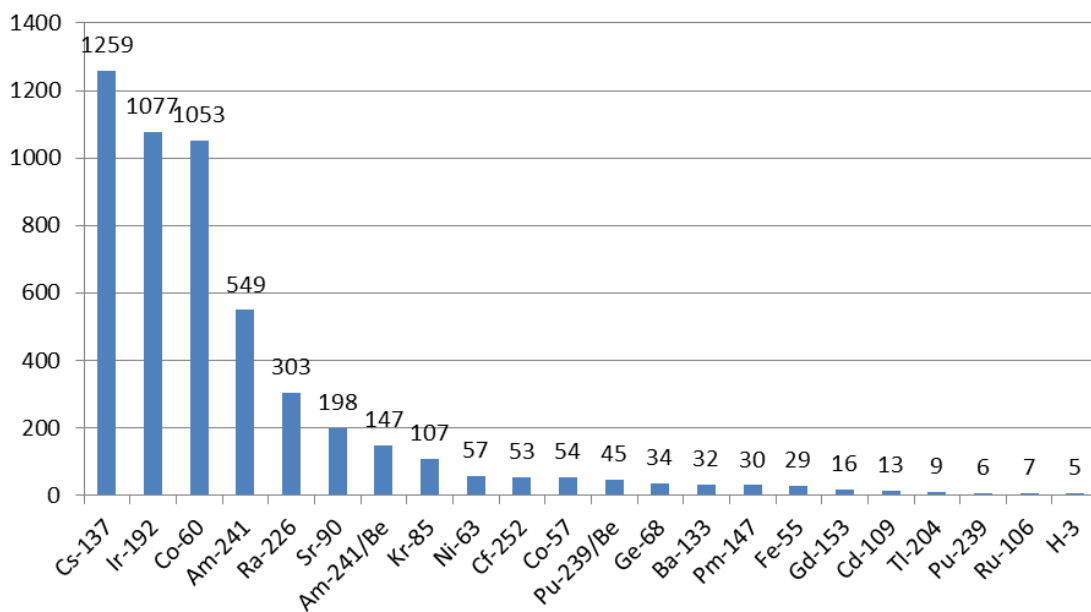


Graf 8 - Zastoupení jednotlivých radionuklidů mezi reálně aktivně používanými HASS



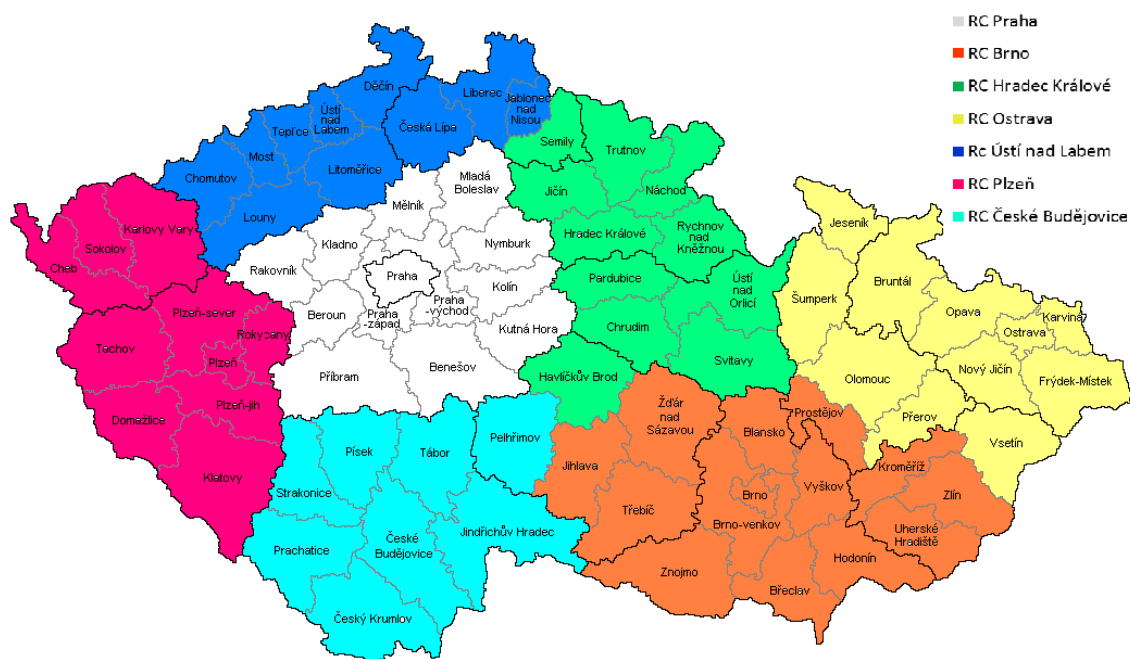
Data z výše uvedených grafů může někdo pochopit jako skutečnost, že například Sr-90, Ra-226 nebo Kr-85 se na území ČR v podstatě nevyužívá. V tomto případě by ovšem došlo ke zcela mylné interpretaci, neboť zde byly počítány pouze vysokoaktivní zářiče, tedy uzavřené radionuklidové zářiče přesahující jistou úroveň aktivit. Pro upřesnění a ujasnění je tedy v grafu 9 uveden přehled radionuklidů obsažených ve všech uzavřených radionuklidových zářičích všech aktivit, které jsou v ČR v současné době evidovány. Jedná se tedy o celkový počet evidovaných uzavřených radionuklidových zářičů v ČR, kterých je v současné době cca 5100. Toto zahrnuje jak vysokoaktivní zářiče, tak zářiče nedosahující aktivit vysokoaktivních zářičů, a také zářiče s velmi nízkými aktivitami.

Graf 9 - Celkový počet a přehled všech uzavřených radionuklidových záříčů na území ČR

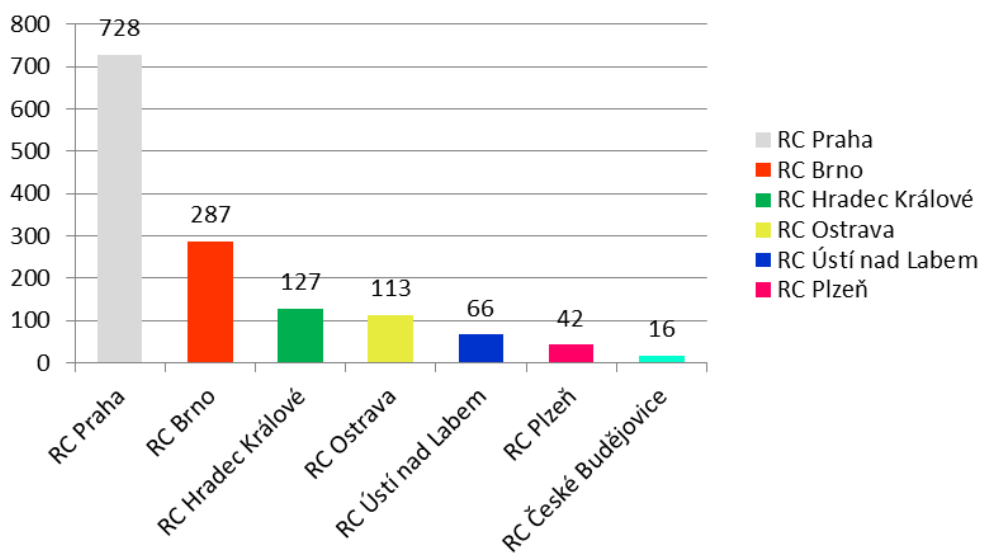


Níže je uveden obrázek 27 společně s grafem 10. Graf zobrazuje počty vysokoaktivních záříčů v jednotlivých správních oblastech dle mapy na obrázku 27. Nejedná se o typické územní jednotky, ale o územní celky, které jsou spravovány jednotlivými regionálními centry Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Tato regionální centra (dále jen „RC“) se nacházejí v krajských městech Brno, Hradec Králové, Ostrava, Ústí n. Labem, Plzeň, České Budějovice a v hlavním městě Praha. Z grafu je patrné, že více než polovina ze všech vysokoaktivních záříčů se vyskytuje v oblasti RC Praha. To je dáno částečně hustším výskytem firem, které s HASS nakládají. Zejména je to ale dáno konkrétní firmou, která se kromě širokého spektra jiných činností se záříči jako jedna z mála zabývá i jejich skladováním, servisem a také likvidací. Počet záříčů, které čekají na likvidaci nebo jsou dlouhodobě skladovány v prostorách této firmy, se v současné době pohybuje kolem cca 380ti záříčů a k celkovému počtu oblasti RC Praha tak přispívá velmi významně. Dále je třeba zmínit, že v případě oblasti RC Brno zde opět významnou měrou do celkového počtu HASS přispívá již zmiňovaný průmyslový ozařovač, který se v této správní oblasti nachází.

Obrázek 27 - Oblasti ČR pod správou regionálních center SÚJB.



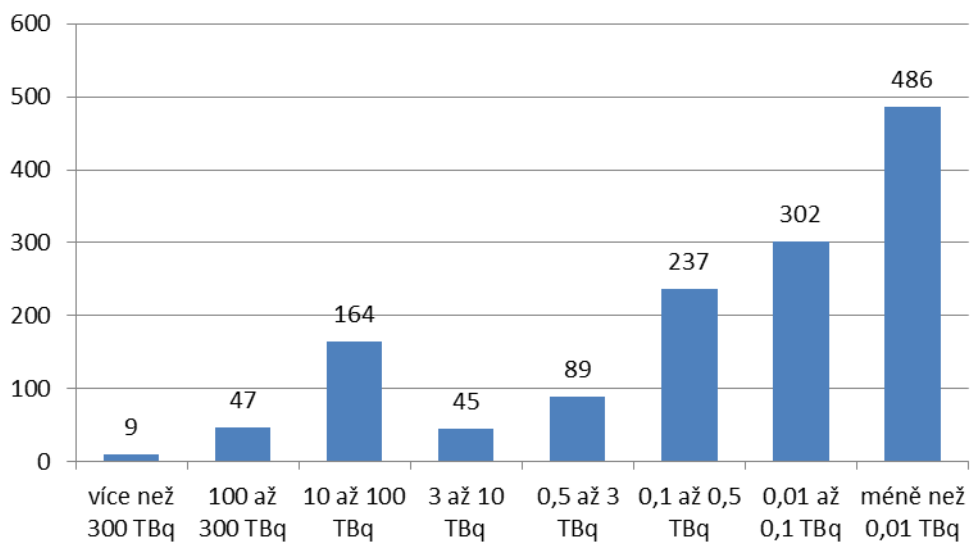
Graf 10 - Geografické rozdělení celkově evidovaných HASS v ČR



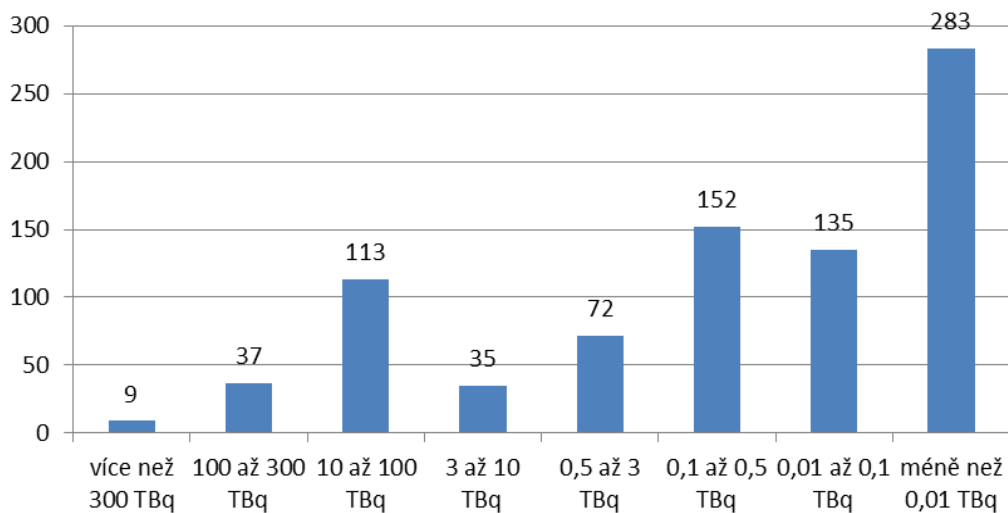
Graf 11 ukazuje rozdělení všech evidovaných vysokoaktivních zářičů v ČR z hlediska jejich aktivit (sestupně). Na grafu 12 jsou pak stejným způsobem rozděleny pouze zářiče aktivně využívané. Více než 300 TBq má pouze 9 zářičů z celé ČR. Mezi 100 až 300 TBq je zářičů 47, přičemž aktivně používaných pouze 37. Mezi 10 až 100 TBq je již větší množství zářičů (164 evidovaných/113 aktivně využívaných), neboť v rozmezí těchto aktivit se nejčastěji nachází běžné teleterapeutické zářiče, ozařovače krve, také často jednotlivé zářiče používané v průmyslovém ozařovači, aj. Rozdíly mezi evidovanými a opravdu aktivně využívanými zářiči jsou zde způsobeny zejména ukončením provozu různých činností, např. teleterapeutických jednotek, které jsou nahrazovány lineárními urachlovači, aj. V praxi pak takto aktivní zářiče nejsou likvidovány, spíše dlouhodoběji skladovány a zůstávají tedy v evidenci. Od úrovně cca 5 TBq se objevují některé neaktivnější defektoskopické zářiče, přičemž běžně se vyskytují spíše od cca 2 TBq níže. Jak již bylo zmíněno, defektoskopické zářiče významně zastupuje radionuklid Ir-192, který má relativně krátký poločas rozpadu (asi 74 dní) a tak se často obměňuje. Aktivně využíváno v defektoskopii může být Ir-192 i na úrovních desetin TBq, což ale může být velmi individuální. Při nižších aktivitách se přestává využívat a přechází do procesu likvidace, což často zahrnuje nejprve dlouhodobější uskladnění. Ir-192 se tedy opět významně podílí na rozdílu mezi evidovanými a aktivně používanými HASS zejména v posledních třech pravých sloupcích grafů. Kromě často již nevyužívaných defektoskopických zářičů se pod úrovněmi cca desetin TBq objevují také různá průmyslová měřidla (hladinoměry, aj.), která na těchto úrovních aktivit opět tvoří významný počet.

Od úrovně aktivit 0,01 TBq, tedy 10 GBq a méně, se již často nemusí jednat o vysokoaktivní zářiče (viz tabulka 1), přičemž tato skupina tvoří z celkového počtu významnou část. Jedná se většinou o zářiče, které v době jejich výroby dosahovaly úrovní aktivit pro HASS, avšak jejich aktivity postupem času poklesly, přičemž označení vysokoaktivního zářiče v souladu s legislativou zůstává.

Graf 11 - Rozdělení všech evidovaných HASS z hlediska jejich aktivit



Graf 12 - Rozdělení reálně aktivně používaných HASS z hlediska jejich aktivit



4 DISKUZE

Vzhledem k výše zmíněným výsledkům (kapitola 3.2), jež poukazují na relativně masivní rozšíření vysokoaktivních zářičů na území ČR, pokládám za prokázané, že vysokoaktivní zářiče v ČR mohou představovat potenciální hrozbu z hlediska zisku a jejich následného zneužití například teroristickou organizací.

K této skutečnosti dále přispívá fakt, že současná legislativa ČR týkající se vysokoaktivních zářičů není v porovnání s mezinárodními doporučeními v této oblasti dostatečně vyvinutá. Je však třeba zmínit, že Česká republika se v současné době nezařazuje k zemím, jimž by bezprostředně hrozil teroristický útok (rozuměj na úrovni národních a nadnárodních teroristických organizací k prosazování politických nebo ideologických cílů, typicky např. Al-Káida, Taliban aj.) a míra rizika, která z těchto hrozeb plyne není tak vysoká jako v jiných, např. západních státech. Je ale prokazatelné, že hrozba možnosti zneužití HASS v ČR existuje, a je tedy nutné se jí nadále zabývat. Možnosti zneužití, zejména možné způsoby a také následná problematika konkrétního způsobu zneužití z pohledu teroristy (útočníka), budou ještě diskutovány níže (kapitola 4.1).

Vzhledem k tomu, že z výše zmíněných důvodů hrozba a riziko zneužití existuje, pokládám dále za prokázanou nutnost se nadále průběžně zabývat zabezpečením vysokoaktivních zářičů na území ČR z hlediska prevence jejich potenciálního zneužití.

Často bývá uváděno, že prevence je tím nejdůležitějším faktorem v boji proti jakékoli potenciální nežádoucí situaci. Z toho tedy vyplývá, že zabezpečení HASS proti možnému zisku hraje velmi důležitou roli. Nejlepším způsobem, jak zabezpečení u HASS zajistit, je legislativně ho zakotvit, popřípadě zpřísnit podmínky, tedy přenést povinnost zabezpečení na subjekty, které s vysokoaktivními zářiči nakládají, což si však vyžaduje modifikaci současné legislativy v souladu s mezinárodními doporučeními.

Kromě zabezpečení je dále nutné komplexně zhodnotit celý systém, který se vysokoaktivních zářičů týká, což může zahrnovat například povinnosti a pravidla

celostátní evidence záříčů, státní dozor, pravidla používání a přepravování a mnoho dalšího. Krátká diskuze k možnostem zisku HASS bude ještě uvedena v kapitole 4.2.

4.1 Diskuze k možnostem zneužití HASS

V případech, kdyby došlo k získání některého vysokoaktivního záříče teroristickou organizací, anebo i jednotlivcem se zločineckými úmysly (útočníkem), je důležité v předstihu specifikovat možnosti a cesty, kterými může být záříč následně zneužit. Možností jak záříč zneužít a ohrozit tak životy a zdraví osob se teoreticky nabízí velké množství, avšak ve skutečnosti se bude potenciální terorista při konkrétním způsobu zneužití pravděpodobně potýkat s různými komplikacemi.

Vysokoaktivní záříče jsou většinou součástí složitějších a větších zařízení, která samozřejmě zahrnují i ochranná stínění a dosahují tak vysokých hmotností. Problém tedy vzniká zejména u způsobu odcizení nebo zmocnění se záříče, neboť lze s jistotou říci, že by si odcizení celého zařízení vyžadovalo sofistikované technické zázemí, a zároveň by bylo časově dosti náročné. Jinou možností útočníka by bylo záříč ze zařízení vyjmout. Tato činnost však zákonitě vyžaduje použití speciálního nářadí a hlavně značně vysoké vědomosti a dovednosti, týkající se daného zařízení, což pro útočníka může představovat opět určitou, byť ne nepřekonatelnou, bariéru.

Pomineme-li tyto skutečnosti a útočníkovi se podaří vyjmou záříč ze zařízení, nastává další velmi závažný problém. Tím je vlastní ochrana útočníka před záříčem. Bude-li útočník záříč kamkoli přemísťovat (převážet nebo přenášet), bude muset mít k dispozici velmi účinné přenosné stínění, aby sám útočník předešel deterministickým zdravotním účinkům. Manipulace v podstatě s jakýmkoli vysokoaktivním záříčem pouze rukama povede s jistotou k projevu zejména radiačních popálenin a to v pravděpodobně krátkém časovém horizontu. U projevů zdravotních účinků samozřejmě záleží na mnoha faktorech (druh radionuklidu, aktivita, vzdálenost, doba a způsob manipulace, aj.), přičemž samozřejmě nelze s jistotou potvrdit, že například u některých vysokoaktivních záříčů s nižšími aktivitami (řádově desítky GBq) dojde již ve velmi krátkém čase k fyzické manifestaci radiačních popálenin v případě, že bude se záříčem

pouze mžikově manipulováno (vteřiny až minuty). V každém případě lze s jistotou říci, že ohrožení zdraví může pro útočníka představovat jistou zábranu, kterou musí překonat. Celý problém můžeme zanedbat jen není-li útočník o účincích záření informován nebo tyto účinky ignoruje, anebo má k dispozici dostatečné stínění a manipulační zařízení.

Ve fázi, kdy se útočník záři úspěšně zmocnil a má dostatek znalostí, popřípadě vybavení k manipulaci s ním, vyvstává otázka týkající se konkrétního způsobu zneužití. Obecně se uvažuje o několika způsobech, jak radioaktivní látku k ohrožení života a zdraví osob zneužít. Nejčastěji uváděným způsobem je rozptýlení látky do okolí prostřednictvím tzv. radiačního disperzního zařízení (RDD - radiological dispersal device), pro který se nejčastěji používá již mediálně rozšířený termín - špinavá bomba. Dalšími způsoby pak může být kontaminace potravin, popřípadě kontaminace zdroje pitné vody.

Principem špinavé bomby (RDD) je rozptýlení radioaktivní látky do prostředí za pomoci konvenční výbušniny. Tento způsob zneužití se dokonce stal předmětem několik studií a pokusů, přičemž odborná veřejnost v této skutečnosti došla k závěru, že rozptýlení radioaktivní látky by bylo relativně nízké a ve srovnání s biologickými nebo chemickými zbraněmi nebudou účinky výrazně fatální. Kromě toho velmi záleží na fyzikálních a chemických vlastnostech radionuklidu a formě jeho uložení v zářiči. Lze předpokládat, že některé radionuklidy by se dle jejich fyzikální a chemické formy rozptýlily jako prachové částice nebo úlomky, zatímco jiné by zůstaly vcelku, atd.

V případě kontaminace potravin, nebo pitné vody záleží na fyzikálně chemických vlastnostech pravděpodobně ještě podstatněji. V případě kontaminace potravin by velmi záleželo na fyzikální formě uložení radionuklidu v zářiči. Ve většině používaných zářičů jsou radionuklidy těžké kovy, často jsou ale ve formě pelet (např. Co-60) a potraviny by se jimi daly relativně snadno kontaminovat. Jednalo by se ale o menší množství potravin, neboť v zářiči je pelet také omezené množství. Pro kontaminaci většího množství by byl útočník nucen nějakým způsobem radionuklid v zářiči přeměnit např. na prachová zrnka, pokud možno rozpustná ve vodě. To by ovšem vyžadovalo sofistikovanější metody, neboť při této činnosti by byl útočník

pravděpodobně opět vystaven bezprostřednímu ohrožení života a zdraví. Existují ale zářiče (často např. Cs-137), ve kterých je radionuklid uložen ve formě prášku (typicky chlorid cesný – CsCl). Tato skutečnost by pak útočnickovi kontaminaci výrazně zjednodušila. V obou případech je však důležité zmínit, že by se pravděpodobně jednalo o kontaminaci lokálnějšího charakteru s nižšími dopady, neboť lze předpokládat, že útočník kontaminuje určité množství potravin na určitém místě a pravděpodobně se také bude jednat pouze o konkrétní typ potraviny. Přípuštěny by však jistě měly být i možnosti kontaminace většího množství potravin například při procesu výroby a tedy větší a hlavně širší dopady na obyvatelstvo.

U kontaminace vody je pak jednoznačně rozhodující jedna chemickofyzikální vlastnost - rozpustnost ve vodě. U zářičů, v nichž jsou radionuklidy ve své základní formě, tedy většinou jako těžké kovy, lze předpokládat nerozpustnost ve vodě (např. Co-60 nebo Ir-192). V této souvislosti může dále být důležitou vlastností vysoká hustota, která zajistí, že při rozptýlení prachových zrněk do vody tyto pravděpodobně pouze klesnou na dno a vodu nekontaminují. Výjimku opět tvoří chlorid cesný (CsCl), který je používán jako náplň v zářičích Cs-137, ten je ve vodě poměrně dobře rozpustný a může pak představovat určitou hrozbu.

Ve výše zmíněných případech kontaminace vody i potravin je zřejmé, že převažující poškození zdraví nebo života osob by v tomto případě plynulo z vnitřního ozáření a v této souvislosti vyvstávají další okolnosti, které by celkové ohrožení a újmu dále významně ovlivnily. Mezi ty patří zejména celková biokinetika radionuklidu v těle, brány vstupu radionuklidu do těla (ve výše zmíněných případech by se jednalo spíše o ingesci), faktory a koeficienty vstřebávání radionuklidů např. z gastrointestinálního traktu, deponovatelnost různých radionuklidů v různých tkáních, aj.

Kromě rozptýlení špinavou bombou a kontaminace potravin nebo vody lze vysokoaktivní zářič zneužít ještě jedním a zároveň asi tím nejjednodušším způsobem. Ten spočívá v umístění zářiče na nějaké veřejně přístupné a frekventované místo. V případě tohoto způsobu zneužití pak útočník nemusí zářič jakkoli „upravovat“ a není

ani vystaven přímému kontaktu s radionuklidem, zbývá pouze zvolit umístění a také bezpečný způsob dopravy. Další výhodou pro útočníka je také celková velikost zářiče (desítky mm), která výrazně ztěžuje případný nález nebo celkově pojetí podezření.

Uvažujeme-li jako terorista nebo útočník, potenciálně „vhodné“ místo pro umístění zářiče musí být velmi frekventované, tedy místo kde se neustále nachází co nejvyšší počet lidí., což jistě ovlivní celkové zdravotní dopady na společnost. Dále je z hlediska vzniku zdravotních účinků u jednotlivých osob významným faktorem vzdálenost od zářiče a také celková doba pobytu v jeho blízkosti. V této souvislosti je tedy zřejmé, že velmi záleží na konkrétním umístění zářiče. Bude-li umístěn například v prostorách, kde se nachází velké množství lidí, kteří se zde ale nezdržují přiměřeně dlouhou dobu nelze očekávat rozsáhlou a především okamžitou zdravotní újmu. Čas, který lidé stráví v poli záření prostě nebude dostatečný k obdržení potřebné prahové dávky, která vyvolá deterministické zdravotní účinky. Na druhou stranu však pravděpodobně bude docházet k „podprahovému“ ozařování relativně vysokými dávkami, které budou z dlouhodobého hlediska indikovat rozsáhlé stochastické účinky. K vyvolání deterministických účinků by však bylo pro útočníka vhodnější umístit zářič do prostorů, které jsou dostatečně frekventované a zároveň se zde osoby zdržují po jistou dobu. Je třeba říci, že zde opět velmi záleží na mnoha okolnostech, kromě vzdálenosti a času dále na druhu radionuklidu (druhu záření, velikosti emitované energie, celkové aktivitě zářiče, aj.) Zde by bylo pro útočníka vhodné znát tyto konkrétní parametry zářiče, z nichž by bylo možné odhadnout přibližnou vzdálenost nebo dobu, po kterou je nutné se u zářiče vyskytovat k obdržení určité dávky. Podle toho pak zvolit konkrétní místo, například prostředky hromadné dopravy nebo jejich zastávky a nádraží (metro, tramvaj, autobus, vlak), kulturní a společenské prostory (divadla, kina, posluchárny, školy, restaurace, bary), nákupní centra, náměstí, aj.

Pro ucelení a částečné vysvětlení této problematiky je níže uveden zjednodušený příklad zahrnující míru ozáření a distribuci dávek u konkrétního, v praxi využívaného zářiče. V příkladu je počítáno s nestíněným, bodovým zdrojem, který emituje záření rovnoměrně do celého prostorového úhlu 4π , přičemž se jedná pouze o hrubé odhady za použití tzv. gamma konstant - Γ , které slouží k jednoduchému přepočtu aktivity na

dávkový příkon u různých radionuklidů. Je zde využíváno pravidlo „čtverce vzdálenosti“, tedy dávkový příkon klesá s druhou mocninou vzdálenosti, což ale platí pouze při bodovém zdroji, tedy je-li možná geometrickou velikost zdroje oproti vzdálenosti od něj zanedbat. Do výpočtů nejsou zahrnuty žádné jiné podmínky okolí a jde tak o odhad, nikoli o přesný výpočet.

Příklady jsou uváděny na základě následujícího vzorce, kde D je dávkový příkon ($\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$), A je aktivita zdroje (TBq), r je vzdálenost (m), Γ je gamma konstanta ($\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{TBq}^{-1}$), gamma konstanty pro nejrozšířenější radionuklidy jsou uvedeny v tabulce 7:

$$\dot{D} = \frac{A\Gamma}{r^2}$$

Tabulka 7 – Gamma konstanty pro nejrozšířenější radionuklidy (34)

Radionuklid	Poločas	Γ ($\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{TBq}^{-1}$),
Co-60	5,3 roku	0,370
Cs-137	30,17 roku	0,103
Ir-192	74 dní	0,160

V příkladu uvedeme zářič, který se nachází v krevním ozařovači zmiňovaném již v kapitole 3.1.1.1, respektive dva zářiče, které jsou v ozařovači umístěny těsně vedle sebe, přičemž v tomto příkladě budou uvažovány jako jeden. Aktivita zářiče je tedy 107,4 TBq, radionuklid Cs-137. Dle gamma konstanty je tedy dávkový příkon ve vzdálenosti 1 m od zářiče cca 11,06 Gy/hod! (Výpočet: $107,4 \times 0,103 / 1^2$) V případě, že se bude pohybovat osoba v takové blízkosti zářiče po dobu 5 min obdrží dávku téměř 1 Gy (0,92 Gy). Ve vzdálenosti 10 m od zářiče již poklesne příkon na hodnotu 0,11 Gy/hod (výpočet: $107,4 \times 0,103 / 10^2$). V případě, že by se osoba nebo spíše část jejího těla vyskytovala ve vzdálenosti cca 10 cm od zářiče (lze si představit například byl-li by zářič umístěn v sedadlu prostředku hromadné dopravy) dávkový příkon v této vzdálenosti by byl cca 1106 Gy/hod! (v této vzdálenosti již nelze teoreticky zanedbávat

poměr vzdálenost/velikost zdroje a není tedy možné zdroj geometricky pokládat za bodový, skutečná hodnota dávkového příkonu bude oproti odhadu již kolísat, avšak nikoliv řádově). Jestliže by se osoba vyskytovala v takovéto vzdálenosti od zdroje, např. posadila-li by se na sedadlo se zdrojem a seděla na něm 5 min (stínění vlastním sedadlem lze zanedbat), obdržela by lokální dávku na část těla cca 90 Gy, což nepochybně vyvolá brzké deterministické zdravotní účinky! Znovu zmíníme, že distribuce dávků v terénu je skutečně velmi složitá, svou roli sehraje velké množství fyzikálně-geometrických faktorů a tak je třeba brát tyto výpočty pouze jako orientační, avšak v celkových důsledcích velmi pravděpodobné .

4.2 Diskuze k možnostem zisku HASS teroristickou organizací

Výše byly nastíněny způsoby, jakými by bylo teoreticky možné vysokoaktivní zářiče zneužít. V následující kapitole se budeme krátce zabývat možnostmi a způsoby, jakými by bylo vysokoaktivní zářič možné získat. Možnost násilného zmocnění nebo odcizení zářiče a s tím spojené problémy pro útočníka byly již stručně zmíněny v předchozí kapitole. Celé této problematice je bezesporu nutné věnovat dostatečnou pozornost a vysokoaktivní zářiče proti odcizení preventivně zabezpečovat, avšak je nutné zvážit i další možnosti, kterými je možné zářič získat. Pomineme-li odcizení, obecně je jako druhý nejčastější způsob potenciálního zisku zářiče uváděn černý trh. Z hlediska útočníka by pak připadalo v úvahu například získání kontroly nad firmou zabývající se výrobou, dovozem nebo distribucí HASS, apod.

V případě dostatečných finančních prostředků v rukou útočníka také vyvstává možnost nákupu zářičů v podstatě standardní legální cestou. Jestliže potenciální útočník splní určité podmínky (bezúhonnost, odborná způsobilost, právní způsobilost, aj.) a zažádá jménem nějaké bezúhonné osoby o povolení k nakládání se zářiči z důvodu zakládání například defektoskopické firmy, bude mu toto povolení vydáno legální cestou a nic nebude stát v cestě naprosto legálnímu nákupu určitých zářičů. I když lze obecně vyslovit domněnku, že se u útočníka nebo teroristické skupiny nepředpokládá splnění všech podmínek potřebných k vydání povolení k této činnosti, je nutné tento způsob zisku rovněž uvážit.

4.3 Diskuze k zabezpečení HASS obecně

V podstatě celá iniciativa mezinárodních organizací je založena na zabezpečení vysokoaktivních zářičů proti svévolné manipulaci za účelem jejich zneužití, řečeno jinak jedná se v podstatě o zabezpečení proti odcizení. Existuje tedy předpoklad, že vysokoaktivní zářiče jsou nebo mohou být terčem takového útoku a následně mohou být zneužity. Tento předpoklad ale nemusí být až tolik opodstatněný. Ohlédneme-li se do historie a pokusíme-li se dohledat nějaké prokázané zlovolné aktivity, tedy např. vraždy nebo jakékoli pokusy o ohrožení a újmu na zdraví za použití zářiče, nalezneme jen několik případů, z nichž u většiny nakonec vůbec nedošlo k úmrtí. Je například prokázáno několik případů umístění zářiče do blízkosti jednotlivce, konkrétně např. do auta nebo do kanceláře (viz kapitola 1.4.1), za účelem jeho zavraždění. Celkově však počet takto zavražděných dosahuje pravděpodobně do cca 5 osob. Existují i případy záměrné vnitřní kontaminace radionuklidem, nejznámější je případ bývalého agenta KGB Litviněnka, který byl otráven Poloniem-210, a existují také případy záměrné sebeexpozice (sebevraždy) za použití zářiče. Celkově se množství případů, u nichž bylo prokázáno záměrné zneužití zářiče odhaduje na 15-20, přičemž v podstatě nikdy se nejednalo o čin zhodnocený jako typicky teroristický.

Jde-li o hrozbu z tzv. špinavé bomby, ta byla v historii zaznamenána celkem dvakrát, přičemž k výbuchu nikdy nedošlo. Oba případy byly spojeny s Čečenskými separatisty a udály se v letech 1995 a 1998, zároveň se oba případy uvádějí jako prokazatelně teroristické. U žádného z nich však nedošlo k výbuchu. V prvním případě byla bomba obsahující Cs-137 umístěna v parku v centru Moskvy, přičemž vše bylo ze strany teroristů oznámeno médiím, pravděpodobně za účelem vytvoření paniky a „teroristické reklamy“. Bomba nakonec nebyla aktivována. Druhý případ byl zaznamenán na území Čečenska, kdy pravděpodobně stejná skupina jako v prvním případě umístila jisté radioaktivní látky k vojenské mině nedaleko vlakového nádraží. K výbuchu nakonec také nedošlo.

Celkové množství případů se záměrným zneužitím zářičů je tedy relativně malé a typicky teroristické činy se v této oblasti objevily v podstatě jen dvakrát (případy špinavých bomb). Vzhledem k celkovému množství nežádoucích událostí (nehod,

havárií), které se v historii v souvislosti s vysokoaktivními zářiči vyskytly a které zapříčinily újmy na zdraví nebo smrt představují případy záměrného zneužití opět pouze malý zlomek. V naprosté většině případů, kdy došlo k ozáření osob zářičem, se tedy jednalo o nehodové situace, tedy situace, které vznikly z důvodu nevědomé nebo chybné manipulace se zářičem. Ve většině případů se jednalo o ztrátu nebo zapomenutí zářiče (případ Goiania, RTG na území Ruska, aj.) nebo o chybnou manipulaci a tedy pochybení pracovníků, kteří se zářiči nakládali.

Vzhledem k výše zmíněným skutečnostem je nutné se zamyslet nad celkovou koncepcí a smyslem zabezpečení vysokoaktivních zářičů. Zejména je důležité zhodnotit, zda je třeba klást důraz na preventivní zabezpečení proti svévolné manipulaci za účelem zneužití (teroristické organizace), nebo zda je nutné zářiče zabezpečovat spíše ve smyslu jejich přísné evidence, erudovanosti pracovníků, pravidel pro používání, atd., tak aby již více nedocházelo k jejich ztrátám, zapomenutím, nebo chybné manipulaci, jakož i jakékoli nevědomé manipulaci.

5 ZÁVĚR

Terorismus, jako fenomén 21. století představuje jednu z největších antropogenních hrozeb současného světa. Lze s jistotou říci, že je a nadále i bude nutné se tímto jevem zabývat, a to jak na úrovni velkých teroristických organizací nadnárodního charakteru, tak na úrovni menších extremistických skupin, jakož i jednotlivců, kteří násilím prosazují svá náboženská, politická nebo ideologická přesvědčení. Úzce s fenoménem terorismu souvisí i strach veřejnosti z radiologických, chemických nebo biologických látek a zbraní, respektive strach z jejich zisku a následného zneužití právě jednotlivcem nebo organizací teroristického charakteru. Jako nejdůležitější prostředek pro úspěšný boj s radiologickým, chemickým nebo biologickým terorismem je pak označována zejména prevence, tedy zabezpečení těchto látek tak, aby jejich možný zisk teroristickou organizací byl v podstatě vyloučen. Jednou z takových látek, představující určitou hrozbu jsou bezesporu i vysokoaktivní zářiče. Jejich rozšíření, zejména z hlediska jejich množství, rozsahu a způsobu použití je relativně vysoké, a to jak ve světě, tak na území ČR, kde se těchto zářičů v současné době nachází cca 1300.

Z těchto důvodů byla v nedávné době vyvinuta iniciativa na úrovni mezinárodních organizací (zejména IAEA), jejíž výsledkem bylo vydání série doporučení na konkrétní požadavky a způsob zabezpečení na pracovištích s HASS, která by měla být postupem času zařazena do legislativních dokumentů jednotlivých členských zemí. Platná legislativa České republiky má sice základní požadavky na zabezpečení zářičů, avšak ve srovnání s mezinárodními doporučeními má zejména z hlediska explicitnosti a podrobnosti požadavků stále určité nedostatky.

Lze tedy říci, že vysokoaktivní zářiče nacházející se na území ČR určitou hrozbu představují a je nutné se zabezpečením z hlediska jejich možného zisku a zneužití teroristickou organizací nadále zabývat. Ve světle dosavadních zkušeností je ale také třeba hodnotit, zvažovat a upřesňovat všechna mezinárodně stanovená pravidla a návrhy na toto zabezpečení, neboť v České republice nejsou zatím rizika teroristického útoku ve srovnání s jinými, zejména západními zeměmi tak vysoká a zároveň pravidla a praxe

související s používáním vysokoaktivních zářičů jsou v ČR ve srovnání s mnohými zeměmi světa na relativně vysoké úrovni. Zejména z tohoto důvodu je nutné k zabezpečování vysokoaktivních zářičů ve smyslu prevence jejich zisku a zneužití teroristickou organizací nutné přistupovat jako k jednomu ze základních principů a postulátů radiační ochrany, principu optimalizace - ALARA, ekvivalentně tedy: „Způsob a úroveň zabezpečení musí být na takové úrovni, aby rizika plynoucí z možného zisku a následného zneužití zářiče například teroristickou organizací byla tak nízká, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek.

Předložená práce si kládla mj. za cíl popsat a definovat problematiku obecného používání vysokoaktivních zářičů ionizujícího záření v kontextu společenských a zdravotních rizik, která taková činnost přináší. Její ambicí je stát se jedním ze základních drobných příspěvků k otevření veřejné odborné rozpravy na stanovená témata a pokusem o definování potenciálních latentních problémů, kterým vždy bude účelné účinně předcházet.

6 SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

1. Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 1997
2. Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. In: *Sbírka zákonů*. 2002.
3. Official Journal of the European Union. *COUNCIL DIRECTIVE 2003/122/EURATOM: on the control of high-activity sealed radioactive sources and orphan sources*. European Union: EU, 2003. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:346:0057:0064:EN:PDF>
4. *Identification of radioactive sources and devices: reference manual*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007, 138 p. ISBN 978-920-1114-068.
5. Sealed Radioactive Sources. *IAEA.org* [online]. 2005 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/SealedRadioactiveSources>
6. *The Use and Management of Sealed Radioactive Sources* [online]. IAEA, 2007[cit. 2013-04-04]. ISBN 92-0-105403-3. Dostupné z: http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC56/GC56InfDocuments/English/gc56inf-3-att6_en.pdf
7. *Effects of ionizing radiation on blood and blood components: A survey: IAEA-TECDOC-934* [online]. Vienna: IAEA, 1997[cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_934_prn.pdf
8. Technical Specifications of Gammacell® 3000 Elan. In: *Best Medical International* [online]. Ottawa, 2008 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.patho.hku.hk/facilities/docs/Gammacell_3000_specs.pdf
9. Zpráva Komise o ozařování potravin za rok 2007. In: *Úřední věstník Evropské unie* [online]. 2009 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2009:242:0002:0018:CS:PDF>
10. BIOSTER. BIOSTER, a.s. *Radiační sterilizace* [online]. 2013 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.bioster.cz>

11. *Gamma Irradiators for Radiation Processing* [online]. Vienna: IAEA, 2005[cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/Brochure%20on%20gamma%20irradiators.pdf>
12. *Lessons from Major Radiation Accidents* [online]. International Atomic Energy Agency, 2002[cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00140.pdf>
13. *The Radiological accident at the irradiation facility in Nesvizh*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996, 75 p. ISBN 92-010-1396-5. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1010_web.pdf
14. ADROVIC, Feriz. *Sterilization by Gamma Irradiation* [online]. 2012 [cit. 2013-04-04]. ISBN 978-953-51-0316-5. Dostupné z: http://cdn.intechopen.com/pdfs/32842/InTech-Sterilization_by_gamma_irradiation.pdf
15. SENTINEL Operating and Maintenance Manual. In: *Sentinel NDT* [online]. Sentinel, 2011 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.sentinelndt.com/LinkClick.aspx?fileticket=McQRljntP0w%3D&tabid=80>
16. *Radiation protection and safety in industrial radiography*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999. ISBN 92-010-0399-4. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P066_scr.pdf
17. Disposal of Radioisotope Thermoelectric Generators. In: *RTG* [online]. IAEA, 2007 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/ws042008/2_1%20Dismantling%20RTGs%20Problems%20and%20Solutions%20English.pdf
18. ALIMOV, Rashid. *Radioisotope Thermoelectric Generators* [online]. 2005 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://bellona.no/bellona.org/english_import_area/international/russia/navy/northern_fleet/incidents/37598
19. Radiobiologie, *fbmi.sirdik.org* [online]. 2013 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/>
20. Ullmann V.: *Jaderná fyzika, radiační fyzika, radioisotopy*. Ullmann V.: "AstroNuklFyzika" [online]. 2000 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>

21. Database of Radiological Incidents and Related Events. *Johnston's Archive* [online]. 2004, 22.7.2012 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html>
22. IAEA, WHO. *Planning the medical response to radiological accidents*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1998. ISBN 92-010-2598-X.
23. *The Radiological accident in Goiânia*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988. ISBN 92-0-129088-8. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815_web.pdf
24. *The radiological accident in Tammiku*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1998, 59 p. ISBN 92-0-105903-5. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1053_web.pdf
25. Codes of conduct. *Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004.
26. *Categorization of radioactive sources*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004. Safety Guide: IAEA Safety Standards. ISBN 92-010-3905-0. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1227_web.pdf
27. *Categorization of radioactive sources TECDOC-1344*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003. ISBN 92-0-105903-5. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/pdf/te_1344_web.pdf
28. *Nuclear security recommendations on radioactive material and associated facilities*. Vienna: IAEA, 2011. IAEA Nuclear Security Series No. 14. ISBN 987-92-0-112110-3. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1487_web.pdf
29. *Safety considerations in the disposal of disused sealed radioactive sources in borehole facilities* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003 [cit. 2013-04-04]. ISBN 92-010-6403-9. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1368_web.pdf
30. *Dangerous quantities of radioactive material (D-values): EPR-D-VALUES 2006*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. Emergency Preparedness and Response. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR_D_web.pdf

31. *Security of radioactive sources: implementing guide*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. IAEA Nuclear Security Series No. 11. ISBN 978-92-1026-095. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1387_web.pdf
32. *Safety of radiation sources and security of radioactive materials: proceedings of an International Conference on the Safety of Radiation Sources and the Security of Radioactive Materials*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999, 399 p. Proceedings series (International Atomic Energy Agency). ISBN 92-010-1499-6. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1042_web.pdf
33. *Safety of radiation generators and sealed radioactive sources*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. ISBN 92-010-7506-5. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1258_web.pdf
34. SHLEIEN, Bernard. *The Health physics and radiological health handbook*. Rev. ed. Silver Spring, MD: Scinta, 1992. ISBN 09-172-5105-9. Dostupné z: <http://www.epa.gov/radiation/docs/wipp/08-0442-attach-3.pdf>
35. *Directory of gamma processing facilities in member states* [online]. Vienna, Austria: IAEA, 2004 [cit. 2013-04-04]. ISBN 92-010-0204-1. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/dgpf-cd/PDF/Contents.pdf>
36. *International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: jointly sponsored by FAO, IAEA, ILO ..* [Final ed.]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996. ISBN 92-010-4295-7.
37. Radiological Dispersal Device. In: *Human Health Fact Sheet* [online]. Argonne National Laboratory, 2005 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.evs.anl.gov/pub/doc/rdd.pdf>
38. Over a Hundred Disused Sealed Sources Collected in Honduras. In: *Sealed Sources* [online]. 2012 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/News/2012/repository/Over-a-Hundred-Disused-Sealed-Sources-Collected-in-Honduras.html>
39. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000, 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
40. *ICRP Publication 103: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. International Commission on Radiological Protection, 2007. ISBN neuváděno.

41. Radiation Sources in the EU. *Rewiew of steps in European Union* [online]. 1999, neuvedeno [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull413/41305094244.pdf>
42. SCOTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. *Guidance on the High-activity Sealed Radioactive Sources and Orphan Sources Regulations 2005*. London, 2007.
43. Radiation Safety Training. *Ehs.washington.edu: Enviromental Health and Safety* [online]. University of Washington, 2010v [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.ehs.washington.edu/rsotrain/sealedsources/index.shtm>
44. ŠEDA, Josef. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. ISBN neuvedeno.
45. Sealed Radioactive Sources. *Radiation Protection* [online]. 2012 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/radiation/source-reduction-management/sources.html>
46. ISO 2919. *Radiation protection -Sealed radioactive sources -General requirements and classification*. Geneve, Switzerland: International Organization, 1999. Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0036/ML003686268.pdf>
47. *Radiation Safety of Sealed Sources and Devices Containing Them* [online]. Helsinki, 2007 [cit. 2013-04-10]. ISBN 978-952-478-343-9. Dostupné z: <http://www.finlex.fi/data/normit/32117-ST5-1e.pdf>
48. High-activity Sealed Radioactive Sources and Orphan Sources Regulations 2005. *Legislation.gov.uk* [online]. 2005 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.legislation.gov.uk/uksi/2005/2686/contents/made>
49. The security of high-activity radiological sources. *Conference on Strengthening European Action on WMD Non-proliferation and Disarmament*. 2005.
50. Operation of the Register on High Activity Sealed Sources in Germany – four years of experience. In: *Federal Office for Radiation Protection, Germany* [online]. 2009 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: http://www.alara2009.at/presentations/Day-1_Session-2_11-00.pdf

51. *Management of disused long lived sealed radioactive sources (LLSRS): IAEA-TECDOC-1357* [online]. Vienna: IAEA, 2003 [cit. 2013-04-04]. ISBN 92-0-105403-3. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1357_web.pdf
52. *Handling, conditioning and storage of spent sealed radioactive sources : IAEA TECDOC 1145* [online]. 2000[cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1145_prn.pdf
53. JONATHAN, Medalia. “Dirty Bombs”: Technical Background, Attack Prevention and Response, Issues for Congress. In: *Congressional Research Service* [online]. 2011 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.fas.org/sgp/crs/nuke/R41890.pdf>