

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta**



**Měření rozložení výkonu v experimentálním reaktoru
LR-0 (CV Řež) pomocí polovodičové spektrometrie gama**

Bakalářská práce

Jitka Brabcová

Školitelka: Ing. Marie Švadlenková. CSc.
Centrum výzkumu Řež

České Budějovice 2012

Brabcová J., 2012: Měření rozložení výkonu v experimentálním reaktoru LR-0 (CV Řež) pomocí polovodičové spektrometrie gama. [Measurement of output distribution in LR-0 experimental reactor core (Research Centre Rez) using a semiconductor gamma-spectrometry. Bc. Thesis, in Czech] – 39 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

Anotace

Cílem práce bylo studovat teoretické i praktické základy měření rozložení výkonu v aktivní zóně experimentálního reaktoru LR-0 (Centrum výzkumu Řež) pomocí neutronové aktivační metody a měření palivových proutků s využitím polovodičové spektrometrie gama. V praktické části bylo měřeno axiální a radiální rozložení reakční rychlosti v okolí středu aktivní zóny reaktoru. Dále bylo vyhodnoceno axiální rozložení aktivity štěpného produktu ^{140}La v palivovém proutku z LR-0.

Abstract

The objective of the present work is to study the theoretical and practical background of the measurement of output distribution in LR-0 experimental reactor core (Research Center Rez) by means of neutron activation method and by means of fuel rods scanning using a semiconductor gamma-spectrometry. In the practical part of the work, axial and radial distributions of reaction rate in the vicinity of the centre of reactor core were measured. Further, axial distribution of the activity of the fission product ^{140}La in a fuel rod from LR-0 was estimated.

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

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

V Českých Budějovicích 12.4.2012.

.....

Jitka Brabcová

Poděkování

Ráda bych tímto způsobem poděkovala všem zaměstnancům Centra výzkumu Řež, od kterých jsem měla možnost získat množství informací potřebných k vytvoření této práce. Především pak paní školitelce Ing. Marii Švadlenkové CSc. za cenné rady i trpělivost.

Obsah

1	Experimentální reaktory v ČR.....	1
1.1	Školní reaktor VR-1.....	1
1.2	Výzkumné reaktory v Řeži.....	1
1.2.1	LVR-15.....	2
1.2.2	LR-0.....	2
2	Teoretická část.....	4
2.1	Fyzikální pojmy.....	4
2.1.1	Aktivita.....	4
2.1.2	Poločas přeměny.....	4
2.1.3	Účinný průřez.....	4
2.1.4	Fluence.....	5
2.1.5	Energetický pík.....	5
2.1.6	Kolimátor.....	5
2.2	Interakce záření gama s detektorem.....	5
2.2.1	Fotoefekt.....	5
2.2.2	Comptonův jev.....	6
2.2.3	Tvorba páru.....	7
2.3	Polovodičové detektory.....	7
2.3.1	Krystal HPGe.....	8
2.3.2	Chlazení detektoru.....	9
2.3.3	Stínění.....	9
2.3.4	Předzesilovač.....	9
2.3.5	Zesilovač.....	9
2.3.6	Analýza podle výšky pulzů.....	10
2.3.7	Mnohokanálový analyzátor se softwarem v PC.....	10
2.3.8	Analogově digitální konvertor ADC.....	10
3	Analýza spekter zářičů gama.....	11
3.1	Kalibrace detektoru.....	11
3.1.1	Energetická kalibrace.....	11
3.1.2	Účinnostní kalibrace.....	13
3.2	Ovládání programu Genie 2000.....	15
3.2.1	Nabírání dat.....	15
3.2.2	Kalibrace.....	16
3.3	Načítání dat.....	17
3.4	Práce s daty.....	17
4	Měření fluence neutronů v reaktoru pomocí aktivačních fólií.....	18
4.1	Neutronová aktivační analýza.....	19
4.2	Výběr aktivačních fólií.....	20
4.2.1	Zlato.....	20
4.2.2	Indium.....	21
4.2.3	Nikl.....	22
4.2.4	Kadmium.....	22
4.3	Měření ozářených AF.....	22

4.3.1	Měření 1	24
4.3.2	Měření 2	25
4.3.3	Měření 3	26
5	Skenování palivových proutků z reaktoru LR-0.....	27
5.1	Palivový proutek.....	27
5.2	Zařízení pro gama-skenování	28
5.2.1	Ovládání gama-skenovacího zařízení.....	30
5.2.2	Ovládání programu DASAVR	30
5.3	Měření palivových proutků.....	30
5.3.1	Měření zbytkové aktivity proutku před aktivací	30
5.3.2	Měření pozadí.....	31
5.3.3	Měření aktivovaných palivových proutků.....	31
5.3.4	Měření 4	31
6	Výsledky měření	32
6.1	Aktivační fólie	32
6.1.1	Měření 1	32
6.1.2	Měření 2	34
6.1.3	Měření 3	35
6.2	Palivový proutek.....	36
6.2.1	Měření 4	36
7	Závěr.....	38
8	Použitá literatura.....	39

1 Experimentální reaktory v ČR

Již v roce 1895, kdy byly objeveny paprsky X, vznikla potřeba zkoumat možnosti využití jaderné fyziky pro mírové účely. Spuštění a využívání prvních jaderných reaktorů, amerického z roku 1942 a ruského z roku 1946, umožnilo v Rusku spustit v roce 1954 první jadernou elektrárnu dodávající energii do sítě. Tím výzkum nekončí, ale rostoucí využití jaderné energie vyžaduje neustálý vývoj a výzkum v této oblasti i kvalitní přípravu odborníků v neustále rostoucím počtu oborů s jadernou fyzikou souvisejících.

V současné době v ČR pracují 3 experimentální jaderné reaktory. Dva výzkumné a jeden školní.

Všechny tři jsou lehkovodní, jako moderátor se používá demineralizovaná voda. Žádný z nich neslouží pro výrobu energie. Jejich parametry i konstrukce se liší podle toho, k jakým účelům jsou využívány.

1.1 Školní reaktor VR-1

Školní reaktor VR-1, pojmenovaný Vrabčák, provozovaný Katedrou jaderných reaktorů při Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské (FJFI) ČVUT v Praze slouží již od roku 1990 ke vzdělávání studentů a specialistů jaderné energetiky, převážně v oblastech reaktorové a neutronové fyziky, dozimetrie, jaderné bezpečnosti a systémů řízení jaderných zařízení.

Jedná se o lehkovodní reaktor bazénového typu s obohaceným uranem s odvodem tepla přirozenou konvekcí. Reaktor má tvar osmistěny a je vyroben ze stínícího betonu, uvnitř jsou dva shodné bazény z nerezavějící oceli, které se liší funkcí a vybavením a je možné je vodotěsně oddělit. V jednom je aktivní zóna a druhý je manipulační. Toto umožňuje snadno a bezpečně připravovat a provádět experimenty. Palivo je typu IRT-4M ve dvou provedeních: šestitrubkové a osmitrubkové palivové články.

Zajímavostí je, že od svého vzniku je reaktor řízen plně digitálně. Studentům umožňuje přístup k naměřeným datům [1].

1.2 Výzkumné reaktory v Řeži

Další dva reaktory provozuje Centrum výzkumu Řež, s.r.o. v Řeži u Prahy, který je dceřinou společností Ústavu jaderného výzkumu a.s. v Řeži. Oba reaktory

(označují se LR-0 a LVR-15) jsou využívány k výzkumným i vzdělávacím účelům, LVR-15 slouží i ke komerčním účelům.

1.2.1 LVR-15

Reaktor LVR-15 je lehkovodní reaktor tankového typu v beztlakové nádobě s nuceným chlazením a s provozním tepelným výkonem do 10 MW.

Tento reaktor je využíván pro potřeby výzkumu a průmyslu, například výzkum a zkoušky materiálů pro jaderné elektrárny, určení složení látek pomocí neutronové aktivační analýzy, vývoj a výroba radiofarmak, výroba radioizotopů i pro léčebné účely pomocí neutronové záchytové terapie.

Tento reaktor je vyroben z nerezové oceli a stíněn vrstvami vody, litiny a těžkého betonu. Víko je z ocelolitiny. V reaktoru je používáno ruské palivo IRT-4M (výrobce NZCHK Novosibirsk) s obohacením 19,9 % ^{235}U . K řízení reakce je používáno 12 regulačních tyčí, 8 kompenzačních, 3 havarijní a jedna je v režimu automatického regulátoru. Absorpční část regulačních tyčí je vyrobena z karbidu bóru. Teplo z aktivní zóny je odváděno přes tři chladicí okruhy do řeky Vltavy. Reaktor je v provozu vždy 3 týdny, pak je týden odstaven [2].

1.2.2 LR-0

Jedná se o lehkovodní reaktor s nulovým výkonem. Stálý výkon reaktoru je jen asi 1 kW a maximálně 5 kW po kratší časový úsek, ale tento výkon nezpůsobí výrazné ohřátí moderátoru, a proto nevyžaduje chlazení. Jeho provozní teplota je od pokojové teploty do 70°C. I přes malý výkon probíhají fyzikální děje uvnitř reaktoru, stejně jako v reaktorech s velkým výkonem. Proto je využíván pro měření neutronově fyzikálních charakteristik reaktorů typu VVER a PWR. Umožňuje experimenty související s ději v aktivní zóně a při skladování vyhořelého paliva z jaderných elektráren, jakož i výzkum radiačního poškození materiálů vnitroreaktorové vestavby, reaktorových nádob a stínění lehkovodních reaktorů.

Reaktor vyrobený z hliníku o čistotě 99,5% je umístěn v betonovém stínícím bunkru. Skládá se ze dvou částí, spodní válcová část má průměr 3,5 m a výšku 6,5 m, stěny mají tloušťku 16 mm, dno 25 mm. Horní čtvercová část má rozměry 6 x 6 m, výšku 1,5 m a je ve spodní části svařena v jeden celek. Jeho vnější válcovitá část je stíněna 1mm silnými

kadmiovými plechy a má odnímatelnou tepelnou izolaci o tloušťce 100 mm a 200 mm.

Aktivní zóna reaktoru umožňuje zakládat palivo v různých geometriích podle použité nosné desky a tím simulovat různé typy aktivních zón reaktorů. Dále obsahuje klastry pro řízení fluence neutronů a různé kanály pro uložení měřicích přístrojů.

Jako palivo se používá uran ve formě UO_2 s různým množstvím obohacení izotopu ^{235}U v závislosti na potřebách experimentu. Práškový UO_2 je lisovaný do malých válcových peletek, které se ukládají do obalu ze zirkonia a tvoří palivový proutek (palivový článek) o délce 1250 mm. Palivové proutky jsou skládány do palivových kazet tvaru šestibokého hranolu. Experimenty na LR-0 se provádějí s kazetami typu VVER 1000 (312 proutků v kazetě) a VVER 440 (126 proutků v kazetě) pouze s tím rozdílem, že jsou kratší než kazety v našich jaderných elektrárnách.

Absorpční klastry obsahují 18 proutků s absorbatorem B_4C . Při experimentech se jich většinou využívá 6 - 15, z toho některé úplně vytažené, připravené k odstavení reaktoru a ostatní nastavené podle požadavků experimentu. K řízení reakce se dále využívá změny výšky hladiny moderátoru. Jedná se o demineralizovanou vodu s B_3BO_3 o koncentraci 0-12 g.l^{-1} . Na rozdíl od jaderných elektráren nelze koncentraci měnit v průběhu experimentu a je nastavena před spuštěním reaktoru.

Nedílnou součástí reaktoru je neutronový zdroj $^{241}\text{AmBe}$ s emisí $6,6 \cdot 10^6$ neutronů. s^{-1} . V tomto takzvaném neutronovém generátoru se využívá reakce (α, n) na terčíkovém materiálu, kterým je ^9Be , kde zdrojem částic α je ^{241}Am . Reakcí, při níž vznikají neutrony, je $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$. Tyto neutrony pak mohou reagovat s uranem v jaderném palivu a spustit řetězovou reakci. Zdroj je umístěn v kontejneru pod nádobou reaktoru a do reaktoru je zasunut jen pro spuštění a stabilizaci, poté je opět vysunut a reakce se nezúčastňuje [3].

2 Teoretická část

2.1 Fyzikální pojmy

2.1.1 Aktivita

Aktivita je veličina charakterizující počet přeměn určitého nestabilního izotopu za jednotku času, a to nezávisle na fyzikální nebo chemické formě této látky.

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

kde dN je střední počet radioaktivních přeměn z daného energetického stavu jádra za časový interval dt .

Jednotkou aktivity je Becquerel [Bq], 1 Becquerel je 1 přeměna za 1 sekundu. Aktivita látky klesá exponenciálně s časem.

2.1.2 Poločas přeměny

Poločas přeměny je veličina určující čas, za který se přemění polovina jader daného izotopu:

$$T = \ln 2 / \lambda, \quad (2)$$

kde λ je přeměnová konstanta, která má pro každý izotop jinou hodnotu. Každý izotop má svou charakteristickou hodnotu poločasu rozpadu. Tato hodnota může nabývat řádově od 10^{-17} s do miliard let, například pro ${}^8\text{Be}$ je $6,7 \cdot 10^{-17}$ s nebo pro ${}^{238}\text{U}$ je 4,468 miliard let.

2.1.3 Účinný průřez

Účinný průřez je veličina popisující pravděpodobnost jaderných reakcí nebo dalších reakcí v mikrosvětě. Vyjadřuje pravděpodobnost, že ostřelující částice bude daným konkrétním způsobem interagovat s terčovým jádrem. Jednotkou SI účinného průřezu je m^2 , v praxi se často používá praktičtější jednotka barn (b) = 10^{-28}m^2 .

Velikost účinného průřezu závisí mnohem více na vlastnostech a skladbě jádra a na druhu a energii jaderné střely než na skutečném geometrickém rozměru jádra πr^2 . Pro různé reakce téhož jádra se může lišit až o mnoho řádů [4].

2.1.4 Fluence

Fluence částic Φ je definována jako podíl počtu částic dN , které dopadly v daném bodě v prostoru na infinitezimální kouli, a plochy hlavního řezu této koule dA

$$\Phi = \frac{dN}{dA}, \quad (3)$$

kde dN je počet částic, které dopadly v daném bodě v prostoru na kouli a dA je hlavní řez této koule.

2.1.5 Energetický pík

Pojem pík se používá pro křivku zvonovitého tvaru, která vyjadřuje závislost dvou proměnných veličin, v našem případě počet signálů detektoru na energii záření.

2.1.6 Kolimátor

Propouští jen požadované záření z požadovaného směru v požadovaném místě; toho docílíme vhodným sestavením materiálů, které pohltí a nepropustí záření z míst a směrů nevhodných pro měření.

2.2 Interakce záření gama s detektorem

Průchod fotonového záření detektorem můžeme zaznamenat jen díky interakci ionizujícího záření s detektorem. Tyto interakce závisí na energii dopadajícího záření, pravděpodobnost jednotlivých dějů se s rostoucí energií mění. Hlavními typy interakce záření gama s prostředím jsou fotoefekt, Comptonův efekt a tvorba párů. Při nízkých energiích fotonů se uplatňuje též neionizační koherentní rozptyl a při energiích řádu desítek MeV nelze zanedbat příspěvek fotojaderných reakcí. Pravděpodobnost reakce fotoefektem s rostoucí energií dopadajícího záření klesá, při energii 200 – 300 keV začne převažovat Comptonův rozptyl a při energii nad 1,02 MeV začne narůstat pravděpodobnost tvorby párů. Pokud nedojde k některé z těchto interakcí, nemůže být toto záření zaznamenáno [5].

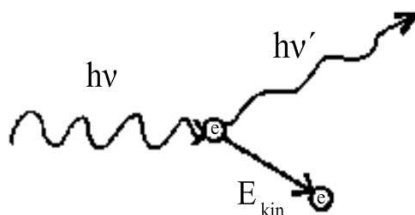
2.2.1 Fotoefekt

Fotoefekt je jev, při kterém rentgenové nebo gama záření předá veškerou energii jedinému vázanému elektronu. Foton s energií $E_\gamma = h\nu$ uvolní elektron, jehož výsledná kinetická energie E_{kin} je zmenšena o energii vazebnou E_{vaz} . Fotoefekt způsobuje čárové

spektrum, kterému říkáme pík totální absorpce, nebo fotopík. Protože energie bývá předána elektronům nejbližší jádra, dojde při uvolnění elektronu k přeskupení elektronů z vyšší hladiny a při tom k vyzáření charakteristického rentgenového záření. Rentgenové záření germánia má energie jen kolem 10 keV a většinou se tyto hodnoty vůbec nevyhodnocují.

2.2.2 Comptonův jev

Comptonův jev vzniká převážně při energiích 100 keV – 1,02 MeV. Při srážce fotonu a elektronu dojde k předání části energie. Předpokládáme, podle kvantové teorie světla, že foton je částice s nulovou klidovou energií a elektron je v naší laboratorní soustavě nehybný. Elektron se začne pohybovat, foton zanikne a vznikne foton s menší frekvencí (rozptýlený foton). Tento děj je znázorněn na obrázku č.1 a vyjádřen rovnicí č. 4 .



Obr. č.1 Comptonův jev [6] upraveno

$$hv - hv' = E_{kin} , \quad (4)$$

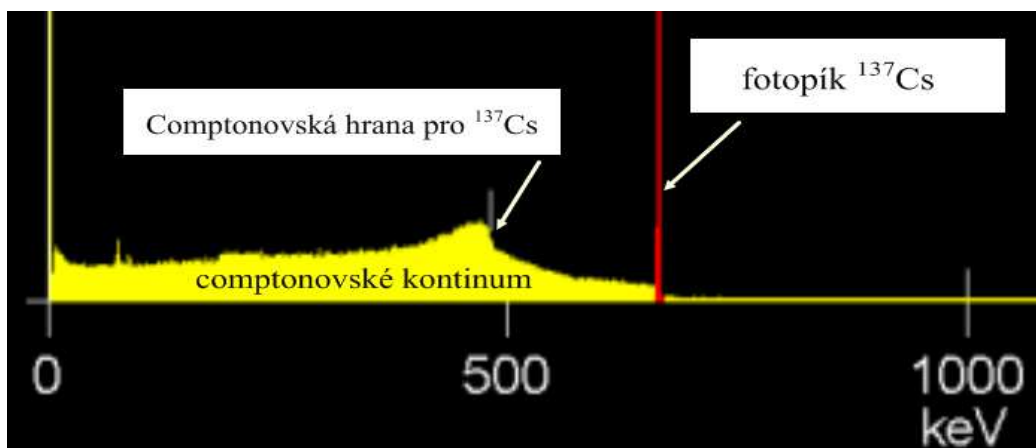
kde hv je původní energie fotonu, h planckova konstanta ($6,626176 \cdot 10^{-34}$ J.s), v původní frekvence fotonu, hv' energie fotonu po srážce, E_{kin} kinetická energie uvolněného elektronu.

Nově vzniklý foton může reagovat s dalším elektronem a děj se takto může několikrát opakovat, foton při srážkách postupně ztrácí energii. Velikosti kinetických energií závisí také na úhlu srážek, tento úhel může nabývat hodnot od 0° do 180° , pro 180° je pokles energie původního fotonu největší. To je důvodem, že při tak velkém množství srážek vzniká spojité spektrum s píkem zpětného odrazu a Comptonovskou hranou. Na obrázku č. 2 je spektrum ^{137}Cs nabraené pomocí HPGe detektoru, na kterém je vyznačena Comptonovská hrana pro ^{137}Cs , jejíž velikost je 477,6 keV a červeně fotopík ^{137}Cs s energií 661,7 keV.

Energii comptonovské hrany vypočítáme podle následující rovnice:

$$E_c = 2 * E_\gamma^2 / (m_e * c^2 + 2 * E_\gamma) , \quad (5)$$

kde E_γ je energie fotonu gama, pokud je od elektronu odražen pod úhlem $\pi = 180^\circ$, m_e je klidová hmotnost elektronu ($9,109534 \cdot 10^{-31} \text{kg}$) a c rychlost světla ($2,99792458 \cdot 10^8 \text{m.s}^{-1}$)



Obr. č. 2 Části spektra záření gama ^{137}Cs měřeného HPGe detektorem

2.2.3 Tvorba páru

Je to jev totální absorpce. Aby k tomuto jevu mohlo dojít, musí mít foton energii alespoň 1,02 MeV, což je součet klidové energie elektronu a pozitronu.

Foton, pohybující se v okolí atomového jádra, se přemění na elektron a pozitron. Obě tyto částice vzniknou současně a v případě, že pozitron neanihiluje, budou detekovány jako součet jejich energií. Pokud dojde k anihilaci pozitronu, pak vzniknou dva fotony, které mohou z detektoru uniknout nebo opět reagovat některým z možných jevů.

2.3 Polovodičové detektory

Polovodičové detektory jsou ionizační detektory v pevné látce, v nichž je energie potřebná k vytvoření iontového páru menší než 3 eV. To je energie potřebná pro přesun elektronu z nejvyššího energetického pásu do pásu vodivostního, přitom musí překonat tzv. energetický pás, jehož velikost je charakteristická pro různé druhy polovodičů [5].

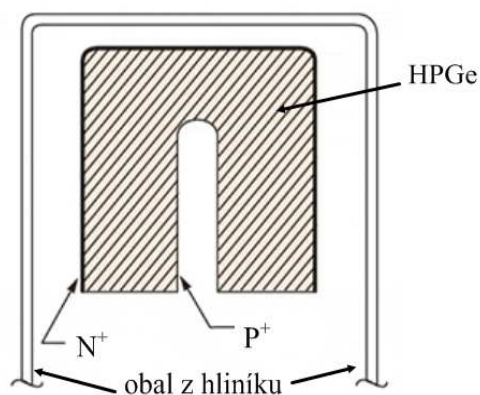
Polovodičové detektory (například HPGe) mají mnohem lepší rozlišovací schopnost

než scintilační detektory (např. NaI), ale je zde menší účinnost. Jednou z metod pro porovnání účinností germaniových a scintilačních detektorů, je porovnání četností pro čáru 1,33 MeV zdroje ^{60}Co . Tento zdroj je umístěn ve vzdálenosti 25 cm od čela detektoru v jeho ose [7].

2.3.1 Krystal HPGe

Základem detektoru je krystal velmi čistého germánia, jehož krystalová struktura je typu diamantu. Atomy, stejně jako atomy většiny pevných látek, jsou tak blízko u sebe, že jejich valenční elektrony tvoří jednotný systém elektronů pro krystal jako celek; díky tomu nejsou energetické stavy vnějších elektronových slupek přesně definované hodnoty, ale tvoří pro celý krystal pás energií. V případě germánia se jedná o hladiny 3s a 3p. Dolní energetické hladiny si zachovávají diskrétní hodnoty. Při dodání dostatečné energie, například dostatečně silným elektrickým polem, nárazem nabitě částice nebo fotonu, přejdou elektrony do vodivostního pásu a mohou být registrovány jako proud procházející polovodičem. Pro Ge je tato energie 2,98 eV. Pro detekci záření se využívá zapojení krystalu jako dioda P-I-N v závěrném směru. Tím vznikne dostatečně velká oblast s vlastní vodivostí, která je silně ochuzená a využívá se jako detekční část pro fotony a nabitě částice. Stejnoseměrné vysoké napětí, při kterém pracuje detektor, má obvykle hodnoty od 2 do 5 kV [5].

Na obrázku č. 3 je průřez HPGe detektorem s difuzními vrstvami typu p a n.



Obr. č. 3 Průřez HPGe detektorem [8] (upraveno)

2.3.2 Chlazení detektoru

Protože polovodiče za pokojové teploty poměrně snadno vedou proud a tento proud by mohl být zaznamenán jako šum a zkreslit naměřené hodnoty, je nutné chladit polovodič na teplotu -196°C , buď kapalným dusíkem nebo jiným vhodným způsobem, např. elektricky. Pro HPGe je chlazení nutné jen při měření, kdy je na detektor přiloženo vysoké napětí, protože u tohoto krystalu nedochází k driftu příměsí. Existují však detektory, které je nutné chladit neustále. Příkladem je germániový detektor driftovaný lithiem Ge(Li) [5].

2.3.3 Stínění

Výsledky měření by mohlo ovlivnit ionizující záření okolí, a proto je nutné obklopit detektor dostatečným množstvím látky, která toto záření pohltí. Pro záření gama se používá převážně olovo. Protože olověné stínění reaguje s γ zářením, které nedopadlo na detektor, vrací se od něho do detektoru záření, které vznikne po některé z reakcí - Comptonův rozptyl, přeměna β , anihilace a fotoefekt. Pokud reaguje fotoefektem, dodává do spektra rentgenové čáry $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$. Jejich energie je od 72 do 87 keV. Toto je možné odstranit přidáním několik mm mědi, která toto záření pohlcuje.

2.3.4 Předzesilovač

Vyžaduje-li zpracování slabých signálů velkého zesílení, je účelné rozdělit potřebné zesílení do dvou konstrukčních celků, do (hlavního) zesilovače a předzesilovače. Používáme-li detektor s velkou rozlišovací schopností, je třeba signál zesilovat předzesilovačem s malým šumem, aby se rozlišení detektoru zbytečně nezhoršovalo. Předzesilovač je od vysokého napětí oddělen kondenzátorem a musí být umístěn co nejbližší detektoru, aby se snížila kapacita vodičů mezi detektorem a předzesilovačem, a tím se zvýšila účinnost měření. Ve většině detektorů se využívá nábojově citlivých předzesilovačů, u kterých je výstupní pulz úměrný vstupnímu náboji. Všechny předzesilovače mají mnohem kratší náběhovou dobu, řádově v nanosekundách, ale poměrně dlouhou dobu tlumení.

2.3.5 Zesilovač

Zesilovač může být díky předzesilovači umístěn ve větší vzdálenosti od detektoru. Jeho úkolem je zesilovat a tvarovat pulz z předzesilovače. Protože poměrně dlouhá doba tlumení (kolem 50 mikrosekund) neumožní pokles signálu na nulu, je vhodné použít zesilovač

derivační nebo zesilovač, který provádí druhou derivaci.

Zesilovač derivační vytváří unipolární signál, který je kratší a po jeho integraci, kterou se odstraní šum, má dobrý poměr signál/šum. Ještě výhodnější je využití zesilovače s druhou derivací, protože jeho výstupní signál se skládá ze dvou tvarově stejných částí, jedné kladné a jedné záporné. To zajistí, že takový pulz nezanechá na kondenzátoru žádný náboj a nemusíme řešit jeho vynulování.

Důležitou faktorem je čas, který udává šířku výstupního pulzu. Pro spektroskopické zesilovače se udává přibližně $7,3 \times$ časová konstanta, která je pro optimální rozlišení 2 až $6 \mu\text{s}$ [5].

2.3.6 Analýza podle výšky pulzů

Po zesílení signálu a odstranění šumu je nutné oddělit výšky pulzů do jednotlivých kanálů. To se provádí pomocí jednokanálových analyzátorů. Tyto analyzátory mají nastavenou spodní a horní diskriminační mez, a vytvoří logický pulz vždy, když výška pulzu ze zesilovače dosáhne požadovaného napětí. Pro každý malý rozsah napětí potřebujeme jeden jednokanálový analyzátor.

2.3.7 Mnohokanálový analyzátor se softwarem v PC

Aby bylo možné zaznamenat větší množství různě velkých napětí, využíváme mnohokanálové analyzátory (MCA – z angl. Multichannel Analyzer). Mnohokanálový analyzátor obsahuje až 32 tisíc kanálů.

Tento analyzátor jako celek nabírá a vyhodnocuje celý rozsah napětí najednou, hodnoty zobrazuje na obrazovce v reálném čase.

V současnosti lze tyto analyzátory instalovat jako desku do počítače a ovládat je pomocí softwaru dodávaného výrobcem.

2.3.8 Analogově digitální konvertor ADC

Aby údaje z detektoru mohly být zpracovány počítačem, je nutné analogový signál převést na digitální. Údaje z konvertoru jsou ukládány v pamětech jednotlivých kanálů. Může být jako samostatný modul nebo součástí mnohokanálového analyzátoru.

3 Analýza spekter zářičů gama

3.1 Kalibrace detektoru

Pro přesné vyhodnocení měření na HPGe detektoru je nutná přesná energetická a účinnostní kalibrace. Umožní správné určení jednotlivých radioizotopů a jejich množství.

Energetickou a účinnostní kalibraci spektrometru provádíme pomocí kalibrovaných zářičů. Tyto zářiče jsou dodávány například Českým metrologickým institutem, Inspektorátem pro ionizující záření. Každý zářič je certifikován. Průvodní list obsahuje název radionuklidu, jeho aktivitu, poločas rozpadu, referenční datum, způsob výroby, popis pouzdra etalonu a další údaje. Součástí certifikátu je i popsání způsob, který byl použit k určení měrné aktivity a určení kombinované standardní nejistoty

Výběr zářičů by měl pokrýt celé energetické spektrum, které budeme měřit. Jsou to například radionuklidy ^{152}Eu (121,8; 244,7; 344,3; 964,1; 1085,9; 1112,1; 1408,0 keV), ^{241}Am (59,5 keV), ^{133}Ba (81,0; 302,8; 356,0; 383,8 keV), ^{137}Cs (661,6 keV), ^{60}Co (1173,2 a 1333,5 keV). V případě kalibrace při našich měřeních používáme zářiče typu EG. Tyto zářiče jsou velmi malých rozměrů (prakticky bodové), jsou dodávány v plastových hermeticky uzavřených obalech a jsou uloženy v olověných pouzdrech, pokud se s nimi neměří.

3.1.1 Energetická kalibrace

Pro správné přiřazení kanálu určité energii je nutné provést energetickou kalibraci.

Po dostatečně dlouhém naměření spektra vybraného kalibrovaného zářiče provedeme přiřazení jednotlivých píků známým izotopům obsaženým v zářiči. Jedná se v podstatě o vyjádření lineární závislosti mezi energií záření gama a číslem kanálu analyzátoru.

Program GENIE 2000 je komplexním programem pro ovládání HPGe detektoru, jeho napájení i pro práci s daty. Tento program umožňuje při energetické kalibraci využít zadání izotopů a jejich energií pomocí seznamu nuklidů z vybrané knihovny nuklidů. Základní knihovny jsou součástí aplikace, je však možné je podle potřeby rozšiřovat a následně používat.

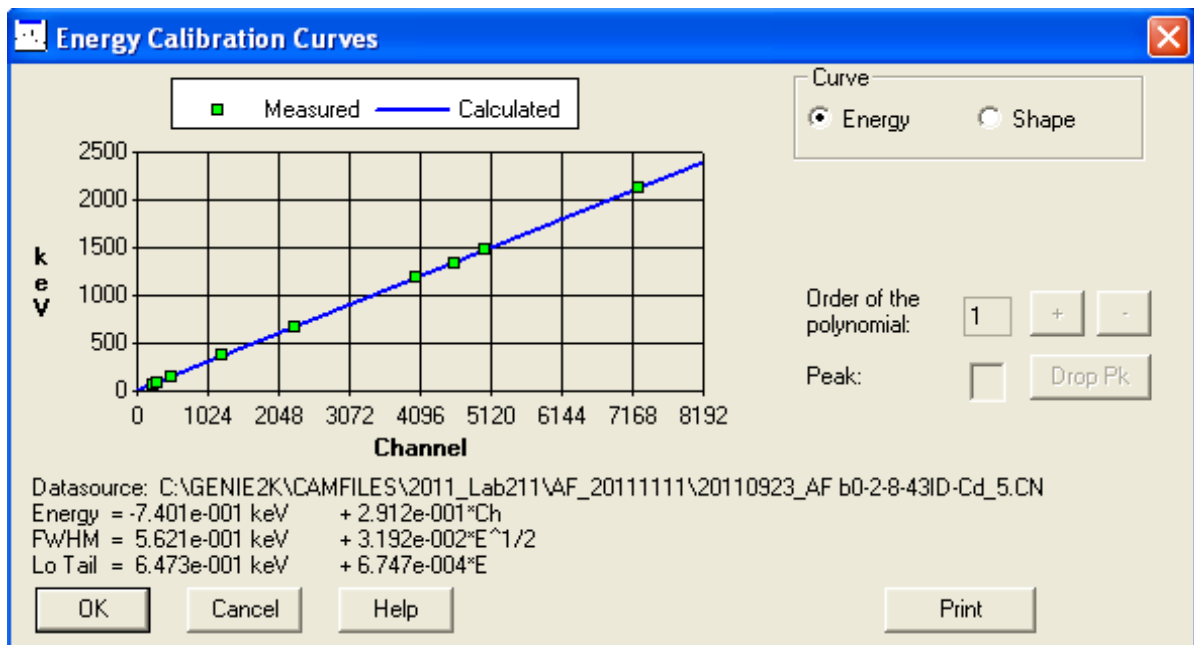
Výpočet rovnice křivky a přiřazení energie jednotlivým kanálům provede aplikace

automaticky. Je možné postupně přidávat jednotlivé naměřené hodnoty vybraných etalonů a tím dostatečně pokrýt celé spektrum. Pro výpočet energie kanálu je využita rovnice (6), kde k je směrnice přímky, n číslo kanálu analyzátoru.

$$E = E_0 + k.n \quad (6)$$

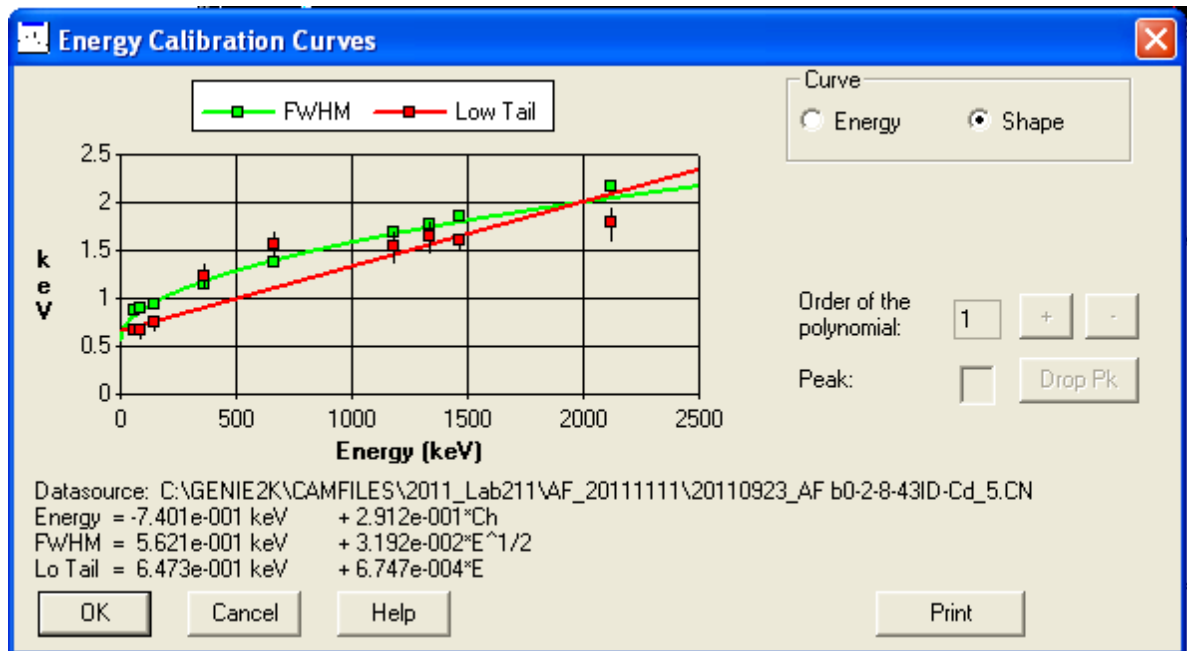
Přesnost kalibrace je možné ovlivnit vhodným výběrem naměřených píků, které využijeme ke kalibraci.

Na obrázku č. 4 je typická křivka energetické kalibrace.



obr. č. 4 zobrazení typické energetická kalibrace, a její kalibrační přímky

V rámci energetické kalibrace v programu Genie 2000 proběhne též určení tvaru píků v závislosti na energii. Příklad je uveden na obrázku č. 5, kde zeleně je označena pološířka píku (FWHM - z angl. Full-Width Half-Maximum) a červeně velikost tzv. chvostu píku. Jednotlivé naměřené body by se měly co nejméně odchylovat od proložených křivek



obr. č. 5 energetická kalibrace

Po vytvoření kalibrace ji uložíme pod vhodným názvem. Tuto kalibraci pak můžeme použít při měřeních shodným nastavením celé gamaspektrometrické trasy. Pro tuto kalibraci není nutné dodržovat shodnou vzdálenost zářiče od detektoru, jak je tomu u účinnostní kalibrace.

3.1.2 Účinnostní kalibrace

Již v úvodu bylo zmíněno, že HPGe detektory mají poměrně velkou rozlišovací schopnost, ale relativně malou účinnost detekce. Pro vyhodnocení měření je však nutné znát, jaké množství radioaktivních přeměn odpovídá detekovaným hodnotám. Právě k tomu je určena účinnostní kalibrace.

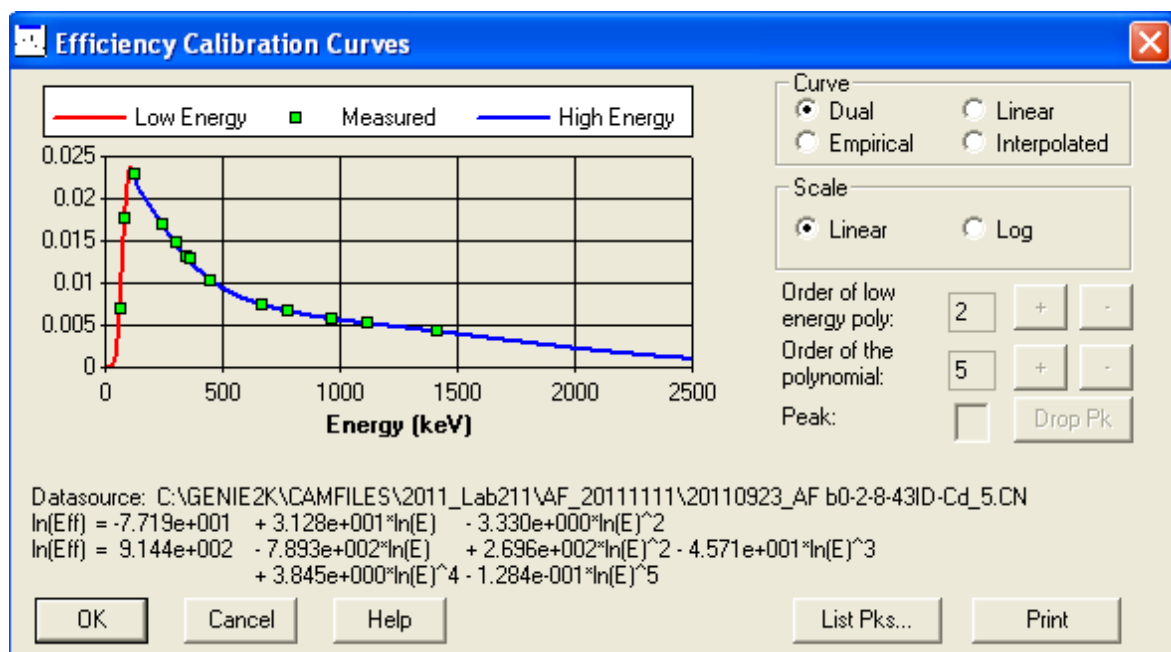
Pro ni je důležité, aby certifikované etalony a měřené vzorky měly shodnou velikost a tvar a měření proběhlo ve shodné vzdálenosti od čela detektoru. Pokud probíhá měření v různých vzdálenostech, je nutné i měření pro kalibraci provést v těchto vzdálenostech. I zde je nutné vybrat etalony, které pokryjí celé spektrum energií a znát přesně jejich aktivitu.

Účinnost detektoru není pro všechny energie stejná; pro malé energie je malá, protože obal detektoru, vyrobený z hliníku, některé tyto neutrony pohltí. Se stoupající energií účinnost roste, poté začne klesat. Důvodem je, že při vyšších energiích část fotonů

proletí detektorem bez reakce fotoefektem, nebo reaguje Comptonovým jevem.

Při kalibraci je možné zvolit, zda body jednotlivých energií proložit jednou křivkou (polynomem) nebo graf rozdělít na dvě části. Toto volíme v části Curve. Linear znamená proložení jednou křivkou a vyjádření jednou rovnicí, dual rozdělení na dvě části s dvěma rovnicemi. Při rozdělení je nutné určit bod zlomu v místě s největší účinností, takzvaný crossover. Tyto dvě části jsou v obr. č. 6 vyznačeny, pro malé energie červeně a pro velké energie modře. Pro dobrou kalibraci jsou nutné i v oblasti malých energií alespoň tři body. Výběrem vhodných přiřazovaných aktivit daných energií můžeme ovlivnit kvalitu kalibrace.

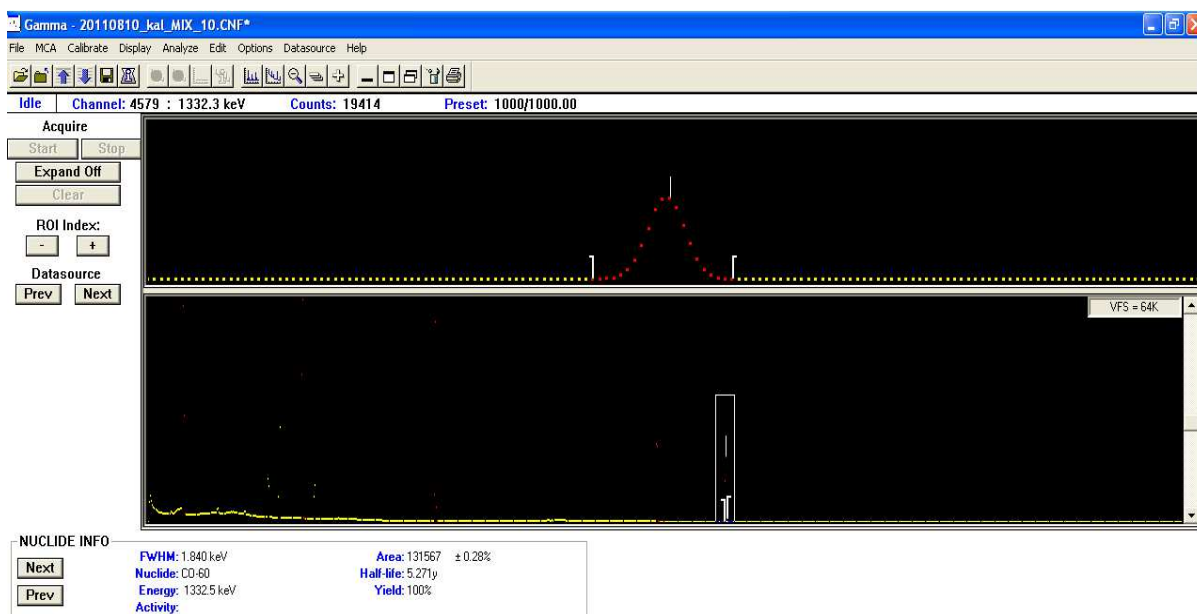
Další možností, jak ovlivnit kvalitu kalibrace, je vhodný výběr polynomu pro výpočet rovnic proložených křivek. Při výběru polynomu je nám nápomocná křivka, kterou zobrazíme jako logaritmickou v části scale. Dbáme na to, aby tato křivka byla v první polovině rostoucí a dále klesající.



Obr.č. 6 Zobrazení křivky účinnosti kalibrace

3.2 Ovládání programu Genie 2000

Program Genie 2000 umožňuje velmi pohodlnou práci nejen při získávání dat z mnohokanálového analyzátoru, ale i při jejich zpracování. Přehledné grafické prostředí obsahuje záložky, tlačítka pro rychlé ovládání, pruh pro zobrazení kanálů a energií, grafické zobrazení i prostor pro výpis dat ve spodní části obrazovky.



Obr. č. 7 Ovládací panel programu Genie 2000

3.2.1 Nabírání dat

znamená načtení počtů impulzů jednotlivých energií z vybraného detektoru pomocí mnohokanálového analyzátoru. Toto je možné provést pomocí PC díky ovládání mnohokanálového analyzátoru pomocí nabídky MCA. Tato nabídka je aktivní pouze pokud je vybraný analyzátor připojen. Umožňuje nastavit parametry pro měření, například napětí na detektoru a dobu měření. Měření spouštíme tlačítkem Start. K ukončení nabírání dat dojde po nastaveném čase automaticky, nebo je možné měření předčasně ukončit pomocí tlačítka Stop. Pokud probíhá několik měření za sebou, použijeme pro vymazání předchozích dat tlačítko Clear. Rozložení tlačítek pro ovládání nabírání dat je na obrázku č. 8.

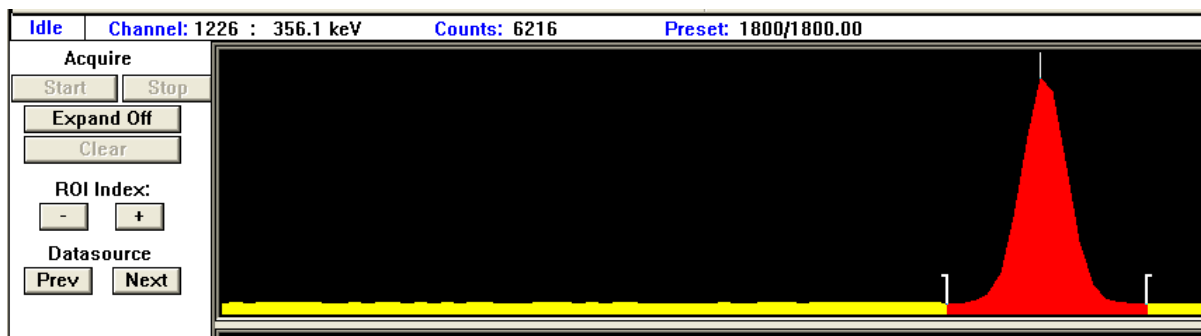


obr.č. 8 Panel nástrojů pro nabírání dat

3.2.2 Kalibrace

Menu nabízí několik možností pro energetickou i účinnostní kalibraci. Principem kalibrace jsem se zabývala v předchozí části.

Při energetické kalibraci je výběr jednotlivých píků možné provést automaticky, program vyhodnotí jednotlivé píky jako oblasti zájmu, vyznačí je červenou barvou a označí jejich krajové body. Obsluha má možnost se posouvat po ose energií po jednotlivých oblastech zájmu pomocí tlačítek +,- ROI Index. V řádku nad grafickým zobrazením jsou vypsány hodnoty popisující označený vrchol píku, kanál, jeho energii. Na obrázku č. 9 je část ovládacího panelu s jedním píkem o energii 356,1 keV a s ovládacími tlačítky pro pohyb po celé šířce spektra.



obr. č. 9 zobrazení naměřené energie

Poté je možné automaticky přiřadit energie s využitím knihovny nuklidů, nuclide list.

Účinnostní kalibrace je komplexnější problém, který je mimo rámec této práce. Při měření jsem využívala již hotové kalibrační soubory příslušející dané geometrii měření.

3.3 Načítání dat

Po načtení dostatečného počtu impulzů je možné data uložit do námi vybraného adresáře a následně vyhodnotit. Každé měření by mělo probíhat dostatečně dlouho, aby chyba nepřekročila zvolenou mez, např. 1% . Relativní statistickou chybu stanovení počtu impulzů pro danou energii ve spektru určíme podle vzorce:

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} \cdot 100 = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100 \quad (7)$$

Z toho plyne, že potřebujeme detekovat alespoň 10000 impulzů pro pík zkoumané energie, požadujeme-li chybu $\leq 1\%$. Čím menší aktivita, tím je potřeba delší čas měření.

3.4 Práce s daty

Naměřená data je možné ukládat do námi zvolených adresářů ve formátech *.CNF a následně je dle potřeby načítat a zpracovávat. Program Genie 2000 umožňuje mít otevřeno několik dokumentů s daty, a zároveň provádět nabírání nových dat. Mezi těmito daty můžeme přepínat v záložce datasource.

Program nám také umožňuje protokol o vyhodnocení spektra tisknout nebo exportovat do formátu *.PDF V exportovaném dokumentu najdeme všechny potřebné informace o daném měření.

Každé vyhodnocování spektra záření gama vzorku se skládá z několika úkonů:

Kalibrace

- načtení kalibračních dat
- samotná kalibrace

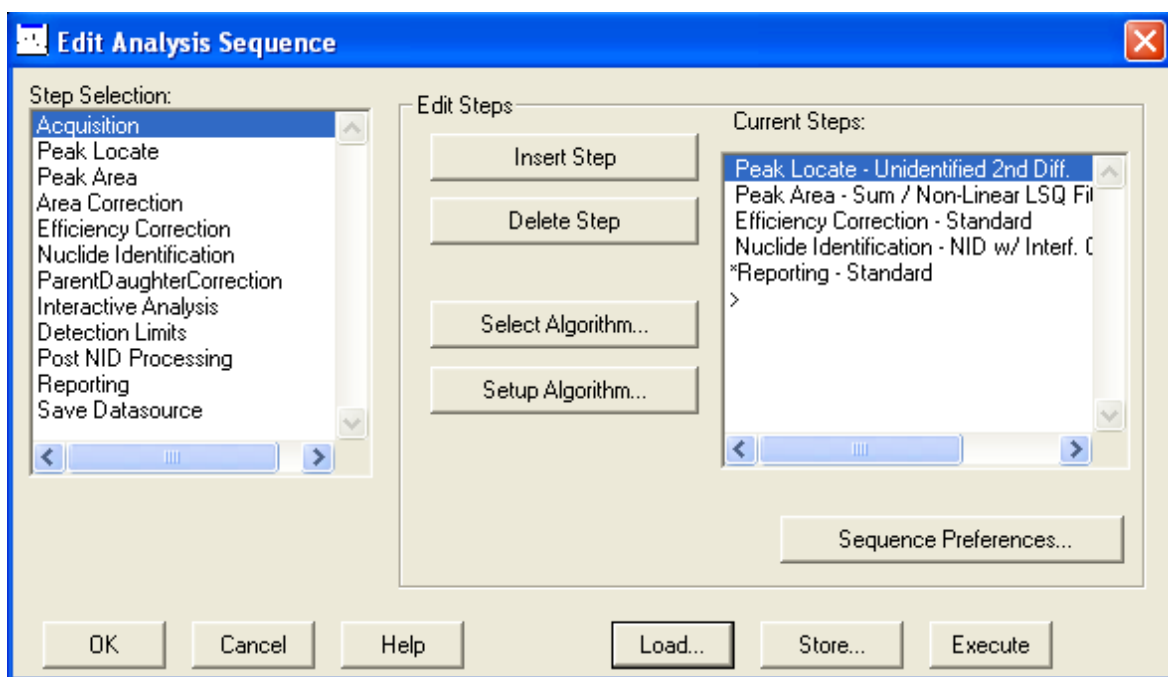
Analýza

- lokalizace píků
- výpočet plochy píků
- korekce
- identifikace jednotlivých izotopů
- výpis výsledků na monitoru

Report vypsání dat ve formátu pdf

Program Genie 2000 nám umožňuje zautomatizovat většinu úkonů pomocí Edit Analysis Sequence.

Zde nejprve vybereme ze seznamu v levé části nabídky kroky, které mají proběhnout pomocí tlačítka Insert Step, pak pomocí Select Algorithm vybereme způsob, jak mají jednotlivé kroky proběhnout, a k jejich nastavení využijeme Setup Algorithm. V pravé části se vytváří sekvence kroků. Tyto kroky následně spustíme pomocí execute. Po tomto spuštění vše proběhne automaticky. Tuto sekvenci je možné vhodně pojmenovat a využívat pro větší množství vyhodnocování. Na obrázku č.10 jsou všechna tlačítka a ukázky možností výběru po rozbalení nabídky Edit Analysis Sequence. Jejich využití bylo popsáno.



Obr.č.10 Nabídka pro vytvoření sekvence kroků při vyhodnocování

4 Měření fluence neutronů v reaktoru pomocí aktivačních fólií

Děje probíhající v aktivní zóně reaktoru neprobíhají v celém objemu stejně a mohou být ovlivněny například výškou hladiny moderátoru, zasunutím regulačních tyčí, délkou tohoto zasunutí, i rozložením a složením paliva.

Pro bezpečné používání reaktoru, kvalitní využití paliva a prodloužení doby jeho využívání je nutné znát množství a energie neutronů v různých místech reaktoru. Jedním ze způsobů měření je aktivační metoda - měření pomocí aktivačních fólií. Tato metoda je vhodná pro měření prostorového rozložení neutronového pole, protože jednotlivé fólie jsou malé a můžeme je poměrně snadno umísťovat v dostatečném množství na vhodně zvolená místa v reaktoru.

4.1 Neutronová aktivační analýza

Aktivační fólie (dále jen AF) je vhodný materiál známé hmotnosti, chemického složení a čistoty. Nejčastěji se používá ve formě malých vyražených čtverců nebo kruhů z velmi slabé fólie.

Pokud ozáříme vhodné stabilní prvky tokem neutronů, dojde k přeměně tohoto izotopu na izotop nestabilní. Nestabilní izotop se následně rozpadá, většinou rozpadem β . Při svém rozpadu vyzáří záření γ typické energie, které je možné detekovat a následně určit aktivitu tohoto izotopu. Na základě aktivity lze vypočítat hodnotu tzv. reakční rychlosti a následně fluenci neutronů při aktivaci. K upevnění aktivačních fólií se nejčastěji používá hliník, protože neutrony propouští, a tím neovlivní ozáření AF [9].

Vhodnou volbou materiálů pro fólie máme možnost určit nejen množství neutronů, ale i zda se jedná o neutrony tepelné, epitermální nebo rychlé.

Jako materiál pro aktivační detektory se často používají mangan ^{55}Mn , kobalt ^{59}Co , měď ^{63}Cu + ^{65}Cu , indium ^{115}In , zlato ^{197}Au , nikl ^{58}Ni a další.

Abychom pokryli celé spektrum energií neutronů v reaktoru, je nutné použít několik druhů aktivačních fólií z různých prvků, protože různé prvky mohou být aktivovány neutrony určitých energií. Další možností je využití obalu z vhodného materiálu, který neutrony určitých energií pohltí a propustí ostatní, které mohou reagovat s aktivační fólií.

Na základě stanovení aktivit fólií ozářených v reaktoru lze spočítat veličinu reakční rychlost, která představuje průměrný počet jader produktu vznikajících ve fólii za jednu

sekundu ozařování neutrony vztažený na jedno jádro nebo na jednotku hmotnosti fólie. Pomocí hodnot reakčních rychlostí lze spočítat speciálním programem (např. SAND) příkon fluence neutronů, což je veličina přímo související s výkonem reaktoru.

4.2 Výběr aktivačních fólií

Na výběr AF mají vliv například:

- účinný průřez pro aktivaci, který se liší nejen pro jednotlivé izotopy, ale i pro různé energie dopadajících neutronů, což nám umožní nejen určit množství všech neutronů, ale i vhodným výběrem rozlišit množství tepelných, epitermálních a rychlých neutronů,

- poločas rozpadu aktivovaného izotopu, který se pohybuje ideálně v hodinách až několika dnech - abychom mohli dostatečně dlouhou dobu manipulovat s těmito fóliemi a přitom, aby po dobu měření proběhlo dostatečné množství rozpadů, a nebylo nutné měřit velmi dlouho,

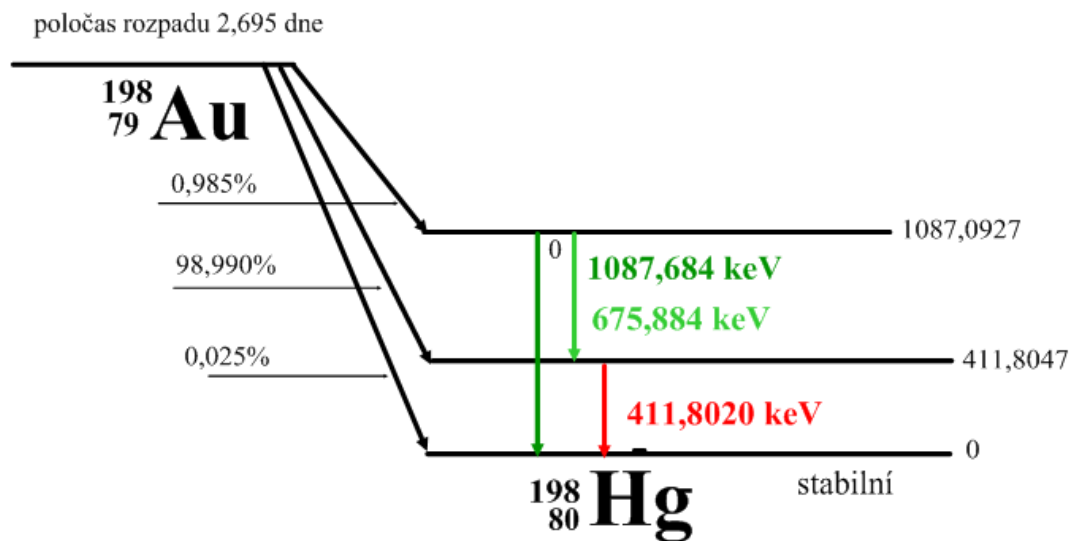
- spektrum záření gama, tj. energie a intenzita energetických píků vhodných k určení aktivity izotopu.

Pro měření na reaktoru LR-0 jsou vhodné zejména tyto aktivační fólie:

4.2.1 Zlato

je často využívaným materiálem, protože i v přírodě obsahuje pouze jeden izotop ^{197}Au . Tento izotop je proudem neutronů aktivován radiačním záchytem (n,γ) na ^{198}Au .

V oblasti rychlých neutronů má zlato menší účinný průřez než v oblasti tepelných neutronů. To by mohlo ovlivnit měření, protože dochází k samoabsorpci pomalých neutronů v horní vrstvě aktivační fólie a zbývající část nemůže být ozářena a nemohou zde vznikat izotopy ^{198}Au . Z tohoto důvodu se pro detekci využívá slitina 1% zlata a hliníku. Hliník svým malým účinným průřezem umožní průchod neutronů do celého objemu aktivační fólie a umožní využití všech jeho výhod.



Obr.č.11 Energie a energetické přechody zlata [9].

Izotop ^{198}Au má i další výhody. Rozpadem β^- se přeměňuje na ^{198}Hg s uvolněním záření γ . Většina emitovaných fotonů (95,6%) je s energií velikosti 411,8 keV, což je výhodné, protože po detekci vyhodnocujeme jen jeden energetický pík. Další energie 675,9 keV a 1087,7 keV jsou pro naše měření zanedbatelné.

Výhodný je také poločas rozpadu 2,69 dne, který umožňuje dostatečně dlouhou dobu pro manipulaci s ozářenou AF a pro měření.

4.2.2 Indium

Dalším, často používaným materiálem pro aktivační fólie, je ^{115}In . Na ^{115}In dochází k několika reakcím s neutrony. Radiačním záchytem vzniká reakcí (n,γ) metastabilní izotop $^{116\text{m}}\text{In}$, který přechází β^- na stabilní ^{116}Sn . Nevýhodou tohoto přechodu je relativně krátký poločas rozpadu 54,3 minuty. To znamená, že je nutné provést měření brzy po aktivaci, aby se většina aktivovaných jader nerozpadla ještě před měřením. Emitované fotony mají energie 1293,5 keV (84,4 %), 1097,3 keV (57,1 %) a 416,9 keV (27,8 %) a další s malým výtěžkem.

Další reakcí, způsobenou rychlými neutrony, je nepružný rozptyl $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$. Zde nevzniká odlišný izotop, ale pouze metastabilní stav stejného izotopu, jehož poločas rozpadu je 4,486 hodiny. Pokud chceme zjišťovat rychlé neutrony, které reagují s menším účinným průřezem, je vhodné využít indium 100%, tj. nesmíchané s hliníkem. Po nazáření je vhodné

počkat před měřením zhruba 5 hodin, abychom snížili comptonovské pozadí vytvořené při rozpadu ^{116m}In , kterého vzniká radiačním záchytem v aktivační fólii zhruba 1000 krát víc než ^{115m}In . Za tuto dobu, která je větší než desetinásobek poločasu rozpadu, se rozpadne přibližně víc než 99,9% izotopu ^{116m}In , ale jen asi polovina ^{115m}In , tím se měření zpřesní. Hlavní energií tohoto přechodu je 336,2keV (45,8%).

4.2.3 Nikl

Třetím často používaným materiálem pro aktivační fólie využívané na reaktoru s malým výkonem je ^{58}Ni . Z tohoto izotopu při reakci $^{58}\text{In} (n,p)$ s rychlými neutrony vznikne ^{58m}Co . Účinný průřez pro tuto reakci je $9 \cdot 10^{-3}$ b. Protože se jedná o rychlé neutrony a poměrně malý účinný průřez, používáme Ni 100%.

Kobalt ^{58m}Co se přeměňuje na ^{58}Co s poločasem rozpadu 9 hodin, ale pro naše měření je tento přechod nevýhodný, protože vyzářené γ má energii jen 25 keV, což není polovodičovým detektorem dobře detekovatelné. Proto je vhodnější využít až dalšího přechodu ^{58m}Co . Abychom v nazářené aktivační fólii získali dostatečné množství ^{58m}Co musíme počkat alespoň desetinásobek poločasu rozpadu ^{58m}Co , což znamená alespoň 90 hodin. ^{58m}Co má poločas rozpadu 70,9 dne. Nejvýznamnější energií tohoto přechodu je 810,8 keV (99%).

4.2.4 Kadmium

Kadmium je materiálem pro obaly aktivačních fólií v případě, že potřebujeme oddělit tepelné neutrony od ostatních. Kadmium má velký účinný průřez pro tepelné neutrony a velmi malý pro ostatní. To způsobí, že většina tepelných neutronů je pohlcena v tomto obalu a již nemůže reagovat s aktivační fólií. Intermediální a rychlé neutrony tímto obalem projdou a reagují s aktivační fólií. Ozáříme-li za stejných podmínek tentýž typ AF bez Cd obalu a s tímto obalem, můžeme rozlišit příspěvek pouze od tepelných neutronů.

4.3 Měření ozářených AF

Pro naše měření aktivačních fólií byl používán HPGe detektor napájený zdrojem

vysokého napětí a chlazený pomocí chladiče na elektrický proud, pomocí technologie Pop Top – Kryostat od firmy ORTEC značky Cooler II. Při tomto způsobu chlazení se krystal detektoru nachází ve vakuu. Detektor je stíněn olověnou skříňkou, jejíž vnitřní strana je pokryta vrstvou mědi. Uvnitř stínění nad detektorem je umístěn stojan pro vložení obalů s AF. Napětí na zdroji i sběr a vyhodnocení dat, procházejících mnohokanálovým zesilovačem, řídíme pomocí programu Genie 2000 na PC.

Protože v měřeních 1 až 3 je využita stejná metoda a jednotlivé experimenty se liší pouze pozicí v reaktoru nebo jeho nastavením, je způsob měření na aktivačních fóliích shodný. K aktivaci byly vybrány fólie ze zlata a india. Fólie mají průměr 3,6 mm a tloušťku 0,1 mm. Po umístění a připevnění aktivačních fólií byly tyto držáky umístěny do reaktoru a po popsanou dobu aktivovány a následně umístěny do plastových obalů, které umožní lepší manipulaci (těchto fází experimentu jsem se osobně nezúčastňovala). Plastové pouzdro s aktivační fólií pro měření aktivity je ukázáno na obrázku č. 12. Aktivní materiál byl umístěn mimo místnost, ve které probíhá měření, aby byla snížena možnost ovlivnění výsledku vnějším pozadím. Následně proběhlo měření jednotlivých aktivačních fólií pomocí polovodičového detektoru HPGe, u kterého byla před měřením ověřena energetická kalibrace. Všechny měřené aktivační folie byly umístěny do držáku ve vzdálenosti 5 cm nad čelo detektoru.



Obr. č. 12 Aktivační fólie (zde č. 25) uzavřená v pouzdře pro měření.

Měření trvala přibližně pro zlato 2,5 hodiny, indium 1% 2 hodiny, indium 100% 8 hodin a nikl 4 hodiny, čas potřebný pro naměření hodnot s dostatečnou přesností závisí na aktivitě

měřené aktivační fólie, která s časem klesá.

Na obrázku č. 13 je část spektrometrické trasy se stíněným detektorem, nad kterým je umístěn speciální plastový držák s drážkami a podložkou, v níž je vybroušen kruhový zářez, umožňující přesné umístění zářiče nad detektor.



Obr.č. 13. Vkládání aktivační fólie nad detektor

4.3.1 Měření 1

Měření 1 bylo metodického charakteru a týkalo se axiálního rozložení reakční rychlosti v blízkém okolí bodu B0, tj. středu aktivní zóny reaktoru. Měřila jsem aktivační fólie, které byly ozařovány v bodě B0 reaktoru v suchém kanálu, při zasunutí regulačního klastru poměrně blízko B0 (73 mm nad ním), při výkonu $3,67 \cdot 10^4$ nA, po dobu 10 hodin. Poměrně dlouhá doba byla z důvodu aktivování dalších folií v místech s menší fluencí než v B0. Tyto fólie nebyly součástí mého měření, ale vyžadovaly delší dobu aktivace, aby bylo možné naměřit dostatečnou aktivitu. Aktivační fólie v suchém kanále v B0 byly umístěny na třech propojených hliníkových tyčkách v přesně daných bodech v axiálních vzdálenostech

0 mm, 50 mm a 100 mm od středu aktivní zóny na obě strany. Ostatní fólie byly umístěny samostatně a výsledky měření sloužily k výpočtu fluence neutronů v daném místě. Seznam jednotlivých aktivačních fólií s jejich umístěním a hmotností je v tabulce č. 1. Tučným písmem jsou zvýrazněny aktivační fólie určené pro určení axiálního rozložení neutronů v B0.

Tab. č.1 Seznam aktivačních fólií pro měření č. 1 a jejich poloha v B0

Typ AF	Celkové označení	Celková hmotnost [mg]	Obal	Axiální poloha vůči B0 [mm]
Au 1%	5	3,31		100
Au 1%	11	3,22		50
Au 1%	16	3,28		0
Au 1%	17	3,46		-50
Au 1%	18	3,18		-100
Au 1%	21	2,70		0
Au 1%	23	3,42	Cd	0
In 1%	8	3,82		0
In 1%	11	3,82	Cd	0
In 100% (ID)	42	7,73	Cd	50
In 100% (ID)	44	7,26		50

4.3.2 Měření 2

Druhé měření v bodě B0 testovalo vliv regulačního klastru, který byl ve větší vzdálenosti od B0 než při měření 1 (110 mm nad B0), pro toto měření byly použity fólie 6, 17 a 28, v Tab. 2 jsou zvýrazněny tučným písmem. Ještě se měřily fólie v B0 pro účely výpočtu fluence neutronů v B0. Relativní výkon reaktoru byl $2,24 \cdot 10^4$ nA po dobu 3 hodin. Seznam jednotlivých aktivačních fólií s jejich umístěním a hmotností je zapsán v tabulce č. 2

Tab. č. 2 Seznam aktivačních fólií pro měření č. 2.

Typ	Celkové označení	Celková hmotnost [mg]	Obal	Axiální poloha vůči B0 [mm]
Au 1%	6	2,73		0
Au 1%	17	3,46		-100
Au 1%	28	3,31		+100
Au 1%	31	3,41	Cd	0
In 1%	14	3,82		0
In 1%	8	7,73	Cd	0
In 100%	2	7,61		0
Ni 100%	3	6,61		0

4.3.3 Měření 3

Radiální (horizontální) měření v bodě B0 v suchém kanálu (při dostatečné vzdálenosti regulačních klastrů, tyto klasy nemají vliv na výsledek měření). Radiální vzdálenost jednotlivých fólií od B0 byla $\pm 10,5$ mm, ± 21 mm. Pro aktivační fólie byl vytvořen speciální držák z hliníku, jehož základní částí je destička s důlky pro umístění aktivačních fólií dle obr. 14. Tato destička je pro pohodlnou a přesnou manipulaci připevněna k hliníkové tyčce o délce palivového proutku, doplněné v horní části o část umožňující přesné uložení v reaktoru. Aktivace fólií probíhala při relativním výkonu $2,24 \cdot 10^4$ nA po dobu 3 hodin. Seznam jednotlivých aktivačních fólií s jejich umístěním a hmotností je v tabulce č. 3.

Tab. č. 3 Seznam aktivačních fólií pro měření č. 3 a jejich poloha.

Typ	Celkové označení	Celková hmotnost [mg]	Obal	horizontální poloha [mm]
Au 1%	11	3,22		-10,5
Au 1%	16	3,28		-21
Au 1%	21	2,7		0
Au 1%	25	3,32		21
Au 1%	30	3,31		10,5



Obr. č. 14 Držák aktivačních fólií pro radiální měření.

5 Skenování palivových proutků z reaktoru LR-0

Dalším ze způsobů určení rozložení fluence neutronů v reaktoru je měření aktivity štěpných produktů palivových proutků. Vychází se ze známé závislosti výkonu reaktoru na fluenci neutronů a potažmo hustotě štěpení uranu v palivových proutcích umístěných v aktivní zóně reaktoru.

5.1 Palivový proutek

Pro měření se na LR-0 využívá palivových proutků, které mají složení shodné jako palivové proutky v jaderné elektrárně typu VVER. Rozdíl je v délce, která je zkrácena na aktivní délku 1250 mm, to je délka vhodná pro reaktor LR-0 a je jednou třetinou délky palivového proutku používaného v jaderné elektrárně Temelín. Hmotnost jedné pelety je 4,8 g . Palivové pelety jsou ze slisovaného UO_2 , kde je přírodní uran obohacen izotopem ^{235}U . Obohacení paliva se řídí experimentem. Tyto hotové palivové články s danou hodnotou obohacení dodá výrobce, ruská společnost *.TVEL. Palivový proutek je hermeticky pokryt ZrNb, slitina zirkonia. Pokrytí má za úkol usnadnit manipulaci a chránit okolí před únikem štěpných produktů.

Doba expozice a výkon reaktoru se řídí požadavkem na velikost aktivity gama měřených proutků. Rozložení paliva a regulačních tyčí je závislé na návrhu probíhajícího experimentu.

5.2 Zařízení pro gama-skenování

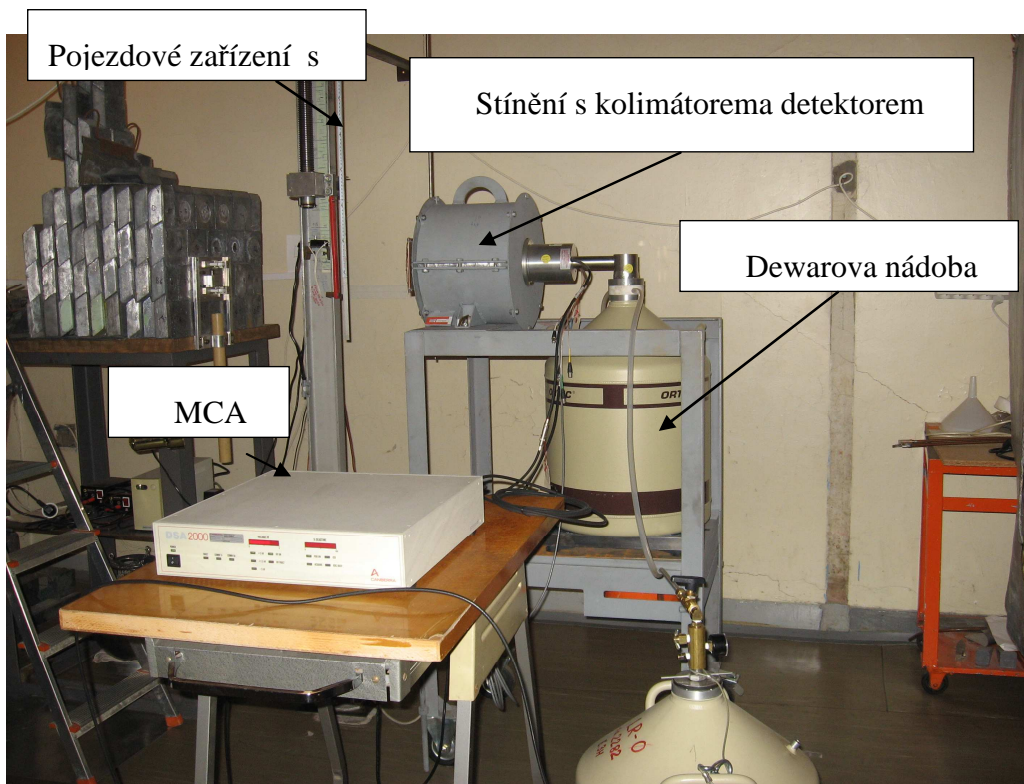
Obsahuje polovodičový detektor s mnohokanálovým analyzátozem ovládaným programem Genie 2000, podobně jako při měření aktivační metodou.

Tento HPGe detektor je, na rozdíl od předchozí metody, chlazen tekutým dusíkem o teplotě přibližně -196°C , který je nutné dopouštět do Dewarovy nádoby pod detektorem. Tato tlaková nádoba má objem 30l. Množství dusíku určíme pomocí váhy, která je umístěna pod touto nádobou. Hmotnost dusíku je určena jako rozdíl hmotnosti prázdné nádoby a nádoby s dusíkem. Množství chladiwa je nutné během měření kontrolovat, aby bylo v nádobě po celou dobu měření dostatečné množství dusíku pro kvalitní měření a nehrozilo zničení detektoru. I tento detektor je nutné chladit alespoň 8 hodin před měřením, vhodnější je s chlazením začít jeden den před měřením.

Detektor je stíněn olověným stíněním s kolimátorem vhodného tvaru. Tento kolimátor propouští záření jen z určitého místa palivového proutku na detektor, a tím umožní postupné podélné měření v různých místech palivového článku. Palivový proutek je před kolimátorem zafixován pomocí dvou plastových hranolů s výřezem, zajištěných pružinami, což zajistí proutek přesně na požadovaném místě, současně umožní volný pohyb ve svislém směru i otáčení proutku kolem svislé osy.

Další důležitou součástí je stojan, na němž je upnut měřený proutek, s krokovým motorem a přesnou šroubovicí, což umožňuje přesný pohyb ve svislém směru při měření. Pozici je možné kontrolovat na měřidle, které je součástí tohoto stojanu. Pro zpřesnění je možné při měření ještě palivovým článkem otáčet.

Pohyb a měření pozice je ovládáno automaticky pomocí programu DASAVR Ge, který je připojen k jednotce řízení krokových motorů Kinex. Na obrázcích č. 15 a 16 je vidět mechanická část spektrometrické trasy s detektorem.



Obrázek č. 15. Sestava pro měření palivových prouků (PP)



Obrázek č. 16. Připojování detektoru k mnohokanálovému analyzátoru

5.2.1 Ovládání gama-skenovacího zařízení

Ovládání spektrometrické trasy pomocí programu Genie již bylo popsáno a je i při tomto měření shodné, pouze navíc umožňuje komunikovat s programem DASAVR pomocí souborů, v nichž jsou uloženy sekvence, podle kterých má proběhnout měření a následné vyhodnocení.

5.2.2 Ovládání programu DASAVR

V tomto programu můžeme nastavit jméno adresáře, kam chceme ukládat naměřená data, a název měření, který se objevuje jako poznámka v textových souborech s vyhodnocenými spektry. Nebo můžeme využít možnosti automatického nastavení jména adresáře, jméno pak bude obsahovat datum měření. Dále pak vepíšeme datum a čas odstavení reaktoru. Pro usnadnění práce je možné nastavit sekvenci kroků pro nabírání a vyhodnocování spekter, kterou uložíme pod vhodným názvem, abychom ji mohli při dalších měřeních vybrat a opětovně použít. Nastavujeme dobu měření v jednotlivých bodech, krajní polohy měření v mm. Krokování znamená, o jakou vzdálenost se posune proutek mezi jednotlivými měřeními v mm, počet cyklů, kolik proutků budeme měřit v jednom měření. Pro usnadnění a urychlení je možné lichá měření měřit od opačného konce proutku. I tuto možnost je nutné v nabídce programu navolit. Protože v průběhu času dochází ke změnám aktivit, je vhodné vždy po několika měřeních provést měření takzvaného monitoru v jednom bodu, abychom mohli provést potřebné korekce. Jako monitor se používá palivový proutek shodných vlastností a umístěný v reaktoru zároveň s proutky měřenými. V nastavení volíme, po kolika měřeních má být měřen monitor. Další položkou je, na jakou adresu má být oznámen konec měření.

Po vyplnění údajů spustíme program tlačítkem start, měření nelze pozastavit, jen zastavit tlačítky Stop měření, nebo Ukončit program. Výsledky jsou ukládány ve formátech *.CNF a *.TXT. Pro každý naměřený bod zvlášť. *.CNF je binární soubor spektra a *.TXT zpráva o analýze spektra.

5.3 Měření palivových proutků

5.3.1 Měření zbytkové aktivity proutku před aktivací

Aktivita proutku před aktivací není nulová, a proto je potřebné před aktivací v reaktoru

změřit zbytkovou aktivitu tohoto proutku. Měření probíhá shodně jako měření proutku po aktivaci. Já jsem provedla pouze měření zbytkové (nízké) aktivity proutků, měření ozářených proutků jsem se přímo nezúčastnila.

Tyto hodnoty budou využity při následném vyhodnocování experimentu. Budou odečteny od hodnot naměřených na aktivovaných proutcích.

5.3.2 Měření pozadí

Protože dříve bylo stanoveno, že hodnoty aktivit pozadí jsou v porovnání s aktivitami měřenými na palivových proutcích zanedbatelné, toto měření není nutné a při vyhodnocení ho nemusíme odečítat.

5.3.3 Měření aktivovaných palivových proutků

Probíhá za přísnějších bezpečnostních podmínek s využitím postupů omezující kontakt s aktivním materiálem. Ozářené palivové proutky jsou, po vyjmutí z reaktoru, dopraveny speciálním otvorem v reaktorové hale do prostoru s gama-skenovacím zařízením. Vyjmutí proutků z reaktoru je možné až když jsou splněny podmínky radiační ochrany.

5.3.4 Měření 4

Měření axiálního rozložení štěpného produktu uranu palivového proutku č. 10 z aktivní zóny LR-0.

Měření probíhalo na HPGe detektoru pomocí programů Genie 2000 a DASAVR, připojeného na řízení krokových motorů Kinex. Před měřením proběhla kalibrace.

Nejprve byla naměřena a zaznamenána zbytková aktivita palivového proutku, který byl následně společně s dalšími umístěn v reaktoru LR-0 a následně byla spuštěna reakce. Po odstavení reaktoru byl proutek vyjmut a opět změřena jeho aktivita. Počátečním bodem pro měření bylo 50mm od počátku paliva v proutku s krokem 20 mm a konec na pozici 470mm od počátku. Protože aktivita článků po vyjmutí z reaktoru je větší než u aktivačních fólií, je při manipulaci nutné dodržovat speciální bezpečnostní pravidla. Proto jsem se tohoto měření nezúčastnila a data naměřená na aktivním proutku jsem pouze vyhodnotila.

6 Výsledky měření

6.1 Aktivační fólie

Naměřená data byla automaticky vyhodnocena a zpracována pomocí programu Genie 2000. Z protokolů ve formátu pdf. byly vypsány hodnoty do tabulek a následně vypočítána reakční rychlost RR [s^{-1}], podle následujícího vzorce č. (8):

$$RR = A_{satur} / n_{izot} = [A / (1 - \exp(-\lambda \cdot t_{ir}))] / (m_{AF} \cdot k_{AF} \cdot k_{izot} \cdot N_A / M) \quad (8)$$

kde AF je aktivační fólie, A_{satur} [Bq] je saturovaná aktivita, n_{izot} je počet nukleonů terčového izotopu (např. ^{197}Au), A [Bq] je změřená aktivita aktivovaného izotopu, vztažená k času konce ozařování AF (v našem případě čas, kdy byl odstaven reaktor, ve kterém byly AF ozařovány), λ [s^{-1}] = $\ln(2)/T_{1/2}$ je rozpadová konstanta aktivovaného izotopu (např. ^{198}Au), $T_{1/2}$ je poločas rozpadu, t_{ir} [s] je doba ozařování AF v reaktoru, m_{AF} [kg] je hmotnost AF , k_{izot} [1] je izotopové zastoupení terčového izotopu v přírodní směsi prvku, N_A [mol^{-1}] je Avogadrova konstanta ($6,0221367 \cdot 10^{23}$), M [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$] je molární hmotnost terčového prvku.

Pro přehlednost byly vytvořeny grafy, které ukazují závislost reakční rychlosti zlaté fólie na poloze v reaktoru. Pro výpočet kadmiového poměru využijeme naměřených aktivit ve shodném bodu s využitím obalu z Cd a bez něho. Podle vzorce (9), kde A_{tep} je aktivita aktivační fólie způsobená tepelnými neutrony a A_{rez} je aktivita aktivační fólie způsobená intermediálními neutrony.

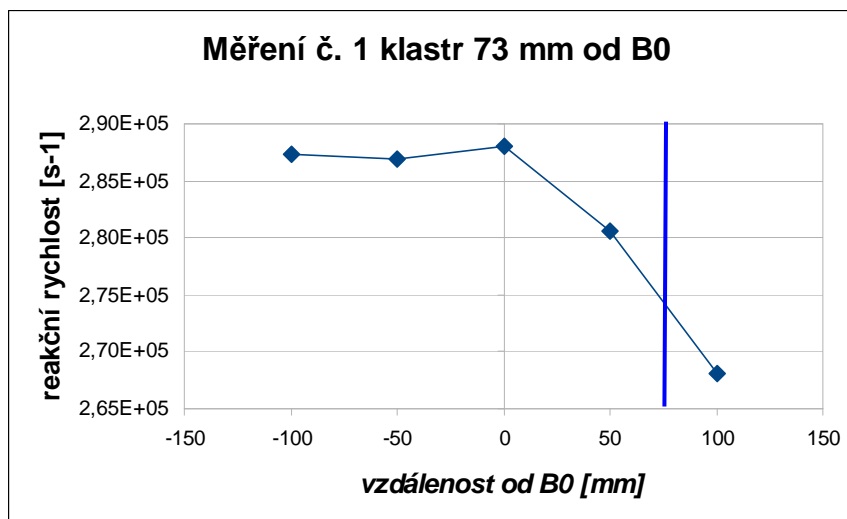
$$R_{Cd} = 1 + \frac{A_{tep}}{A_{rez}} \quad (9)$$

6.1.1 Měření 1

Naměřené hodnoty z prvního měření jsou zaznamenány v tabulce č. 4, v posledním sloupci se nacházejí vypočítané reakční rychlosti. Pro výpočty v tabulce byly využity ještě následující hodnoty $t_{ir}=36000\text{s}$, $M(\text{Au})=196,967$, $M(\text{In})=114,82$. Zvýrazněné hodnoty z tabulky č.4 jsou využity pro graf č.1. Ve kterém je modře vyznačena poloha klastru, 73 mm od B0. Dále byl vypočten kadmiový poměr s využitím aktivačních fólií ^{23}Au a ^{21}Au je 1,35 a s využitím ^{14}In a ^8In je 1,3.

Tab. č. 4 aktivita a reakční rychlost pro měření 1.

AF	A[Bq.g-1]	chyba [Bq.g-1]	λ [s-1]	mAF [mg]	kAF [1]	RR[s-1]
Au5	2,681E+05	3,553E+00	2,976E-06	3,31	0,01	8,633E-14
Au11	2,805E+05	3,726E+00	2,976E-06	3,22	0,01	9,032E-14
Au16	2,880E+05	3,802E+00	2,976E-06	3,28	0,01	9,272E-14
Au17	2,869E+05	3,674E+00	2,976E-06	3,46	0,01	9,236E-14
Au18	2,873E+05	3,757E+00	2,976E-06	3,18	0,01	9,252E-14
Au21	2,865E+05	3,837E+00	2,976E-06	2,70	0,01	9,224E-14
Au23	2,116E+05	2,809E+00	2,976E-06	3,42	0,01	6,812E-14
In8	4,086E+03	5,601E+01	2,133E-04	3,82	0,01	8,144E-17
In11	3,135E+03	3,455E+01	2,133E-04	3,82	0,01	6,248E-17
ID42	1,016E+08	8,650E+02	2,133E-04	7,73	1	2,026E-14
ID44	2,088E+08	3,827E+03	2,133E-04	7,26	1	4,161E-14



Graf č. 1 Závislost reakční rychlosti Au na axiální vzdálenosti od B0

Na grafu je vidět, že v blízkosti zasunutých regulačních klastrů reakční rychlost klesá. Pokles RR ve 100 mm oproti B0 je zhruba 7%.

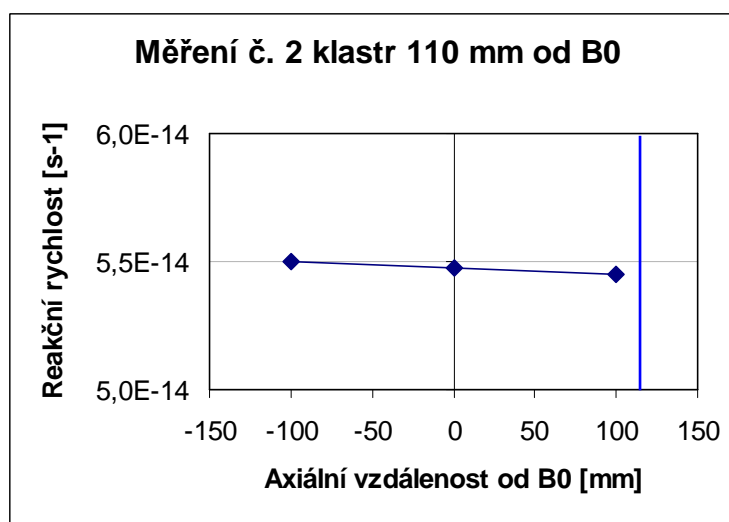
6.1.2 Měření 2

Tabulka č. 5 obsahuje naměřené hodnoty z druhého měření s vypočítanými reakčními rychlostmi. Pro výpočty v tabulce byly využity ještě následující hodnoty $t_{ir} = 10800$ s, $M(\text{Au})=196,967$, $M(\text{In})=114,82$.

Tab. č. 5 Aktivita a reakční rychlost pro měření 2.

AF	A [Bq.g ⁻¹]	chyba [Bq.g ⁻¹]	λ [s ⁻¹]	m_{AF} [mg]	k_{AF}	RR [s ⁻¹]
Au6	5,291E+04	7,181E+02	2,975E-06	2,73	0,01	5,472E-14
Au17	5,321E+04	8,481E+02	2,975E-06	3,46	0,01	5,503E-14
Au28	5,270E+04	8,564E+02	2,975E-06	3,31	0,01	5,450E-14
Au31 Cd	3,886E+04	6,542E+01	2,975E-06	3,41	0,01	4,019E-14
In14	4,298E+06	2,698E+01	2,133E-04	3,82	0,01	9,512E-14
ID2	1,623E+08	7,721E+02	2,133E-04	7,61	1	3,593E-14
Ni3	2,206E+04	1,561E+02	1,131E-07	6,61	1	2,560E-15

Reakční rychlosti fólií ⁶Au, ¹⁷Au a ²⁸Au (axiální okolí B0) byly vyneseny do grafu 2. Z grafu je vidět, že vzdálenost klastru 110 mm (modře vyznačena) od B0 již nemá prakticky vliv na průběh reakční rychlosti (změna RR je v rámci chyb měření).



Graf č. 2 závislost reakční rychlosti na axiální vzdálenosti od B0

S využitím aktivit pro ^{31}Au a ^6Au jsme získali kadmiový poměr 1,36.

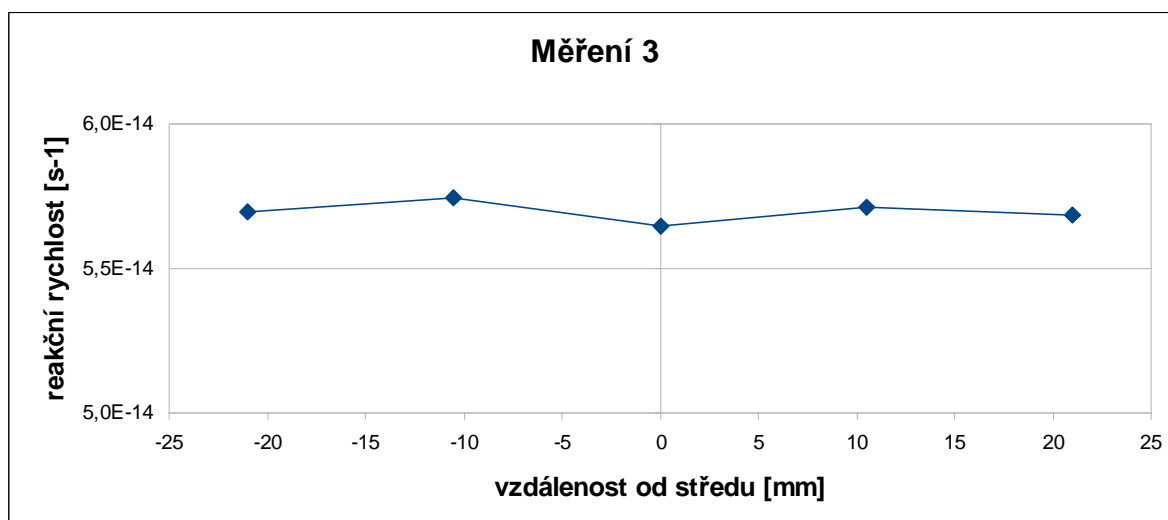
6.1.3 Měření 3

Třetí měření testovalo radiální rozložení reakčních rychlostí blízko B0. Bylo naměřeno a vyhodnoceno pět hodnot, které jsou zapsány v tabulce č. 6. Závislost reakčních rychlostí na vzdálenosti od středu B0 v horizontálním směru byly zaznamenány v grafu č. 3 ve kterém je patrné, že se reakční rychlost nemění (změna RR je v rámci chyb měření).

Pro výpočty v tabulce byly využity následující hodnoty: $t_{ir} = 36000 \text{ s}$, $M(\text{Au}) = 196,967$.

Tab. č. 6 Aktivita a reakční rychlost pro měření 3.

AF	A [Bq/g]	chyba [1]	λ [s ⁻¹]	m_{AF} [mg]	k_{AF} [1]	RR[s ⁻¹]
Au11	5,509122E+04	7,3308310E+01	2,9757184E-06	3,22	0,01	5,6972934E-14
Au16	5,553571E+04	7,1811460E+01	2,9757184E-06	3,28	0,01	5,7432606E-14
Au21	5,460351E+04	7,2909100E+01	2,9757184E-06	2,7	0,01	5,6468566E-14
Au25	5,521358E+04	7,3131260E+01	2,9757184E-06	3,32	0,01	5,7099473E-14
Au30	5,498886E+04	7,8875060E+01	2,9757184E-06	3,31	0,01	5,6867078E-14



Graf č. 3 závislost reakční rychlosti na horizontální vzdálenosti od B0

6.2 Palivový proutek

6.2.1 Měření 4

Toto měření mělo za cíl změřit zbytkové množství radioizotopů v palivovém proutku před jeho ozáření v reaktoru a vyhodnotit spektra tohoto proutku po jeho ozáření.

Tabulka č. 7 obsahuje zbytkové aktivity naměřených izotopů v jednom bodu palivového proutku, označeném číslem 10, před vložením do reaktoru.

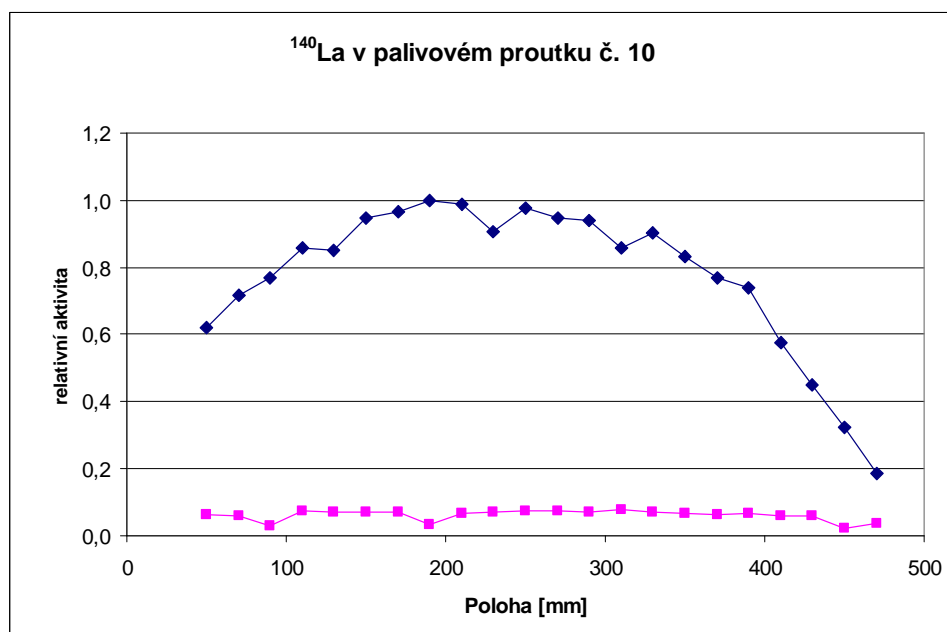
Tab. č. 7 zbytkové energie palivového proutku č. 10

Energie [keV]	144	163	186	662	743,4	766,4	766,7	1460,8
Izotop	²³⁵ U	²³⁵ U	²³⁵ U+ ²²⁶ Ra	¹³⁷ Cs	⁹⁷ Zr	^{234m} Pa	¹³⁴ I	⁴⁰ K
Aktivita [imp.s-1]	110,0	67,0	938,0	62,1	0	82,1	0	23,0

Tabulka č. 8 obsahuje hodnoty aktivity vybraného radionuklidu ¹⁴⁰La z naměřeného spektra pro jednotlivé body měřené podél (axiálně) palivového proutku č. 10 po vyjmutí z reaktoru. Energie tohoto izotopu nebyla ve zbytkové aktivitě naměřena (viz. Tab. 7), a proto není nutné ji při dalším vyhodnocování odečítat. Výsledek zpracování spekter je uveden v grafu č. 4 závislosti relativní aktivity na axiální poloze na proutku modrou barvou. Je to zároveň axiální rozložení fluence neutronů v místě reaktoru, kde byl proutek ozařován. V grafu je ještě růžově vynesena chyba měření.

Tab. č. 8 aktivita ^{140}La aktivního proutku č. 10

Poloha od spodního konce paliva v PP (mm)	Aktivita La-140 (kBq)	Relativní aktivita La-140	chyba
50	1,573	0,620	0,062
70	1,818	0,717	0,060
90	1,949	0,769	0,028
110	2,176	0,858	0,075
130	2,160	0,852	0,072
150	2,399	0,946	0,071
170	2,447	0,965	0,069
190	2,536	1,000	0,032
210	2,504	0,987	0,068
230	2,300	0,907	0,072
250	2,479	0,977	0,073
270	2,399	0,946	0,073
290	2,383	0,940	0,069
310	2,179	0,859	0,076
330	2,290	0,903	0,069
350	2,109	0,831	0,067
370	1,952	0,770	0,064
390	1,872	0,738	0,065
410	1,461	0,576	0,059
430	1,139	0,449	0,058
450	0,823	0,325	0,023
470	0,469	0,185	0,038



Graf č. 4. Axiální rozložení relativní aktivity ^{140}La v palivovém proutku.

7 Závěr

Měření v této bakalářské práci byla součástí mnohem většího počtu měření, která měla za úkol ověřit výpočty pro rozložení příkonu fluence neutronů v reaktoru.

Z malého množství dat, uvedeného v této práci, není možné udělat konečný kvantitativní závěr, přesto je z aktivačních měření 1 a 2 patrné, že regulační klastry mají vliv na fluenci neutronů uvnitř reaktoru. Fluence se zmenšuje se zmenšující se vzdáleností od klastrů. regulační vliv klastrů se v našem případě začal projevovat ve vzdálenostech menších než asi 100 mm.

Dále byl měřením č. 3 s aktivačními fóliemi potvrzen výsledek výpočtu metodou MCNP, že radiální rozložení reakční rychlosti v blízkosti bodu nula je konstantní. Rozdíly v naměřených hodnotách nebyly větší než chyba měření.

Vyhodnocením spekter z axiálního měření ozářeného palivového proutku byla na příkladu ^{140}La zjištěna závislost hustoty štěpení na daném místě reaktoru. Průběh hustoty potvrzuje předchozí měření i výpočty MCNP.

8 Použitá literatura

- [1] <http://www.reaktorvr1.eu/> 2.4.2012
- [2] <http://www.cvrez.cz/web/reaktor-lvr-15> 15.12.2012
- [3] <http://www.nri.cz/web/ujv-800/reaktor-lr-01> 8.12.2011
- [4] <http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/107.pdf>
4.4.2012
- [5] Ohera, M.: Úvod do plovodičové gamaspektrometrie. EnviMO Brno, 2000.
- [6] <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/laborky/candra/rejstrik/comtpon.htm> 4.4.2012
- [7] http://theses.cz/id/rs6vnl/downloadPraceContent_adipIdno_11145 4.4.2012
- [8] Švadlenková, M.- Rypar, V.- Juříček, V.: Polovodičová gama-spektrometrie palivových proutků I., Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., zpráva 12346, 2005.
- [9] Šoltés J.: Stanovenie tepelného výkonu reaktora VR-1 pomocou aktivačných detektorov. Diplomová práce, ČVUT FJFI KJR, Praha, 2011.