

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra fyziky



Bakalářská práce

Radioaktivní odpady

Jakub Záruba

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Záruba

Procesní inženýrství

Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

Radioaktivní odpady

Název anglicky

Radioactive waste

Cíle práce

Vytvořit přehled radioaktivních odpadů a možností ukládání či přepracování.

Metodika

Z dostupné literatury bude vytvořen přehled radioaktivních odpadů, gama spektroskopie radioaktivních odpadů, ukládání radioaktivních odpadů. Budou formulovány vlastní závěry ohledně budoucího nakládání s jadernými odpady.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

jaderná fyzika, radioaktivita, záření

Doporučené zdroje informací

HALLIDAY, D. – OBDRŽÁLEK, J. – RESNICK, R. – WALKER, J. – VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Fyzika : vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: Vutium, 2000. ISBN 80-214-1869-9.

LIBRA, M. – MLYNÁŘ, J. – POULEK, V. – ZEMCHEBA (FIRMA). *Jaderná energie*. Praha: Ilsa, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 4. 1. 2022

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 10. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Radioaktivní odpady" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne:

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce, panu profesorovi Martinu Librovi za vedení mé práce a cenné rady. Dál bych rád poděkoval panu magistrovi Tomáši Otcovskému, který mi dal řadu potřebných rad v oboru mé práce. A na závěr panu Davidovi Šírovi za mentoring spektrometrie.

Radioaktivní odpady

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá radioaktivními odpady, jejich produkcí a druhy. Dále zkoumá metody nedestruktivní charakterizace, a to zejména metody spektrometrie záření gama a radiografie již vyhotovených obalových souborů. Mapuje ukládání radioaktivních odpadů do úložišť v rámci České republiky. Na závěr se zabývá průběhem nedestruktivní charakterizace konkrétního odpadu. Bakalářská práce je zpracována metodou literární rešerše.

Klíčová slova: radioaktivita, záření, jaderná fyzika.

Radioactive waste

Abstract

The bachelor thesis deals with radioactive waste, its production and types. It also investigates methods of non-destructive characterisation, in particular gamma-ray spectrometry and radiography of already produced packaging. It maps the disposal of radioactive waste in repositories within the Czech Republic. Finally, it discusses the course of non-destructive characterisation of specific waste. The bachelor thesis is prepared by the method of literature search.

Keywords: radioactivity, nuclear physics, radiation.

Obsah

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Cíl práce a metodika | 2 |
| 2.1 Cíl práce | 2 |
| 2.2 Metodika | 2 |
| 3 Teoretická východiska | 3 |
| 3.1 Radioaktivita | 3 |
| 3.1.1 Elektromagnetické záření | 3 |
| 3.1.2 Radioaktivní přeměna za emitace částic | 5 |
| 3.2 Měřené veličiny | 8 |
| 3.2.1 Dávka | 8 |
| 3.2.2 Dávkový příkon | 8 |
| 3.2.3 Ekvivalentní dávka | 8 |
| 3.2.4 Příkon ekvivalentní dávky | 9 |
| 3.2.5 Efektivní dávka | 9 |
| 3.2.6 Kerma | 9 |
| 3.3 Vliv radioaktivity na lidské zdraví | 9 |
| 3.4 Radioaktivní odpady | 11 |
| 3.4.1 Definice radioaktivních odpadů | 11 |
| 3.4.2 Klasifikace radioaktivních odpadů | 12 |
| 3.4.3 Pracoviště se zdroji ionizujícího záření | 16 |
| 3.4.4 Monitorování radiační situace na pracovištích zpracovávajících RAO | 17 |
| 3.4.5 Přístrojová technika monitorování | 18 |
| 3.4.6 Nedestruktivní charakterizace | 23 |
| 4 Stav problematiky | 25 |
| 4.1 Legislativa | 25 |
| 4.1.1 Česká republika | 25 |
| 4.1.2 Evropská unie | 25 |
| 4.2 RAO v České republice | 26 |
| 4.2.1 Druhy RAO a jejich původci v ČR | 27 |
| 4.2.2 Nakládání s RAO | 29 |
| 4.2.3 Úložiště v České republice | 33 |
| 4.3 Nedestruktivní analýza na pracovišti zpracování RAO | 36 |
| 4.3.1 Spektrometrické měření na HPGe | 36 |
| 4.3.2 Radiografické měření | 39 |
| 4.3.3 Analýza sudu 568/2021 | 40 |
| 5 Závěr | 43 |
| 6 Seznam použitých zdrojů | 44 |
| 7 Přílohy | 47 |

Seznam obrázků

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Mechanismus přeměny jádra A na jádro B* a jeho následné vyzáření γ na výsledné dceřiné jádro B..... | 4 |
| Obrázek 2: vyzáření částice α | 5 |
| Obrázek 3: přeměna β^- | 6 |
| Obrázek 4: přeměna β^+ | 7 |
| Obrázek 5: Původci RAO..... | 12 |
| Obrázek 6: LB 124..... | 19 |
| Obrázek 7: LB 122..... | 20 |
| Obrázek 8: FH 40..... | 21 |
| Obrázek 9: CPD-14..... | 22 |
| Obrázek 10: dozimetrický systém..... | 22 |
| Obrázek 11: Radiografie obalového souboru s RAO..... | 23 |
| Obrázek 12: porovnání Scintilačních a polovodičových detektorů..... | 24 |
| Obrázek 13: ÚRAO Dukovany..... | 34 |
| Obrázek 14: Pohled do ÚRAO Richard..... | 35 |
| Obrázek 15: Spektrum..... | 37 |
| Obrázek 16: Gama Scanner..... | 38 |
| Obrázek 17: Radiograf MOS - 100..... | 40 |

Seznam tabulek

| | |
|-------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1: Aktivity odpadů..... | 13 |
| Tabulka 2: Další dělení RAO..... | 14 |
| Tabulka 3: Klasifikace dle doporučení MAAE..... | 15 |
| Tabulka 4: nakládání s RAO..... | 30 |

Seznam příloh

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Příloha 1: Součtové spektrum 568/2021..... | 47 |
| Příloha 2: Rozložení aktivity ^{60}Co | 48 |
| Příloha 3: Rozložení aktivity pro ^{54}Mn | 49 |
| Příloha 4: Rozložení aktivity pro ^{137}Cs | 50 |
| Příloha 5: Radiografické zobrazení v Matlab..... | 51 |
| Příloha 6: Srovnání měření..... | 52 |

1 Úvod

Již od roku 1896, kdy francouzský fyzik Henri Becquerel objevil radioaktivní záření při svém výzkumu uranových solí, se naše věda zabývá způsoby využití tohoto přírodního fenoménu. Dnes se radionuklidy, a to ať už přírodní jako izotopy uranu či rádia, tak uměle vyrobené v reaktorech nebo urychlovačích dostaly do značného množství technických oborů a můžeme se s nimi setkat téměř v každém průmyslu. Od výroby energie v jaderných elektrárnách, přes medicínu až například po měření tloušťky materiálu ve strojírenském průmyslu.

Při všech těchto a dalších činnostech využívajících radionuklidy nevyhnutelně vzniká odpad. Může se jednat o odpad kontaminovaný radionuklidy, odpad aktivovaný v jaderných reaktorech, nebo urychlovačích částic. Zároveň se ale jedná i o samotné zdroje záření, které již nejsou vhodné pro další užitečné využití a musí tak být bezpečně zpracovány a odstraněny. V závislosti na poločasu přeměny konkrétního radionuklidu mohou být tyto materiály nebezpečné lidskému zdraví i životnímu prostředí po velmi dlouhou dobu.

Z tohoto důvodu není možné radioaktivní odpady (dále jen RAO) uvolňovat do životního prostředí bez řádného a legislativně definovaného zpracování. Za tímto účelem bylo nutné začít RAO rozdělovat a určit tak míru nebezpečí, které představuje. Tako klasifikace RAO se provádí na základě aktivity odpadů, jejich fyzikálních vlastnostech (pevné, kapalné), lisovatelné a nelisovatelné apod. Podrobně bude klasifikace RAO uvedena ve třetí kapitole této práce.

Nebezpečí ale hrozí i samotným pracovníkům, kteří mají zpracování RAO na zodpovědnosti. I za tímto účelem je velmi podstatnou součástí tohoto oboru nedestruktivní charakterizace RAO. Ta umožňuje kvalitativní i kvantitativní určení radionuklidů v daném materiálu. Díky ní lze optimalizovat pracovní činnost zodpovědných pracovníků a podává potřebné informace provozním dozimetristům, kteří rozhodují například o potřebných ochranných pomůckách pro konkrétní činnost.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této práce je provést rešerši druhů RAO jak institucionálních, tak vzniklých při provozu jaderných elektráren. Popis používaných způsobů zpracování těchto odpadů vždy pro konkrétní druh odpadu a vysledování následného nakládání s vyhotovenými obalovými soubory. V další části této práce je popsán způsob a průběh nedestruktivní charakterizace RAO užívaný na pracovištích v České republice. A to konkrétně metody gamaspektrometrie a radiografie. Na závěr je provedena charakterizace odpadu po jeho přijetí.

2.2 Metodika

Pro literární rešerši jsem využil podklady ve formě publikací, vědeckých článků, sborníků a internetových zdrojů. Využil jsem i bezplatné poradenství Správy úložišť radioaktivních odpadů – SÚRAO. Dále jsem využil sever IAEA (International Atomic Energy Agency) a zde volně přístupné online publikace.

Pro aktuální informace jsem využil pracoviště nedestruktivní charakterizace na Centru nakládání s odpady ve firmě ÚJV Řež, a.s. Zde jsem měl možnost věnovat se dozimetrické činnosti od přejímání RAO ke zpracování až po odvoz vyhotovených obalových souborů na úložiště.

3 Teoretická východiska

3.1 Radioaktivita

Pojmem radioaktivita rozumíme fenomén, při němž dochází ke spontánní přeměně nestabilního jádra atomu za emise energie ve formě elektromagnetických vln, nebo částic. V případě elektromagnetického záření se zabýváme zářením fotonů gama a rentgenovým zářením. Uvolňování částic probíhá emisí α (jádro helia), nebo β (elektrony či pozitrony). Radioaktivní přeměnou štěpitelných nuklidů může také docházet k vyzáření neutronů. [1]

Úbytek radionuklidů dN za čas dt lze vyjádřit vztahem

$$dN = -\lambda N dt \quad (1)$$

Kde N je množství atomů či jader a λ přeměnová konstanta. Přeměnová konstanta je definována jako pravděpodobnost přeměny jádra konkrétního radionuklidu za jednotku času. Hodnota této konstanty závisí na vnitřních vlastnostech jádra a je specifická pro každý radionuklid.[2] Integrací podle času intervalu 0 až t , pokud v čase 0 je soubor jader roven N_0 získáváme přeměnový zákon

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Kde t značí čas, ve kterém chceme znát počet jader. Vztah pro aktivitu získáme analogicky

$$A(t_0) = A_0 e^{-\lambda t_1} \quad (3)$$

Kde A_0 značí aktivitu v čase $t = 0$ a A aktivitu, v námi sledovaném čase t_1 . Fyzikální jednotkou aktivity je Becquerel [Bq], kdy 1 Bq znamená jednu jadernou přeměnu za sekundu.

3.1.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické vlny definované svou vlnovou délkou λ a frekvencí. Jedno kvantum elektromagnetického záření je známo pod názvem foton. Energie fotonu je dána vztahem

$$E = h\nu \quad (4)$$

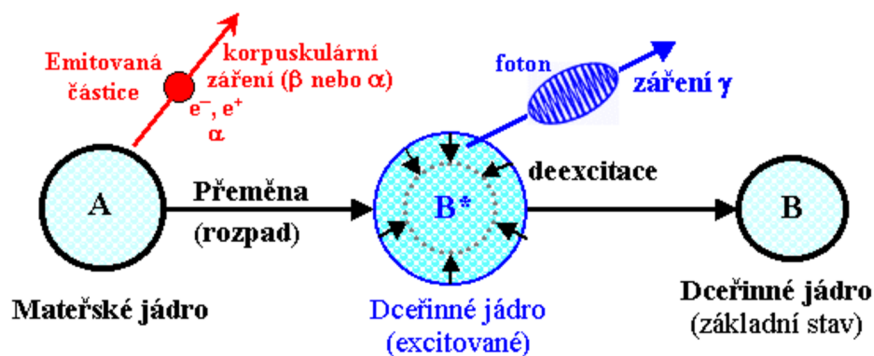
Kde h představuje Planckovu konstantu ($= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$) a ν frekvenci (Hz). Zářením γ i rentgenové záření X jsou elektromagnetická záření o vysokých frekvencích, tj. nad 10^{18} Hz a vysokých energiích. Vlnové délky rentgenového záření leží v intervalu mezi 10^{-8} m až 10^{-12} m . Toto záření přirozeně vzniká ve hvězdách. Na zemi jej v malé míře produkuje úder blesku, my jej však dokážeme vyrobit při dopadu rychle se pohybujících elektronů na povrch kovu. Rentgenové záření vzniká o energiích v desítkách až stovkách keV a je proto zářením ionizujícím. To znamená, že jeho energie je vyšší, než vazebná energie nejnižšího vazebného elektronu v atomu a má tak schopnost elektron vytrhnout a daný atom elektricky nabít. [1][3]

Zářením γ se na elektromagnetickém spektru částečně překrývá s rentgenovým zářením. Má větší energii (od 100 keV) a kratší vlnové délky, je mezi nimi ale rozdíl v mechanismu jejich vzniku. Γ vzniká v průběhu jaderných reakcí či během radioaktivní přeměny, kdy jádro atomu přechází z vyššího do nižšího energetického stavu. Vyzářením kvanta γ se tak jádro zbavuje své excitační energie. Viz obrázek č.1.

Stínění záření X a γ je náročné vzhledem k tomu, že je tvořeno fotony, které mají vysokou schopnost pronikat prostředím. Pro stínění se používají materiály s velkým protonovým číslem. Například ^{82}Pb , nebo ^{74}W .

Důležitou vlastností γ záření je jeho čárové spektrum. To znamená, že konkrétní radionuklidy emitují fotony s určitými energiemi. Tuto vlastnost využíváme právě v gamaspektrometrii kterou se tento text bude později zabývat.

Obrázek 1: Mechanismus přeměny jádra A na jádro B* a jeho následné vyzáření γ na výsledné dceřiné jádro B



Zdroj: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

3.1.2 Radioaktivní přeměna za emitace částic

Sestává z vyzařování elementárních částic, tedy záření α , β které jsou nabité, nebo vyzařování neutronů bez elektrického náboje.

Záření α tvoří takzvané heliony, jádra helia, které nesou dva elementární kladné náboje (viz obrázek č.2). Tyto částice mají energii v intervalu mezi 4–9 MeV.

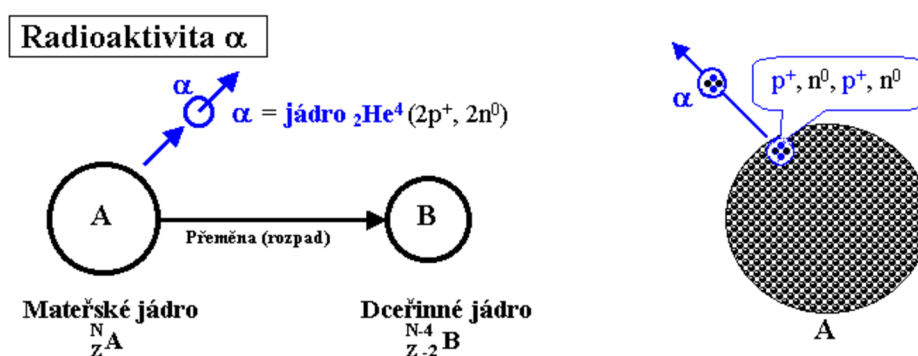
Dosahují rychlostí v řádu 10^7 m/s. Během srážek částic s atomy okolí jsou vytvářeny kladné a záporné ionty, záření α se tak řadí mezi ionizující. Částice α ztratí během jedné srážky a tím vytvořením jednoho iontového páru ve vzduchu energii 32,5 eV.

Z toho vyplývá, že na svém maximálním doletu, tedy dráze, kterou částice uletí, než předá veškerou svou energii okolí vytvoří řádově 10^5 iontových párů. Dolet částic α je velmi malý, v pevné látce je dolet pouze ve zlomcích milimetrů. [4]

Příklad záření α nalezneme mimo jiné při přeměně jádra rádia 226 na helion a radon 222 dle následujícího schématu:



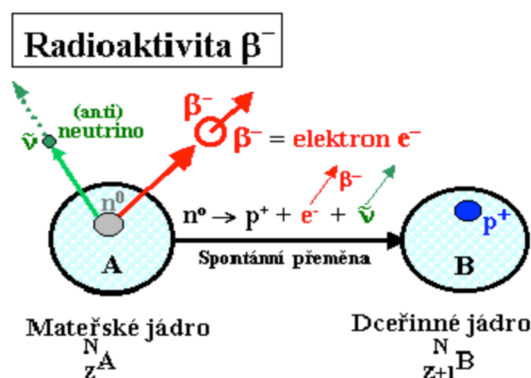
Obrázek 2: vyzáření částice α



Zdroj: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

Záření β^- je druh radioaktivní přeměny, při kterém se v jádru atomu změní jeden neutron na proton za vyzáření elektronu a antineutrína jak ukazuje obrázek č. 3. Vyskytuje se u jader s přebytkem neutronů vzhledem k počtu protonů. [2] Hmotnostní číslo prvku se vlivem reakce nemění, atomové číslo se však zvýší o jedna. [4] Kinetická energie, se kterou je tento elektron emitován je charakteristická pro konkrétní radionuklid. Toto záření má větší pronikavost než záření α a je ionizující, lze jej ale snadno odstínit například plexisklem o tloušťce několika milimetrů. Tím, že je toto záření tvořeno elektrony, je snadno možné jej vychýlit elektrickým, nebo magnetickým polem. Tento jev způsobuje, že jeho dráha v prostředí není přímá.

Obrázek 3: přeměna β^-



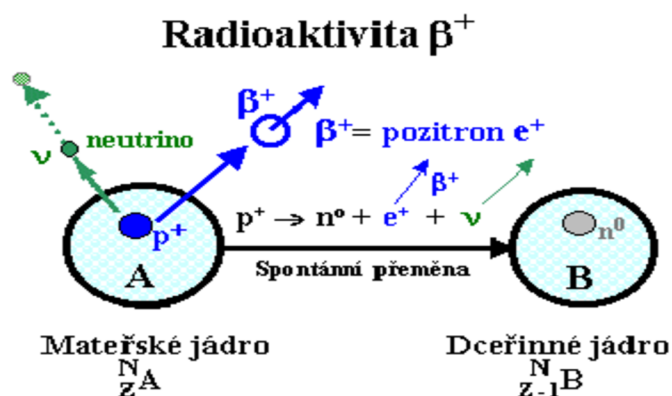
Zdroj: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

Pro příklad radionuklidu podléhajícího přeměně β^- uvedeme přeměnu cesia 137, které se mění na baryum 137 v následujícím schématu:



Záření β^+ nastává v případě jader s přebytkem protonů vůči neutronům, tedy takzvaná neutron deficitní jádra. Proton se při přeměně mění na neutron a během této změny dochází k vyzáření kladně nabitého pozitronu který je antičásticí elektronu a neutrína. Protonové číslo se tím zmenší o jedna. Záření β^+ doprovází i záření γ , to je způsobeno tím, že po zpomalení pozitronu vlivem ionizačních ztrát dojde k jeho anihilaci s elektronem za vzniku dvou fotonů s opačnou orientací o energiích 511 keV. [2] Jelikož je pro stínění nutno odstínit nejen pozitrony, ale i záření γ je zapotřebí použít vrstvu olova.

Obrázek 4: přeměna β^+



Zdroj: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

Pro příklad uvedeme přeměnu sodíku, který se mění na neon za vyzáření pozitronu a neutrina:



Neutronové záření je druh ionizujícího záření, které je tvořeno tokem volných neutronů. Většinou vzniká během štěpení štěpitelných radionuklidů, mohou ale vznikat například i při procesu jaderné fúze. Nemají elektrický náboj, a to má za následek, že se prostředím mohou pohybovat velmi rychle, protože neinteragují s elektronovým obalem atomů v okolí. Interagují ovšem přímo s jádry atomů srážkami, během kterých ztrácí energii.[1] Jev, při kterém se srážkami s jádry neutron zbavuje energie se nazývá termalizace a je podstatný pro zvýšení pravděpodobnosti štěpení v aktivní zóně tepelného jaderného reaktoru.

Z různých druhů záření je pro odstínění toto nejnáročnější. Je to tak z toho důvodu, že neutrony neinteragují s elektronovým obalem, ale pouze jádrem. V praxi stínění tvoří třívrstvý systém, kdy první vrstva obsahuje lehká jádra, tuto vrstvu může tvořit například parafín, ta neutrony zpomalí. Následující vrstva je tvořena například borem, nebo kadmíem, která neutrony pohltí. Záchyt neutronů je doprovázen vyzářením fotonů γ , které zachycuje třetí vrstva tvořená například olovem.[5]

3.2 Měřené veličiny

3.2.1 Dávka

Jednotka Bq, která byla uvedena v kapitole 3.1 nám popisuje pouze střední počet přeměn za sekundu. Nepopisuje tedy jak zdroj záření působí na lidský organismus, ani o jaký druh záření se jedná. Z tohoto důvodu byly zavedeny dozimetrické veličiny popisující ionizující účinky. První z nich je Dávka D . Jednotkou dávky je gray [Gy] zavedený mezi jednotky SI s fyzikálním rozměrem [J/kg]. Tuto veličinu definoval Louise Harold Gray, anglický fyzik, který se zabýval biologickými účinky záření. Dávka 1 Gy je tedy energie 1 J předaná látce o hmotnosti 1 kilogram. V praxi je tato hodnota relativně vysoká. Proto se používají její násobky mGy a μ Gy. *„Akutní nemoc z ozáření (akutní postradiační syndrom) se rozvíjí po jednorázovém ozáření celého těla nebo jeho větší části dávkou asi od 1 Gy výše. V závislosti na stupni ozáření převládají v klinickém obraze příznaky od poškození krvetvorných orgánů a trávicího ústrojí až k poškození centrálního nervového systému.“* [6]

3.2.2 Dávkový příkon

Je definován jako dávka, která je předaná zasaženému objemu látky za jednotku času. Jednotkou je pak Gy/s, v praxi užívanější jeho násobek mGy/hod.

3.2.3 Ekvivalentní dávka

Ekvivalentní dávka H_t je definována jako střední absorbovaná dávka D_{tr} násobená radiačním váhovým faktorem W_r . Radiační váhový faktor udává, kolikrát je dané záření biologicky nebezpečnější než záření γ , které má tento faktor roven 1. Ale například částice α jej mají roven 20.[7] Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert [Sv] na počest švédského radiologa Rolfa Sievrta, který byl průkopníkem radiační ochrany. Vzhledem k faktu že pro praktické využití v provozu je 1 Sv vysoká hodnota, setkáváme se hlavně s jeho násobky mSv a μ Sv.

3.2.4 Příkon ekvivalentní dávky

Příkon ekvivalentní dávky H je podobně jako dávkový příkon vztažen na čas. Tedy je podílem přírůstku ekvivalentní dávky v časovém intervalu. Jednotkou příkonu H je sievert za sekundu [Sv/s]

3.2.5 Efektivní dávka

Efektivní dávka De_f byla zavedena kvůli potřebě reflektovat různou míru citlivosti tkání a orgánů na vliv záření. Za tím účelem je efektivní dávka definovaná jako součet vážených středních hodnot ekvivalentních dávek Ht násobených tkáňovým váhovým faktorem Wt . Jednotkou efektivní dávky je sievert [Sv]. Tkáňový váhový faktor je bezrozměrná veličina udávající relativní příspěvek dané tkáně k celkové újmě způsobené rovnoměrným ozářením celého těla. Součet všech váhových faktorů je roven 1.

3.2.6 Kerma

Kerma (kinetic energy released in material – kinetická energie uvolněná v materiálu), je veličina, která popisuje množství energie uvolněné v materiálu v důsledku interakce ionizujícího záření s uvažovanou hmotou. Byla zavedena pro lepší podání informace o dění v okolí sledovaného objemu látky. Její jednotkou je grey [Gy]. Používá se v souvislosti s nepřímo ionizujícím zářením a pokud je dodržena podmínka rovnováhy nabitých částic, je rovna dávce.[8]

3.3 Vliv radioaktivity na lidské zdraví

Od počátku minulého století jsou získávány poznatky o vlivu radioaktivního záření na lidské tělo a jeho zdraví. Tyto poznatky jsou dnes již velmi rozsáhlé, ale rozhodně ne úplné. Nejpodstatnější metodou získávání těchto poznatků jsou skupinová šetření. Ta nám umožňují prokazovat zvýšenou frekvenci onemocnění, která jsou těžko odlišitelná od jejich spontánního původu. [9] Znalost biologických účinků je nutná pro stanovení jednoznačných kritérií radiační ochrany. Z nich je následně odvozen systém limitů pro obyvatele a radiační pracovníky. Mimo to je znalost vlivu záření na jednotlivé tkáně a orgány nutná pro schopnost podat první pomoc po nehodě na pracovišti a následnou léčbu.

Při průniku záření do živé hmoty dochází k ionizaci a excitaci za absorbování energie stejně jako u hmoty neživé. Na rozdíl od ní je ale organismus velmi složitý a proměnlivý, což vede k dalším dějům. Je podstatné zmínit, že ne všechny změny vyvolané zářením mají stejný dosah co do vážnosti či trvání. [9] Každá tkáň nebo orgán lidského těla má jinou radiosensitivitu, tedy citlivost k poškození zářením. Platí, že vyšší radiosensitivitu mají tkáně, které se obnovují rychlým buněčným dělením, jako například gonády.

Prvním z účinků záření na buňku je buněčná deplece, tímto termínem se označuje buněčná smrt. Ta může nastat v interfázi (interval mezi děleními), za vysoké dávky záření. Větší pravděpodobnost deplece nastává ve fázi buněčného dělení, poškození záření v této fázi způsobí neschopnost buňky se rozdělit. V této fázi stačí k usmrcení buňky nižší dávka než v interfázi, to můžeme odvodit jako důvod vyšší radiosensitivitu tkání s rychlým buněčným dělením.

Druhý z účinků záření na buňku je změna cytogenetické informace. Mutace způsobené zářením uvnitř buňky v jejím jádře v chromozomech. Tyto mutace mohou být bodové, genové nebo chromozonové. Podle jiného dělení pak gametické, které se propagují do dalších generací, nebo somatické které mají vztah ke vzniku rakoviny.[9]

Důležitou charakteristikou, kterou při účinku záření na člověka sledujeme je rozložení dávky v prostoru. Rozlišujeme, zda došlo k zevnímu ozáření celého těla, nebo jen určité části. Kdy pro každou část těla je biologická odpověď rozdílná.

Zvláštním případem je pak vnitřní kontaminace, ta může nastat všude tam, kde se pracuje s otevřenými zářiči. Zvláště pak v jaderných energetických zařízeních, kde v primárním okruhu vznikají radioaktivní korozní produkty. Dále v zařízeních pro zpracování vyhořelého paliva, dolech zabývajících se těžbou radioaktivních surovin, zařízení zabývající se výrobou radiofarmak jako například centra PET (pozitron emisní tomografie). A samozřejmě provozy zpracovávající RAO, kde se z podstaty činnosti nelze zcela vyhnout riziku kontaminace osob. [10] K vnitřní kontaminaci může dojít zažívacím, nebo dýchacím ústrojím. Eventuelně průnikem přes pokožku. Vnitřní kontaminace je velmi riziková, protože radionuklid, který vnikl do organismu se může dle své chemické povahy hromadit v konkrétních orgánech a ozařovat dlouhodobě.[8]

Existuje vztah mezi dávkou a jejím účinkem na lidské tělo. Rozlišujeme dva typy účinků a to stochastické (náhodné) a deterministické (důsledkové).

Stochastické účinky jsou vyvolané změnami genetické informace a mají statistický charakter. Nelze je přiřadit ke konkrétní dávce, kterou byla tkáň vystavena, a proto nelze určit práh, který daný účinek způsobí.

Se zvyšující se dávkou se zvyšuje pravděpodobnost onemocnění, ne však jeho závažnost. Stochastické účinky záření zahrnují výskyt zhoubných nádorů a genetické změny.

Deterministické účinky naproti tomu mají určený práh, po jehož překročení nastávají a následně se jejich závažnost zvyšuje spolu s dávkou. Na rozdíl od stochastických účinků mají charakteristický klinický obraz. Deterministickým účinkem je například radiační dermatitida, nebo akutní nemoc z ozáření. [6]

Radiační hormeze je podle některých autorů pozitivní vliv velmi nízkých dávek záření, který je způsoben stimulací chromozomových reparací. Podle závěrů Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu není však pro toto tvrzení dostatek dokladů a pozorované výsledky byly spíše následek reparačních dějů.[6]

3.4 Radioaktivní odpady

3.4.1 Definice radioaktivních odpadů

Za radioaktivní odpad můžeme prohlásit materiál, který obsahuje radionuklidy v množství a aktivitě ve které nespĺňuje zprošťovací úrovně. Tyto úrovně stanovuje pro každý radionuklid vyhláška č. 422/2016 sb., přesněji její příloha č.7. V případě směsi radionuklidů je jejich zprošťovací úroveň určena jako součet podílů aktivit jednotlivých radionuklidů a k nim určených zprošťovacích úrovní. Pokud je podíl menší než 1, pak je materiál pod zprošťovací úrovní. [7]

Dále je nutné, aby byl daný materiál vlastníkem prohlášen za odpad a nebyl už jinak využitelný. Pak je materiál považován za radioaktivní odpad. Zvláštním případem radioaktivního odpadu je vyhořelé jaderné palivo. Vlastníkem paliva jsou v České republice provozovatelé jaderných reaktorů a jejich prohlášení je v tomto směrodatné.[11] Specifikem vyhořelého jaderného paliva ale je jeho možná využitelnost v budoucnu. „*Palivo vyňaté*

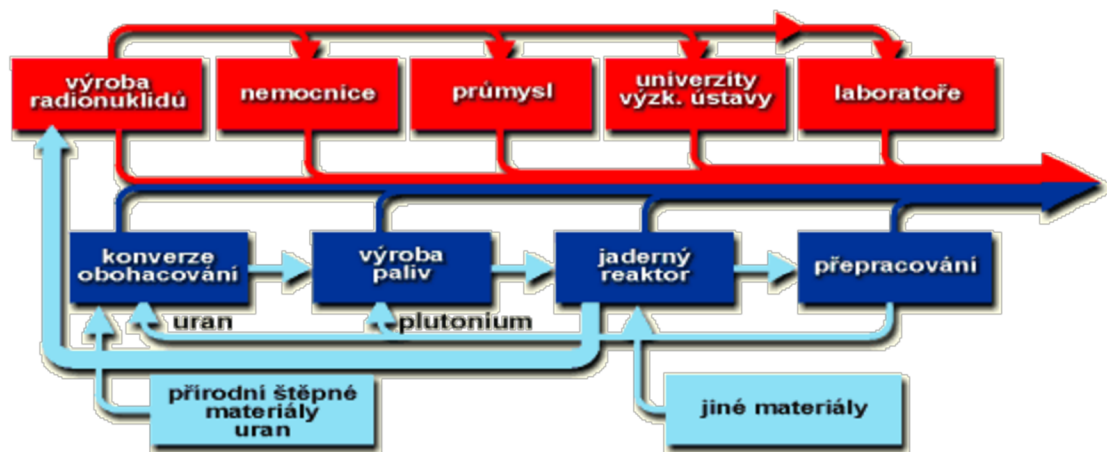
z reaktoru stále ještě obsahuje 95% nespotřebovaného uranu a z toho 1% štěpitelného uranu 235. a 1% štěpitelného izotopu plutonia 239.“ [12] Je tedy možné nahlížet na vyhořelé jaderné palivo jako na druhotnou surovinu. Již dnes je možné toto palivo částečně recyklovat na palivo typu MOX (mixed oxide fuel), které je směsí obohaceného uranu a plutonia.

3.4.2 Klasifikace radioaktivních odpadů

Klasifikace RAO je nezbytná pro jejich další bezpečné zpracování. S každým druhem RAO je třeba nakládat dle jeho chemických a fyzikálních vlastností. Dělení probíhá jak obecně dle aktivity či skupenství, tak specificky pro účely zpracování, jako je dělení na odpady lisovatelné a nelisovatelné.

Odpady v první řadě klasifikujeme dle místa jejich vzniku. Mohou být institucionální: produkované ve výzkumných zařízeních, medicínských zařízeních během diagnózy a léčby či průmyslu využívajícím radioaktivní zářiče. 90% veškeré radioaktivity odpadů ale zaujmají odpady vzniklé v rámci jaderného palivového cyklu.[12] Nejedná se pouze o vyhořelé jaderné palivo, ale o veškeré odpady pocházející z procesu těžby, zpracování, obohacování a výroby jaderného paliva. Dále veškeré reaktorové odpady z provozu jaderného reaktoru a přidružených zařízení, a nakonec odpad vzniklý při vyřazování jaderného zařízení.[11]

Obrázek 5: Původci RAO



Zdroj: https://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/odpady_3.html

Dále se odpady dělí dle doby, po kterou musí být izolovány od životního prostředí na odpady přechodné tvořené radionuklidy s poločasem přeměny do 1 roku, odpady krátkodobé s poločasem přeměny od 1 do 30 let a dlouhodobé s poločasem přeměny nad 30 let.[11]

Klasifikace dle aktivity obsažených radionuklidů dělí RAO na nízko, středně a vysoce aktivní odpady. Orientační aktivity jsou zaneseny v tabulce č. 1. [11]

Tabulka 1: Aktivity odpadů

| | |
|------------------------|---------------------------------------------------|
| Nízko aktivní | $< 10^9 \text{ Bq/m}^3$ |
| Středně aktivní | $10^9 - 10^{14} \text{ Bq/m}^3$ |
| Vysoce aktivní | $>10^{14} \text{ Bq/m}^3$ |

Z pohledu zpracování RAO je podstatné dále dělit odpady dle jejich fyzikálních vlastností. Hlavním rozdělením je skupenství, kdy dělíme odpady na pevné, kapalné a plynné. Pro zvýšení užitečného objemu sudu obsahujícího konečný produkt RAO dělíme odpady na lisovatelné a nelisovatelné. Dále například na rozpustné, nerozpustné atd. Další dělení viz tabulka č. 2.

Tabulka 2: Další dělení RAO

| Druh záření | Alfa | Beta | Gama | - |
|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Tepelný výkon | Významná produkce tepla | Nevýznamná produkce tepla | - | - |
| Kritičnost | S obsahem štěpitelných materiálů | Bez obsahu štěpitelných materiálů | - | - |
| Povrchová kontaminace | Bez povrchové kontaminace | Slabě kontaminované | Středně kontaminované | Silně kontaminované |
| Původ | Přírodní | Umělý | - | - |
| Hořlavost | Spalitelné | Nespalitelné | - | - |

Od šedesátých let minulého století se klasifikací radioaktivních odpadů zabývá i mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE, respektive IAEA). Aktuálně platná příručka pro kategorizaci RAO pod číslem GSG-1 z roku 2009 obsahuje doporučení pro kategorizaci a uložení dle následující tabulky č. 3 [13]

Tabulka 3: Klasifikace dle doporučení MAAE

| Kategorie | Charakteristika | Uložení |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Zproštěný odpad | Odpad, který splňuje zprošťovací úroveň a může být uvolněn do životního prostředí. | Bez omezení |
| Velmi krátkodobé odpady | Odpady s radionuklidy o krátkém poločasu přeměny. Jsou skladovány do vymření a následně uvolněny do životního prostředí. | Bez omezení |
| Velmi nízko aktivní odpady | Odpady, které nesplňují parametry zproštění, ale nepředstavují vysoké riziko a lze s nimi ukládat i neradioaktivní odpad. Příklad takového odpadu je hlušina po těžbě radioaktivních surovin. | Řízené skládky |
| Nízko aktivní odpady | Obsahující radionuklidy nesplňující zprošťovací úroveň, ale s malým obsahem dlouhodobých radionuklidů. Tyto odpady vyžadují důkladnou izolaci. | Přípovrchová úložiště |
| Středně aktivní odpady | Obsahující dlouhodobé radionuklidy, znemožňující institucionální kontrolu po dobu jejich vymírání. Bez nutnosti zajišťovat odvod tepla. | Hlubinné úložiště |
| Vysoce aktivní odpady | Vyhořelé jaderné palivo a jiné odpady obsahující dlouhodobé radionuklidy, pro které musí být úložiště konstruováno, nebo odpady s tak vysokou aktivitou že dochází k vyvíjení tepla. | Hlubinné úložiště |

3.4.3 Pracoviště se zdroji ionizujícího záření

Pracoviště vykonávající činnost s radioaktivními zdroji jsou v zákoně č.263/2016 sb. členěny v jeho § 61 na 4 kategorie označené římskými číslicemi I. – IV. Těmto kategoriím se dále věnuje vyhláška č. 422/2016 sb. Ve svém § 19, kde jsou jednotlivým kategoriím přiřazeny podrobné definice. Pracoviště zpracovávající RAO jsou zařazena do III. a IV. kategorie.

Samotná pracoviště pak dle svých radiačních parametrů mohou být provozována ve vymezených prostorech, a to v takzvaném sledovaném nebo kontrolovaném pásmu.

Sledované pásmo je vymezeno „Na pracovišti se zdrojem ionizujícího záření, kde lze předpokládat, že by efektivní dávka mohla být vyšší než 1 mSv ročně nebo by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než jedna desetina limitu ozáření pro radiačního pracovníka pro oční čočku, kůži a končetiny.“ [14]

Musí být při svém vymezení jednoznačně určené a ucelené. Dále by mělo být stavebně oddělené. Je nutné, aby vchod sledovaného pásma byl označen znakem radiačního nebezpečí a také aby na něm byli deklarovány používané zdroje ionizujícího záření a jejich rizika. Pracoviště musí být vybaveno ochrannými prostředky a pracovní činnosti na něm mohou vykonávat pouze radiační pracovníci. V době mimo práci se zdroji záření musí být plošná aktivita povrchů na pracovišti nižší než 0,4 Bq/cm² pro zářiče emitující záření beta, gama nebo nízké toxický zdroj záření alfa a 0,04 Bq/cm² pro ostatní zářiče alfa.

Kontrolované pásmo je vymezeno „Na pracovišti se zdrojem ionizujícího záření, kde lze předpokládat, že by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo že by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než tři desetiny limitu pro radiačního pracovníka pro kůži anebo končetiny nebo 15 mSv pro oční čočku“ [14]

Kromě jasného označení a ucelenosti jako tomu je u sledovaného pásma je kontrolované pásmo specifické tím, že je vyžadována ochrana proti vstupu nepovolané osoby. Práce v kontrolovaném pásmu může vykonávat pouze radiační pracovník kategorie A. Další podmínky práce v kontrolovaném pásmu definuje vyhláška 422/2016 sb. ve svém § 46. Plošná aktivita povrchů v kontrolovaném pásmu mimo dobu práce se zdroji záření musí být

nižší než 4 Bq/cm² pro zářiče emitující záření beta, gama nebo nízcce toxický zdroj záření alfa a 0,4 Bq/cm² pro ostatní zářiče alfa.

3.4.4 Monitorování radiační situace na pracovištích zpracovávajících RAO

Jedním z dokumentů nutných pro povelní činnosti, kterou je provoz pracoviště III. a IV. kategorie je mimo jiné i program monitorování. Tento dokument obsahuje systém kontroly radiační situace daného pracoviště, prokazuje optimalizaci radiační ochrany a dodržování požadavků na limitaci ozáření osob. Díky systému, který stanovuje je možné včas odhalit odchylky od normálního stavu. Obsahuje tyto části [15]:

- Monitorování pracoviště.
- Monitorování osob.
- Monitorování výpustí.
- Monitorování okolí.

Obsahuje nejenom popis monitorování za běžného standartního provozu, ale i popis monitorování v případě radiační mimořádné události nebo radiační havárie.

Monitorování konkrétního pracoviště je v programu monitorování podrobně popsáno a zpětně i program monitorování je aktualizován dle změn na pracovišti zvláště v případě změny používaných zdrojů ionizujícího záření, podmínkách nebo způsobu nakládání s nimi. Během monitorování pracoviště se sledují nejčastěji tyto ukazatele:

Hodnoty povrchové kontaminace na plochách podlah, nábytku, pracovních nástrojů, přístrojů atd. Hodnotí funkci bariér zabraňujícím rozptylu radioaktivních látek.

Hodnoty příkonu dávkového ekvivalentu pro zhodnocení rizika a míry ozáření osob pracujících na sledovaném pracovišti. Sledování těchto hodnot pomáhá optimalizovat pracoviště ve smyslu stínění zdrojů ionizujícího záření a provozním dozimetristům umožňuje stanovit maximální dobu a podmínky za jakých má práce na pracovišti probíhat.

Hodnoty objemové aktivity aerosolů ve vzduchu je nutné zavést na pracovištích IV. kategorie a na pracovištích III. kategorie, na kterých jsou používány/zpracovávány otevřené zdroje, pokud charakter práce s nimi umožňuje kontaminaci ovzduší.

Rozlišujeme měření [15]:

- kontinuální (nepřetržité): potvrzuje bezpečné pracovní podmínky a dokazuje jejich neměnnost.
- periodické (pravidelné): opakuje se ve lhůtách stanovených v programu monitorování.
- operativní (při činnosti): kontroluje průběh konkrétní činnosti.

3.4.5 **Přístrojová technika monitorování**

Za účelem přijímání, zpracování a ukládání radioaktivních odpadů používají pracoviště celou řadu přístrojů monitorujících radiační vlastnosti konkrétního materiálu. Dále pak přístroje pro měření radiační situace na pracovišti. Následuje popis přístrojové výzbroje ukázkového pracoviště. Pro aktuální informace o používané technice jsem využil zázemí Centra nakládání s RAO ÚJV Řež, a.s.

Měření povrchové kontaminace pracoviště: Pro měření povrchové kontaminace na pracovišti jsou využívány přenosné ruční přístroje založené na technologii proporcionálních detektorů a scintilačních detektorů. Měření je prováděno dvěma metodami, a to přímou metodou, kdy je přístroj přiložen přímo na měřený povrch a otěrovou metodou, kdy je konkrétní plocha (zpravidla 100cm²), měřeného povrchu otřena vhodným otěrovým materiálem a vyhodnocení probíhá změřením tohoto stěru. Následuje stručný popis přístrojů používaných na pracovištích Centra nakládání s odpady ÚJV Řež, a.s.:

LB 124 Scint

Tento monitor kontaminace používá metodu scintilačního detektoru. Ten je vyroben ze sulfidu zinku ZnS. Záření, jenž na povrch scintilátoru dopadá vyvolá záblesk světla, který je odveden do fotonásobiče pomocí reflektoru se vhodným předzesilovačem a diskriminačním stupněm. Následně jsou signály měřeny a elektronicky vyhodnoceny. Tento přístroj obsahuje korelační obvody, ty umožňují rozlišit záření alfa, beta a gama a tím je měřit současně.[16]

Obrázek 6: LB 124



Zdroj: <https://nokitechnologies.com/wp-content/uploads/2022/09/png-1-27-3.jpg>

LB 122

Monitor kontaminace LB 122 je schopný měřit alfa, beta a gama záření. Využívá proporcionální detektor s plochou okna 160cm^2 plněný butanem. Proporcionální detektor pracuje na principu sekundární ionizace v blízkém okolí tenkého vodiče, který je pod vysokým napětím a je obklopen plynem, v tomto případě butanem. Příchozí záření ionizuje atomy plynu a takto vzniklé elektrony jsou urychleny směrem k anodě tvořené vodičem. Výstupní impulsy jsou úměrné energii záření, které bylo v pracovním prostoru detektoru pohlceno. Velkou výhodou proporcionálních detektorů je vysoká citlivost a lineární odezva.[2]

Obrázek 7: LB 122



Zdroj: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Portable_Geiger_counter_Berthold_LB122-01.jpg

Měření příkonu dávkového ekvivalentu: Je prováděno jak přenosnými, tak stacionárními přístroji. Přenosné přístroje umožňují operativní měření přímo na místě práce, nebo měření prostorů mimo dosah sond stacionárního systému. Na pracovišti Centra nakládání s RAO jsou používány přístroje na bázi Geigerova počítače. Ten má oproti proporcionálnímu detektoru vyšší napětí na katodě což vede k lavinovité sekundární ionizaci.

FH 40 G-10

Všestranný Geiger-Müllerův počítač, který lze rozšířit externími sondami (například scintilační NaI(Tl)). Je robustní a voděodolný, díky jednoduchému ovládní je vhodný i pro personál s minimálním zaškolením. Je schopen měřit příkon dávky až do hranice 1 Sv/hod.

Obrázek 8: FH 40



Zdroj: <https://www.thermofisher.com/TFS-Assets/CCG/product-images/FH%2040G-L.jpg-650.jpg>

Kontinuální měření

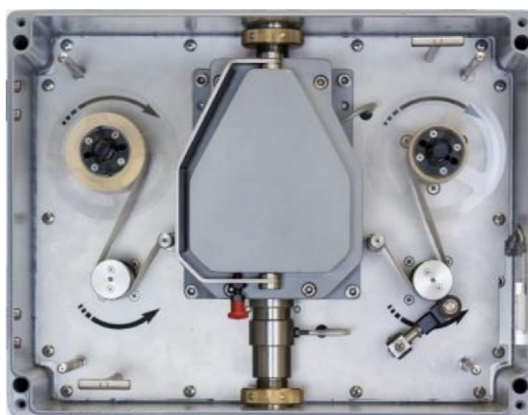
Stacionární sonda MDG 08e

Pracoviště jako je výše zmíněné vyžaduje kontinuální měření příkonu dávkového ekvivalentu v prostorách kontrolovaného pásma. Měření je provozováno za účelem kontroly stavu radiační situace a bezpečnosti práce na něm. Z dlouhodobého hlediska umožňuje kontrolovat jakost a optimalizaci systému zabezpečení zdrojů ionizujícího záření. Na tomto konkrétním pracovišti jsou využívány sondy MDG firmy VF, a.s. Tyto sondy jsou opatřeny třemi Geiger-Müllerovi trubicemi a mikroprocesorovou jednotkou. Celý systém je uzavřen do vodotěsného pouzdra. Skrze rozhraní RS-485 jsou data předávána do lokální zobrazovací jednotky a následně jsou data ze všech pracovišť svedena do dozimetrického systému CISRK, který je přístupný přes PC.

Kontinuální měření aerosolů ve vzduchu CPD – 14

Vzhledem k charakteru činností během zpracovávání RAO, které je často otevřeným zdrojem záření je na pracovišti vysoké riziko uvolňování radioaktivních aerosolů do vzduchu. Za účelem monitorování úrovně těchto látek ve vzduchu je vzduchotechnický systém budovy opatřen přístroji umožňující kontinuální monitorování. Typickým zařízením je i CPD – 14. Princip funkce je prosávání vzdušiny přes filtrační pásku, která aerosoly zachytí a je změřena alfa a beta kanálem detektory Si – PIN (křemíkový polovodičový detektor s přechodem p-i-n). Filtrační páska se v průběhu měření kontinuálně posouvá. Vnitřní uspořádání viz obrázek 9.

Obrázek 9: CPD-14



Zdroj: https://www.vfnuclear.com/uploads/fe_photogallery/747cf21792c540e5286d268380784916-cpd-14-1.jpg

Data z kontinuálního měření příkonů dávkových ekvivalentů i aerosolů ve vzduchu jsou svedena do centrálního systému, ke kterému mají pracovníci dozimetrie přístup a mají tak neustálý přehled o radiční situaci na všech pracovištích v kontrolovaném pásnu.

Obrázek 10: dozimetrický systém

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Přízemí - dávkové příkony m.č. 10 1,43E+00 uGy/h 4,63E+00 uGy/h 1,84E+00 uGy/h 2,49E+01 uGy/h 1,36E+00 uGy/h | Přízemí - OA Aerosolů Okamžitá Av Alfa 1,27E+01 Bq/m3 Okamžitá Av Beta 3,06E+01 Bq/m3 Av Alfa za periodu 09.03.23 22.51 5,44E-02 Bq/m3 Av Beta za periodu 09.03.23 22.51 5,24E-01 Bq/m3 | Průtok ventilací 11216,7 m3/h Průtok filtrem 35,2 l/min Zbývající délka pásky 17,4 m Počet dnů do konce pásky 145,0 dnů Perioda měření 240 min |
| 1. suterén - dávkové příkony 8,30E-01 uGy/h m.č. 019 8,04E+00 uGy/h m.č. 019 1,86E+00 uGy/h m.č. 017 | 1. suterén - OA Aerosolů Okamžitá Av Alfa 1,65E+01 Bq/m3 Okamžitá Av Beta 5,47E+01 Bq/m3 Av Alfa za periodu 09.03.23 22.51 5,62E-01 Bq/m3 Av Beta za periodu 09.03.23 22.51 6,89E-01 Bq/m3 | Průtok ventilací 12400,0 m3/h Průtok filtrem 35,2 l/min Zbývající délka pásky 1,8 m Počet dnů do konce pásky 19,1 dnů Perioda měření 240 min |
| 2. suterén - dávkové příkony m.č. 00013 4,03E-01 uGy/h | | |

Zdroj: archiv autora

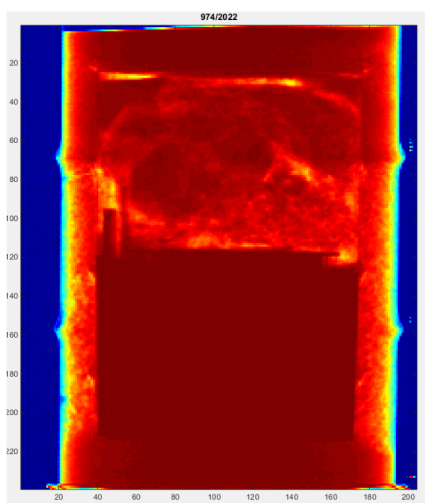
3.4.6 Nedestruktivní charakterizace

Vzhledem k nutnosti ověřovat kvantitativní a kvalitativní vlastnosti RAO při jeho přijetí ke zpracování byly vyvinuty metody nedestruktivní analýzy, které umožňují provádět ověření bez nutnosti poškození integrity materiálu čímž zvyšují bezpečnost pracovníků. Pokud to charakter materiálu a situace umožňuje, je nedestruktivní analýza vždy preferována. [17] Přední metody charakterizace v ČR představuje radiografie a gamaspektrometrie.

Radiografie s využitím zdroje záření

Například v USA, představuje radiografické měření vůbec první ověření odpadů při procesu přijímání na úložiště. [17] V ČR je radiografické pracoviště provozováno v Centru nakládání s odpady ÚJV Řež. Radiografický přístroj funguje na principu prozařování celého obalového souboru obsahujícího RAO silným zářičem gama, například ^{60}Co a detekování zeslabení svazku kvant gama za obalovým souborem vhodným detektorem. Tímto způsobem vznikne matice o n sloupcích a m řádcích obsahující množství signálů za vteřinu v měřených bodech, matice je dále škálována a potažena barevnou mapou vhodně zvoleným softwarem, například Matlab. Vzniklý obraz představuje rozložení hustoty uvnitř obalového souboru a umožňuje odhalit vady vnitřního uspořádání tak jako charakter a materiál RAO. Příklad výsledného obrazu viz obrázek č. 11:

Obrázek 11: Radiografie obalového souboru s RAO



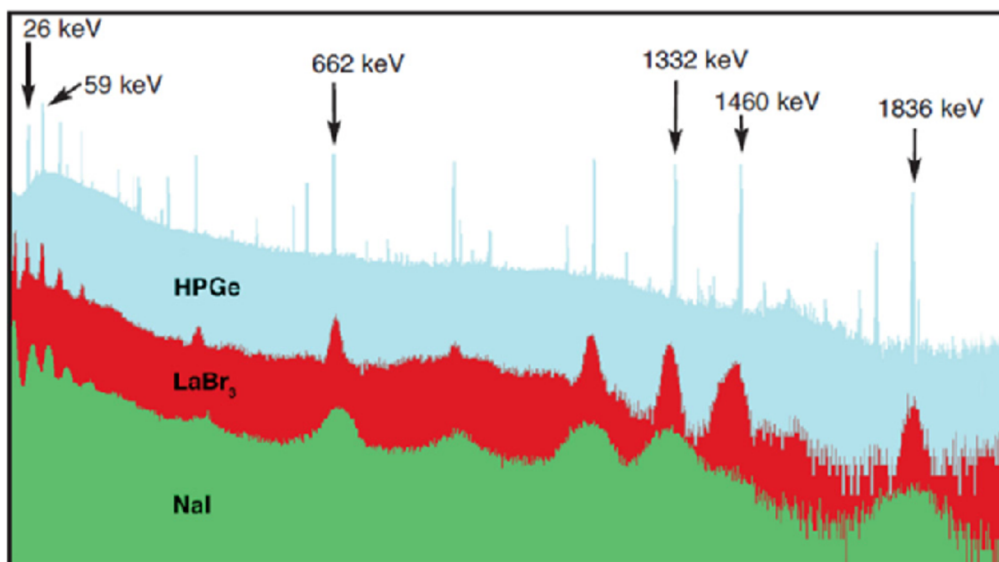
Zdroj: archiv autora

Gamaspektrometrie

Spektrometrické měření záření gama je široce využívanou metodou nedestruktivní charakterizace, setkáme se s ní téměř na všech pracovištích, která RAO zpracovávají. Pro spektrometrii gama jsou nejčastěji využívány dva typy detektorů: scintilační detektory, jako například ty s krystalem NaI(Tl), a polovodičové detektory, hlavně germaniové a křemíkové. Scintilační detektory jsou relativně citlivější než běžné polovodičové detektory, což znamená, že jsou schopny detekovat více fotonů dopadajících na detektor.

Na druhou stranu se polovodičové detektory vyznačují výrazně vyšším energetickým rozlišením, což je výhodné pro analýzu složitých spekter měřených vzorků. To je dáno tím, že pro vytvoření iontového páru v polovodiči je zapotřebí energie cca 3 eV, zatímco u scintilačního detektoru je pro vyražení elektronu z fotokatody tato energie asi 50 krát vyšší.[18] Názorně je tento jev ukázán na následujícím obrázku znázorňující podobu tří spekter. Scintilační detektory NaI, LaBr₃ a polovodičový detektor HPGe (high purity germanium).

Obrázek 12: porovnání Scintilačních a polovodičových detektorů



Zdroj: DOI:10.1016/j.sbspro.2015.06.380: New Developments of Neutron Activation Analysis Applications Stav problematiky

4 Stav problematiky

4.1 Legislativa

4.1.1 Česká republika

Aktuálně platný Zákon č. 263/2016 Sb. (Atomový zákon) zahrnuje kompletní úpravu otázek týkajících se mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Tento zákon nahradil od 1. ledna 2017 původní zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, který nadále reguluje pouze odpovědnost za jaderné škody.

Atomový zákon je prováděn následujícími vyhláškami: 379/2016 Sb., 378/2016 Sb., 377/2016 Sb., 376/2016 Sb., 375/2016 Sb., 374/2016 Sb., 362/2016 Sb., 361/2016 Sb., 360/2016 Sb., 359/2016 Sb., 358/2016 Sb., 347/2016 Sb., 408/2016 Sb., 409/2016 Sb. a 422/2016 Sb., 21/2017 Sb., 162/2017 Sb., 329/2017 Sb., 266/2017 Sb., 250/2020 Sb. Tyto předpisy se zabývají otázkami jako je schválení typu výrobků v oblasti jaderné energie, umístění jaderných zařízení, bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem, zabezpečení jaderného zařízení, monitorování radiační situace a dalšími otázkami týkajícími se jaderné bezpečnosti. [21]

Pro splnění požadavků směrnice 2011/70/Euratom vláda české republiky schvaluje Koncepti nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem. Aktuálně platná koncepce byla schválena dne 26. srpna 2019 usnesením č. 597/2019.

4.1.2 Evropská unie

Hlavní právní předpisy EU v oblasti radioaktivních odpadů jsou:

- Směrnice 2011/70/Euratom o nakládání s radioaktivními odpady
- Směrnice 2013/59/Euratom o základních normách bezpečnosti a ochrany zdraví při ochraně před nebezpečími ionizujícího záření

Směrnice 2011/70/Euratom stanovuje zásady nakládání s radioaktivními odpady. Tato směrnice stanovuje, že radioaktivní odpady by měly být nejprve minimalizovány na zdroji, následně by měly být bezpečně sbírány, transportovány, zpracovány a uloženy tak, aby

neohrozily zdraví lidí a životní prostředí. Směrnice dále stanovuje povinnosti členských států v oblasti nakládání s radioaktivními odpady.

Například zajištění finančních prostředků na účinné nakládání s odpady nebo povinnosti informovat veřejnost o činnostech v oblasti nakládání s radioaktivními odpady. Podstatnou součástí této směrnice je i požadavek na všechny země EU, aby měly národní politiku pro nakládání s radioaktivními odpady a aby vypracovaly a prováděly národní programy pro správu těchto materiálů. Programy by měly zahrnovat všechny druhy vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů pod jurisdikcí zemí EU a všechny fáze nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivními odpady od vzniku až po likvidaci.[19]

Od srpna 2015 předkládají země EU každé 3 roky zprávy o provádění směrnice Komisi. Na základě těchto zpráv Komise vypracovává zprávu o celkovém provádění směrnice a inventář radioaktivních odpadů a vyhořelého paliva přítomných na území Společenství a budoucí výhledy.

Směrnice 2013/59/Euratom stanovuje základní normy bezpečnosti a ochrany zdraví při ochraně před nebezpečími ionizujícího záření. Tato směrnice stanovuje požadavky na ochranu před ionizujícím zářením a zahrnuje způsoby nakládání s radioaktivními odpady. Směrnice dále požaduje, aby byli odpovědní orgány povinni posoudit a kontrolovat všechny aspekty nakládání s radioaktivními odpady včetně plánování, sběru, přepravy, zpracování a skladování.[20]

4.2 RAO v České republice

V České republice je za bezpečné uložení RAO odpovědná Správa úložišť radioaktivního odpadu (SÚRAO), která je organizací státního sektoru. SÚRAO se řídí ustanoveními atomového zákona a dalšími českými právními předpisy, stejně jako mezinárodními smlouvami a doporučeními týkajícími se využívání jaderné energie a ionizujícího záření, které byly přijaty Českou republikou. V ČR se RAO dělí na tři základní kategorie – nízkoaktivní, středně aktivní a vysokoaktivní odpady – přičemž způsob jejich uložení závisí na konkrétním typu odpadu. [11]

Hlavní principy aktuálně platné české Koncepce pro nakládání s RAO lze shrnout následovně: V České republice mohou nakládat s radioaktivními odpady a vyhořelým

jaderným palivem (VJP) pouze držitelé povolení, které vydává Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), a to pouze po splnění požadavků stanovených v atomovém zákoně a jeho prováděcích předpisech. Nakládání s VJP a RAO v ČR musí být v souladu s národními strategickými cíli a uznávanými mezinárodními principy, jako jsou doporučení MAAE a Agentury pro jadernou energii při Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj nebo požadavky Evropské komise. [22]

Náklady na nakládání s RAO a VJP hradí původci odpadu a náklady na uložení nově vznikajících RAO a VJP se nepřenesují na budoucí generace. Původci musí omezovat produkci odpadů a poskytovat SÚRAO informace o krátkodobé a dlouhodobé tvorbě odpadů a další podklady pro stanovení výše a způsobu odvádění finančních prostředků na jaderný účet, kterým je SÚRAO financováno. Poplatky za ukládání nezbytných zbytkových RAO a VJP jsou stanoveny samostatně. [22]

Držitelé povolení musí vést přesnou evidenci RAO a VJP takovým způsobem, aby byly zaznamenány všechny požadované charakteristiky odpadů. Držitelé povolení SÚJB upravují RAO pro uložení s cílem minimalizovat odklad. [22]

4.2.1 Druhy RAO a jejich původci v ČR

Institucionální odpady tedy odpady vznikající v průmyslu, výzkumu, zemědělství nebo zdravotnictví. Mohou obsahovat například staré měřicí přístroje, radioaktivní zářiče obsažené v detektorech kouře, vyřazené etalony aktivity, znečištěné pracovní oděvy, látky, papír nebo injekční stříkačky. Důležité je, zda obsahují přírodní radionuklidy, jako je uran a radium, nebo uměle vytvořené radionuklidy, jako je americium, plutonium, cesium aj. Na základě této klasifikace jsou odpady ukládány. Odpady s přírodními radionuklidy jsou ukládány do úložiště Bratrství u Jáchymova a ostatní odpady jsou ukládány do úložiště Richard blízko Litoměřic.[11]

Na území české republiky je evidováno 70 původců [23] institucionálních odpadů, což komplikuje zabezpečení tohoto odpadu. V roce 2022 bylo do úložiště Richard uloženo 135,6 m³ RAO o aktivitě 27,3 TBq, Do úložiště Bratrství se v roce 2022 odpad neukládal [24]

Většina institucionálních radioaktivních odpadů je nízkoaktivní. V České republice existuje několik organizací, které jsou držiteli povolení pro zpracování nebo úpravu radioaktivního odpadu a mohou tuto službu poskytovat ostatním původcům odpadu.

V ÚJV Řež a.s. se zpracovává a upravuje téměř 90% všech institucionálních odpadů České republiky. Zároveň je jejich největším producentem.[22] Kromě ÚJV je v ČR dalších 7 držitelů povolení ke zpracování RAO.[24]

Provozní odpady z jaderných elektráren Temelín a Dukovany se skládají z různých kontaminovaných kapalin a ochranných pomůcek, které při provozu jaderné elektrárny přišly do styku s radionuklidy. Pro ukládání tohoto odpadu slouží úložiště Dukovany, které se nachází v areálu stejnojmenné jaderné elektrárny. V současné době se také intenzivně pracuje na přípravě hlubinného úložiště, které bude určeno pro ukládání středně a vysokoaktivního odpadu na dlouhou dobu.

V jaderných elektrárnách jsou odpady důkladně tříděny a shromažďovány podle svého typu a aktivity, aby se zajistilo správné nakládání s nimi. Odpadní vody jsou odděleně shromažďovány v nádržích v závislosti na jejich dalším zpracování. Pevný odpad se shromažďuje na sběrných místech, kde se již provádí třídění odpadu, a dále se třídí na specializovaných pracovištích. Odpad, který splňuje požadavky zákona, může být uvolněn do životního prostředí, zatímco odpad, který nelze uvolnit, je dále považován za RAO.[22]

V roce 2022 bylo uloženo do úložiště Dukovany 1084 obalových souborů z JE Dukovany, 277 obalových souborů z JE Temelín a 87 obalových souborů pocházejících z reaktoru provozovaném v ÚJV Řež. Dohromady o objemu 318,7 m³. [24]

Vyhořelé jaderné palivo je po vyjmutí z reaktoru skladováno v bazénech vyhořelého jaderného paliva po dobu přibližně 7-10 let a poté přemístěno do suchých skladů, kde zůstává po dobu 40-60 let. Tyto sklady jsou umístěny v blízkosti elektráren. Společnost ČEZ, a. s., deklarovala záměr prohlásit VJP za odpad a po roce 2065 ho předat k uložení SÚRAO. [22]

Plánované prodloužení provozu stávajících reaktorů a případné spuštění nových povedou k nárůstu objemu VJP, což bude vyžadovat v budoucnu vytvoření nových skladovacích kapacit.

V současné době se obecně přijímá, že nejbezpečnějším způsobem zneškodnění vyhořelého jaderného paliva nebo jeho zbytků po přepracování je jejich uložení do hlubinného úložiště.[22] Bezpečné uložení vyhořelého jaderného paliva v hlubinných geologických úložištích je založeno na tzv. více bariérovém konceptu. První bariérou je obalový soubor samotného odpadu, druhou nepropustná zemina.

Třetí bariéru poskytuje okolní stálé horninové prostředí v hloubce 500 metrů a více pod zemským povrchem.[25] Finsko je první členskou zemí Evropské unie, která by hlubinné úložiště měla uvést do provozu, a to v roce 2023 na ostrově Olkiluoto. Česká republika započala systematický proces přípravy hlubinného úložiště po zrušení smlouvy o bezplatném odvozu vyhořelého jaderného paliva do bývalého Sovětského svazu v roce 1989. Český geologický ústav v roce 1992 vybral 27 potenciálně vhodných oblastí pro umístění hlubinného úložiště a osm z nich bylo doporučeno k dalšímu průzkumu. Konečná lokalita úložiště by měla být určena do roku 2025, uvedení úložiště do provozu by pak mělo proběhnout do roku 2065.[22]

4.2.2 Nakládání s RAO

Přibližně 90 % všech institucionálních odpadů z České republiky je zpracováváno společností ÚJV Řež na pracovištích Centra nakládání s RAO (dále jen centrum).[22] Centrum poskytuje široké spektrum služeb souvisejících s nakládáním s radioaktivními odpady. Mezi tyto činnosti patří zpracování a úprava odpadů pro uložení či skladování v úložišti, dekontaminace radioaktivně kontaminovaných materiálů a zařízení, přeprava kontaminovaného materiálu k likvidaci, přeprava vyhořelého jaderného paliva z výzkumných reaktorů a vyřazování pracovišť se zdroji ionizujícího záření z provozu. Kromě toho Centrum provádí výzkum a vývoj v oblasti nakládání s radioaktivními odpady pro své vlastní potřeby a potřeby externích zákazníků, zejména ČEZ, a. s. [31]

Obecně lze systém nakládání s RAO shrnout následujícím způsobem [32]:

Tabulka 4: nakládání s RAO

| Činnost | Popis |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Převzetí a přeprava | Přeprava RAO z místa vzniku na místo shromažďování nebo zpracování. |
| 2. Kontrola převzatých | Radiační kontrola převzatého RAO |
| 3. Shromažďování | Shromažďování RAO na určeném místě. |
| 4. Charakterizace | Určení složení a vlastností RAO. |
| 5. Třídění | Rozdělení RAO podle typu a vlastností. |
| 6. Skladování | Skladování dle typu RAO před zpracováním a úpravou. |
| 7. Zpracování a úprava | Zpracování zvláště pevných a kapalných RAO dle aktuálních postupů. |
| 8. Uvolňování | Materiál vhodný k uvolnění do ŽP není dále veden jako RAO |
| 9. Nakládání s upraveným RAO | Skladování a kontrola radiačních a fyzikálních vlastností před konečným uložením na úložiště. |

RAO je přijato od původce odpadu a na převzatém RAO probíhá kontrola, zda odpovídá charakteru, který uvádí původce a zda je vhodné pro správné nakládání s ním. Tato kontrola zahrnuje také ověření, zda RAO neobsahuje jiné nebezpečné vlastnosti kromě radioaktivity, jako například výbušnost, hořlavost, chemickou toxicitu, žíravost nebo infekčnost. Další aspekty kontroly jsou například ověření, zda RAO obsahuje přípustnou aktivitu pro zpracování a skladování v jednom obalovém souboru. Pokud je RAO přijímáno na místě vzniku u původce, je kontrola prováděna již na místě převzetí. Přeprava radioaktivního materiálu probíhá dle platných předpisů, zejména pak dle Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných látek ADR. Následně je dle typu RAO určeno pracoviště, na

kterém bude upraveno a na něm je shromážděno v určených přepravních kontejnerech případně na vhodné manipulační podložce.[31]

Po přijetí odpadu na pracoviště následuje podrobná charakterizace RAO. Sestává z ručního měření příkonu dávkového ekvivalentu, měření povrchové kontaminace a gamaspektrometrického měření celého obalového souboru, nebo vyňatého vzorku. Účelem je zjištění kvantitativního i kvalitativního radionuklidového složení. Některé radionuklidy je náročné stanovit, zvláště jedná-li se o radionuklidy emitující čistě alfa, nebo beta záření. Pro takové případy jsou využity služby specializovaných pracovišť Centrální analytické laboratoře ÚJV Řež, a. s. [31]

Následuje úprava RAO do obalového souboru pro konečné uložení. Ten slouží jako nepropustná bariéra, která brání průniku radioaktivních látek do životního prostředí. Nároky na obalové soubory stanovuje vyhláška 379/2016 sb. Obalové soubory obsahující radioaktivními odpady musí splňovat přísné požadavky pro konkrétní skladovací místo a při přijetí kontroluje jejich shodu SÚRAO. Pokud pracovníci úložiště zjistí, že obaly s odpady nevyhovují stanoveným podmínkám, nebudou odpady přijaty k uložení. Institucionální odpady jsou upraveny s ohledem na to, aby maximálně využili objem obalového souboru. Standartní obalový soubor institucionálního odpadu je 100 l sud zabetonovaný do 216 l sudu.[11]

Pevné odpady se dále dělí na lisovatelné a nelisovatelné. Lisování probíhá nízkotlakým lisem určeným ke zpracování odpadu ve formě ochranných pracovních pomůcek, vaků z průmyslových vysavačů a dalšího odpadu, který je k lisování vhodný. [11] V případě nelisovatelného odpadu, je jeho zpracování do standardního obalového souboru prováděno fragmentací na drobnější frakci. K fragmentaci jsou využívány hydraulické nůžky, mechanická pila, nebo plazmové řezání.[11] Je-li to to možné stran radiační ochrany a ekonomické výhodnosti, je RAO dekontaminováno, čímž vznikne kontaminovaný abrazivní materiál a původní materiál vhodný k uvolnění do životního prostředí.

Kapalné odpady jsou nejčastěji zpracovány metodou odpařování ta je nejúčinnější při zpracování kapalných radioaktivních odpadů, jelikož dosahuje vysokých hodnot dekontaminačního faktoru (až 10^5) a faktoru redukce objemu (až 10^4). Výhodou této metody je, že kondenzát je obvykle schopen být vypuštěn do životního prostředí bez dalšího zpracování. Ekonomicky je tento proces náročný, avšak spolehlivý a jednoduchý, jako většina tepelných úprav. Sušina nebo kalcinát, které vzniknou, musí být dále zpracovány nebo solidifikovány pro konečné uložení.[11] Další metodou je bitumenace při níž se kapalina odpařuje a zbývající suchý materiál se smíchá s roztaveným bitumenem nebo bitumenovou emulzí. Bitumen je organická látka, která je podobná asfaltu. Výhodou této metody je, že výsledný produkt má menší objem a má nízkou vyluhovatelnost ve vodě. Nevýhodou je hořlavost bitumenu, vyšší investiční náklady na zařízení, náročnost na obsluhu zařízení a jeho degradace v průběhu času. Další z užívaných metod je cementace kdy se kapalný radioaktivní odpad váže s cementem pomocí vody. Výhodou této metody je, že výsledný produkt je nehořlavý a proces je energeticky úsporný s jednoduchou technologií. Nevýhodou je výrazné zvětšení objemu výsledného produktu a vyšší vyluhovatelnost. [11]

Vybraná metoda úpravy musí splnit stanovené požadavky, ale zároveň by neměla být příliš finančně náročná. Pro každou metodu je vybráno jedno konkrétní zařízení, a pořizovací a provozní náklady se liší v závislosti na velikosti zařízení, jeho vytížení, vlastnostech zpracovávaného odpadu a aktuálních cenách jednotlivých komponent a materiálů. Na konci všech metod zpracování RAO je imobilizovaný materiál v předepsaném obalovém souboru přijatelný k uložení na úložišti.

4.2.3 Úložiště v České republice

RAO je nutné zadržet od průniku do životního prostředí, nebo ohrožení člověka na dostatečně dlouhou dobu. Na základě dlouhého poločasu přeměny některých radionuklidů tato doba překračuje stovky let a stává se tak velkou výzvou. Existuje globální konsensus všech zemí, které využívají jadernou energii ve větší či menší míře, že jediným konečným bezpečným řešením pro dlouhodobou správu jaderného odpadu je ukládání. Ukládáním se rozumí umístění odpadu do vhodného zařízení bez záměru ho později odstraňovat.[28] Za tímto účelem byly vybudovány úložiště radioaktivních odpadů, za jejichž provoz je v České republice zodpovědné SÚRAO. Úložiště RAO (ÚRAO) je místo nebo zařízení na povrchu nebo v podzemí.

ÚRAO Dukovany je jediné povrchové úložiště RAO v České republice. Bylo postaveno na rozloze 1,3 hektaru v areálu jaderné elektrárny Dukovany pro ukládání upraveného RAO z provozu jaderných elektráren. Sestává ze 112 železobetonových jímek ve čtyřech řadách. Soustava bariér s dlouhodobou životností zajišťuje, že v případě úniku radionuklidů do biosféry nedojde k nebezpečí. Jedná se o nejmladší ÚRAO v České republice, výstavba započala v roce 1987 a uvedení do provozu proběhlo roku 1995. Jeho celková kapacita je 55 000 m³ (asi 180 000 sudů o objemu 200 l), což je dostatečné pro uložení všech radioaktivních odpadů z bloků JE Dukovany i Temelín, i v případě, že budou provozovány po dobu 60 let. Bezpečnost úložiště během provozu je monitorována podle Programu monitorování schváleného SÚJB.[26]

Monitorování areálu je provozováno společně s firmou NUVIA a sestává mimo jiné i ze vzorkování vod z dešťových drenáží a vrtů v okolí úložiště. Je zajištěno i pravidelné měření pracovníků a kontrola jejich dávek, která je dle záznamů hluboko pod zákonnými limity.[27] Ročně je v ÚRAO uloženo na kolem dvou tisíc obalových souborů s RAO. Od roku 2005 je možné ukládat do ÚRAO Dukovany i určité množství institucionálního odpadu zpracovaného v ÚJV Řež.[27] Na obrázku č. 13 vidíme otevřenou jíмку s obalovými soubory obsahujícími RAO.

Obrázek 13: ÚRAO Dukovany



Zdroj: https://atominfo.cz/wp-content/uploads/2018/02/DSC0191_1024.jpg

ÚRAO Richard se nachází u Litoměřic a je vybudováno v bývalém vápencovém dolu Richard II. Bylo uvedeno do provozu roku 1964 jakožto podpovrchové úložiště. Sestává z podzemních prostor 70 metrů pod povrchem o celkovém objemu 18 900 m³. Z toho 12 500 m³ slouží k ukládání obalových souborů s odpadem a zbytek prostor slouží jako obslužné chodby. Úložiště slouží k ukládání institucionálního odpadu. Odděleně od něj je ukládáno RAO, které není v aktuální čas uložitelné. Je tedy pouze skladováno v zařízení až do doby, kdy bude možné ho uložit na příslušném místě. Konkrétně se jedná o použité uzavřené radionuklidové zářiče, shromážděné zdroje z požárních hlásičů a jaderné materiály, které nevyhovují podmínkám pro uložení.[26] Plán monitorování se nezabývá jen radiační situací na úložišti, ale také stavem horninového masivu. Probíhá pravidelné odebrání vzorků důlních vod následně analyzovaných v akreditované laboratoři. SÚRAO dále sleduje hodnoty aktivity odpadních vod v litoměřické čistírně odpadních vod a vrtů v okolí úložiště. ÚRAO Richard obsahuje jedinou certifikovanou zkušebnu obalových souborů pro RAO v ČR.[29]

Obrázek 14: Pohled do ÚRAO Richard



Zdroj: https://1gr.cz/fotky/idnes/13/122/cl5/RJA4fede0_IMG_2942.jpg

ÚRAO Bratrství vystavěné v těžební štole bývalého uranového dolu nedaleko Jáchymova poskytuje 5 komor o objemu cca 1200 m³ k ukládání RAO obsahující pouze přírodní radionuklidy. Do provozu bylo úložiště uvedeno v roce 1974 a v dnešní době je jeho kapacita již téměř zaplněná. Jelikož se úložiště nachází v prostorách uranového dolu, je při jeho monitorování bráno v úvahu určité množství radionuklidů, pocházející z přeměny uranu a thoria které se ve vodách a prostředí přirozeně vyskytuje. [30]

Uzavřené úložiště Hostim se nachází asi tři kilometry východně od Berouna v opuštěném vápencovém lomu Hostim I, který je také znám jako Alkazar. Sestává ze dvou štol o objemu 1600 m³ obsahujících nízko a středně aktivní odpady. Jeho provoz byl ukončen již v roce 1965 a později v 90. letech 20. století byla provedena inventarizace odpadů a rozhodnuto o jeho trvalém uzavření, což se po vyplnění obou chodeb betonem stalo v roce 1997. [26]

4.3 Nedestruktivní analýza na pracovišti zpracování RAO

Podrobná charakterizace RAO je nutná vždy po přijetí odpadu ke zpracování. Zvláště pak v případech, kdy hodnoty aktivity při prvotním měření neodpovídají hodnotám uvedeným v průvodním listu daného odpadu. Charakterizace je prováděna destruktivními metodami, tedy odebíráním vzorků způsobem, který naruší jeho integritu, nebo právě metodami nedestruktivními, které jsou první volbou tam, kde je to možné. Nejužívanější metodou charakterizace je spektrální analýza, která ve velmi krátkém čase poskytne komplexní informace o radionuklidovém složení a jeho aktivitě. V ÚJV se pro spektrometrické měření používají polovodičové detektory HPGe. V případech, kdy je jako odpad přijat již vyhotovený obalový soubor zalitý betonem, například z ekologických zátěží, je třeba po jeho přijetí zkontrolovat vnitřní strukturu a obsah. Za tímto účelem se provádí radiografické měření na přístroji MOS 100.

4.3.1 Spektrometrické měření na HPGe

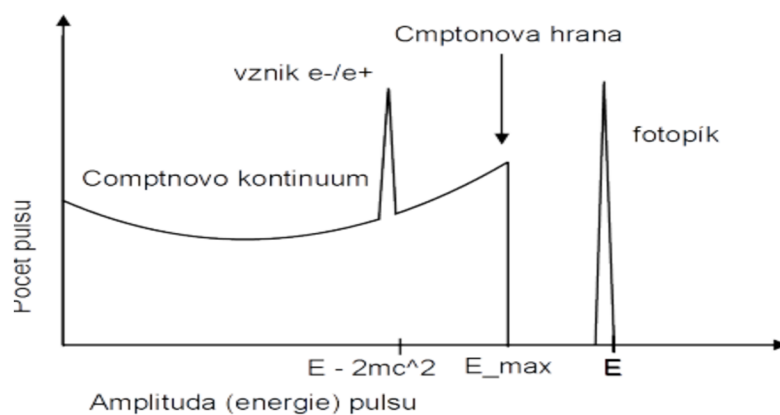
Hlavním prvkem spektrometrické trasy je detektor, který je tvořen polovodičovým germaniovým krystalem o vysoké čistotě (High Purity Germanium), k němuž se připojuje vysoké napětí v rozsahu 3000 až 5000 V. Když gama záření interaguje s tímto krystalem, uvolní se elektrický náboj, který se pohybem v krystalu mění na napěťové nebo proudové pulsy. Tyto pulsy se zesilují v předzesilovači a zesilovači a pomocí analogově-digitálního převodníku se převádějí do digitální podoby. Poté jsou tyto signály zpracovávány multikanálovým analyzátozem a sčítány v jednotlivých kanálech. Získaná data mohou být zobrazena jako spektrum na obrazovce počítače.[33] Při průchodu záření gama materiálem, včetně detektoru nebo stínění, může dojít ke třem základním interakcím: fotoefektu, Comptonově rozptylu a tvorbě párů. Pravděpodobnost výskytu těchto interakcí je ovlivněna jak energií záření, tak materiálem, kterým záření prochází. Spektra měřená gamaspektrometrickou trasou vykazují všechny zmíněné interakce.

Při interakci fotoelektrickým jevem, kdy je celá energie fotonu předána jednomu elektronu na nižší energetické hladině v atomu látky, vznikne ve spektru čára ve formě píku. Tento jev se také nazývá totální absorpce energie záření gama a vede k vyzáření charakteristického rentgenového záření nebo Augerova elektronu při obsazování uvolněného místa elektronem z vyšších hladin.[2]

V oblasti od 100 keV do 1,02 MeV je nejvíce pravděpodobnou interakcí mezi fotonem a germaniovým detektorem Comptonův efekt. Pokud foton s touto energií interaguje s elektronem volněji vázaným v atomovém obalu germania, elektron se uvolní (získá energii) přičemž část energie fotonu se rozptýluje. Tento rozptýlený foton může interagovat s dalším elektronem v polovodičovém detektoru a proces se může opakovat, přičemž se vytvářejí fotony s nižší energií. Nakonec může být foton absorbován při fotoelektrickém jevu. Ve spektru má Comptonova interakce charakter spojitě oblasti. [2]

Při interakci tvorbou páru předá foton celou svou energii páru elektron-pozitron a sám zanikne. Zákon zachování energie vyžaduje, aby počáteční energie byla nejméně 1,02 MeV, což odpovídá klidové energii páru elektronu a pozitronu. Podle zákona zachování hybnosti může tento jev nastat pouze v blízkosti atomového jádra nebo elektronu. Po vzniku se elektron a pozitron pohybují v germaniovém krystalu. Po asi 10^{-10} sekundách se pozitron a elektron anihilují s uvolněním dvou fotonů γ o energii 511 keV, které létají proti sobě v opačných směrech. Ve spektru pozorujeme tento jev jako pík v kanálu přiřazenému k energii 511 keV.[2]

Obrázek 15: Spektrum



Zdroj: Fyzikální praktikum II., FJFI ČVUT

Pro charakterizaci RAO se na pracovišti Centra nakládání s odpadem využívá HPGe detektor ve formě gama scanneru. To je pro toto pracoviště navržený systém skládající se z mechanické, elektronické a řídicí části.

Mechanickou část tvoří točna na kterou je možné umístit sud s měřeným odpadem a libovolně jím otáčet, dále pak posuv detektoru ve vertikálním směru. Elektronickou část tvoří 16000 kanálový analyzátor od firmy Canberra – Packard k němuž je detektor připojen. Řízení tvoří počítač se softwarem Gennie 2K.

Postup měření:

- Detektor je vhodně kolimovaný a měří systematicky několik různých segmentů v různých výškách na sudu položeném na točně gama scanneru.
- Celkové spektrum je načítáno a s každým segmentem je zároveň uchováván přírůstek k měřenému celkovému spektru v daném segmentu.
- Identifikují se měřené radionuklidy a vypočítají se plochy jednotlivých píků analýzou celkového spektra.
- Vypočítají se relativní přírůstky ploch nejsilnějších píků analýzou spekter naměřených v jednotlivých segmentech.
- Porovnáním přírůstků ploch nejsilnějších píků v jednotlivých segmentech se určí charakter odpadu.

Obrázek 16: Gama Scanner



Zdroj: Archiv autora

4.3.2 Radiografické měření

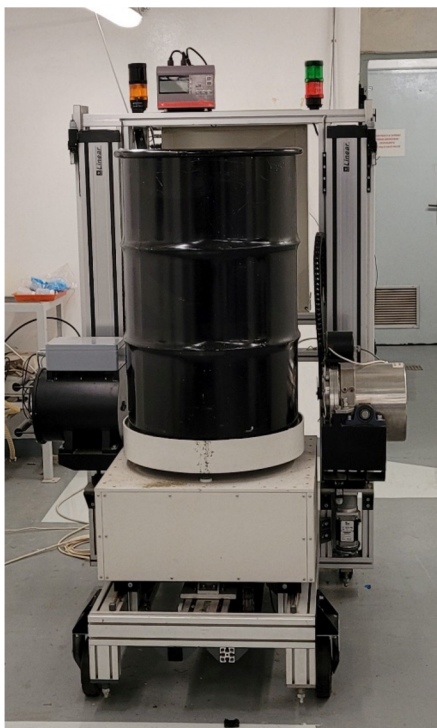
Je na Centru nakládání s odpady prováděno přístrojem MOS-100 vyrobeného firmou VF, a.s. Černá hora. Sestává ze čtyř pohonů které zajišťují posuv skenovaného sudu dopředu a dozadu, zdvih detekční sestavy, a rotaci sudu. Detekční sestava je tvořena zdrojem kolimovaného prozařovacího gama paprsku ^{60}Co o aktivitě přibližně 100 GBq. Na druhé straně sestavy je proti tomuto paprsku umístěn scintilační detektor CsI(Tl), který dosahuje podobných vlastností jako NaI(Tl), ale vykazuje nižší hygroskopičnost. Což přispívá k jeho stálosti v prostředí podzemního pracoviště.

Zařízení MOS-100 je navrženo jako hierarchické zařízení. To znamená, že řízení a kontrola jeho funkcí se provádí v několika vrstvách. V nejnižší vrstvě jsou umístěny motory, čidla, přepínače a světla. Vyšší vrstva zahrnuje řídicí jednotky motorů, elektronické váhy a detekční jednotky. Nad nimi se nachází řídicí automat ADAM5511 a jeho moduly. Nejvyšší vrstvou je počítač. Zařízení MOS-100 dokáže pracovat určitou dobu i bez PC.

Postup měření:

- Sud je naveden na posuvné zařízení.
- V PC je provedeno nastavení zahrnující výšku, šířku sudu a další parametry jako výška vrstvy jednoho měřicího cyklu.
- Nastavení je skrze USB posláno do přístroje.
- Otvírá se clona zářiče a posuvy dle nastavení provádějí prozařování, data o množství impulsů jsou posílána zpět do počítače k uložení do matice.
- Výsledná matice je interpretována vhodným SW, například MATLAB, ImageJ a jiné.

Obrázek 17: Radiograf MOS - 100



Zdroj: Archiv autora

4.3.3 Analýza sudu 568/2021

Pro praktickou ukázkou reálné úlohy nedestruktivní analýzy obalového souboru jsem na Centru nakládání s RAO použil oba výše popsané přístroje na sud obsahující radioaktivní odpad s identifikačním číslem 568/2021. Nejprve jsem provedl měření na segmentovém HPGe a zpracoval výsledné spektrum v programu Gennie 2K, následně jsem nechal soubor prozářit na přístroji MOS – 100. Výslednou matici obsahující četnosti v měřených bodech jsem interpretoval pomocí skriptu v prostředí Matlab. Výsledky obou měření jsem porovnal a interpretoval.

Měření spektra:

Po navezení sudu na točnu jsem spustil měření s nastavením: 12 pootočení po 30°, 12 posunutí detektoru ve vertikálním směru. Vzniklo tak 144 spekter segmentů. Pomocí interního SW, jehož autorem je pan Mgr. Karel Svoboda jsem vytvořil součtové spektrum a analyzoval jej v programu Gennie 2K viz příloha 1.

Výsledek analýzy radionuklidů a jejich aktivity:

^{54}Mn – 7,65 MBq

^{60}Co – 18 MBq

^{137}Cs – 14 MBq

Zobrazení rozložení aktivity v sudu:

V součtovém spektru jsem označil pík na kanálu odpovídající energii 661,7 keV, což je dominantní pík odpovídající přechodu mezi excitovaným stavem jádra ^{137}Cs a jeho základním stavem. A stejně jsem postupoval pro energii 1173,5 keV, která odpovídá ^{60}Co a 834,8 keV pro ^{54}Mn . Takto označené píky jsem exportoval a pomocí makra jehož autorem je pan Mgr. Karel Svoboda jsem zobrazil rozložení aktivity uvnitř sudu. Výstupem makra je graf rozložení aktivity pro konkrétní pík, který identifikuje pozici zdroje konkrétního radionuklidu. Viz příloha 2.

Radiografické měření:

Po navezení sudu na točnu jsem provedl nastavení sestávající z výšky, šířky sudu a požadované rychlosti měření. Měření jsem provedl v jednom úhlu a vytvořil tak řez vertikální řez sudem. Doba měření jednoho bodu pak vyšla na 850 ms. Po naměření dat jsem napsal skript v prostředí Matlab, kterým jsem data zobrazil jako obrázek s barevnou mapou Jet.

Výsledný obrázek je přílohou 3. Syntax skriptu je následující:

```
% Načtení dat z obrázku do proměnné img
img = importdata('data.imj');
% Vytvoření nového okna obrázku
figure
% Vytvoření nového podgrafu s rozměry 1x1
subplot(1,1,1)
% Zobrazí obrázek v podgrafu
imagesc(img)
% Nastaví poměr stran na 1:1, aby se zabránilo zkreslení
obrázku
daspect([1 1 1])
% Nastaví barvy obrázku na jet colormap
colormap(gca, jet)
% Nastaví rozsah osy intenzity tak, aby byl totožný
s rozsahem hodnot datového typu uint16
caxis([intmin('uint16') intmax('uint16')])
% Přidání titulku ke grafu
title('568/2021')
```

Srovnání měření Gama a radiografie

Na závěr jsem v prostředí Matlab vytvořil srovnávací graf zobrazující výsledky měření součtového spektra gama a radiografického měření. Tím jsem získal přesnou představu o pozici, druhu a tvaru zářiče. Výsledek je předmětem přílohy 6.

5 Závěr

Radioaktivní odpady jsou bedlivě sledovaným odvětvím odpadového hospodářství a posledních 30 let se neslo ve znamení výrazného zvýšení profesionality a bezpečnosti při nakládání s nimi. To můžeme pozorovat i na příkladech odstraňování ekologických zátěží z předchozích dekád.

Teoretická část této práce se zabývala obecným popisem radioaktivity a jejího vlivu na člověka. Dále pak popisem radioaktivních odpadů, jejich klasifikací a pracovištěm vybudovaným pro zpracování odpadu.

V popisu dnešní situace jsem se věnoval nakládání s odpady v České republice a úložišti, která jsou k jejich konečnému uložení užívána. Závěrem jsem věnoval čas Centru nakládání s RAO jakožto hlavního zpracovatele institucionálních odpadů v České republice, kde jsem provedl charakterizaci obalového souboru obsahujícího RAO nedestruktivními metodami.

Dle mého názoru je velmi podstatnou otázkou dneška vybudování hlubinného úložiště, které se stále zdá být jedinou spolehlivou metodou odstranění vysoce aktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva. Ve většině zemí, které jadernou energetiku využívají se pro tento vysoce aktivní odpad kombinují tři přístupy, a to ukládání do hlubinných úložišť, vyčkávaní a přepracování. Cestou je zřejmě kombinace všech přístupů.

V případě nízko a středně aktivního odpadu je z důvodu mnohem vyššího množství tohoto odpadu podstatné zvyšování bezpečnosti pracovníků, jež zajišťují jeho zpracování a ukládání. V tomto ohledu došlo k výrazným pokrokům v posledních 30 letech, například zavedením moderních metod nedestruktivní charakterizace, která umožnila analyzovat radioaktivní materiál, aniž by byl odstraněn ze svého obalu. Česká republika by se mohla inspirovat v zahraničí, kdy například v některých zemích disponují úložiště charakterizačními linkami, které umožňují kontrolu přijatého materiálu ve velmi komplexní míře.

6 Seznam použitých zdrojů

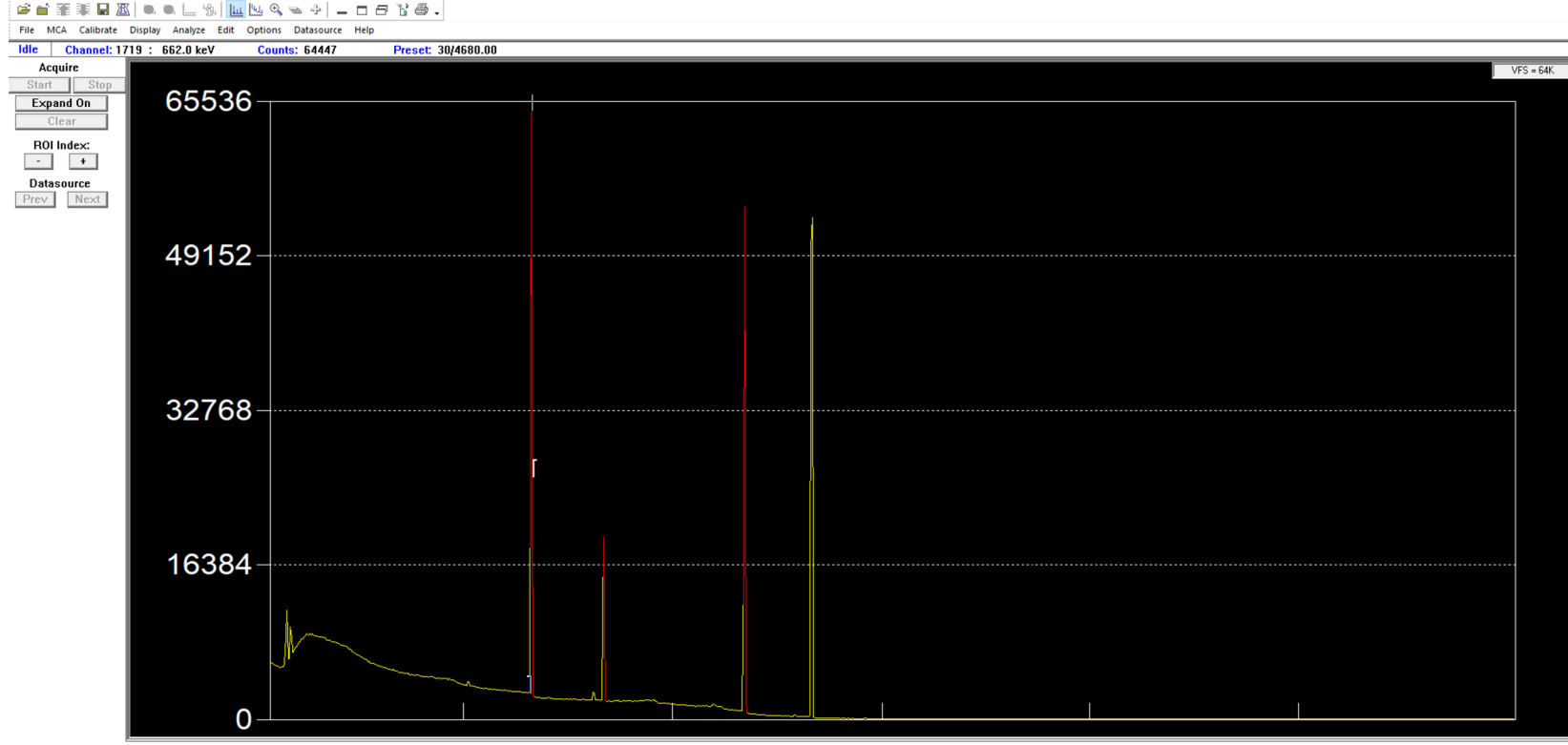
- [1] RAHMAN, A. *Decommissioning and Radioactive Waste Management*. 1. Dunbeath: Whittles Publishing, 2008. 448 s. ISBN 9781904445456.
- [2] KNOLL, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. University of Michigan: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-13148-0.
- [3] LIBRA, Martin, Jan MLYNÁŘ a Vladislav POULEK. *Jaderná energie*. Praha: Ilsa, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.
- [4] HALLIDAY, David, Jan OBDRŽÁLEK, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. Brno: Vutium, 2000. ISBN 80-214-1869-9.
- [5] KUMIČÁK, I. *Detekce, stínění a identifikace radioaktivního záření při ochraně obyvatelstva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 99 s.
- [6] *Stručný přehled biologických účinků záření*. *SUJB.cz* [online]. Praha: subj [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologicky-ucinku-zareni/>
- [7] *Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2016, ročník 2016, 422/2016 Sb.
- [8] ULLMANN, Vojtěch. *AstroNuklFyzika*. *AstroNuklFyzika* [online]. Ostrava [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>
- [9] NEČAS, Emanuel. *Obecná patologická fyziologie*. 3. Univerzita Karlova: Karolinum, 2006. ISBN 978-80-246-1688-9.
- [10] BOMANJI, Jamshed B., Fuad NOVRUZOV a Sobhan VINJAMURI. *Radiation accidents and their management: emphasis on the role of nuclear medicine professionals*. *NUCLEAR MEDICINE COMMUNICATIONS* [online]. 2014, 29.10. 2014, 2014(10), 1-8 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: doi:10.1097/MNM.000000000000156
- [11] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Brno: Akademické nakladatelství, VUTIUM, 2009. ISBN 9788021436299.
- [12] *Vyhořelé palivo*. *Cez.cz* [online]. Praha: čez [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html
- [13] *Classification of Radioactive Waste* [online]. Vídeň: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2009 [cit. 2023-03-06]. ISBN 978-92-0-109209-0. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf

- [14] ČESKO. zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon - znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony lidí.cz* [online]. © AION CS 2010-2023 [cit. 7. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263#p74-1>
- [15] KLENER, Vladislav, ed. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 8023837036.
- [16] LB 124 Scint: Digital Contamination Monitor. 10. Bad Wildbad, 2010.
- [17] SVOBODA, Karel, Antonín VOKÁL a Markéta NEČASOVÁ. *Obecný postup charakterizace nebezpečných odpadů kontaminovaných radionuklidy*. ÚJV Řež, 2002.
- [18] SHULYAKOVA, Olga, Petr AVTONOMOV a Valeria KORNIENKO. *New Developments of Neutron Activation Analysis Applications* [online]. 2015, 3-4 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.380
- [19] *SMĚRNICE RADY 2011/70/EURATOM*. In: . Brusel, ročník 2011, číslo 70. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=celex:32011L0070>
- [20] *SMĚRNICE RADY 2013/59/EURATOM*. In: . Brusel, ročník 2013, číslo 59. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=EN>
- [21] SUJB. *SUJB.cz* [online]. Praha [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/legislativa/atomove-pravo>
- [22] *Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR*. Dostupné online: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/nakladani-s-radioaktivnimi-odpady/aktualizace-koncepce-nakladani-s-radioaktivnimi-odpady-a-vyhorelym-jadernym-palivem-v-cr--251133/>
- [23] *Seznam původců RAO*. SURAO.cz [online]. 2020 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2020/01/Seznam-p%C5%AFvodcu-RAO_2020.pdf
- [24] *HOSPODAŘENÍ S RADIOAKTIVNÍM ODPADEM V ČR 2022*. SUJB.cz [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-rao/Hosp_RAO_2022.pdf
- [25] CHURAKOV, Sergey, Wolfgang HUMMEL a Maria Marques FERNANDES. *Fundamental Research on Radiochemistry of Geological Nuclear Waste Disposal* [online]. 2021, 2-4 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.2533/chimia.2020.1000
- [26] SUJB. *Úložiště radioaktivního odpadu (ÚRAO)* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-radioaktivnim-odpadem/uloziste-radioaktivniho-odpadu>

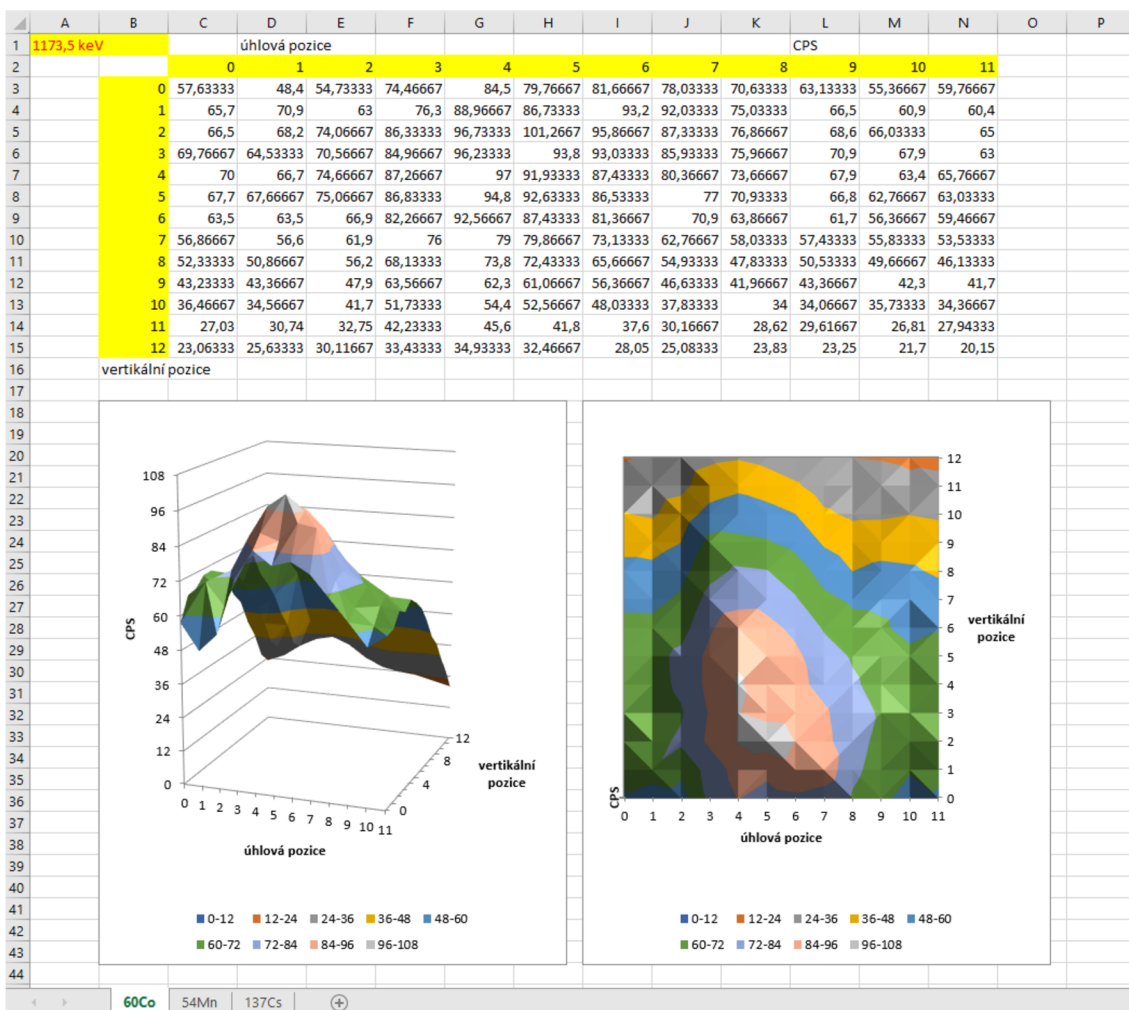
- [27] SÚRAO. Historie jediného povrchového úložiště. SURAO.cz [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uloziste-dukovany/>
- [28] OJOVAN, Michael a Hans J. STEINMETZ. Approaches to Disposal of Nuclear Waste: 10.3390/en15207804. Energies [online]. 11.2. 2022, 1-2 [cit. 2023-03-21]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15207804
- [29] Úložiště Richard. SURAO.cz [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uloziste-richard/>
- [30] Úložiště Bratrství. SURAO.cz [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uloziste-bratrstvi/>
- [31] OTCOVSKÝ, Tomáš, Radek TRTÍLEK a Martin Strejc. Nakládání s radioaktivními odpady ve společnosti ÚJV Řež, a. s. Odpadové Forum [online]. 1-5 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.odpadoveforum.cz/new/www/TVIP2021/prispevky/131.pdf>
- [32] SANDERS, Mark Callis a Charlotta E. SANDERS. A world's dilemma 'upon which the sun never sets': The nuclear waste management strategy. <https://www.sciencedirect.com/> [online]. 28.11.2021, 18-22 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnucene.2021.104014
- [33] ARTJOMS, Kail, Matthias KAISLER, Sergey KIM, Edward LOSHEVICH a Alexander SOKOLOV. DEVELOPMENT OF PORTABLE HPGe SPECTROMETER FOR IN SITU MEASUREMENTS. Nuclear Technology & Radiation Protection [online]. 2015(30), 1-3 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: doi:10.2298/NTRP1502154K

7 Přílohy

Příloha 1: Součtové spektrum 568/2021



Příloha 2: Rozložení aktivity ⁶⁰Co



Příloha 3: Rozložení aktivity pro ⁵⁴Mn

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
|----|-------------------|----|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|---|
| 1 | 835,05 keV | | úhlová pozice | | | | | | | | | | | CPS | | |
| 2 | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| 3 | | 0 | 15,57333 | 16,75333 | 17,58333 | 26,25667 | 27,51 | 28,19667 | 22,17667 | 18,98333 | 17,68 | 16,42333 | 14,84 | 16,34333 | | |
| 4 | | 1 | 18,45333 | 16,15 | 20,02 | 28,35333 | 31,09667 | 28,95333 | 25,02 | 20,49667 | 18,38667 | 17,08667 | 15,32667 | 15,04667 | | |
| 5 | | 2 | 17,08 | 17,55667 | 21,48333 | 27,68667 | 30,01333 | 26,01333 | 24,69667 | 19,44333 | 19,42333 | 19,05333 | 16,47333 | 14,41 | | |
| 6 | | 3 | 16,95 | 20,35667 | 21,18 | 28,94333 | 27,22 | 28,17333 | 23,04333 | 19,71 | 18,64 | 16,00667 | 14,89 | 16,89 | | |
| 7 | | 4 | 19,99 | 17,27667 | 21,47333 | 28,91333 | 31,37333 | 26,81333 | 23,07333 | 22,18333 | 18,99333 | 19,43333 | 15,37 | 17,00667 | | |
| 8 | | 5 | 16,77667 | 18,76 | 19,84 | 26,45 | 26,48 | 27,97667 | 23,46 | 18,89 | 16,70333 | 17,72 | 16,00333 | 16,58 | | |
| 9 | | 6 | 17,22 | 18,08333 | 21,34 | 26,6 | 24,82333 | 26,14 | 22,92667 | 17,79 | 16,52333 | 16,47 | 14,73 | 14,8 | | |
| 10 | | 7 | 15,79 | 16,19667 | 17,36333 | 24,43667 | 26,06 | 25,30667 | 19,75 | 17,06 | 15,16667 | 13,54667 | 12,30333 | 14,08 | | |
| 11 | | 8 | 14,62 | 14,60333 | 18,05667 | 21,79 | 22,36 | 21,93 | 16,9 | 16,39667 | 13,66667 | 14,77333 | 12,31333 | 12,7 | | |
| 12 | | 9 | 12,65 | 12,83333 | 15,21667 | 18,20333 | 20,66333 | 19,16333 | 16,09333 | 13,4 | 12,64667 | 10,78667 | 12,41667 | 11,32333 | | |
| 13 | | 10 | 10,49667 | 11,24 | 11,85333 | 15,46667 | 16,13333 | 14,86667 | 13,44 | 10,51333 | 8,196667 | 9,81 | 8,77 | 9,043333 | | |
| 14 | | 11 | 8,336667 | 9,08 | 10,28333 | 13,47667 | 13,15333 | 12,82333 | 10,75 | 8,5 | 7,696667 | 7,123333 | 7,413333 | 7,49 | | |
| 15 | | 12 | 5,17 | 7,31 | 8,146667 | 8,403333 | 9,61 | 9,3 | 7,843333 | 7,336667 | 5,89 | 4,916667 | 5,083333 | 4,783333 | | |
| 16 | vertikální pozice | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | | |

úhlová pozice

vertikální pozice

CPS

úhlová pozice

vertikální pozice

CPS

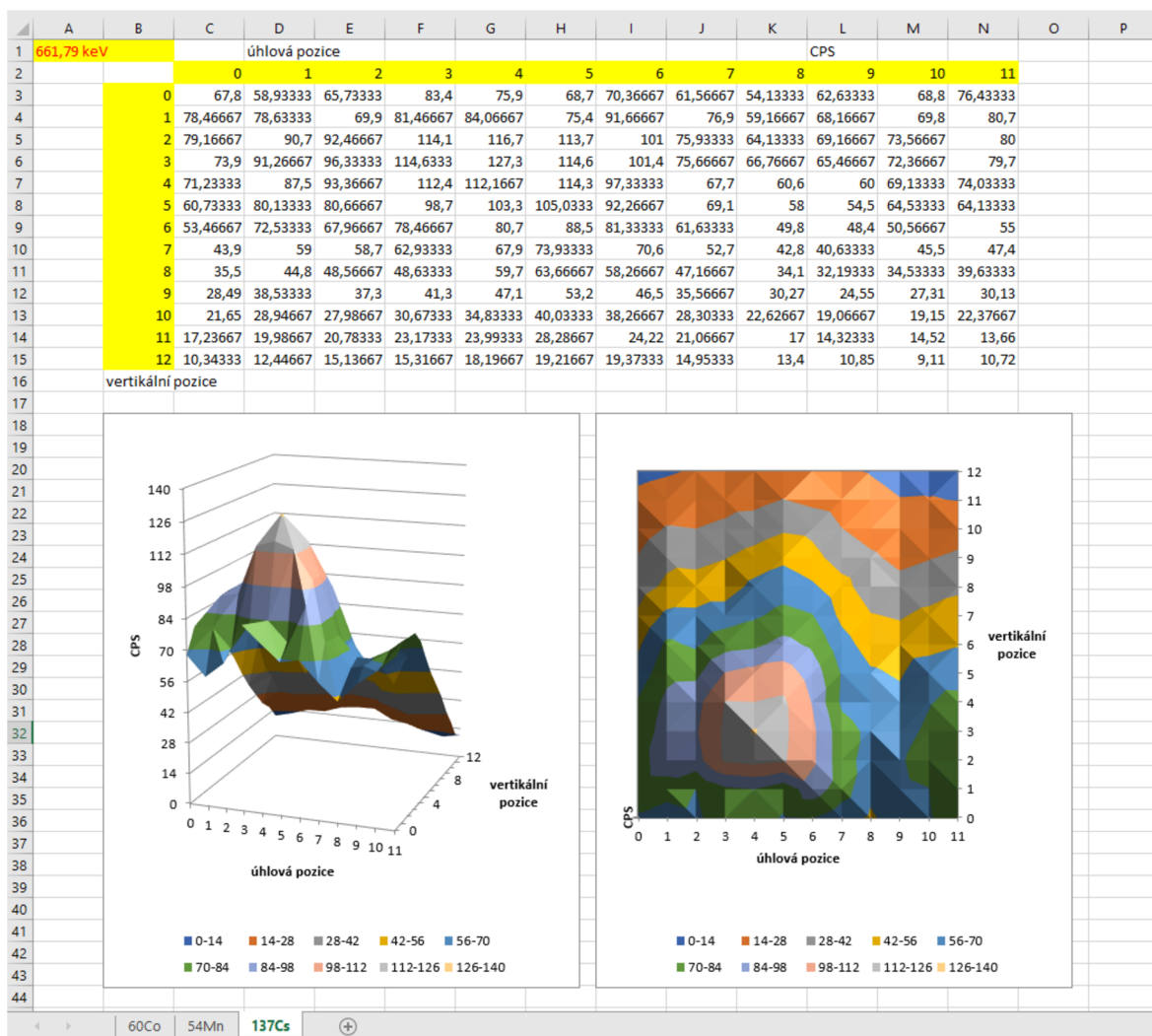
■ 0-3,5 ■ 3,5-7 ■ 7-10,5 ■ 10,5-14 ■ 14-17,5

■ 17,5-21 ■ 21-24,5 ■ 24,5-28 ■ 28-31,5

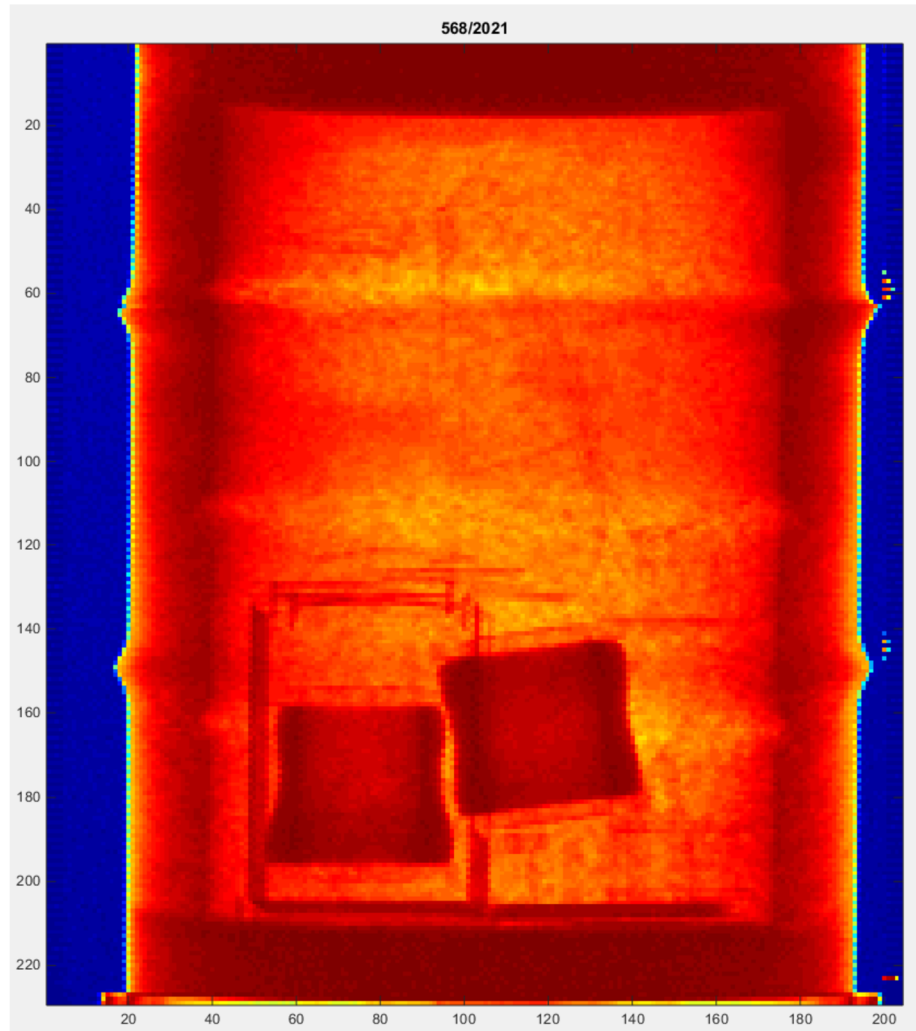
■ 0-3,5 ■ 3,5-7 ■ 7-10,5 ■ 10,5-14 ■ 14-17,5

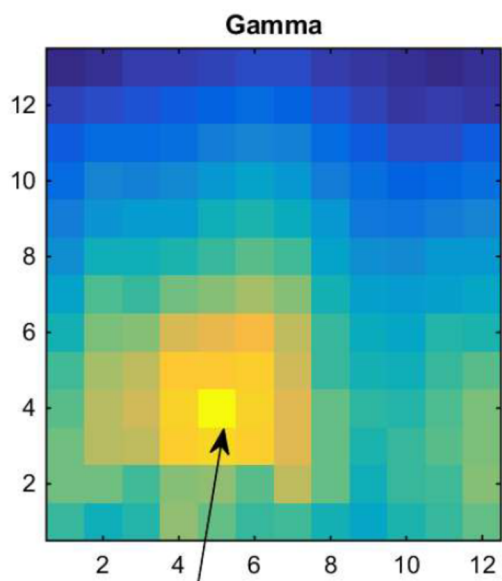
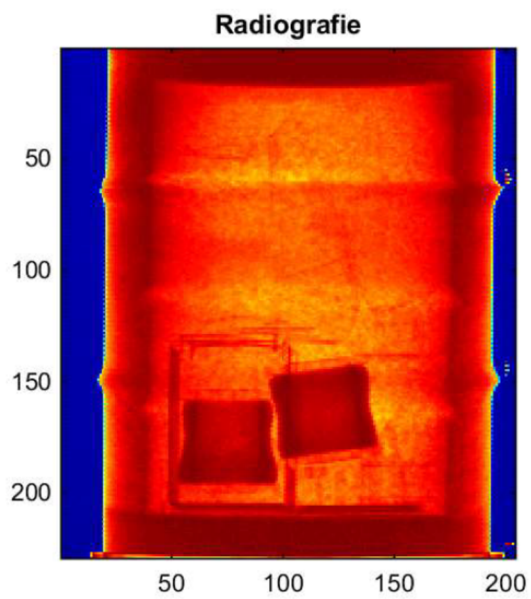
■ 17,5-21 ■ 21-24,5 ■ 24,5-28 ■ 28-31,5

Příloha 4: Rozložení aktivity pro ¹³⁷Cs



Příloha 5: Radiografické zobrazení v Matlab





^{137}Cs
 ^{60}Co