

Transport a měření radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu aktivovaných v poli rychlých neutronů

Transport and measurement of radionuclides with short
half-life activated in the fast neutron field

*Dušan Král, Miroslav Zeman, Robert Holomb, Elmira Melyan, Anhelina
Tanchak*

xkrald00,zemanm@vutbr.cz

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně

DOI: -

Abstract: The issue of measuring radionuclides with a short half-life using transport devices based on compressed air or vacuum is a discussed topic in many areas. Therefore, a mobile post tube was developed at Brno University of Technology, which was used to transport samples during three different experiments. A PuBe neutron source, neutron dT generator and microtron accelerator were used to activate the targets. Samples of salts and threshold activation detectors were activated in the neutron field, which were measured using NaI(Tl) and HPGe detectors after irradiations.

Transport a měření radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu aktivovaných v poli rychlých neutronů

Dušan Král, Miroslav Zeman, Robert Holomb, Elmira Melyan, Anhelina Tanchak

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
Email: xkrald00@vutbr.cz, zemanm@vutbr.cz

Abstrakt – Problematika měření radionuklidů s krátkým poločasem přeměny pomocí transportních zařízení na bázi stlačeného vzduchu nebo podtlaku je v mnoha odvětvích diskutované téma. Proto byla na Vysokém učení technickém v Brně vyvinuta mobilní potrubní pošta, která sloužila k transportu vzorků během třech různých experimentů. K jejich aktivaci bylo využito PuBe neutronového zdroje, neutronového dT generátoru a mikrotronového urychlovače. V poli neutronů byly aktivovány vzorky solných a prahových aktivačních detektorů, které byly následně měřeny pomocí NaI(Tl) a HPGe detektorů.

1 Úvod

Potrubní pošta je zařízení používané pro rychlý transport drobných nákladů zejména v nemocnicích, supermarketech, skladech, na úřadech apod. Před rozvojem elektronické komunikace se používala pro přenos informací ve velkých městech, jež si takovou síť mohla dovolit, např. v Berlíně, Vídni, Praze atd. Městské sítě dosahovaly délky desítek až stovek kilometrů [1].

Ve výzkumné sféře se uplatňuje zejména při přesunu vzorků, u kterých je třeba minimalizovat čas transportu mezi experimentálními a měřicími zařízeními. V případě jaderné fyziky se používá pro přesun mezi zdrojem částic (reaktor, urychlovač, apod.) k detektorům, jež nemohou být umístěny přímo u zdroje, ať už z důvodu jejich prostorové náročnosti nebo kvůli radiačním podmínkám. Může jít o jednoduchou trasu mezi zdrojem a detektorem nebo složité soustavy umožňující více operací s transportními kapslemi, resp. vzorky [1, 2].

2 Systémy potrubní pošty v experimentální fyzice

Existuje celá řada typů potrubní pošty podle účelu experimentu. Její návrh je ovlivněn celou řadou parametrů, jako je tok částic a jejich distribuce, teplota, radiační ohřev ozařovacího místa, chlazení ozařovací trubice, dávkový příkon v okolí potrubní pošty, materiál a typ transportního pouzdra, vliv na experimentální zařízení apod.

Výhody potrubní pošty:

1. Nižší vystavení dávkám záření pro radiační pracovníky.

2. Rychlost transportu, jež umožňuje měřit krátce-žijící radioizotopy.

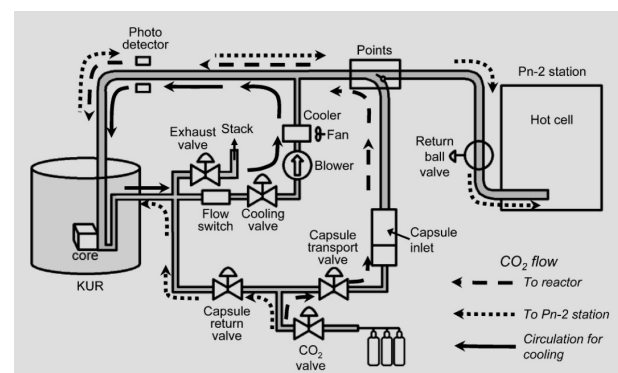
Nevýhody potrubní pošty:

1. Aktivace materiálu transportního pouzdra. V případě vyšších příkonů je nutné zajistit jeho uložení do speciálního úložiště.
2. Transportní pouzdro a část potrubní pošty vystavená radiaci musí být vyrobena z materiálu, jenž co nejméně ovlivní vlastní experiment.
3. V případě velkých zařízení a rozsáhlých sítí potrubní pošty musí být s jejím umístěním počítáno již při jeho výstavbě.
4. Riziko rozptýlení radioaktivního materiálu při poruše potrubní pošty.

Následující část představuje vybraná výzkumná pracoviště ve světě a v ČR, kde je rovněž využívána potrubní pošta.

2.1 Výzkumný reaktor univerzity v Kjóto

Univerzita v Kjóto provozuje výzkumný reaktor, u kterého se používá potrubní pošta se třemi stanicemi, jež se označují Pn-1, Pn-2 a Pn-3. Vzorky se vkládají do polyetylenových pouzder, která jsou poháněna stlačeným CO₂. Ozařování vzorků probíhá v grafitovém reflektoru aktivní zóny reaktoru a po jeho skončení je vzorek transportován do laboratoře s horkými komorami, viz obrázek 1.



Obrázek 1: Schéma potrubní pošty výzkumného reaktoru v Kjóto [3].

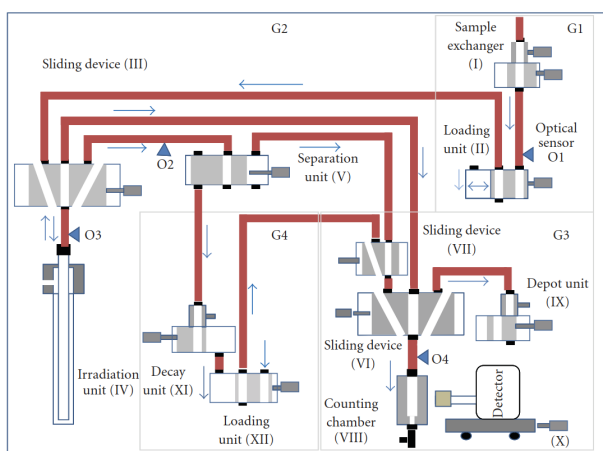
Vlastní části potrubní pošty jsou z hliníkové slitiny a nerezavějící oceli. Primární použití je pro aktivační analýzu, produkci radioizotopů a další účely z oblasti fyziky, chemie, geologie, zdravotnictví, biologie nebo materiálového výzkumu [3].

2.2 High Flux Isotope Reactor (HFIR)

Toto zařízení se nachází v Oak Ridge National Laboratory v USA. Jedná se o reaktor s výkonem 85 MW, jenž má jednu z nejvyšších hustot neutronového toku ve Spojených státech. Na reaktoru se nachází dvě potrubní pošty s označením PT-1 a PT-2, které se využívají pro aktivační analýzu. Pro pohon se využívá tlakového vzduchu. Průměr potrubí je 15,88 mm a průměr pouzdra 14,48 mm. Při přiletu pouzdra do koncové stanice jsou pouzdra bržděna, díky čemuž je možno použít méně odolné materiály jako jsou plasty nebo grafit. Pouzdra z grafitu mají velkou radiační odolnost, což umožňuje několikahodinová ozařování. To je výhodné zejména pro neutronovou aktivační analýzu [4].

2.3 Atomový institut Technické univerzity ve Vídni

Na Technické univerzitě ve Vídni vyvinuli plně automatizovanou potrubní poštu pro aktivační analýzu, která je použitelná pro malé výzkumné reaktory a laboratoře, které používají např. neutronové generátory, radioizotopové neutronové zdroje apod. Zařízení je vybaveno programovatelnou řídicí jednotkou, řídicím programem s grafickým rozhraním a 12 různými komponentami pro zajištění co nejkratších transportních časů. Blokové schéma potrubní pošty je vidět na obrázku 2. Rozměry kapslí jsou následující: 15 mm průměr, délka 50 mm a hmotnost 4 g. Při pracovním tlaku 0,4 MPa a délce trasy 20 m byl transportní čas 0,55 s [5].

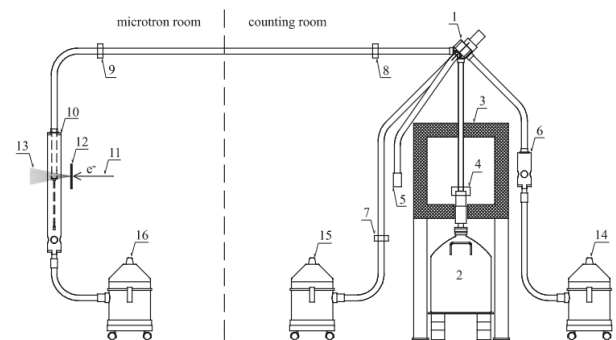


Obrázek 2: Schéma potrubní pošty na univerzitě ve Vídni [5].

2.4 Mikrotron MT25 v ÚJF AVČR

Potrubní pošta se používá i na pracovištích v ČR. Jedním z příkladů je Mikrotron MT25 v Praze, který slouží k urychlování elektronů až do energie 25 MeV. Ty se obvykle konvertují na vysoko energetické fotony brzděného záření, jež slouží např. k fotonové aktivační analýze nebo je lze dále konvertovat na neutrony, v závislosti na použitém konverzním terči.

Místní potrubní pošta umožňuje transport vzorků o maximálním objemu 25 ml (průměr 31,3 mm, délka 52,5 mm). K pohonu jsou použity tři komerční průmyslové vysavače a schéma systému je na obrázku 3. Kvůli redukci nehomogenit svazku se využívá rotování vzorku, ten je v ozařovací sekci umístěn na držáku, jež se v průběhu ozařování otáčí. Systém využívá optických závor a vzduchových ventilů pro brzdění vzorků a tím redukci namáhání transportních pouzder [6].



Obrázek 3: Schéma potrubní pošty na Mikrotronu MT25 [6].

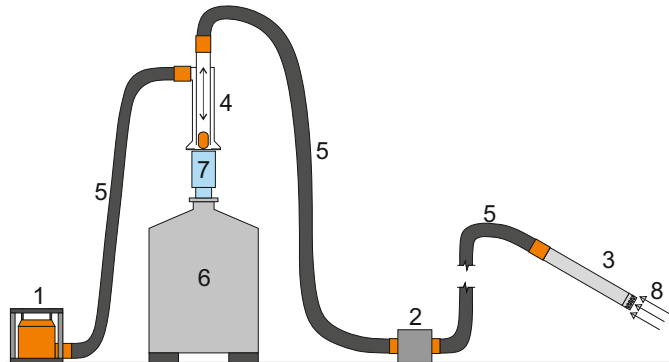
3 Mobilní potrubní pošta

Potrubní pošta vyvíjená v rámci jaderné výzkumné skupiny na Ústavu elektroenergetiky, Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysokého učení technického (UEEN FEKT VUT) má určitá specifika oproti obvyklým potrubním poštám používaným na experimentálních pracovištích. Zejména se jedná o požadavek na snadný transport celého zařízení a tím pádem i jeho kompaktnost a jednoduchost. Dalšími požadovanými parametry pro návrh byla nízká cena, spolehlivost, rychlost, modulárnost a nízká aktivace všech komponent¹. Aby tyto požadavky mohly být naplněny byl vytvořen základní design jež sestává z měřicí sekce, ozařovací sekce, pohonné jednotky, jednotky pro výměnu vzorku, transportního pouzdra a propojovacích hadic.

V budoucnu bude možné připojit volitelné části, jež jsou stále ve vývoji, jako např. rozbočovač umožňující tvorbu komplexnějších potrubních tras, pro složitější experimenty. Dále pak revolverový zásobník, umožňující skladování většího množství vzorků v transportních pouzdrech. To je důležité zejména pro automatizaci měření na spektrometrických systémech, kdy nebude třeba lidská obsluha.

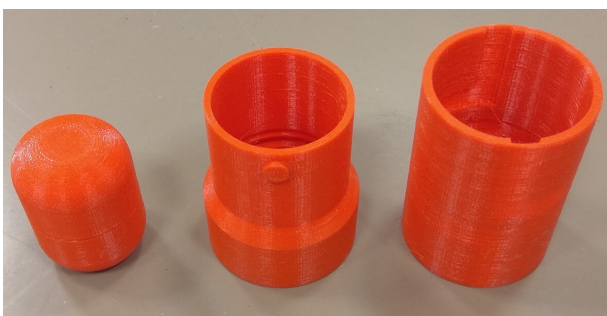
¹Z tohoto důvodu je pohonná jednotka umístěna u měřicí sekce.

Poslední částí bude obslužný SW, jež umožní ovládání všech aktivně řízených komponent, spouštění, ukončování a ukládání měřicího procesu, vyhodnocování informací ze senzorů atd. Celkové schéma aktuální verze odpovídá obrázku 4.



Obrázek 4: Schéma zapojení potrubní pošty (1 - pohonná sekce, 2 - sekce pro výměnu vzorku, 3 - ozařovací sekce, 4 - měřící sekce, 5 - propojovací hadice, 6 - dewarova nádoba, 7 - HPGe detektor, 8 - zdroj částic).

Všechny použité součástky vychází z komerčně dostupných komponent, aby bylo samotné zařízení cenově dostupné a jednoduše opravitelné. Jako pohonná jednotka slouží radiální dmychadlo poháněné sériovým motorem. Jedná se o standardní jednotku používanou např. ve vysavačích. Výhodou je vysoký výkon, relativně nízká cena a jednoduchost. Vedení vzorku je zajištěno vysavačovými hadicemi o vnitřním průměru 36 mm. Všechny propojovací komponenty jsou vyrobené na 3D tiskárně Prusa MK2.5S z materiálu PETG, viz obrázek 5. Tento materiál je výhodný pro dobré mechanické vlastnosti a dobrou tisknutelnost na rozdíl od materiálů jako je ABS, které trpí na smršťování a různé lokální deformace.



Obrázek 5: 3D tisky transportního pouzdra, koncovky na hadice a bajonetové spojky.

Běžné systémy potrubní pošty používají více pohonných jednotek podél celé trasy [6], případně systém rozvodu tlakového plynu [7], což má svůj důvod u komplexních systémů, ale v případě jednoduché trasy je to zbytečné. Proto byla zvolena varianta používající jednu pohonnou jednotku na celou trasu. Jelikož radiální dmychadlo nemůže pracovat v reverzním režimu, tak byla navržena a vyrobena

trojcestná klapka, která mění směr proudění z dmychadla. Samotné pouzdro pro motor a dmychadlo bylo taktéž vyrobeno pomocí 3D tisku. Nevýhodou 3D tištěných plastových komponent je nižší pevnost a houževnatost, než u dílů extrudovaných pomocí vstřikolisů [8]. Proto byla motorová sekce umístěna do ochranného rámu, viz obrázek 6.



Obrázek 6: Pohonná sekce v ochranném rámu.

Za účelem vkládání a vyjímání vzorků byla vytvořena sekce s pohyblivým jezdcem, jež má dvě polohy, viz obrázek 7. V první je trasa volná a transportní pouzdro se může pohybovat volně mezi měřícími sekcemi, v druhé dojde k jeho zastavení na tlumící mřížce a lze jej následně vyjmout. Mimo spojovacího materiálu a PVC trubek jsou opět všechny části připraveny pomocí 3D tisku.



Obrázek 7: Sekce pro vložení a vyjmutí vzorku.

Na obou koncích celé trasy jsou zakončovací sekce, viz obrázek 8. V blízkosti ozařovače je hliníková trubice s otvory pro odvod/přívod vzduchu, která je zakončená hliníkovým dnem. Tento materiál byl zvolen s ohledem na

přijatelný poločas přeměny aktivačních produktů. Dále také proto, že minimálně ovlivňuje neutronové pole. Konec sekce je pak opatřen bajonetovou koncovkou pro připojení k trase.



Obrázek 8: Měřicí sekce (vlevo), ozařovací sekce (vpravo).

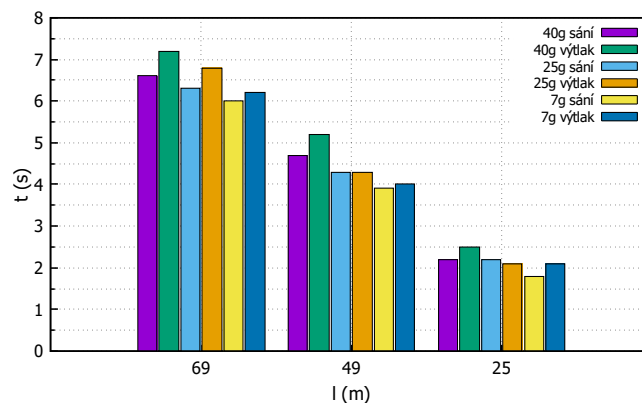
Měřicí sekce má dva účely. Prvním je připojení pohonné sekce a tedy přívod a odvod vzduchu. Druhým je zastavení transportního pouzdra aniž by došlo k jeho odražení ode dna sekce. Horní a spodní část jsou opět vyrobeny pomocí 3D tisku. Spojovací trubice jsou z transparentního PVC, což je výhodné pro kontrolu funkce samotného zařízení. Spodní část sestává z celkem čtyř komponent, kterými jsou gumová brzda, příruba, hliníkové dno a samotné tělo, které všechny tyto části integruje.

Prvotní experimenty ukázaly nevhodnost použití 3D tištěného dna, které nedokáže odolávat nárazům transportního pouzdra. V současné době je používáno hliníkové dno, ale plánují se experimenty uhlíkovo-kevlarovými kompozity, jež mají nižší útlum gama záření oproti různým kovovým materiálům.

Po kompletaci testovací verze potrubní pošty proběhlo její testování s různě těžkými hmotnostními maketami na různých dlouhých trasách s různými převýšeními. Výsledky jsou uvedeny v obrázcích 9 a 10.

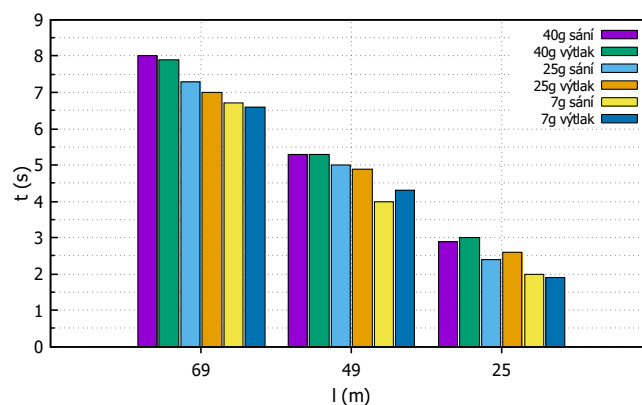
Samotné transportní pouzdro má hmotnost 11 g. Jelikož jsou pro krátkodobá měření vhodné spíše hmotnější vzorky, tak byly zvoleny hmotnosti 40 g, 25 g a 7 g. Délka trasy závisí na počtu spojených hadicových segmentů. Nejdelší segment má 15 m. Mimo to byly připraveny kratší segmenty v rozmezí 2–10 m, tak aby v podmínkách různých

pracovišť šlo připravit vždy optimálně dlouhou trasu. Pro testování byly zvoleny následující délky: 69 m, 49 m a 25 m. První měření proběhlo při nulovém převýšení a v druhém případě byla ozařovací sekce umístěna do druhého patra a trasa vedla po schodišti. Měřicí sekce spolu s pohonem byla umístěna v přízemí a výškový rozdíl činil 7,2 m.



Obrázek 9: Porovnání doby transportu v závislosti na délce trasy a hmotnosti vzorku při převýšení 0 m.

Samotné měření nebylo automatizováno a probíhalo ručně, což vnáší určitou nejistotu způsobenou lidským faktorem. U měření s nulovým převýšením je průměrný rozdíl mezi časem sání a výtlaku pouze 0,2 s pro všechny délky trasy. Pro nejdelší trasu je pak průměrný rozdíl 0,5 s. V případě měření s převýšením jsou výsledky méně průkazné, ale jako nepatrně rychlejší vychází výtlak.



Obrázek 10: Porovnání doby transportu v závislosti na délce trasy a hmotnosti vzorku při převýšení 7,2 m.

Jak již bylo uvedeno, měření probíhalo ručně a je proto zatíženo relativně velkou chybou. Dalšími faktory, jež ovlivňují měření jsou pohyb měřicí trasy, kdy hmotný vzorek spolu s tlakovou/podtlakovou vlnou dokáže poměrně výrazně hýbat s trasou v případě kdy není dostatečně upevněna. Výsledky bude nutné ověřit dalším měřením s automatizovaným odečtem času pomocí optických závor, s dalšími délkami trasy a různým převýšením.

4 Příprava experimentů a jejich výsledky

Experimentální ozařování bylo provedeno na zařízeních s různými neutronovými spektry kvůli vyzkoušení navrhované techniky a přípravě k měření spekter generovaných laserovými systémy. Pro návrh bylo vybráno PuBe spektrum, které má maximální počet neutronů v rozmezí 3–6 MeV, neutronový dT generátor produkující monoenergetické neutrony s energií 14 MeV a mikrotronový urychlovač s konvertorem z W a Pb generující maximum neutronů v oblasti 1–2 MeV. Všechna ozařování byla zaměřena na detekci radionuklidů s krátkým poločasem přeměny.

4.1 Ozařování na PuBe neutronovém zdroji

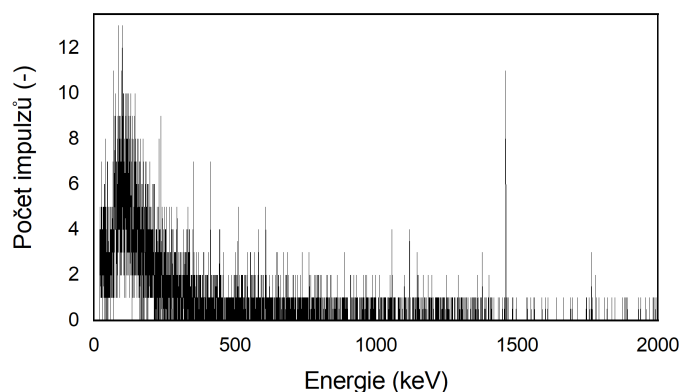
První experiment byl proveden ve spolupráci s Univerzitou obrany, Ústavem ochrany proti zbraním hromadného ničení ve Vyškově. Zde byla provedena prvotní ozařování solných vzorků a prahových aktivačních detektorů pro měření radionuklidů s poločasem přeměny v řádu desítek vteřin až jednotek minut. Aktivované vzorky byly měřeny na dvou zařízeních. V prvním případě se jednalo o měření na scintilačním detektoru NaI(Tl) a druhém o polovodičový HPGe detektor. První trasa potrubní pošty byla vedena od neutronového zdroje ke scintilačnímu detektoru NaI(Tl) na vzdálenost přibližně 30 m. Při provedení testovacího transportu bylo určeno, že doba mezi odletem vzorku na jeho začátku u stínění neutronového zdroje a přijmutím na straně detektoru je 5 s, v opačném směru byla doba o půl vteřiny kratší. Po měřeních provedených na NaI(Tl) byla trasa změněna a přivedena k polovodičovému HPGe detektoru, kde byla vzdálenost 45 m a doba transportu vzorku se zvýšila na 7 s.

Pro měření na scintilačním detektoru byly vybrány vzorky KCl, NaCl a MgCl₂ o hmotnosti 6 až 7 g. Vzorky byly ozařovány v rozmezí 15 až 20 minut pomocí PuBe neutronového zdroje o intenzitě $5,0 \cdot 10^7$ n·s⁻¹ s aktivitou 1250 GBq (ke květnu 1986). Neutronový PuBe zdroj byl uložen ve stínícím kontejneru s šachtou pro vývod neutronů, na jehož výstupu byla ukotvena část potrubní pošty sloužící k aktivaci vzorků.

Aktivované vzorky byly následně potrubní poštou dopraveny k detektoru a měřeny. Pro účely experimentu byl počet neutronů generovaný PuBe zdrojem na výstupu z šachty nedostatečný, proto byl použit pro zvýšení intenzity neutronů AmBe zdroj a prahové detektory byly měřeny na HPGe detektoru. Přidaný neutronový AmBe zdroj měl intenzitu $1,1 \cdot 10^6$ n·s⁻¹ a nominální aktivitu 18,5 GBq k srpnu 2020. Kromě výše zmíněných vzorků byla aktivována a měřena ještě sůl CaCl₂ a prahové aktivační detektory z materiálů Ag a Pb. U všech solných vzorků byla hmotnost zvýšena na dvojnásobek z důvodu vyšší pravděpodobnosti detekce sledovaných reakcí. Hmotnost Ag byla 10 g a Pb vážilo přibližně 12 g.

Výsledky z γ -spektroskopických měření jsou značně omezené z důvodu nízké hustoty toku neutronů. Jedno z naměřených spekter je vyobrazeno na obrázku 11. Měření

trvalo necelé 3 minuty, ale z naměřeného spektra lze pozorovat pouze pík ⁴⁰K s energií 1460 keV, který se vyskytuje v přirozeném zemském pozadí.



Obrázek 11: Spektrum NaCl naměřené po aktivaci PuBe a AmBe neutronovým zdrojem.

Pro zvýšení hustoty neutronů je možné vzorky vložit přímo do šachty pro vývod neutronů. Při experimentu byly zjištěny rozměry šachty a je plánováno vytvořit specifickou koncovku na potrubní poštu, s níž bude možné dopravit vzorek přímo pod neutronový PuBe zdroj a aktivaci zopakovat s těžšími vzorky.

4.2 Ozařování na neutronovém generátoru

Pro další měření byl využit neutronový generátor na Katedře fyziky, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Neutronový dT generátor produkoval monoenergetické neutrony s energií 14 MeV a intenzitou $1 \cdot 10^8$ n·s⁻¹. Zde byla sestavena potrubní pošta na vzdálenost 17 m mezi neutronovým generátorem a polovodičovými HPGe detektorem. Při testovacích měřeních byl vzorek transportován k neutronovému zdroji za 3 s a doba letu k HPGe detektoru byla 2,5 s. Sestavení potrubní pošty je zobrazeno na obrázku 12.

Bylo zde provedeno celkem 11 ozařování, během kterých se aktivovaly solné vzorky a slitiny prahových aktivačních detektorů. Ze solných vzorků byly vybrány tyto materiály: NaCl, MgCl₂, KCl, CaCl₂ a LiCl. Hmotnosti aktivovaných materiálů byly v rozmezí 6–17 g, přičemž některé materiály byly ozařovány dvakrát. Doby ozařování byly voleny v souvislosti se sledovanými radionuklidy od 5 do 20 minut. Dalšími použitými detektory bylo Ag a slitiny AlMn a MnCu o hmotnostech v rozsahu 10–40 g.

Z naměřených spekter krátkodobé aktivace NaCl byl pozorován pík s γ -energií 439,99 keV, který byl generovaný interakcí ²³Na(n,p)²³Ne, resp. rozpadem ²³Ne s poločasem přeměny 37,2 s. Část naměřeného spektra je znázorněna v horní polovině obrázku 13. Měřený počet impulzů byl nízký pro určení produkční rychlosti s dostatečnou přesností. Z aktivovaného terčiku ^{nat}Ag byl měřen radionuklid ¹⁰⁸Ag, jehož produkční rychlost je generována reakcemi (n, γ) a (n,2n) a je znázorněn ve spodní části obrázku 13. Detekce zmíněného radionuklidu produkovaného



Obrázek 12: Sestavená potrubní pošta pro měření s neutronovým zdrojem.

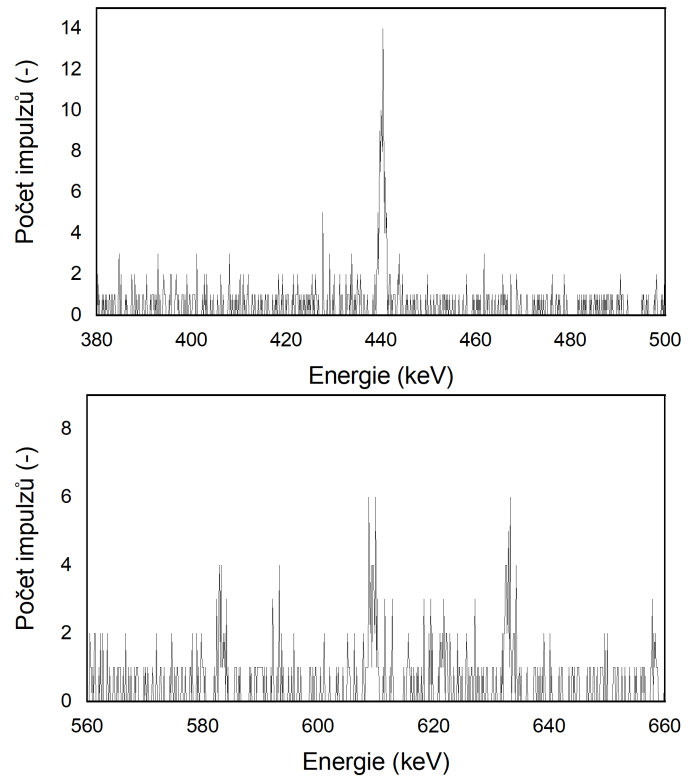
interakcí $^{nat}\text{Ag}(n,x)^{108}\text{Ag}$ s poločasem přeměny 2,38 min je úspěchem, protože jeho nejsilnější hodnota γ -energie 632,98 keV má intenzitu γ -linie pouze 1,76 %. Na základě tohoto úspěchu byl naplánován další experiment, ve kterém bude zvýšena hmotnost všech vzorků, aby byla data změřena s vyšší přesností.

4.3 Ozařování na mikrotronu

Během ozařování na urychlovači Mikrotron MT25 na Ústavu jaderné fyziky AV ČR byla energie elektronů zvolena na hodnotě 15 MeV. Elektrony urychlené na tuto energii dopadaly na terčík z wolframu, kde je generováno brzdné záření dopadající na Pb terčík a produkující neutrony pomocí reakce fotojaderného štěpení s maximálním počtem neutronů v energetické oblasti 1–2 MeV. Jedná se o spektrum podobné štěpnému spektru pro ^{235}U . Při použití olověného terče může emise neutronů dosahovat hodnoty $2,5 \cdot 10^{11} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro ozařování byly zvoleny solné vzorky jako v předchozích experimentech. Pro rychlý transport vzorků byla využita potrubní pošta Ústavu jaderné fyziky v kombinaci s potrubní poštou vyrobenou na VUT v Brně, jelikož původní potrubní pošta byla momentálně mimo provoz.

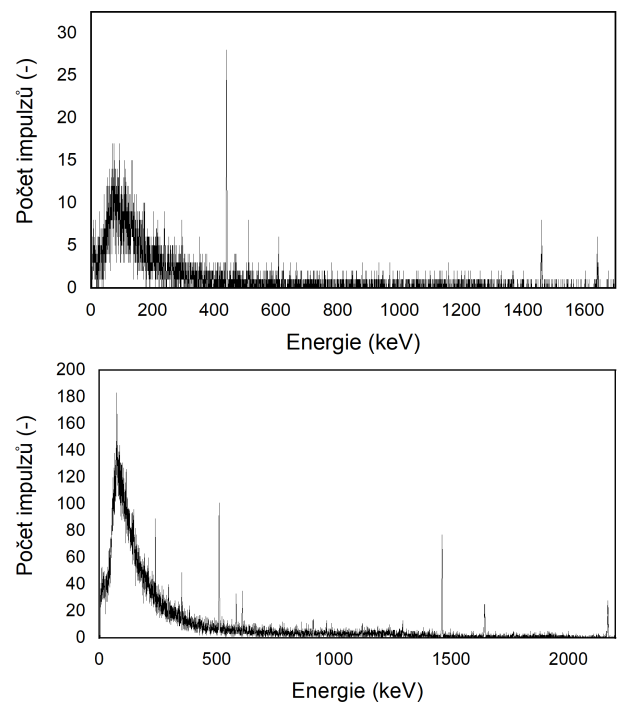
Při testovací zkoušce byla doba letu 3,5 s a zpět k detektoru byl vzorek transportován za 3 s. Hmotnosti vzorků byly od 6 do 21 g a doba ozařování byla od 6 po 17 minut. Transportované vzorky byly měřeny na polovodičovém HPGe detektoru.

Naměřená data experimentálních ozařování na Mikrotronu MT25 jsou znázorněna na obrázku 14. Jedná se o spektrum z aktivace NaCl (nahore), kde je znázorněna reakce $^{23}\text{Na}(n,p)^{23}\text{Ne}$. Zde je vyšší počet impulzů, nicméně nejistota je stále vysoká i přes hmotnost vzorku 21 g, což byla maximální hmotnost, kterou bylo možné do omezeného objemu transportního pouzdra vložit. Po aktivaci



Obrázek 13: Vzorky NaCl-vrchní a Ag-spodní aktivované v neutronovém poli vytvořeném dT generátorem.

KCl byla detekována reakce $^{39}\text{K}(n,2n)^{38}\text{K}$ s poločasem přeměny 7,64 minut a energií γ -linie 2167,4 keV o intenzitě γ -linie 99,86 %.



Obrázek 14: Naměřená γ spektra z aktivace NaCl-vrchní a KCl-spodní.

V následujících týdnech je plánováno provést ozařování se zmoderovanými neutrony na hodnoty tepelných případně rezonančních energií z důvodu efektivnější aktivace pro (n,γ) reakce. Další variantou je použití jiných konvertorů než je Pb. Zájem je zejména o použití D₂O a beryliového konvertoru, které umožňují produkci spektra neutronů s vyššími energiemi než lze dosáhnout u štěpných spekter.

5 Závěr

Pro měření radionuklidů s krátkým poločasem přeměny byla navržena a vyvinuta transportní potrubní pošta, která byla otestována v České republice a to na různých neutronových zdrojích. Neutronové zdroje byly vybrány se zaměřením na různorodost jejich spekter, tak aby byly testovány vlastnosti materiálů, které budou sloužit k určení neutronového spektra generovaného laserem. Provedené experimenty ukázaly místa pro další rozvoj potrubní pošty na UEEN FEKT VUT v Brně. Mezi ně patří zejména sestavení koncovky potrubní pošty pro měření na PuBe neutronovém zdroji v co nejtěsnější blízkosti, zvýšení hmotnosti ozařovaných materiálů a případnou změnu neutronových spekter pomocí konvertorů.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci výzkumného projektu TJ02000321 - Activation Detectors for High Energy Lasers: využití kvazi-offline metod pro detekci laserem generovaných neutronů. Autoři by rovněž rádi poděkovali Ústavu fyziky z VŠB v Ostravě, Ústavu ochrany proti zbraním hromadného ničení na UNOB ve Vyškově a Oddělení urychlovačů ÚJF AVČR za přístup k jejich experimentálnímu vybavení a pomoc při vlastním měření.

Literatura

- [1] S. L. Arlinghaus, *Down the Mail Tubes: The Pressured Postal System, 1853-1984*. Institute of Mathematical Geography, 1985.
- [2] W. Shibani, M. Zulkafli, and B. Basuno, "Methods of transport technologies: a review on using tube/tunnel systems," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 160, no. 1. IOP Publishing, 2016, p. 012042.
- [3] Y. Oki, A. Ozaki, N. Osada, T. Kaneto, Y. Hata, K. Yamasaki, and S. Shibata, "Radioactive aerosol particles released from a pneumatic irradiation system in a nuclear research reactor," *Proceedings in Radiochemistry*, vol. 1, no. 1, pp. 245–249, 2011.
- [4] T. Sims and J. Swanks, "High flux isotope reactor (hfir) experiment facilities and capabilities," *Oak Ridge National Laboratory*, 1979.
- [5] S. Ismail, "A new automated sample transfer system for instrumental neutron activation analysis," *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, vol. 2010, 2010.
- [6] P. Krist, Z. Horák, J. Mizera, D. Chvátil, M. Vognar, and Z. Řanda, "Innovations at the mt 25 microtron aimed at applications in photon activation analysis," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 304, no. 1, pp. 183–188, 2015.
- [7] J. D. Simpson, D. Chichester, and J. Hill, "The a-711 high yield neutron generator and automated pneumatic transfer system for fast neutron activation analysis," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 241, no. 1-4, pp. 228–231, 2005.
- [8] J. Holmström, J. Partanen, J. Tuomi, and M. Walter, "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain," *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2010.