

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra jaderných reaktorů

Projekt SAD - Subcritical Assembly at Dubna

bakalářská práce

Ondřej Šťastný

akademický rok 2005/2006

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský
Konzultant: RNDr. Pavel Bém, CSc.

*České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská*

Katedra jaderných reaktorů

Akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro Ondřej Šťastný

obor: Jaderné inženýrství

zaměření: Jaderná zařízení

Název práce: **Projekt SAD – Subcritical Assembly at Dubna**

1. Seznamte se s problematikou podkritických systémů řízených urychlovačem (ADS – Accelerator Driven Systems), charakterizujte jejich funkci a význam, diskutujte jejich možné využití v praxi, vědě a výzkumu.
2. Proveďte rešerši literatury, internetových zdrojů, časopisů (zejména internetových), serverů jaderných dat, elektronickou knihovnu JINR atd. Využijte informační systém INIS.
3. Charakterizujte současný stav a trendy ve vývoji a stavbě ADS, popište běžící projekty. Podrobně charakterizujte projekt SAD, věnujte se zejména jeho účelu a plánovaným experimentálním pracím. Detailně popište budované zařízení SAD.
4. Na základě literatury proveďte diskuzi vlastností neutronového pole v SAD. Diskutujte také produkty reakcí vznikajících v terči a palivu. Zpracujte přehled výpočetních a experimentálních metod k měření či predikci těchto dat.
5. V případě příznivého vývoje rekonstrukce urychlovače Fázotron a připravenosti pracoviště SAD v SÚJV Dubna se pod vedením školitele účastněte měření, v opačném případě vypracujte plán prvních měření s terčem systému SAD.

Literatura:

1. Shvetsov, S.N. et al.: *Project on Creation of Subcritical Assembly Driven by Proton Accelerator in Dubna*, 2001 Workshop on Nuclear Data Production and Evaluation, J. Korea, 2001
2. Barashenkov V.S. et al.: *An Experimental Accelerator Driven System Based on Plutonium Subcritical Assembly and 660 MeV Protons Accelerator*, ADDTA'1999
3. Sborníky z konferencí Accelerators' Applications (AccApp'03 a '05), Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications (ADDTA'2001) a Nuclear Data for Science and Technology (ND'2001 a ND'2004)
4. Vhodné zdroje z databáze INIS, internetové zdroje, vědecké časopisy

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Karel KATOVSKÝ**
KJR FJFI ČVUT v Praze

Konzultant: RNDr. Pavel BÉM, CSc.
OJR ÚJF AV ČR

Datum zadání bakalářské práce: 31. října 2005

Datum odevzdání bakalářské práce: 10. června 2006



Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.

Vedoucí katedry



Prof. Ing. Miloslav Havlíček, DrSc.

Děkan

Název práce:

Projekt SAD - Subcritical Assembly at Dubna

Autor: Ondřej Šťastný

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: RNDr. Pavel Bém, CSc. Oddělení jaderných reakcí, Ústav jaderné fyziky, Akademie věd České republiky

Abstrakt: V této práci jsou popsány základní vlastnosti urychlovačem řízených podkritických systémů (ADS), jejich základní komponenty a možnosti jejich využití. Také jsou zde uvedeny nejvýznamnější světové projekty zaměřené na výstavbu ADS a výzkum příslušné problematiky. Následuje popis projektu SAD, který má být demonstračním prototypem ADS, jehož stavba se plánuje ve Spojeném ústavu jaderného výzkumu v Dubně u Mosky. Při realizaci tohoto projektu má být využit již existující protonový urychlovač (660 MeV, 1 μ A) spolu se speciálním podkritickým reaktorem, ve kterém se má používat U-Pu MOX palivo. V této práci je detailně popsáno celé zařízení a také výzkumy, které již proběhly v souvislosti s přípravou tohoto projektu. Rovněž je zde věnováno pár slov plánům výzkumů, které mají na tomto zařízení probíhat. Také zde lze najít návrh měření, která může na zmiňovaném zařízení provést KJR FJFI ČVUT, a tak se uplatnit ve špičkovému světovému výzkumu.

Klíčová slova: Urychlovačem řízené systémy, Podkritické reaktory, Podkritický systém v Dubně (SAD), Transmutace.

Title:

Project SAD - Subcritical Assembly at Dubna

Author: Ondřej Šťastný

Abstract: Basic features of accelerator driven systems, their basic components and possible ways of using are described in this thesis. Further, most important projects on creation ADS of the world and research to be done on them are presented. Below, a short description of the Project SAD follows, which is ment to be a demonstration facility for ADS that has been proposed to be constructed at the Joint Institute of Nuclear Research in Dubna. The Subcritical Assembly at Dubna project proposes to couple an existing proton accelerator of 660 MeV and 1 μ A current with a specially designed U-Pu MOX subcritical core. In this thesis, a detailed description of this facility and research programs, which have been performed in order to prepare this project, is presented. There are mentioned future research programs as well. In the end, there is a proposal of experiments and measurement, which can KJR FJFI ČVUT provide and turn into a part of the top class of world research.

Key words: Accelerator driven system, Subcritical reactors, Subcritical assembly at Dubna (SAD), Transmutation.

Obsah

| | |
|---|------------|
| Čestné prohlášení | iii |
| Poděkování | iv |
| Seznam použitých zkratk a označení | v |
| 1 Úvod do problematiky | 1 |
| 1.1 Úvod | 1 |
| 1.2 Charakteristika ADS | 2 |
| 1.2.1 Urychlovač | 2 |
| 1.2.2 Terčik | 3 |
| 1.2.3 Plášť (blanket) | 4 |
| 1.3 Spalační (tříštivá) reakce | 4 |
| 1.4 Jaderné transmutace | 7 |
| 1.5 Možnosti využití ADS | 7 |
| 2 Projekty věnované vývoji ADS | 8 |
| 2.1 Úvod | 8 |
| 2.2 5. rámcový program EU | 8 |
| 2.3 5. rámcový program Euratomu | 9 |
| 2.3.1 MEGAPIE | 9 |
| 2.3.2 THORIUM CYCLE | 10 |
| 2.3.3 CONFIRM | 10 |
| 2.3.4 PDS-XADS | 10 |
| 2.3.5 ADOPT | 11 |
| 2.3.6 HINDAS | 11 |
| 2.3.7 nTOF | 12 |
| 2.3.8 MUSE-4 | 12 |
| 2.4 6. rámcový program Euratomu | 14 |
| 2.4.1 EUROPART | 15 |
| 2.4.2 EUROTRANS | 16 |
| 2.4.3 RED IMPACT | 17 |
| 2.5 Výzkumné středisko CIEMAT | 18 |
| 2.6 Evropský spalační zdroj (ESS) | 19 |
| 2.7 Výzkumné středisko ITEP | 20 |
| 2.8 Další projekty | 20 |
| 2.8.1 IREN | 20 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.8.2 | MYRRHA | 21 |
| 2.8.3 | YALINA | 22 |
| 2.8.4 | TRASCO | 22 |
| 2.8.5 | TARC | 24 |
| 2.8.6 | TRADE | 24 |
| 2.8.7 | Gamma2 | 26 |
| 2.8.8 | Energie & Transmutace | 27 |
| 2.9 | Mimoevropský výzkum | 27 |
| 2.9.1 | USA | 27 |
| 2.9.2 | Japonsko | 28 |
| 2.9.3 | Korea | 28 |
| 3 | Projekt SAD | 30 |
| 3.1 | Úvod | 30 |
| 3.2 | Cíle projektu | 30 |
| 3.3 | Popis zařízení | 32 |
| 3.3.1 | Základní údaje | 32 |
| 3.3.2 | Palivo | 33 |
| 3.3.3 | Podkritický systém | 36 |
| 3.3.4 | Stavební přípravy a řešení | 39 |
| 3.3.5 | Zařízení na vedení svazku | 39 |
| 3.3.6 | Experimentální program | 42 |
| 3.3.7 | Očekávané výsledky a jejich aplikace | 43 |
| 3.3.8 | Spolupracující instituce | 43 |
| 3.4 | Současný stav projektu | 44 |
| 3.5 | Dosavadní výsledky výzkumu | 44 |
| 3.5.1 | Klíčové parametry zařízení SAD a podpůrné experimenty | 44 |
| 3.5.2 | Vývin tepla a neutronový tok v terčíku a exp. kanálech | 45 |
| 3.5.3 | Radioaktivita vyvolaná v terčíku | 48 |
| 3.5.4 | Kinetika zařízení SAD | 48 |
| 3.5.5 | Radiační ochrana a problematika stínění | 49 |
| 3.5.6 | Možnost zvýšení výkonu zařízení SAD | 49 |
| 3.6 | Zhodnocení | 50 |
| 3.7 | Návrh dalších měření | 51 |
| 4 | Závěr | 52 |
| | Seznam obrázků | 53 |
| | Seznam tabulek | 54 |
| | Literatura | 55 |

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci sepsal sám a uvedl veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 26. července 2006

Ondřej Šťastný

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této práce, Ing. Karlovi Katovskému za trpělivost, kterou se mnou měl, cenné rady a připomínky, kterými mě zahrnoval a pomáhal mi tak tuto práci rozvíjet, a také za pomoc s překladem cizojazyčných odborných výrazů, se kterými jsem se v zahraničních pramenech hojně setkával. V této souvislosti cítím milou povinnost poděkovat i Ing. Dušanovi Kobylkovi, PhD za pomoc s překladem některých odborných pojmů. Také bych nerad zapomněl poděkovat svému kolegovi, Janu Pěnkavovi, za cenné rady s typografickým systémem \LaTeX , kterého jsem pro tvorbu této práce použil.

Seznam použitých zkratk a označení

| zkratka | význam |
|----------------|--|
| AAA | Advanced Accelerator Applications (USA) |
| ABPC | Accelerator-Based Plutonium Conversion |
| ADEP | Accelerator Driven Energy Producer |
| ADF | Accelerator Demonstration Facility (USA) |
| ADOPT | Thematic Network on ADvanced Options for Partitioning and Transmutation |
| ADS | Accelerator Driven Systems (urychlovačem řízené systémy) |
| ADTT | Accelerator Driven Transmutation Technologies (urychlovačem řízené transmutační technologie) |
| AIMA | Alternative Investment Management Association (Francie) |
| ANL | Argonne National Laboratory |
| ANP | Framatome, Francie |
| ANSALDO | Italská společnost zabývající se jadernými technologiemi |
| APT | Accelerator Production of Tritium |
| ARC | Adiabatic Resonance Crossing |
| ATW | Accelerator Transmutation of Waste (transmutace RAO pomocí urychlovače) |
| AZ | aktivní zóna |
| BFS | reaktor v Obninsku, Rusko |
| CEA | Commissariat à l'Energie Atomique |
| CERN | European Organization for Nuclear Research |
| CERN PS | CERN Proton Synchrotron |
| CIEMAT | Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas |
| CIRTEN | Consorzio InterUniversitario per la Ricerca Tecnologica sull'Energia Nucleare (Itálie) |
| CISE | Centre for Innovation and Economical Development (Itálie) |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique (Francie) |
| CPSD | metoda přenosové funkce |
| CRS4 | Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia (Itálie) |
| ČVUT | České vysoké učení technické |
| DAQ | Data AcQuisition (systémy pro sběr dat) |
| DOE | Department of Energy (USA) |

| zkratka | význam |
|----------------|---|
| E&T | Energie & Transmutace |
| EA | Energy Amplifier (zesilovač energie) |
| EFIT | European Facility for Industrial Transmutation |
| ENDF | Evaluated Nuclear Data Files |
| ENEA | National Agency for New Technology, Energy and the Environment (Itálie) |
| ENRESA | nějaké výzkumné centrum ve Španělsku |
| ESS | European Spallation Source (Evropský spalační zdroj) |
| ETD | European Transmutation Demonstration |
| EU | Evropská Unie |
| EUROPART | EUROpean Research Programme for PARTitioning of Minor Actinides |
| EUROTRANS | EUROpean Research Programme for the TRANSmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System |
| FGUP | Federalnoje Gossudarstvennoje Unitarnoje Predpriyatje (anglicky: Federal State Unitary Enterprises) |
| FJFI | Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská |
| FP5 | The Fifth Framework Programme (5. rámcový program) |
| FP6 | The Sixth Framework Programme (6. rámcový program) |
| FZJ | Forschungszentrum Jülich GmbH |
| FZK | Forschungszentrum Karlsruhe |
| GAN RF | Gosatomnadzor (ruský státní úřad pro jadernou bezpečnost) |
| GENEPI | Générateur de Neutrons Pulsés Intenses |
| GSPI | Federal State Unitary Enterprise State Special Project Institute (ruská zkratka) |
| HINDAS | High and Intermediate Energy Nuclear Data for Accelerator-Driven System |
| HISTEC | Activités nationales et internationales (Itálie) |
| HLM | Heavy Liquid Metal |
| HPGe | High Purity Germanium (detektory) |
| HYPER | HYbrid Power Extraction Reactor |
| IA „Mayak“ | Industrial Association „Mayak“ |
| IAEA | International Atomic Energy Agency |
| IAEA CRP | IAEA Coordinated Research Project |
| IBA | nějaká Belgická společnost |
| IFMIF | International Fusion Materials Irradiation Facility |
| INFN | National Institute for Nuclear Physics (Itálie) |
| INP | Institut National Polytechnique de Toulouse (Francie) |
| IPPE | Institute of Physics and Power Engineering (Rusko) |
| IREN | Intense REsonance Neutron Source |
| ISTC | International Science and Technology Center |
| JAERI | Japan Atomic Energy Research Institute (Japonsko) |
| JINR | Joint Institute of Nuclear Research (viz SÚJV) |
| JRC | Joint Research Centre (SVS) |

| zkratka | význam |
|----------------|---|
| JRC-ITU | JRC Institute for TransUranium Elements |
| KAERI | Korea Atomic Energy Research Institute |
| KEK | Hign Energy Accelerator Research Organization (Japonsko) |
| KJR | Katedra jaderných reaktorů |
| KTH | Kunliga Tekniska Höskolan |
| LAHET | nějaký výpočtový kód |
| LLFP | Long Lived Fission Fragments (viz LLFP) |
| LLFP | Long Lived Fission Products (dlouhožijící štěpné produkty) |
| LLRN | Long-Lived RadioNuclides (dlouhijící radionuklidy) |
| MA | Minor Actinides (minoritní aktinidy) |
| MASURCA | MAquette de SURgénérateur à CAdarache |
| MCNP | A General Monte Carlo N-Particle Transport |
| MCNPX | Monte Carlo N-Particle eXtended |
| MEGAPIE | Megawatt Pilot Target Experiment |
| MOX | Mixed Oxide Fuel (palivo složené z oxidů uranu a plutonia) |
| MSZ JSC | JSC Mashinostroitelny Zavod (Rusko) |
| MURST | Minister for University and Scientific and Technological Research (Itálie) |
| MUSE | MUltiplication Source Externe |
| MYRRHA | Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications |
| NEA | National Education Association |
| NIKIET | Federal State Unitary Enterprise Research and Development Institute of Power Engineering (ruská zkratka) |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development |
| P&C | Partitioning & Conditioning |
| P&T | Partitioning & Transmutation (separace & transmutace) |
| PDS-XADS | Preliminary Design Studies of an eXperimental Accelerator-Driven System |
| PNG | Pulzní neutronový generátor |
| PNS | Pulsed Neutron Source method (metoda pulzního neutronového zdroje) |
| PSI | Paul Scherrer Institut |
| R&D | Research & Development |
| RAO | Radioaktivní odpad(y) |
| RCS | Rapid Cycling Synchrotron |
| RED IMPACT | Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Waste Disposal Project |
| RIT | Royal Institute of Technology (Švédsko) |
| RTDT | Research, Technological Development and Training |
| SCK-CEN | Studiecentrum voor Kernenergie - Centre d'étude de l'Energie Nucléaire (Belgické centrum jaderného výzkumu) |
| SINQ | Swiss Spallation Neutron Source |
| SISTEC | Sinergie e Innovazioni per lo Sviluppo Tecnologico (Itálie) |
| SNM | SNM koronový detektor |
| SNS | Spallation Neutron Source |
| SSNTD | dielectric (glass) track detectors (pevnlátkové trackové detektory) |

| zkratka | význam |
|----------------|--|
| SÚJV | Spojený ústavu jaderného výzkumu (Dubna u Mosky) |
| SÚRAO | Správa úložišť radioaktivních odpadů |
| SVS | Společné výcvikové středisko |
| ŠKODA JS | Škoda jaderné strojírenství |
| TARC | Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing |
| TRADE | TRiga Accelerator Driven Experiment |
| TRASCO | TRAnsmutazione SCORie |
| TWG-ADS | Technical Working Group on ADS |
| ÚJV Řež | Ústav jaderného výzkumu v Řeži u Prahy |
| UOX | palivo založené na oxidech uranu |
| VJP | Vyhořelé jaderné palivo |
| VNIINM | Russian Scientific Research Institute of Inorganic Materials (ruská zkratka) |
| WP | Work Packages |

Seznam použitých označení

| označení | význam |
|-----------------|---------------------|
| A | nukleonové číslo |
| k_{ef} | koeficient násobení |

Kapitola 1

Úvod do problematiky

1.1 Úvod

Myšlenka urychlovačem řízených podkritických systémů (Accelerator Driven System—ADS) je stará jako jaderná energetika sama, ale jejich praktickému uplatnění vždy stálo v cestě několik skutečností—tlak na vývoj těchto systémů nebyl moc velký, jejich výzkum byl a je stále finančně velmi náročný a především parametry urychlovačů nebyly dostačující. To se však v současnosti začíná měnit, a tak se studium ADS stává velmi perspektivním oborem. [5] Přispívá k tomu i fakt, že s pomocí těchto systémů je—zdá se—možné najít pro jadernou energetiku způsob, jak se vypořádat s vyhořelým jaderným palivem (VJP). Dá se říci, že právě problém vyhořelého jaderného paliva obsahujícího nebezpečné dlouhožijící radionuklidy je v současnosti Achillovou patou celé jaderné energetiky. Pro její další úspěšný rozvoj je proto nutné tento problém vyřešit.

K 31.5.2006 bylo podle [25] na celém světě v provozu v 38 zemích 441 energetických jaderných reaktorů o celkovém výkonu 369 374 MWe, což představuje přibližně 16% celosvětové produkce elektrické energie. Ve výstavbě je dalších 27 reaktorů o celkovém výkonu 21 051 MWe. V plánu jich je 38 (dohromady 40 737 MWe) a byly podány návrhy na stavbu dalších 115 (83 620 MWe). Většina z nich se staví v rozvojových nebo postkomunistických zemích. Mezi rozvinutými zeměmi je výjimkou Japonsko (12 plánovaných reaktorů), dále s velkým odstupem Francie (1 plánovaný) a Finsko (1 ve výstavbě). Jaderná éra nastupuje v Asii—svědčí o tom fakt, že se tam nachází většina budovaných a plánovaných reaktorů. Je ale nutné podotknout, že poslední léta jsou ve znamení znatelného oživení celosvětového zájmu o jadernou energetiku.

Uvažujme průměrný tlakovodní 1000 MWe reaktor. Podle [26] tento reaktor vyprodukuje ročně 17 tun vyhořelého jaderného paliva (VJP). Na světě je 441 pracujících energetických reaktorů (různého typu a výkonu) o celkovém výkonu 369 374 MWe, což představuje výkon přibližně 369 tlakovodních reaktorů o jednotkovém výkonu 1000 MWe. Konzervativní odhad množství ročně produkovaného VJP je tedy přibližně $369 \times 17 = 6273$ tun. Započteme-li též provoz nejrozličnějších experimentálních, výzkumných a vojenských zařízení, můžeme se lehce dostat na hodnotu 7000 tun VJP ročně.

S VJP lze nakládat různými způsoby, např. ho přepracovat (znovuobohatit) a vrátit do reaktoru, použít jej pro výrobu paliva MOX, anebo ho uložit trvale pod zemský povrch do hlubinného úložiště. Vzhledem k tomu, že v této práci nepovažujeme za uspokojivé řešení problému VJP jeho skladování a následné hlubinné uložení, vkládáme v tomto ohledu velké

naděje do transmutačních technologií. V současnosti známe dvě koncepce—kritický transmutační reaktor a podkritický reaktor řízených vnějším neutronovým zdrojem (urychlovačem). Posledně jmenované koncepci a z ní vycházejícím systémům se budeme v této práci podrobněji věnovat. Tyto systémy se označují jako ADS (Accelerator Driven Systems), či ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies), příp. ATW (Accelerator Transmutation of Waste). [24] Důležitým bezpečnostním inherentním faktorem těchto systémů je právě jejich podkritičnost, protože je tak principiálně vyloučena možnost nekontrolovatelného rozvoje štěpné řetězové reakce.

Ve všech typech podkritických transmutačních systémů se při „spalování“ VJP budou využívat 3 typy jaderných reakcí: spalace (tříštění), štěpení a především jaderná transmutace. Pomocí transmutací se dlouhodobé štěpné produkty a aktinidy z VJP změny na nuklidy krátkodobé či stabilní. Nejdříve si však alespoň stručně popíšeme ADS, které nás budou nejvíce zajímat.

1.2 Charakteristika ADS

Urychlovačem řízené systémy (ADS) jsou charakteristické svým uspořádáním—skládají se z neutronového zdroje (urychlovač s terčíkem) a podkritického souboru nazývaného pláštěm nebo též blanketem. Urychlovače by měly produkovat většinou protony nebo deuterony urychlené na vysoké (relativistické) energie—řádově 0,5–10 GeV. Počítá se přibližně 1 GeV na nukleon.

Svazek těchto vysokoenergetických částic se směřuje do terčíku z vhodného materiálu, kde vlivem tohoto intenzivního toku dopadajících částic dochází na jádrech materiálu terčíku k tříštivým (spalačným) reakcím (viz oddíl 1.3). Produktem těchto reakcí je neutronové pole, jehož vlastnosti jsou dány materiálem terče, jeho geometrií a v neposlední řadě také vlastnostmi dopadajících protonů produkovaných urychlovačem. Vhodným nastavením parametrů provozu urychlovače lze tedy ovlivňovat vlastnosti neutronového pole generovaného v terčíku.

1.2.1 Urychlovač

Systémy ADS kladou na urychlovače velké nároky. Je třeba, aby byly schopny dodávat vysoce energetické částice (nejčastěji protony) a zaručovaly velkou stabilitu toků, vše při kontinuálním provozu. Nejvíce se budou využívat 2 základní typy urychlovačů:

1. lineární urychlovač (linear accelerator, linac)
2. kruhový urychlovač (cyklotron, synchrotron, fázotron)

Lineární urychlovač se hodí pro urychlování velkých proudů částic, ale nedokáže je urychlit na dostatečně vysoké energie. Proto se u mírně podkritických souborů, které nepotřebují příliš intenzivní svazky, bude také využívat kruhových urychlovačů (cyklotron, synchrotron, fázotron). Cyklotron je vzhledem ke svým menším rozměrům vhodným urychlovačem pro transmutační systémy.

Aby bylo možno dosáhnout ještě vyšších intenzit svazku, spojí se několikero svazků urychlených částic z několika urychlovačů do jednoho svazku. Přitom se klade velký důraz na stabilitu protonového svazku, aby se minimalizovaly fluktuace výkonu podkritického souboru. S tímto provedením se lze setkat např. v projektech IREN (viz oddíl 2.8.1) či IFMIF¹.

¹<http://www.frascati.enea.it/ifmif>

1.2.2 Terčík

Terčík je taková soustava, ve které vznikají interakcí s dopadajícím protonovým svazkem neutrony. Při návrzích konstrukce terčíku se naskytla otázka, jak oddělit vakuum urychlovače od prostoru terče. Některé návrhy počítaly s tím, že se mezi ně vloží okénko, ale narazily na problémy s vývojem vhodného materiálu odolného vůči působení protonového svazku.

Všechny koncepce terčíku můžeme rozdělit do dvou skupin:

1. primární terčík z těžkých kovů (Pb, směs Pb-Bi)
 - s množivou zónou—je obklopen sekundárním terčíkem z množivého materiálu (blanket)—uvažuje se o fluoridu uranu v roztoku roztavených solí (např. LiF—BeF₂—UF₄)
 - bez množivé zóny
2. svazek vysokoenergetických neutronů dopadá přímo na množivý materiál, přičemž dochází k produkci i absorpci neutronů v témže materiálu

Velmi důležitá je nejen správná volba materiálu, ale i geometrie terčíku. Naší snahou musí být co největší produkce neutronů a jejich co nejmenší záchyt v samotném terčíku.

Svazek o energii 1 GeV a proudu 1 mA v tlustém terči vyvine tepelný výkon rovný přibližně 500 kW—celý terč musí umožňovat velmi dobré chlazení. Jak je vidět, jsou velmi důležité také fyzikální (tepelné) charakteristiky terčového materiálu (tepelná vodivost a kapacita, bod tavení a bod varu (viz Tabulka 1.1)) a také jeho skupenství (tekutý terč lépe odvádí vznikající teplo).

K chlazení primárního terče se dají použít běžná chladiva—voda, těžká voda, příp. dvoufázová směs vody a páry (pokud nám nevádí jejich moderační schopnosti). Pak musí mít ovšem terčový materiál kanálové uspořádání. V případě, že se tomuto chceme vyhnout, musíme k chlazení použít jinou teplotnosnou látku s nízkou tenzí par (např. slitina Pb-Bi). Vhodným chladicím médiem pro případ, že chceme spektrum rychlých neutronů, je např. Na nebo He.

Tabulka 1.1: Fyzikální vlastnosti materiálů navrhovaných pro terče ([13], Tab. 3)

| prvek | Z | hmotnostní číslo | hustota [g/cm ³] | bod tavení [°C] | bod varu [°C] | tep. kapacita [Jg ⁻¹ K ⁻¹] | tep. vodivost [Jcm ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹] |
|-------|----|------------------|------------------------------|-----------------|---------------|---|--|
| Ta | 73 | 180,9479 | 16,654 | 3017 | 5458 | 0,142 | 0,578 |
| W | 74 | 183,84 | 19,3 | 3422 | 5555 | 0,134 | 1,88 |
| Pb | 82 | 207,2 | 11,35 | 327,46 | 1749 | 0,130 | 0,347 |
| Bi | 83 | 208,9804 | 9,747 | 271,40 | 1564 | 0,142 | 0,083 |
| PBE | | | | 129 | | | 0,048 |
| Th | 90 | 232,0381 | 11,72 | 1750 | 4788 | 0,117 | 0,377 |
| U | 92 | 238,0289 | 18,95 | 1135 | 4131 | 0,117 | 0,268 |
| Np | 93 | (237) | 20,25 | 644 | 3902 | | |
| Pu | 94 | (244) | 19,84 | 640 | 3228 | | |
| Am | 95 | (243) | 13,67 | 1176 | | | |

Terče je možné rozdělit podle jejich skupenství při provozu na tekuté a pevné. Náplní tekutých jsou roztavené těžké materiály, pevné mohou být tvořeny např. tyčemi z těžkého kovu oddělenými navinutým tenkým drátem a uspořádanými v pravidelné mříži (chlazení

např. plynem). Tekuté provedení terčíku má oproti pevnému jednu podstatnou výhodu—snese větší výkonové zatížení.

Vyrobíme-li terčík ze štěpitelných materiálů, projeví se to zvýšenou produkcí neutronů z terčíku, a to je výhodné. Ale zbytková radioaktivita od těchto materiálů a z toho plynoucí vysoká obtížnost manipulace s nimi tuto výhodu snižuje. V případě použití neštěpných materiálů získáváme nižší zbytkové teplo a též nižší radioaktivitu.

Klíčovým parametrem pro volbu vhodného materiálu terče je množství produkovaných neutronů ze spalační reakce (počet neutronů na 1 proton dopadající na terč), což se ukazuje být lineární funkcí nukleonového čísla A a hustoty materiálu terče. Proto je dobré hledat takový materiál v dolní části periodické soustavy prvků (viz Tabulka 1.1). Ukazuje se, že výtěžek také roste se zvyšující se energií svazku protonů (viz Obrázek 1.1—energie protonů se pohybovala v rozmezí 200–2000 MeV, terč byl z ^{208}Pb , ve tvaru válce o průměru 10,2 cm a výšce 61 cm).

Experimentální výsledky tuto linearitu ale plně nepotvrzují, zejména pokud jde o horní část uvedeného intervalu energií protonů. Empirických vzorců pro výpočet výtěžku spalačních neutronů bombardováním vysokoenergetickými protony existuje několik. Lze však použít zjednodušeného tvaru:

$$\text{výtěžek} = -3,530 + 2,113 \cdot 10^{-2} \times E \text{ (v MeV)}$$

a platí pro energie v rozmezí 300 MeV až 1 GeV.

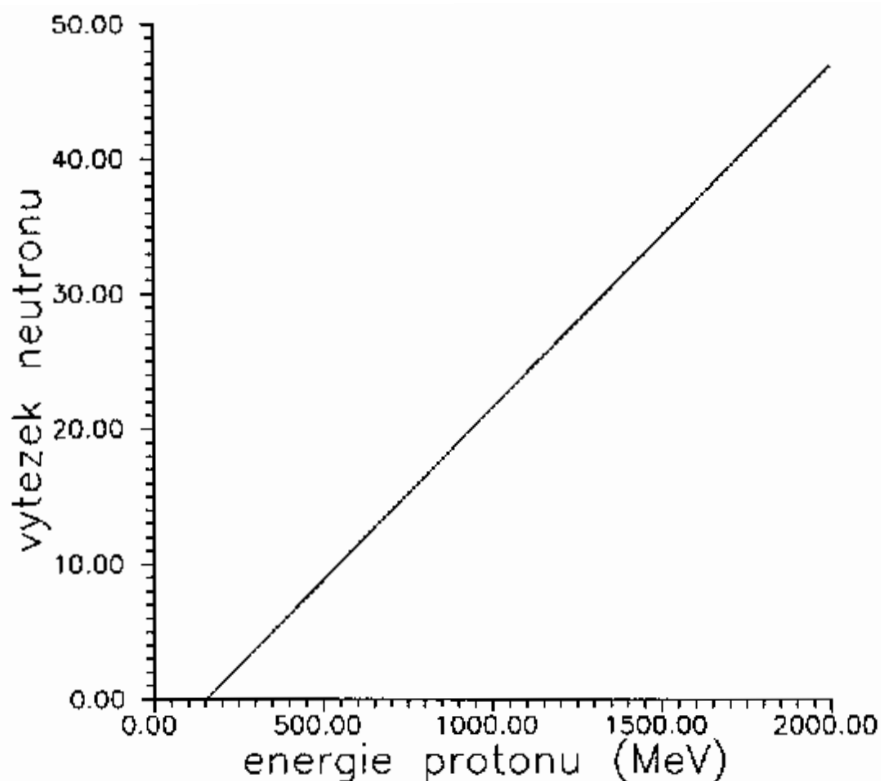
Vzhledem k pořizovacím a provozním nákladům urychlovače je velmi nutná přesná znalost výtěžku neutronů, abychom mohli stanovit jeho potřebný výkon. Důležitá je znalost predikce vztažená na energii primární částice (ta je přibližně lineární funkcí nákladů). Navíc se při studiu vlastností jednotlivých terčů dostávají výzkumníci do potíží, protože je prozatím nedostatek potřebných experimentálních údajů. Jaderných dat pro tenké terčíky je poměrně málo, bylo totiž provedeno pouze několik testů s tlustými terči a experimentální simulace reálné situace s moderátorem se téměř nevyskytují.

1.2.3 Plášť (blanket)

Existují různé koncepce pláště, které se liší podle sledovaného cíle, ale všechny víceméně počítají s válcovou geometrií. Plášť může být tvořen látkou v pevném nebo tekutém stavu. V minulých letech se uvažovalo o roztavených halogenidových solích nebo o palivovém terči ve formě tekutých kovů. Od roztavených solí se však postupně upouští, protože s nimi byly nehorázné technologické problémy.

1.3 Spalační (tříštivá) reakce

Jedná se o takový typ jaderné reakce, při němž se po ostřelování terčového jádra o atomovém čísle Z_1 a hmotnostním čísle A_1 uvolní takové množství částic, že vzniklé jádro má atomové číslo Z_2 a hmotnostní číslo A_2 podstatně odlišné (řádově v desítkách) od čísel jádra terčového. Tato reakce byla původně objevena při studiu kosmického záření a v laboratorních podmínkách byla poprvé pozorována v roce 1947. Obvykle je vyvolávána částicí („střelou“) o vysoké energii (desítky až stovky MeV), která dopadá na terčík z těžkého kovu (Pb, Bi, W, Th, U, Np, Am).



Obrázek 1.1: Závislost výtěžku neutronů ze spalace na energii dopadajícího protonu ([13], Obr. 2)

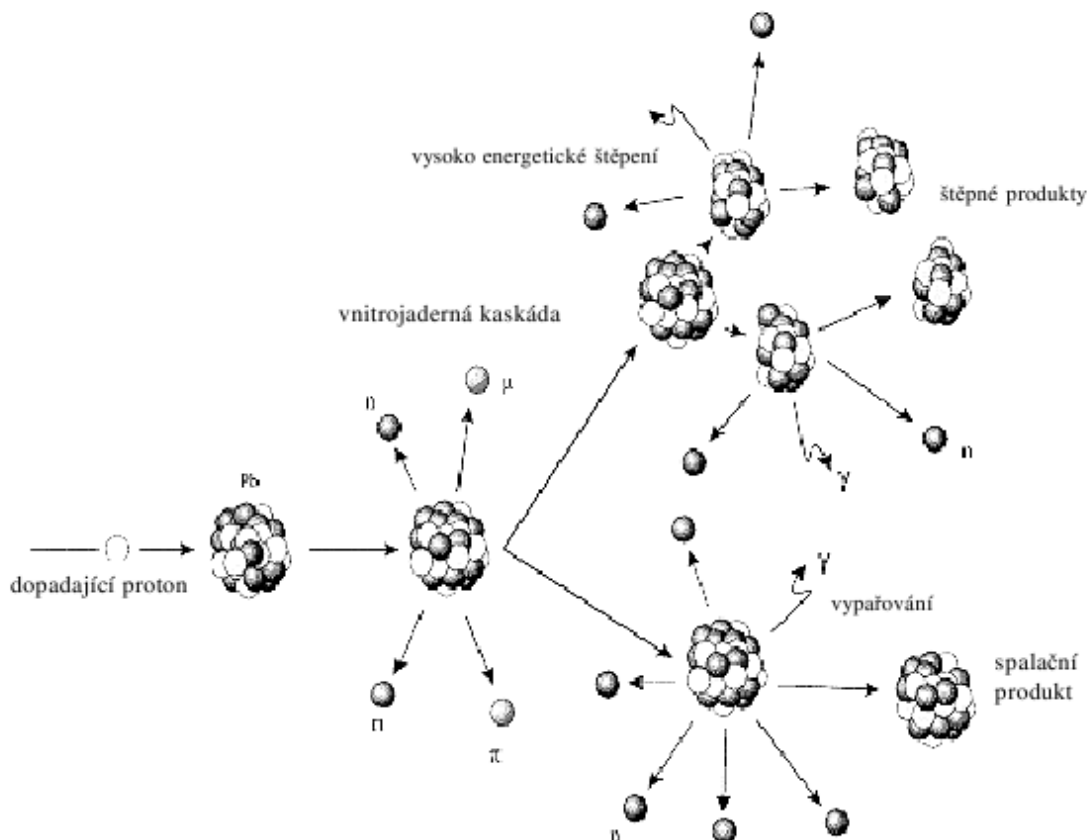
Ačkoliv nás budou především zajímat spalační reakce vyvolané protony a deuterony, uvedeme si zde malý příklad—tříštění jádra ^{238}U velmi rychlými α částicemi—viz následující schema:



Vedle jiných procesů se při této reakci uvolní 20 protonů a 35 neutronů. Studium této interakce vysokoenergetické částice (proton, deuteron) s těžkým atomovým jádrem představuje náročnou úlohu kvantové fyziky. V procesu nepružné interakce prvotní dopadající částice s jádrem terčíku vznikají totiž vnitrojaderné kaskády (laviny), iniciované rychlými sekundárními částicemi (protony, neutrony, miony, piony).

Poté, co rychlé částice vylétnou z jádra, zůstane toto jádro v excitovaném stavu a nastane buď jeho dělení nebo vypaření částice. Vzniklé úlomky dělení přejdou do základního energetického stavu pomocí dalšího vypařování neutronů. Tak vznikají intenzivní neutronová pole mající kvazi-maxwellovské rozložení s maximem okolo 2 MeV a se střední energií cca 3,5 MeV. Jejich energetické spektrum je podobné spektru neutronů vznikajících při štěpení, ale narozdíl od štěpného spektra se v něm objevuje vysokoenergetická složka neutronů až do energie dopadající částice. Takových neutronů je ale málo.

Vedle vytváření vnitrojaderných kaskád při interakci vysokoenergetického protonu s těžkým jádrem probíhají také periferní interakce, jichž se účastní jen několik periferních nukleonů



Obrázek 1.2: Schema spalační reakce ([13], Obr. 1)

terčíkového jádra. Při této interakci vzniká jen malý počet sekundárních částic a dochází k nevelké excitaci jádra. Může také dojít ke klasickému štěpení.

Při určování středních veličin charakterizujících interakci vysokoenergetické částice s atomovým jádrem je možno považovat periferní procesy za zvláštní případ vnitrojaderné kaskády a použít stejné metody vyšetřování jako pro vnitrojaderné procesy.

V případě, že je terčíkem štěpitelný nuklid (U, Np, Am), vytvoří nám vlivem štěpení dodatečně neutrony úměrně zlomku $(1/1 - k_{ef})$.

Chceme-li provést analýzu nepružných vysokoenergetických srážek, musíme provést určitá měření, např. na fotoemulzích. Vyhodnocování částic v nich se provádí na základě ionizací (počet černých zrn připadajících na 1 mm stopy), které tyto částice způsobí. Podle velikosti ionizace se dělí sekundární částice na 3, resp. 4 typy:

1. typ s—slaboionizující částice nebo sprškové částice
2. typ q—částice se střední hodnotou ionizace (šedé stopy na fotoemulzi)
3. typ b—částice se silnou ionizací (černé stopy)

4. typ h—tento typ představují částice se šedými a černými stopami, spojené do jedné nízkoenergetické grupy

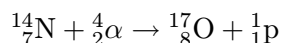
Ukazuje se, že analýza vysokoenergetických jaderných interakcí, kterých se účastní několik desítek částic, je velmi obtížná. K výpočtům vnitrojaderných kaskádních procesů se používá metoda Monte Carlo, která dovoluje vytvořit dostatečně detailní statistický model, ve kterém se matematicky zkoumá krok za krokem vývoj kaskády.

1.4 Jaderné transmutace

Jaderné transmutace jsou takové jaderné přeměny, při nichž dochází ke změně složení atomového jádra. Mějme terčové jádro o atomovém čísle Z_1 a hmotnostním čísle A_1 . Po jaderné transmutaci obdržíme produkt s atomovým číslem Z_2 a hmotnostním číslem A_2 . Zjistíme, že se tato čísla liší jen velmi málo (řádově o jednotky) od čísel jádra terčového (narozdíl od spalace, kde je tento rozdíl výrazně vyšší).

Slovo „transmutace“ pochází z latinského „transmuto“—přeměňovati. V dřívějších dobách se totiž tímto výrazem označovala v alchymii snaha o přeměnu obecných kovů na zlato.

Dnes známe dva typy jaderných transmutací—samovolné (přirozené) a uměle vyvolané. Ty se vyvolávají účinkem korpuskulárního záření na atomová jádra (p, n, α , d, e, γ ...). První umělou přeměnu jader provedl v roce 1919 prof. Ernst Rutherford, když ostřeloval jádro ^{14}N částicemi α , čímž získal ^{17}O . Reakce probíhala podle následujícího schématu:



Jaderné transmutace jsou nejběžnějším typem jaderných reakcí. Probíhají také při běžném provozu jaderných reaktorů (v jaderném palivu, regulačních orgánech, konstrukčních materiálech, chladiivu...). V této práci jimi miníme především reakce (n, γ), (n,2n), (n,p), (n, α) a (n,d).

1.5 Možnosti využití ADS

ADS se mohou uplatnit v mnoha aplikacích, např.:

- reaktory pracující s U-Th, popř. U-Pu cyklem—produkce elektřiny a množení štěpného materiálu—Energy Amplifier (EA) / ADEP (Accelerator-Driven Energy Producer)
- transmutační technologie—likvidace nebezpečných aktinidů a štěpných produktů z RAO
- likvidace Pu—ABPC (Accelerator-Based Plutonium Conversion)
- produkce tritia—APT (Accelerator Production of Tritium)
- neutronové zdroje vyjímecných parametrů—projekty IREN (viz oddíl 2.8.1) a SAD (viz kap. 3)

Kapitola 2

Projekty věnované vývoji ADS

2.1 Úvod

Zatímco v 90. letech 20. století převládaly ohledně ADS (a jejich dalších aplikací—např. ADTT) velmi optimistické názory, plánovaly se ambiciózní projekty samotných podnikových systémů a také urychlovačů, dnes—na počátku 21. století—zjišťujeme, že se stále řeší velmi složité technologické, fyzikální a téměř vždy finanční problémy, které prozatím neumožňují ADS se významněji prosadit a zapojit do prvních experimentů např. s transmutacemi VJP. V následujících odstavcích si stručně popíšeme nejvýznamnější aktivity v této oblasti, jako jsou 5. a 6. rámcový program Euratomu, resp. projekty zaměřené na řešení problému VJP prováděné v rámci těchto programů, a další projekty. Na konec ještě připojíme stručnou charakteristiku některých významných výzkumných středisek podílejících se na tomto vývoji.

2.2 5. rámcový program EU

Pátý rámcový program EU (The Fifth Framework Programme—FP5), jehož originální název zní „Fifth framework programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities“ [27], vytyčoval priority výzkumu Evropské Unie, technologického vývoje a demonstrační aktivity (research, technological development and demonstration—RTD) pro období mezi léty 1998 až 2002. Tyto priority byly určeny na základě několika kritérií odrážejících hlavní zájmy EU, jako jsou např. snaha o zvyšování konkurenceschopnosti evropského průmyslu v celosvětovém měřítku a kvalita života Evropských občanů.

Pátý RTD rámcový program se podstatně lišil od svých předchůdců. Byl koncipován tak, aby pomáhal řešit problémy a odpovídal na hlavní socio-ekonomické výzvy, kterým musí Evropa čelit. Aby dosáhl co největšího účinku, zaměřil se na omezený počet oblastí výzkumu, ve snaze respektovat technologické, průmyslové, ekonomické, sociální a kulturní aspekty prováděného výzkumu. Řídící procedury byly v zájmu zjednodušení struktury programu výrazně potlačeny.

Hlavní inovací 5. rámcového programu byl koncept tzv. „klíčových akcí“ (key actions). Jejich implementace do všech tématických oblastí programu mobilizovala široké spektrum vědeckých a technologických disciplín (jak teoretických, tak aplikovaných), což výrazně přispělo ke schopnosti programu překonávat překážky přesahující hranice jednotlivých vědních oborů.

Program měl dvě odlišné části:

1. rámcový program Evropského společenství pokrývající výzkum, technologický vývoj a demonstrační aktivity
2. rámcový program Euratomu zahrnující výzkum a výcvikové aktivity v jaderném sektoru

Rozpočet ve výši 14,96 mld. eur byl schválen pro období do roku 2002. Částka 13,7 mld. byla určena pro rámcový program Evropského společenství a 1,26 mld. pro rámcový program Euratomu.

Jak již bylo řečeno výše, tento program zahrnoval celou škálu vědních oblastí. My se však vzhledem k tématu této práce zaměříme na projekty věnované vývoji transmutačních technologií a především podkritických systémů a věnujeme jim samostatný oddíl 2.3.

2.3 5. rámcový program Euratomu

2.3.1 Projekt MEGAPIE

MEGAPIE (Megawatt Pilot Target Experiment) [28] je iniciativou Commisariat à l'Energie Atomique v Cadarache (Francie) a Forschungszentrum Karlsruhe (Německo) ve spolupráci s Paul Scherrer Institut (PSI, Švýcarsko), která má při mezinárodní spolupráci ukázat proveditelnost tekutého Pb-Bi terčíku pro spalační zařízení při výkonu svazku 1 MW. Takový terčík se uvažuje v různých koncepcích urychlovačem řízených systémů (ADS), se kterými se počítá pro transmutaci RAO a další aplikace. Spalační neutronový zdroj SING má také velký potenciál k významnému zvýšení toku tepelných neutronů, které generuje. Výkon svazku zdroje SING se už přiblížil blízko 1 MW. Toto zařízení tedy nabízí jedinečnou příležitost realizovat takový experiment s rozumně malým počtem nových pomocných systémů.

Experiment MEGAPIE bude významnou součástí formulace a zahajování dalšího kroku, vyhrazeného urychlovače kvalit ADS + terčíku zaměřeného na ozařování + (jako pozdější podstupeň) nízkonoenergetického podkritického blanketu.

Cílem tohoto experimentu je prozkoumat podmínky, za kterých může být takový terčík licencován, aby byla získána další důležitá data pro Pb-Bi terčíky a zkušenosti z provozu takového systému při výkonech dnešních urychlovačů. Kromě toho, ověření správnosti konstrukce za pomoci rozsáhlého monitorování jeho chování při provozu a poté „po-ozařovací“ zkouška jeho komponent jsou nedílnou součástí projektu. Rozsáhlý „před-ozařovací R&D program“ bude uskutečněn, aby se dosáhlo maximální bezpečnosti terčíku a optimalizoval se jeho návrh.

Jediný urychlovač v Evropě, který má dostatečný výkon svazku vysokoenergetických protonů, aby byla realizace takového terčíku smysluplná, je kruhový cyklotron v PSI s energií protonů 590 MeV a stejnosměrným proudem 1,8 mA, jehož hodnota se nyní vylepšením zvyšuje na 2 mA. Používá se pro široké spektrum vědeckých nástrojů, zejména pro spalační neutronový zdroj (SING) s jeho velkým počtem zařízení různých uživatelů. Kromě toho, sama existence tohoto spalačního zdroje s jeho těžkým stíněním a úplnou soupravou pomocných systémů dělá tento experiment mnohem lépe cenově dostupným.

Spalační neutronový zdroj SING [29] je kontinuální zdroj—první svého druhu na světě—s tokem okolo 10^{14} n.cm².s⁻¹. Vedle tepelných neutronů zpomaluje chladný moderátor (tekuté deuterium—chladný zdroj (cold source)) neutrony a posunuje jejich spektrum směrem k nižším energiím. Tyto neutrony se ukázaly být mimořádně důležité ve výzkumu materiálů a při zkoumání biologických sloučenin.

SING je využíván mnoha uživateli. Ti si mohou rozvrhnout svůj čas svazku (beamtime) na různých nástrojích tím, že použijí návrhovací systém SING (SING proposal system).

SINQ je navrhován jako neutronový zdroj hlavně pro výzkum s „vyvedenými“ svazky tepelných a chladných neutronů, ale hostí také zařízení na produkci izotopů a neutronovou aktivační analýzu. Kromě jeho různých způsobů uvolňování neutronů z hmoty, se pro většinu aplikací velmi podobá výzkumnému reaktoru typu „medium flux“.

2.3.2 Projekt THORIUM CYCLE

Použití thoriového cyklu nabízí zajímavé možnosti pro způsoby redukce množství RAO. Cílem projektu bylo vytvořit klíčová data pro aplikace thoriového cyklu v tlakovodních (PWR) a rychlých reaktorech (FR) a také ADS, ve vztahu ke spalování Pu a transuranů a redukcí poločasu rozpadu RAO.

K dosažení tohoto cíle bylo zkoumáno chování Th/Pu paliva při vysokém vyhoření a pro patřičná neutronová pole. Byla určena důležitá data pro varianty geologických úložišť a byly zkoumány cesty vedoucí k redukcí množství RAO, např. pomocí přepracování paliva založeného na Th. Velmi vysoká spotřeba Pu a transuranů v Th/Pu palivu byla ověřena pomocí výpočtů s plnou vsázkou paliva a nezbytná jaderná data pro tyto výpočty byla určena experimentálně.

Projekt byl spuštěn 1.10.2000 a skončil 30.9.2004. Koordinátorem byla Nuclear Research And Consultancy Group (Nizozemsko). [30]

2.3.3 Projekt CONFIRM

V tomto projektu se zkoumaly možnosti vývoje bezuranových paliv pro ADS, zejména aspekty týkající se ozařování oxidů a nitridů a modelování. Důležitým cílem vývoje těchto paliv pro ADS bylo dosáhnout vysokého vyhoření bez ztráty bezpečnostních vlastností. Z pohledu paliva je vyhoření omezeno mírou bobtnání a předpětím paliva v palivovém článku. Tyto problémy mohou být odstraněny použitím optimalizovaných palivových pelet a speciálním provedením palivových tablet a kazet. Tento návrh žádá program na modelování, vývoj a ozařování oxidů a nitridů bezuranových paliv při obvyklých provozních podmínkách stejně jako při přechodových výkonových stavech. Cílem bylo najít referenční palivo (z oxidů) pro demonstrační zařízení ADS a prozkoumat bezpečnostní vlastnosti nitridové alternativy.

Koordinátorem tohoto projektu byl Royal Institute Of Technology (Stockholm, Švédsko). Na projektu se začalo pracovat 1.9.2000 a projekt byl ukončen k poslednímu dni roku 2005. [31]

2.3.4 Projekt PDS-XADS

Použitelnost ADS v průmyslovém měřítku vyžaduje nejprve provoz experimentálního ADS (XADS). Je proto žádáno provést předběžné návrhové studie Evropského XADS, aby se daly odhadnout jeho proveditelnost, bezpečnost a licenční záležitosti, potřeby a nutná podpora, jeho cena, a poté je nutné zkonsolidovat plán jeho výstavby. Již bylo mezi členy EU uvažováno o několika možnostech a výsledek vypadá slibně.

Účelem projektu PDS-XADS (Preliminary Design Studies of an eXperimental Accelerator-Driven System) bylo vyvinout návrhy možností provedení XADS do takové úrovně, která by dovozovala objektivní srovnávání, aby byla EU schopná vybrat svůj Evropský XADS koncept. Předběžné návrhové studie byly zaměřeny na kritické body urychlovače, jednotky spalačního terče a reaktoru podle konceptu XADS.

Koordinátorem projektu byl Framatome ANP (Lyon, Francie). Projekt započal 1.11.2001 a skončil 31.10.2004. [32]

2.3.5 Projekt ADOPT

ADOPT [33] znamená „Thematic Network on ADvanced Options for Partioning and Transmutation“. Tato síť byla vytvořena proto, aby koordinovala R&D aktivity sponzorované 5. rámcovým programem a národní aktivity na poli vývoje ADS a technologií separace a transmutace (Partitioning and transmutation—P&T). Vycházela z celoevropského silného zájmu na prozkoumání potenciální vědecké, technické a průmyslové možnosti realizace P&T.

Její cíle byly následující:

- podpora shody mezi P&T projekty 5. rámcového programu a národními programy
- definice pravidel pro rozšiřování informací a přístup k datům národních R&D programů
- vytvoření přehledu výsledků P&T projektů 5. rámcového programu a zabránění duplikacím
- odhalení mezer v celkovém programu
- informování členů o pokračujících aktivitách v P&T a ADS mimo EU (mezinárodní organizace, USA, Japonsko, Korea, bývalá CIS)
- dát vstup pro budoucí návrhy výzkumu a směrnice pro další R&D orientaci

Pro lepší organizaci práce byl program rozdělen na několik WPs:

- WP1: koordinace tématické sítě a vývoj & údržba webové stránky projektu
- WP2: definice pravidel pro rozšiřování informací v rámci tématické sítě ADOPT
- WP3: vyhodnocení všech svazků + doporučení koordinátorům projektů a EU
- WP4: organizace mezinárodního workshopu věnovaného technologiím P&T a vývoji ADS
- WP5: doporučení pro EU ve věci dalších aktivit v oblasti P&T a vývoji ADS

Koordinátorem bylo Belgian Nuclear Research Centre. Projekt začal 1.11.2001 a skončil 31.10.2004. Podílela se na něm celá řada laboratoří a výzkumných center z celého světa (kromě evropských též z Číny, Japonska, Korei, Ruska a USA) a mezinárodních organizací (IAEA, ISTC, OECD/NEA, TWG-ADS). [34]

2.3.6 Projekt HINDAS

Projekt HINDAS (High and intermediate energy nuclear data for accelerator-driven system) měl poskytnout jaderná data z oblasti 20–2000 MeV prostřednictvím kombinace jaderných modelů a dobře vybraných středně- a vysoko-energetických experimentů. Celá řada Evropských urychlovačů byla využita k získání kompletních sad experimentálních dat pro klíčové prvky a energie. Kódy jaderných modelů byly podle nich zdokonaleny a ověřeny. Poté byly využity k tvorbě rozšířených knihoven dat (ve formátu ENDF) pod 200 MeV, a účinné průřezy pro vysokoenergetické transportní kódy nad 200 MeV. Dopad těchto nových datových knihoven a vysokoenergetických modelů bude přímo testován na některých důležitých parametrech urychlovačem řízených systémů. To je zásadní věc pro výpočet budoucích spalačních modulů

pro ADS a jaderných reakcí v materiálech, které je budou obklopot. Nová data by měla jít daleko za hranici 20 MeV běžných datových knihoven, která jsou používána pro konvenční jaderné (energetické) systémy.

Projekt započal dne 1.9.2000 a byl ukončen k 30.11.2003. Koordinátorem byla Université Catholique De Louvain (Belgie). [35]

2.3.7 Projekt nTOF

Návrh pokrokového ADS pro spalování RAO a produkci energie vyžaduje kompletní znalost základních účinných průřezů pro procesy vyvolané neutrony. Pro účely návrhu je třeba tato data odvodit konzistentně, odpovídajícím způsobem a cenově zajímavě, aby mohla být vyhodnocena a dána k dispozici pro simulační nástroje a ve výsledku i průmyslovým postupům.

Hlavním cílem projektu bylo vyprodukovat, vyhodnotit a rozšířit vysoce precizní údaje o účinných průřezích pro většinu izotopů se vztahem ke spalování RAO a provedení ADS, tj. účinné průřezy pro záchyt a štěpení minoritních aktinidů, účinné průřezy pro záchyt hlavních štěpných produktů a (n,xn) reakce pro konstrukční materiály a chladiva.

Toto bylo vyhodnoceno užitím tří základních technologií:

- vysokoenergetickým spalačním zdrojem
- detektory vysokého výkonu
- DAQ (Data AcQuisition) systémy a nejnovějším počítačovým inženýrstvím

Koordinátorem projektu byla European Organization for Nuclear Research (CERN—Ženeva, Švýcarsko). Projekt začal 1.11.2000 a byl ukončen 31.12.2004. [36]

2.3.8 Projekt MUSE-4

Experimenty MUSE (MULTiplication Source Externe) provedené ve výzkumném centru v Cadarache (Francie) na zařízení MASURCA jsou zásadním krokem pro pochopení neutronického chování podkritického násobícího prostředí řízeného vnějším neutronovým zdrojem.

Experimenty MUSE-1 a poté MUSE-2 prováděné od roku 1995 s ^{252}Cf zdrojem umístěném ve středu AZ zařízení MASURCA, byly zaměřeny na demonstraci toho, že experimentální měřící techniky užívané pro kritické AZ mohou být použity i pro podkritické konfigurace. Později představily experimenty MUSE-3 první důležitou parametrickou studii s několika konfiguracemi charakteristickými svou zvyšující se mírou podkritičnosti. Užitím komerčního generátoru neutronů, umístěného ve středu AZ, pomohly tyto experimenty definovat podmínky, za kterých mohl být proveden program MUSE-4 (MASURCA v podkritickém provedení—palivo U-Pu MOX s tekutým sodíkem představujícím chladivo [42]), a specifikovat charakteristiky neutronového zdroje, mnohem intenzivnějšího a vhodnějšího pro zamýšlená měření.

Financován 5. rámcovým programem Euratomu a podporován francouzskými výzkumnými organizacemi GEDEON (nově GEDEPEON) se experimenty MUSE-4 provádějí v rámci mnoha mezinárodních spoluprací (min. šestnácti organizací z dvanácti zemí). Program má tři hlavní cíle:

1. zlepšit znalosti neutronického chování násobícího prostředí řízeného vnějším neutronovým zdrojem tak, aby bylo možno charakterizovat konfigurace, které je zájem prozkoumat

2. definovat experimentální metody pro měření úrovně podkritičnosti (bez potřeby dosažení kritičnosti) na podporu provozu ADS
3. definovat doporučené metody fyzikální analýzy pro neutronické predikce ADS (zahrnující jaderná data, výpočtové pomůcky, určení chyb a nejistot)

Pro experimenty MUSE-4 je klíčový neutronový generátor GENEPI (Générateur de Neutrons Pulsés Intenses) vyvinutý v úzké spolupráci mezi CEA a CNRS. Byl vybudován speciálně pro tyto experimenty a jeho hlavním úkolem je dodávat velmi krátké pulzy ($< 1 \mu\text{s}$) s frekvencí od pár Hz do 5 kHz.

Měřicí program experimentů MUSE-4 je založen na parametrickém přibližování (1 kritická + 3 podkritické sodíkem chlazené konfigurace, 1 konfigurace s malou, olovem chlazenou zónou, 2 druhy terčů, variace frekvencí generátoru GENEPI) a na použití mnoha rozličných experimentálních technik a metod analýzy.

Po velmi dlouhé přípravné fázi (dlouhé kvůli nezbytnému splnění početných bezpečnostních požadavků ze strany francouzských úřadů) došlo 27.11.2001 k prvnímu spojení zařízení MASURCA a GENEPI s deuteriovým terčem. Na počátku roku 2002 byly provedeny série předběžných měření s téměř podkritickými konfiguracemi ($\rho = -500 \text{ pcm}$) nejen za účelem získání předběžných výsledků, ale také s cílem mít první odezvu na experimentální podmínky, kvůli jejich možným vylepšením v dalších fázích měření. Byla také provedena kalibrace (d,d) zdroje. Kompletní charakteristika referenční kritické konfigurace byla získávána v období duben–červen 2002. Tento program zahrnoval posuny důležitosti, k čemuž posloužil ^{252}Cf zdroj a četné axiální a radiální posuny hustoty štěpení bez vnějšího zdroje. Čtrnáct různých izotopů bylo použito pro tato měření. Studie podkritických stavů začala na začátku října 2002 s prozkoumáváním čisté konfigurace AZ SC0 za použití (t,d) a (t,t) terčů (v tomto pořadí). Od konce měřicí fáze (březen 2003) byly studovány konfigurace s úrovněmi reaktivity více představující průmyslové ADS: na konfiguraci SC2 ($k_{\text{ef}} = 0,95$) se pracovalo od dubna do července 2003, studie konfigurace SC3 probíhala od srpna do října 2003.

S ohledem na definici doporučené cesty predikce vlastností ADS byly odstartovány dvě hlavní akce. První—stanovení výpočtového srovnávacího testu pod záštitou OECD/NEA. Šestnáct organizací (včetně ANL) ze čtrnácti zemí se zúčastnilo tohoto cvičení. Druhý—zkoumání problémů spojených se šířením a prouděním spalačních neutronů v experimentech SAD. Tento program si klade za cíl studovat různé spalační neutronové zdroje (Pb, Pb-Bi, W terčů) pracující pomocí 660 MeV protonů ze synchrotronu v Dubně, s násobícím prostředím, i bez něj. Tyto experimenty dovolí ověření nástrojů pro výpočet transportu a jaderná data týkající se hlubokého průniku a aktivace materiálů velmi vzdálených od zdroje a násobícího prostředí.

Během experimentální fáze je hlavně zájem o určení nejdůležitějšího neutronického parametru—úrovně reaktivity, která je vlastně rozhodující pro akceptovatelnost takového zařízení. Tento cíl charakterizuje všechny experimenty zapojené do programu MUSE.

V praxi se používají dvě skupiny metod analýzy. První se zaměřuje na studium úbytku neutronové populace (okamžitých a zpožděných neutronů) po modifikaci zdrojového členu (pulsed neutron source method—PNS (metoda pulzního neutronového zdroje) a metoda variace frekvence). Druhá skupina metod zkoumá neutronické fluktuace ve štěpných řetězcích (měření šumu). Použité metody analýzy, jako např. Rossi- α a Feynman- α , stejně jako metoda přenosové funkce (tj. CPSD), kdy není přítomen žádný vnější zdroj, potřebují dostatečnou dobu měření a/nebo detektory s adekvátní citlivostí pro hluboce podkritickou soustavu. Samozřejmě tyto doby jsou zredukovány, pokud je AZ řízena pomocí generátoru GENEPI. [2]

2.4 6. rámcový program Euratomu

V tomto programu je prováděn výzkum v oblasti jaderného štěpení a radiační ochrany. Program má rozpočet 1230 mil. eur, čímž se zřetelně odlišuje od 6. rámcového programu EU (rozpočet 16270 mil. eur), protože oba spadají pod jiné smlouvy a mají trochu odlišná pravidla týkající se spoluúčasti a distribuce informací. [37]

Jeho hlavním cílem je pomoci využít naplno potenciál jaderné energie, a to jak v dlouhodobém, tak krátkodobém horizontu. Její rozvoj a využívání musí být vedeno udržitelným způsobem v boji se změnami klimatu a snižování energetické závislosti v EU. Dalším cílem je zintenzivnit a prohloubit dobře započatou spolupráci na Evropské úrovni v jaderném výzkumu. Naplňovat se to bude pomocí propagace výzkumu v klíčových oblastech Evropských zájmů a podporou mezinárodní spolupráce s partnery z oblastí třetího světa.

6. rámcový program Euratomu se skládá ze dvou odlišných částí:

- „přímý“ postup (direct action)
- „nepřímý“ postup (indirect action)

Nepřímý postup je hlavním mechanismem pro výzkum v rámci EU, vývoj technologií a výcvikové akce (Research, Technological Development and Training—RTDT). Přímé postupy (jsou tedy využívány méně) se provádějí v European Communities Joint Research Centre (JRC)—Společném výzkumném středisku (SVS) Evropského společenství.

Nepřímé postupy programů mají tyto tématické priority:

- výzkum fúzní energie
- nakládání s RAO
- radiační ochrana
- další aktivity na poli jaderných technologií a bezpečnosti

My se zaměříme na výzkum v oblasti nakládání s RAO, který lze rozdělit na dva proudy:

- výzkum v oblasti geologického uložení
- separace a transmutace a další koncepty zaměřené na snížení produkce RAO při uvolňování energie z jádra

Hlavní témata zde nastíněná se týkají geologického uložení vysoce aktivních a dlouho žijících RAO, tj. oblastí, ve které již bylo dosaženo dobrého pokroku. Tato oblast také zahrnuje neobvyklé metody zaměřené na snížení množství dlouhožijících prvků v RAO prostřednictvím výzkumu separace a transmutace (separace dlouho žijících radionuklidů a jejich proměna v krátkodobě žijící), komplexní výzkum napříč různými obory (cross-cutting research) v nakládání s RAO, především pro podporu Evropského výzkumu aktinidů (věda o těžkých prvcích používaných a produkováných ve štěpných reaktorech), a studie o sociálních a strategických aspektech nakládání s RAO, zvláště v rovině vládní a názoru veřejnosti.

6. rámcový program Euratomu financuje s tímto záměrem následující projekty:

- geologické uložení

- ▷ ESDRED—Integrovaný projekt na vývoj a demonstraci proveditelnosti technologií pro umístění odpadů, pro zakládání a utěšňování důlních chodeb nebo vrtů.
 - ▷ FUNMIG—Tento integrovaný projekt chce dále vylepšovat základní poznatky o procesech migrace radionuklidů v geosféře a aplikace těchto poznatků v prováděcích podmínkách geologických úložišť pro vysoce radioaktivní odpad.
 - ▷ NF-PRO—Integrovaný projekt zkoumající procesy v bezprostřední blízkosti uloženého odpadu a jejich integraci do prováděcích podmínek úložiště.
- separace a transmutace
 - ▷ EUROPART—Toto je integrovaný projekt, který bude vyhodnocovat techniky separace vysoce radiotoxických prvků z neaktivnějších odpadů a považuje přepracování VJP za strategii jak zkrátit dobu jejich nebezpečnosti.
 - ▷ EUROTRANS—Tento integrovaný projekt se zaměřuje na výzkum transmutace a bude iniciovat započítání prací na návrhu systémů řízených urychlovačem.
 - ▷ RED IMPACT—Specificky zaměřený výzkumný projekt, který bude vyhodnocovat dopad technologie separace a transmutace na nároky konečného úložiště a udržitelnost jaderné energie.
 - komplexní výzkum napříč obory pro nakládání s RAO
 - ▷ ACTINET—Jakostní síť zřízená kvůli zárukám, že jsou odborné znalosti a zařízení pro výzkum aktinidů v Evropě udržované „na úrovni“ a dále rozvíjené.
 - společenské a strategické studie
 - ▷ COWAM—Výzkumný projekt specificky zaměřený na zlepšení celkových rozhodovacích procesů v nakládání s RAO na místní a regionální úrovni.
 - ▷ SAPIERR—Specifická podpůrná činnost za účelem prozkoumání potenciálu a záležitostí regionu jako celku.

A nyní si popíšeme nejvýznamnější projekty tohoto programu, které se týkají problematiky ADS. [38]

2.4.1 Projekt EUROPART

Výzkum v projektu EUROPART (EUROpean Research Programme for the PARTitioning of Minor Actinides) se týká separace dlouhožijících radionuklidů (Long-Lived RadioNuclides—LLRN) obsažených v jaderných odpadech pocházejících z přepracování vyhořelého jaderného paliva. Po separaci budou LLRN přeměněny na krátkodobé nebo stabilní nuklidy jadernými prostředky (strategie P&T) nebo upravené do stabilních vyhrazených pevných matric (P&C strategie). Cílovými prvky budou aktinidy: od Am k Cm pro odpady, které získáme při přepracování paliv UOX a MOX, a od U po Cm pro přepracování vyhořelých paliv a terčů—„koncept dvou průchodů paliva“ (the nuclear double strata concept).

Studium separačních metod se bude dělit do 2 oblastí: hydrometalurgie a pyrometalurgie. Hlavní osy výzkumu pro obě oblasti budou:

1. Oddělení Am-Cm z vysokoaktivních odpadů pocházejících ze zpracování vysoce vyhořelého MOX a vícekrát recyklovaných MOX paliv.

2. Společné oddělení všech aktinidů za účelem recyklace nebo pokročilé vyhrazené palivové cykly, tj. koncept dvou průchodů paliva (double strata concept).

Co se týče hydrometalurgie je výzkum rozdělen do pěti pracovních oblastí (Work Packages—WPs). Čtyři oblasti (WP1–WP4) jsou vyhrazeny ke studiu oddělovacích metod a jedna (WP5) se zajímá o vývoj konverzních metod pro přípravu paliva.

V pyrometalurgii je výzkum organizován do čtyř pracovních oblastí (4 WPs): WP6 je zaměřena na základní studie chemie aktinidů v tekutých halogenidech a tekutých kovech, WP7 se zajímá o proces vývoje oddělení aktinidů, WP8 o studium úpravy odpadů z pyrochemických procesů a WP9 je vyhrazen pro systémové průzkumy.

Projekt má k dispozici silný management, který se nezajímá jen o odbornou, technickou a finanční stránku věci, ale také o další aspekty jako morální otázky, vztah vědy a společnosti, diskriminace žen ve společnosti aj. Výcvik a výuka mladých výzkumných pracovníků spolupracujících na tomto projektu bude také jeho významnou součástí.

Projekt začal na počátku roku 2004 a měl by trvat 3 roky, tj. skončit začátkem roku 2007. Jeho rozpočet byl schválen ve výši 6 mil. eur. Typ programu je rámcový program Euratomu (FP6-EURATOM-RADWASTE), smluvním typem integrovaný projekt.

Koordinátorem projektu je CEA—Commissariat à l’Energie Atomique v Paříži (Francie). Na projektu se podílí více než 20 dalších subjektů z celé EU, tedy včetně ČR (ČVUT, ústavy v Řeži aj.). [39]

2.4.2 Projekt EUROTRANS

EUROTRANS¹ (EUROpean Research Programme for the TRANSmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System) se zaměřuje na transmutaci RAO a bude iniciovat práce na European Transmutation Demonstration (ETD) založené na ADS. To bude znamenat pokročilý návrh prvního experimentálního zařízení s výkonem 50–100 MWt, které bude sloužit k demonstraci technické proveditelnosti transmutace v ADS (XT-ADS). Také to přinese obecně uznávané koncepční provedení (několik set MWt) modulárního Evropského zařízení pro průmyslovou transmutaci (European Facility for Industrial Transmutation—EFIT). Obě provedení budou mít stejné základní systémové charakteristiky, což umožní předávání provozních zkušeností mezi XT-ADS a EFIT.

Práce na provedení zařízení EFIT budou omezeny strategií optimalizace tohoto zařízení jako vyhrazeného transmutoru transuranů. Podstatné množství cílové experimentální a teoretické práce bude prováděno s podporou těchto návrhových prací, zahrnujíc propojení urychlovače, spalačního terče a podkritického blanketu. Určitá práce je věnována vývoji klíčových součástí urychlovače, zvláštních paliv, technologií tekutých těžkých kovů (heavy liquid metal (HLM) technologies) a základních jaderných dat. To poskytne, ve spojení s dalšími projekty, konzistentní a kompletní odhad proveditelnosti dávající návrh rozpočtu pro budoucí transmutační systém a nezbytný vstupní prvek pro rozhodovací struktury pro budoucí implementaci transmutačních procesů založených na ADS.

Práce na projektu budou zahrnovat vývoj detailního designu 50–100 MWt podkritického reaktorového systému (XT-ADS) řízeného lineárním protonovým urychlovačem s bezokénkovým spalačním terčem a koncepce několika set MWt průmyslového ADS pro transmutace (EFIT). Při návrzích zařízení XT-ADS a EFIT bude pomáhat spektrum ověřených experimentálních poznatků ze souvisejících experimentů s dostatečným výkonem (20–100 kW),

¹<http://www.fzk.de/eurotrans>

to vše samozřejmě v mezinárodní spolupráci, která zhodnotí monitorování podkritičnosti, dynamiky chování a ověří funkčnost spojení urychlovače, spalačního terče a podkritického blanketu. Souběžně s tím budou vyvíjena různá ne-uranová reaktorová paliva za účelem jejich testování jako nezávislých, oddělených palivových tyček v XT-ADS stejně jako možné kandidátské palivo pro EFIT. Bezpečnostní záležitosti systémů a netradičních paliv budou brány náležitě v potaz. Další oblast projektu bude vyvíjet a hodnotit struktury materiálů a technologií HLM (Pb a Pb-Bi) pro transmutační systémy, kde je HLM v roli spalačního materiálu a zároveň chladícího média. Nakonec budou vyhodnoceny soubory vylepšených jaderných dat a vyvinuty příslušné modely, což zahrnuje citlivostní analýzu, analýzu nejistot a ověření simulačních nástrojů.

EUROTRANS má rezervováno 5% svého rozpočtu na zaopatření aktivit spojených s výukou a výcvikem pro mladé výzkumné pracovníky v jaderných oborech, což je významnou aktivitou projektu.

Strategickým výsledkem projektu EUROTRANS bude vědní pokrok, důvěryhodný základ pro stanovení technické proveditelnosti transmutace pomocí ADS a první odhady nákladů transmutačního systému založeného na ADS. Také se očekávají významné vstupní podněty pro rozhodovací orgány pro rozhodnutí, zda-li se angažovat na detailním inženýrském plánování ADS pro transmutace (jsou XT-ADS) a jeho eventuální výstavby po dokončení tohoto projektu. [40]

2.4.3 Projekt RED IMPACT

RED IMPACT je zkratka pro „Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Waste Disposal Project“ (volný překlad: dopad separace, transmutace a technologií redukce množství RAO na projekt jejich konečného uložení). Ačkoliv zní název projektu komplikovaně, jeho cíle jsou poměrně jasné. Jeho účelem je totiž průzkum dopadu technologií separace a transmutace vysoceaktivních jaderných odpadů na provedení jejich uložení v geologických úložištích a nároky s tím spojené.

Projekt začal na konci února 2004 [55] a doba jeho trvání by měla být tři roky. Během této doby by mělo být dosaženo následujících cílů:

- vyhodnocení dopadu P&T na geologická uložení a způsob nakládání s RAO
- vyhodnocení ekonomických, environmentálních a sociálních nákladů/zisků P&T
- rozšíření výsledků studie k investorům (odborníci, široká veřejnost a další řídicí subjekty) a získání jejich ohlasů v průběhu studie
- iterace a zdokonalení práce založené na ohlasu investorů za účelem dosažení plného dopadu této studie na implementaci nakládání s RAO v EU

Hlavním koordinátorem projektu je prof. Waclaw Gudowski z KTH—Kunliga Tekniska Högskolan (zde také projekt sídlí), jeho zástupcem je Reinhardt Odoj z FZJ—Forschungszentrum Jülich GmbH. Na projektu se podílí celá řada výzkumných center a laboratoří z celého světa (včetně Správy úložišť radioaktivních odpadů a ÚJV ŘEŽ). Dle informací na webových stránkách projektu se projekt nachází ve 14% vývoje, což představuje vzhledem k jeho plánovanému ukončení k březnu roku 2007 dost špatný postup. [41]

2.5 Výzkumné středisko CIEMAT

CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas)² je výzkumné centrum zabývající se výzkumem a vývojem technologií v oblasti energetiky a životního prostředí. Mezi jeho aktivity patří pochopitelně i program výzkumu v oblasti jaderné fyziky a jaderné energetiky. Jeho nejlepší odborníci jsou členy důležitých národních a mezinárodních expertních komisí.

Jelikož má tento program k dispozici pouze laboratoř s malým jaderným vybavením, užívá zařízení CERNu (mezinárodní centrum), CEA (Cadarache) a YALINA (Minsk) pro své nynější aktivity (účast na projektu SAD v Dubně (Rusko)).

Provádějí se tam následující činnosti:

- Detailní neutronické simulace reaktorů a ADS.
- Provedení a detailní simulace neutronových experimentů.
- Komplexní simulace transportu fotonů a nabitých částic.
- Analýzy jaderně-palivových cyklů.
- Vývoj systémů pro získávání dat z jaderných experimentů.
- Provedení a testování neutronických detektorů.
- Určení účinných průřezů pro neutrony.

To vše probíhá či probíhalo v rámci projektů nTOF, MUSE, PDS-XADS, RED IMPACT a ADOPT Thematic Network.

Nyní uvedeme stručný výčet dosažených výsledků. V oblasti palivových cyklů se podařilo následující:

- Nastavení a vylepšení systému CIEMAT EVOLCODE pro simulace neutroniky ADS, který je schopen vypočítat vývoj paliva.
- Vypracování studií o transmutačních systémech a jejich roli v budoucím energetickém průmyslu.
- Trvalé studium různých verzí dvouprůchodových palivových cyklů s transmutací.

Výzkum kritických a podkritických reaktorů pro transmutaci RAO přinesl následující výsledky:

- Vyhodnocení potenciálu olovem chlazeného ADS s rychlým spektrem a s thoriovým palivem s vysokým obsahem transuranů, pro transmutaci těchto izotopů (včetně plutonia).
- Vyhodnocení transmutačního potenciálu olovem chlazeného ADS s rychlým spektrem a s palivem založeným na inertní nebo částečně množivé vrstvě paliva s transurany, vysoce obohacené minoritními aktinidy.
- Studie neutronického poškození způsobeného ve vnitřních strukturách a techniky minimalizace produkce Po v modelu XADS-80 chlazeném Pb/Bi projektu PDS-XADS, a celková studie neutroniky v projektu MYRRHA (XADS-30).

²<http://www.ciemat.es>

- Studium možností zahrnutí speciálních prvků s minoritními aktinidy a dlouho žijícími štěpnými produkty do Pb/Bi chlazené AZ v projektu PDS-XADS; vyhodnocení jejich transmutační schopnosti.

Také proběhly (probíhají) tyto integrální experimenty s transmutačními systémy (ADS):

- Provedení experimentů a vyhodnocení konfigurací experimentu MUSE-4.
- Měření parametrů kinetiky podkritického systému MASURCA v konfiguracích MUSE-4 a odezvy na vnější neutronový pulz.
- Provedení měření a simulačních programů pro zařízení YALINA.
- Provedení a simulace zařízení SAD a formulace jeho experimentálního programu.

Týmy expertů se též zabývají jadernými daty (účastnili se projektu HINDAS—High and Intermediate Nuclear Data pro ADS) potřebnými pro transmutaci a pokročilé reaktory:

- Měření stupně transmutace ^{99}Tc a ^{129}I epitermálními neutrony v experimentu TARC (viz oddíl 2.8.5).
- Ověření jaderných modelů a databází pro spalaci a transport neutronů v olovu.
- Provedení experimentů a konfigurace neutronového svazku pro experiment nTOF.
- Spoluúčast na uvedení do provozu a charakteristika plánovaných prací na experimentu nTOF.
- Měření účinných průřezů pro záchyt pro ^{232}Th , ^{151}Sm , ^{209}Bi a všechny stabilní izotopy Pb v projektu nTOF (viz oddíl 2.3.7).

Mezi další dosažené výsledky je jistě možno započíst i provedení a počítačové a experimentální vyhodnocení měření neutronů s předem neznámou energií a spektrem.

CIEMAT též velmi těží z řady dohod o spolupráci, zejména se střediskem ENRESA³, se kterým studuje transmutace a problematiku dlouhožijících radionuklidů. [42]

2.6 Evropský spalační zdroj (ESS)

Tento projekt vychází z iniciativ organizací Forschungszentrum Jülich (Německo) a Rutherford Appleton Laboratory (Velká Británie). Na základě jejich společných podnětů odstartoval v roce 1993 projekt European Spallation Source (ESS) založením Rady ESS, ve které se sešli představitelé výzkumných institucí hlavně z Evropy.

K dispozici jsou dva typy vhodných zařízení: první jsou založená na vysokých neutronových tocích z reaktorů a druhá na lineárních urychlovačích se spalačním terčem. Oba typy poskytují vysoké neutronové toky potřebné v moderním výzkumu. Lineární urychlovače produkují snáze pulzní neutronové svazky, ale některé „high flux“ reaktory je také poskytují. Také je nutné podotknout, že zařízení založená na spalaci jsou efektivnější než reaktory určené k produkci vysokoenergetických neutronů. Dále, bezpečnostní koncepty jsou úplně odlišné z důvodu rozdílných typů a množství použitých jaderných materiálů. Lineární urychlovače

³<http://www.enresa.es>

užívají pasivní bezpečnostní prvky, zatímco „high flux“ reaktory jsou omezeny bezpečnostními aspekty srovnatelnými s jadernými produkčními zařízeními.

Konečný návrh projektu byl schválen roku 2004. Mezi léty 2005–2010 má probíhat výstavba (v Yorkshire⁴) a v dalších letech 2011–2012 schvalovací řízení. Poté bude zařízení jistě hojně využíváno mnoha výzkumnými subjekty k nejrůznějším výzkumným záměrům.

ESS je založen na jednom z nejvýkonnějších lineárních urychlovačů na světě, schopným urychlit částice až na energii 1334 MeV, ve srovnání se současným anglickým 70 MeV lineárním urychlovačem ISIS (spojeným se synchrotronem urychlujícím částice až na 800 MeV) nebo s 590 MeV lineárním urychlovačem SING. Americký SNS počítá s 1300 MeV lineárním urychlovačem.

Projekt CONCERT, fungující paralelně s ESS, se už od let svého vzniku (2000–2001) zaměřoval na výzkum transmutací a s tím spojených dalších důležitých věcí—např. provádí pokusy s ozařováním materiálů apod. [12]

2.7 Výzkumné středisko ITEP

Ve výzkumném středisku ITEP (Moskva, Rusko) se buduje experimentální prototyp ADS. Toto hybridní elektrojaderné zařízení středního výkonu se skládá z pulzního protonového lineárního urychlovače (36 MeV, 0,5 mA) a soustavy podkritického blanketu (tepelný výkon 100 kW). Většina vybavení je již objednána pro průmyslovou výrobu a na části se pracuje. Zařízení by mělo sloužit ke zkoumání širokého okruhu problémů soustav tohoto typu, stejně tak jako průzkum dynamických procesů vznikajících během jejich provozu. Plánují se také aplikace protonových svazků a neutronových toků. V budoucnosti by mělo být možné zvýšit proud a energii protonového svazku. [11]

2.8 Další projekty

2.8.1 Projekt IREN

V SÚJV v Dubně u Moskvy se buduje projekt nového intenzivního rezonančního neutronového zdroje (Intense REsonance Neutron source—IREN). IREN bude použit jako neutronový zdroj nové generace pro výzkum širokého spektra problémů částicové a aplikované jaderné fyziky. Zdroj IREN je určený k výzkumům v oblasti jaderné fyziky metodou „time-of-flight“ ve spektru energií až několik set keV. Nachází se v objektu vyřazeného LUE-40 + IBR-30, přičemž se využívá existující infrastruktury tvořené 8 neutronovými svazky s dráhou letu od 10 do 750 m, experimentálního sálu a měřících pavilónů. Zdroj IREN využívající propagačního principu může poskytnout rychlé znásobení okamžitých neutronů produkovaných elektronovým svazkem z lineárního urychlovače v elektron-neutron konvertoru. Jeho provedení musí zaručit co nejkratší čas (méně než 10 ns) pro jedno neutronové násobení v podkritickém blanketu s celkovou délkou trvání pulzu rychlých neutronů okolo 400 ns, frekvencí 150 Hz a neutronovým výtěžkem v řádu 10^{15} n/s. [43]

⁴<http://www.yorkshire-ess.org.uk>

2.8.2 Projekt MYRRHA

MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) je systém řízený urychlovačem (ADS), který se staví v Molu (Belgie). Má sloužit jako základ pro evropský XT-ADS (eXperimental demonstration of Transmutation in ADS—experimentální ukázka transmutace pomocí ADS) a poskytovat protony a neutrony pro nejrůznější R&D aplikace. Skládá se z protonového urychlovače dodávajícího 350 MeV při 5 mA protonového svazku do tekutého Pb-Bi spalačního terče, který je spojen s podkritickým „rychlým“ blanketem chlazeným též Pb-Bi. Projekt začal v roce 1997 a cílem je spustit zařízení mezi léty 2014 a 2015.

Podkritický blanket se skládá z mříže tvořené 99 hexagonálními kanály, z nichž v 45 jsou zasunuty palivové soubory obsahující palivové proutky s MOX obohaceným 30% Pu uspořádané do trojúhelníkové mříže. Celková hmota těžkého kovu je 514 kg na začátku kampaně. Početné extra kanály umožňují tomuto zařízení velkou flexibilitu výzkumu.

Blanket zařízení MYRRHA může být přizpůsoben konfiguracím věnovaným transmutačním studiím minoritních aktinidů (MAs) nebo dlouhožijícím štěpným produktům (LLFPs). Aktinidy obvykle potřebují tok rychlých neutronů, zatímco štěpné produkty tok tepelných neutronů. K dalšímu zlepšování studií transmutací štěpných produktů a k produkci medicínských izotopů, se uvažuje o použití tzv. „thermal flux island“, který by zpomaloval neutrony na tepelné energie.

Podkritický rychlý blanket včetně všeho příslušenství by měl být instalován v prostředí s kontrolou vzduchu. Bylo zjištěno, že další užití stávajících budov není možné, protože tyto budovy nejsou v souladu s prosazovanou filozofií „Remote Handling“. Proto bude tedy postavena nová budova v SCK-CEN Mol areálu. Tato budova je docela velká (100 m délka, 30 m šířka, 40 m výška; 10 m nad povrchem a 30 m pod ním). V současnosti jsou vytipovány dvě možné lokality v areálu SCK-CEN, kde by se dala umístit budova zařízení MYRRHA a jejího urychlovače.

Všechny údržbové operace na primárních systémech a s nimi souvisejících zařízeních se budou provádět pomocí systému „remote handling“. Tento systém bude založen na principu „Man-In-The-Loop“ realizovaném se dvěma oboustrannými servo-manipulátory pracujícími v módu Master-Slave. Slave servo-manipulátory budou ovládány vzdálenými operátory pomocí kinematicky identických master-manipulátorů podporovaných uzavřeným TV okruhem. Manipulátory budou mít další robotické schopnosti, aby se maximalizovaly jejich operační schopnosti.

Účelem zařízení MYRRHA je sloužit jako víceúčelové ozařovací zařízení pro výzkum zejména v těchto oblastech:

- ukázka technologie ADS
- studie transmutací RAO tvořených minoritními aktinidy a dlouhožijícími štěpnými produkty
- studie struktury materiálů pro tlakovodní reaktory, fúzní a ADS reaktory
- studie chování jaderných paliv pro tlakovodní, varné a ADS reaktory
- produkce radioizotopů pro zdravotnické a průmyslové aplikace
- aplikace s protonovým svazkem

Vezmeme-li v úvahu výše zmíněné aplikace a cíl uvést toto zařízení do provozu ve výše zmíněném časovém období, výběr součástí zařízení MYRRHA a jejich parametrů musí být následující:

- výkon protonového svazku až 1,75 MW (350 MeV, 5 mA)
- tekutý Pb-Bi spalační terč (bez okénka)
- podkritická AZ (výkon okolo 50 MW) tvořená MOX palivem s max. 30% obsahem plutonia, chlazená Pb-Bi a $k_{\text{ef}} = 0,95$

Momentálně se zjišťuje, je-li technicky proveditelné a ekonomicky zajímavé odklonit malou část protonového svazku z protonového urychlovače. Tento protonový minisvazek může být použit k ryze protonovému ozařování (simulace záření dopadajícího na vesmírné lodě) a možná také pro protonovou terapii (nová experimentální metoda léčení rakoviny). [44]

2.8.3 Projekt YALINA

Experimentální zařízení Yalina [45] v Minsku (Bělorusko) se skládá z podkritického uran-polyetylenového souboru, vysoce intenzivního neutronového generátoru a podpůrných systémů. Generátor neutronů NG-12-1 s energií 14 MeV (intenzita $I \sim 10^{10}$ n/s při (d,d) a 10^{12} n/s při (d,t) módu) pracuje v kontinuálním a pulzním režimu. Délka neutronových pulzů se může měnit v rozmezí od 5 do 100 ms s frekvencí pulzů od 1 do 1000 Hz.

UO₂ s hořčikovou maticí (obohacení 10%) je umístěn v blanketu obklopeném vysoce čistým grafitovým reflektorem tloušťky 40 cm a 1,5 mm tenkou kadmiovou vrstvou. Počet palivových elementů je 280 a dávají k_{ef} menší než 0,98 v podkritickém souboru dané kompozice a geometrie s olověným terčíkem ve střední části. Neutronové spektrum v experimentálních kanálech podkritického souboru je jedinečné a liší se od neutronového spektra klasického reaktoru.

V rámci projektu se intenzivně spolupracuje s pracovišti jako jsou např. Kernforschungszentrum (Karlsruhe, Německo), RIT (Švédsko) či CIEMAT (Španělsko).

Zařízení může být použito ke studiu fyziky a dynamiky podkritických systémů s vnějším zdrojem, ke zkoumání možného vyhoření dlouhožijících RAO v podkritickém systému se spektrem tepelných neutronů, k provádění neutronové aktivační analýzy a k výcviku studentů v jaderné a neutronové fyzice. Podkritické zařízení Yalina bylo uvedeno do provozu v březnu 2000. V současnosti poskytuje data pro IAEA CRP testovací data pro ADS. [46]

2.8.4 Projekt TRASCO

Italský projekt TRASCO (TRAsmutazione SCORie) byl zaměřen na studium fyziky a vývoj technologií potřebných pro návrh provedení ADS pro transmutaci RAO. Byl připraven podle návrhu Carla Rubbiy. Projekt schválili ENEA (National Agency for New Technology, Energy and the Environment), INFN (National Institute for Nuclear Physics) a MURST (Minister for University and Scientific and Technological Research—Itálie) v roce 1997.

Projekt se skládal ze dvou hlavních oblastí výzkumu—urychlovače a podkritického systému. Ačkoliv jsou ENEA a INFN společně zodpovědné za celý program, INFN se zaměřilo na urychlovač a ENEA na vlastní podkritický systém.

Cílem výzkumu byly všechny hlavní komponenty ADS (urychlovač, okénko/terčik, podkritický blanket). Ačkoliv byly k dispozici omezené finanční zdroje, bylo rozhodnuto koncentrovat úsilí na některé důležité a kvalifikované aktivity.

Hlavní cíle tohoto projektu mohou být shrnuty do následujících bodů:

- návrh koncepce 1 GeV, 30 mA protonového lineárního urychlovače
- vývoj metod a kritérií pro neutroniku, termohydrauliku a návrh uspořádání celého zařízení ve stylu podkritického systému EA (Energy Amplifier), společně s některými specifickými aspekty týkajícími se analýzy bezpečnosti jaderného zařízení tohoto typu
- technologie materiálů a vývoj komponent využitelných v zařízení, kde slitiny Pb nebo Pb-Bi představují primární terčik a chladivo zároveň
- experimenty nutné k ověření a kontrole navrhovaných technologií pro zajištění slučitelnosti materiálů se slitinami Pb a Pb-Bi

Vedle ENEA a INFN na tomto projektu spolupracovala také celá řada kvalifikovaných italských firem a dalších italských výzkumných institucí (univerzity, INFN, National Institute for Physics of Matter).

Program byl rozdělen do devíti podprogramů (v závorkách jsou uvedeny subjekty, které se na dané oblasti podílely):

1. finální návrh a výstavba protonového zdroje (INFN, SISTEC, HITEC)
2. nízko- a středně-energetická urychlovačová sekce (INFN, CINEL)
3. vysokoenergetická urychlovačová sekce (INFN, CISE, SAES-Getters, ZANON)
4. neutronová produkce pro charakteristiku materiálů (INFN, INFM)
5. bezpečnostní kritéria a klasifikace (ENEA, ANSALDO)
6. neutronika a transmutační schopnost (ENEA, CIRTEN, CRS4, University of Bologna)
7. termohydraulická analýza (ENEA, CIRTEN, CRS4, ANSALDO)
8. technologie okénka oddělujícího urychlovač od terčíku (ENEA, CIRTEN, ANSALDO, INFM)
9. technologie materiálů a jejich slučitelnost s Pb/Pb-Bi slitinou (ENEA, CIRTEN, CRS4, FN, ANSALDO)

Projekt trval dva roky a stál okolo 10 milionů dolarů. Mezinárodní spolupráce na tomto projektu byla podložena smlouvami s výzkumnými centry jako jsou např. CERN, CEA, IPPE a INP. [47]

2.8.5 Projekt TARC

Účelem experimentu TARC (Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing), který probíhal v letech 1996–1999, bylo demonstrovat možnost použití metody tzv. „Adiabatic Resonance Crossing“ (je založená na postupném zpomalování neutronů po malých energetických intervalech) k efektivní likvidaci Long Lived Fission Fragments (LLFFs) v ADS a ověřit novou simulaci vyvinutou v rámci programu Energy Amplifier.

Experimentální zařízení bylo instalováno v CERNu u protového urychlovače (CERN PS) za účelem studia toho, jak jsou neutrony produkované spalací s relativně vysokými energiemi ($E_n \geq 1$ MeV) kvaziadiabaticky zpomalovány. Zpomalování má ploché, rovnoměrné rozdělení energie, které příliš nezávisí na různých vnějších parametrech. Neutrony dosahují energie rezonančního záchytu na izotopech určených k transmutaci, což má za následek vysokou pravděpodobnost, že na nich budou zachyceny.

Byla provedena precizní měření prostorového a energetického rozložení spalačních neutronů (při použití 2,5 GeV/c a 3,57 GeV/c protonů) zpomalujících se v oloveném objemu o rozměrech 3,3 m x 3,3 m x 3 m, účinných průřezů pro absorpci na LLFFs ^{99}Tc , ^{129}I , a několika dalších prvcích. Byl také vyvinut příslušný formalismus a výpočetní pomůcky nezbytné pro analýzu a pochopení získaných a detailně ověřených dat.

Výzkum ARC ukazuje možnost likvidace, v urč. parazitním provedení mimo blanket zařízení Energy Amplifier, velkých množství ^{99}Tc nebo ^{129}I rychlostí převyšující rychlost jejich produkce, čímž je možno dosáhnout redukce současných zásob LLFFs. Dále TARC otevírá nové možnosti pro produkci radioaktivních izotopů jako alternativy k jaderným reaktorům, nejen pro medicínské aplikace, ale i pro výzkum pomocí neutronů a průmyslové aplikace. [22]

2.8.6 Projekt TRADE

Projekt TRADE (TRiga Accelerator Driven Experiment) přinesl zajímavou myšlenku—použít „existující“ reaktor nízkého výkonu s velmi dobře známými bezpečnostními vlastnostmi, učinit ho podkritickým a spojit s urychlovačem, který by dodával potřebné protony k vyvolání spalačních reakcí v terčíku umístěném v AZ reaktoru. Takové uspořádání by nevyžadovalo vysoký výtěžek ze spalace. Ve skutečnosti by mělo fungovat i s produkcí 1 neutronu na 1 proton, protože mezi požadavky na toto uspořádání není optimalizace či efektivita transmutace.

Hlavním zájmem tohoto experimentu bylo ukázat dynamiku chování podkritického systému. Ve skutečnosti jsou však pro transmutaci paliva z minoritních aktinidů bezpečnostní charakteristiky věcí nejvyšší důležitosti. Spolehlivost provozu systému—od najíždění, přes provoz na nominálním výkonu, až po odstavení, byla společně s výzkumem tepelných charakteristik reaktoru jedním z hlavních cílů. Přítomnost kontrolních tyčí v systému dovolovala ověřit různé režimy provozu během ozařování paliva a určování a sledování úrovní reaktivity pomocí „ad-hoc“ technik. Společné chlazení terčíku a podkritické AZ bylo demonstrováno společně s řešením některých inženýrských problémů obecné povahy ADS, jako např. správná konfigurace průniku svazku do AZ.

Možnost provozovat experiment na různých úrovních podkritičnosti (provedené pomocí odpovídajících modelů zaváženého paliva) dovolovalo experimentální průzkum přechodu od režimu dominujícího externího zdroje k režimu, kdy se projevují teplotní zpětné vazby. Tento přechod je důležitý pro pochopení dynamiky chování ADS pro budoucí demonstraci transmutace, které mohou mít velmi malý k_{ef} a velmi malý Dopplerův efekt v reaktivitě.

Carlo Rubbia naznačil, že tento pilotní experiment, který může být prvním příkladem

ADS „v životní velikosti“, může být uskutečněn na reaktoru TRIGA v ENEA Casaccia Centre (Itálie), což je existující reaktor bazénového typu s tepelným výkonem 1 MW, chlazený přirozeným prouděním vody v bazénu reaktoru. Palivové elementy jsou uranové válce se zirkoniovým pokrytím, které je v některých místech nahrazeno nebo doplněno hydridem zirkonia ZrH. [7]

Studie proveditelnosti ukázaly, že realizovatelnost takového experimentu by mohla být možná v časovém horizontu let 2007–2008.

Experiment TRADE byl původně záležitostí ENEA, CEA, CERN a pracovní skupiny ANSALDO, která v roce 2001 provedla studii proveditelnosti (aktualizace přišla v roce 2002). V témže roce začala na tomto experimentu poměrně široká mezinárodní spolupráce— ENEA (Itálie), CEA (Francie), FZK (Německo), DOE (USA), CERN (Švýcarsko), CIEMAT (Španělsko), CNRS (Francie), JRC-ITU, PSI (Švýcarsko), SCK-CEN (Belgie), AAA (Francie), AIMA (Francie), ANSALDO (Itálie) a IBA (Belgie). V jejím rámci probíhají aktivity spojené s navrhováním provedení hlavních součástí, společně s prvními předběžnými pokusy na reaktoru TRIGA RC-1.

Projekt TRADE je založen na spojení vylepšeného komerčního protonového cyklotronu s pevným terčíkem umístěným v reaktoru TRIGA v podkritické konfiguraci. Ve skutečnosti je flexibilita bazénového reaktoru neobyčejně vhodná pro konverzi na tuto konfiguraci, čehož je dosaženo pomocí:

- odstranění nejnvnitřnějšího palivového prstence v AZ
- výměnou paliva v nejkrajnějším kruhu se po malých změnách reaktivity dospěje ke kýžené úrovni podkritičnosti

Terčík by měl být umístěn v centrálním prstenci, v současnosti užívaném pro ozařování vysokými neutronovými toky. Provedení terčíku mohou být omezena geometrií ozařovacího kanálu, a to i přes možnost dosažení adekvátního výkonu (několik desítek kW) v terčíku. Může v něm být uvažována přirozená nebo nucená konvekce chladiva.

Aby byl tento experiment důvěryhodným pro ověření konceptu ADS, musí být splněno několik podmínek, např. typ nezbytného protonového svazku. Výkon AZ v řádu několika stovek kW je potřebný k průzkumu dynamiky, ovládání reaktivity a sledování výkonu v ADS, v podkritické oblasti (tj. od režimu dominantního zdroje k režimu, kdy se projevují zpětné vazby), tzn. od $k_{ef} = 0,9$ ke $k_{ef} = 0,99$ a vyšším. V případě zařízení TRIGA již bylo naznačeno, že maximální výkon, který může být odveden z pevného terčíku, se pohybuje v řádu několika desítek kW. Použití protonů s energiemi několika set MeV se jeví jako adekvátní vzhledem k ceně urychlovače a minimální velikosti ohýbajících magnetů potřebných pro usměrnění svazku do AZ. S těmito parametry získáme požadavek na maximální protonový proud v řádu několika stovek μA .

Co se týče typu neutronového spektra, ukázalo se, že tepelné neutronové spektrum reaktoru TRIGA umožňuje provádět důvěryhodné experimenty také s rychlým spektrem. Ve skutečnosti, ačkoliv jsou kinetické parametry reaktoru TRIGA a rychlého neutronového spektra velmi odlišné, kinetická odezva na odchylky od normálu je identická, což ale neplatí pro posun k nižším frekvencím reaktorové přenosové funkce. Tato vlastnost umožňuje prozkoumat a ověřit dynamiku chování ADS, poněkud nezávisleji na neutronovém spektru.

Experimenty týkající se vývoje ADS, které je možné provádět na reaktoru TRIGA, mohou zahrnovat:

- Dynamické režimy: možnost provozu na několika stech kW výkonu a na různých úrovních podkritičnosti ($k_{\text{ef}} \simeq 0,9 - 0,99$) dávají možnost ověřit experimentálně dynamiku chování systému při vlivu neutronů vnějšího zdroje a získat důležité informace o optimální úrovni podkritičnosti jak pro předváděcí účely, tak pro transmutace.
- Podkritická měření na výkonu.
- Korelace mezi výkonem reaktoru a protonovým proudem. Tato korelace může být studována na různých úrovních podkritičnosti a výkonu.
- Ovládání reaktivity různými prostředky a případnými změnami důležitosti neutronového zdroje, udržování konstatního protonového proudu (tj. použitím různých materiálů v prázdném nejnvtitnějším palivovém kroužku blízko terčiku).
- Procedury najíždění a odstavování, včetně odpovídajících technik a použití příslušných přístrojů.

Další důležitou vlastností uspořádání zařízení TRIGA je možnost provést ještě před spojením s urychlovačem tzv. předběžnou kampaň bez urychlovače, a to vložení stálého neutronového zdroje známých parametrů do centrálního prstence a provedením statických a dynamických měření pro různé úrovně podkritičnosti. Taková konfigurace jako je v reaktoru TRIGA dovoluje aplikaci široké palety technik zaměřených na určení úrovně podkritičnosti, jako je např. metoda source jerk, analýza impulzního neutronového zdroje, rod drop, či „Modified Source Multiplication“. Taková sada experimentů poskytne spojení s experimenty MUSE a charakterizuje podkritickou AZ z bezpečnostního hlediska.

Experimenty TRIGA budou těžit z vývoje extenzivních experimentálních technik prováděném v experimentálním programu nulového výkonu MUSE. Většina experimentálních technik bude přímo aplikovatelná, částečně v oblasti měření a sledování úrovně reaktivity. Ačkoliv jsou experimenty TRIGA prováděny v systému s tepelnými neutrony, závislost chování přenosové funkce systému na frekvenci je podobná její závislosti v rychlém systému. Tento fakt dělá z experimentu TRIGA zásadního předchůdce jakéhokoliv budoucího ADS-experimentu větší velikosti. [48]

2.8.7 Projekt Gamma2

Gamma2 je projekt LVE (Laboratoře vysokých energií Veklera a Baldina) SÚJV Dubna určený ke studiu jaderných reakcí svazku částic (prozatím jen protonů, ale plánují se deuterony a jádra ^{12}C) s tlustým terčem. Cílem je změřit prostorové a energetické rozložení sekundárních neutronů podél terče. Byly provedeny experimenty s holým Pb terčem, U terčem obaleným Pb reflektorem, Pb terčem obaleným parafinovým moderátorem a různými energiemi primárních protonů. V plánu je též experiment s grafitovým moderátorem. [8]

U zrodu projektu stáli vědci z německé univerzity Marburg a FZ Jülich. Na projektu se dále podílí vědci z mnoha dalších zemí—Polska, ČR, Bulharska, Řecka.

Pomocí moderovaných spalačních neutronů se studují také transmutační výtěžky aktinidů a štěpných produktů (^{129}I , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{241}Am). Z výsledků měření se usuzuje např. na optimální energii protonů vzhledem k výtěžku transmutace radioaktivních vzorků a sekundárních neutronů.

Zařízení Gamma2 bylo původně složeno z 20 olověných disků, každý o průměru 8 cm a tloušťce 1 cm, což dávalo celému terči délku 20 cm. [6]

Terč byl však v posledních experimentech zvětšen, takže při zachování průměru 8 cm dosáhl délky 50 cm. Byl obklopen 6 cm silným parafínovým moderátorem a ozařován 1, 1,5 a 2 GeV protonovým svazkem z urychlovače Nuklotron. Tato nová konfigurace sloužila ke studiu produkce spalačnických neutronů v tlustých terčích a výtěžků transmutací RAO. [1]

2.8.8 Projekt Energie & Transmutace

Zařízení E&T je malý pokusný modul určený k základním výzkumům transmutačních reakcí v LVE SÚJV Dubna. Skládá se z masivního tlustého oloveného terče (hmotnost 43 kg, průměr 84 mm a délka 480 mm), který je obklopen hluboce podkritickým blanketem rozděleným na 4 sekce. Každá sekce obsahuje 30 palivových článků (průměr 36 mm, délka 104 mm, hmotnost 1,72 kg). Celý blanket tak obsahuje 206,4 kg přírodního uranu (1,486 kg ^{235}U). Mezi jednotlivé sekce jsou vloženy polyethylenové folie nesoucí celou škálu detektorů. Na vrchní straně blanketu byly pokládány radioaktivní vzorky pro studium výtěžků transmutačních reakcí. Celé zařízení je ukryto v dřevěném biologickém stínění (polyethylenový moderátor s vnitřní stranou pokrytou kadmíem). Stínící box je umístěn na pojízdném podvozku. Hmotnost celé soustavy je 950 kg.

Zařízení je určeno k ozařovacím experimentům na Synchrofázotronu a Nuklotronu (urychlovače v SÚJV Dubna). Bylo použito při čtyřech ozařovacích experimentech na Nuklotronu a několika experimentech na Synchrofázotronu. Ukázalo se však, že konstrukce stínění je chybná a zásadně ovlivňuje spektrum neutronů v blanketu. [6]

2.9 Mimoevropský výzkum

2.9.1 USA

Projekt AAA

Ministerstvo energetiky USA (US Department of Energy—DOE) bylo v roce 2001 pověřeno Kongresem USA vytvořením programu Advanced Accelerator Applications (AAA) pro výzkum jaderných problémů jako jsou např. jaderná energie a nakládání s RAO, upadající jaderná infrastruktura USA, přední pozice v globálním jaderném výzkumu a národní obrana. [16] Tento projekt by měl spojit a harmonizovat výzkumy spojené s urychlovači vysokých výkonů. AAA zahrnuje dřívější projekty Accelerator Production of Tritium (APT) a Accelerator Transmutation of Waste (ATW). [3] Skládá se ze tří součástí:

- Transformace projektu APT na projekt Accelerator Demonstration Facility (ADF).
- Vybudování zařízení ADF založeného na návrhu APT.
- Testování a demonstrace technologií spojených s transmutacemi podle „plánovací“ studie („road-map study“) iniciované DOE.

Vedle průzkumu transmutace jako schůdného způsobu nakládání s RAO, pokračuje program AAA ve vývoji technologických základů alternativní produkce tritia, zahrnující dokončení návrhu provedení APT a vývojových aktivit.

Očekává se, že i další národní a mezinárodní programy zaměřené na aplikace urychlovačů jako např. projekt SNS (viz str. 28) budou ze znalostí a dat získaných při pracích na programu AAA také profitovat.

Spallation Neutron Source (SNS)

Spallation Neutron Source (SNS) je na urychlovači založený neutronový zdroj, který byl vybudován v Oak Ridge, Tennessee, USA, Ministerstvem energetiky USA. SNS byl navržen a postaven v rámci unikátních partnerských vztahů šesti národních laboratoří: Argonne, Lawrence Berkeley, Brookhaven, Jefferson, Los Alamos a Oak Ridge. [49]

V pátek 28. dubna 2006, po sedmi letech výstavby (a utracení 1,4 mld. dolarů), SNS vyprodukoval první neutrony. [50] Oficiálně byl dokončen v květnu 2006 a má poskytovat nejintenzivnější pulzní neutronové svazky na světě pro vědecký výzkum a průmyslový rozvoj. SNS je zařízením pro výzkumné pracovníky z celého světa, zejména v oblasti výzkumu materiálů. Při použití deuteronu jako urychlované částice se ještě zlepší parametry neutronového pole generovaného v terči.

Projekt TIER

Tento projekt byl zahájen před několika lety v USA pod vedením Ch. Bowmana. V tomto projektu je transmutační systém založen na využití termálního spektra, blanket je podkritický ($k_{\text{ef}} = 0,96$), moderovaný grafitem a palivo se zde nachází ve formě roztavených fluoridů (nosič $\text{NaF} + \text{ZrF}_4$). Výkon transmutoru by měl být 750 MWt a bylo též spočteno, že tento systém by měl být schopen transmutovat odpad z lehkovodního reaktoru o výkonu 3000 MWt stejnou rychlostí, jakou tento odpad vzniká.

Neutrony potřebné pro provoz tohoto systému vznikají v olověném terči o průměru 50 cm. Průměr dopadajícího svazku protonů je 10 cm. Grafit obklopující terč zpomaluje vzniklé spalační neutrony dříve než dosáhnou blanketu. Byly také provedeny základní výpočty vyhoření v tomto systému. [14]

2.9.2 Japonsko

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI, Kashiwa) společně s High Energy Accelerator Research Organization (KEK, Tsukuba) spolupracují na projektu vysokoenergetického protonového urychlovače. Na tomto urychlovači se bude provádět výzkum v mnoha vědních oborech—struktura DNA a proteinů, jaderná a částicová fyzika, výzkum materiálů, jaderné transmutace a mnohé další. V budoucnu se zde budou také zkoumat vlastnosti spalačních terčů. [51]

Tento urychlovač byl navržen pro urychlování protonů na vysoké energie s variantou supravodivého (superconducting—SC) linacu s energetickým rozsahem urychlených částic 400–600 MeV. SC linac bude nejspíše v budoucnu použit jako injektor do 3 GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) pro spalační neutronový zdroj. [15] Uvažuje se též o 50 GeV zařízení (to má být použito hlavně pro výzkum transmutací). [12]

2.9.3 Korea

Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) vyvíjí ADS zvaný HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor). Výzkum na tomto projektu financovaném korejskou vládou začal v roce 1997 s plánem na 10 let. Návrh projektového řešení AZ zařízení HYPER je už téměř hotov. HYPER je projektován pro transmutace transuranů a některých štěpných produktů jako ^{129}I a ^{99}Tc . Má mít výkon 1000 MWt a $k_{\text{ef}} = 0,98$. Inventář transuranů činí asi 6,51 kg

a je v plánu přetransmutovat ročně 282 kg transuranů. V případě produktů štěpení budou ^{129}I a ^{99}Tc transmutovány v množstvích 7 a 27 kg/rok. Délka jedné kampaně má být 180 dnů.

Jako terčový materiál a zároveň chladivo je použita slitina Pb-Bi. Průměrná teplota chladiva na vstupu do AZ je 340 °C a na výstupu 490 °C. Maximální teplota pokrytí může bezpečně vystoupat až k 570 °C. Zjistilo se, že je potřeba 2,5 mm silné dělicí okénko, aby bylo možno udržet mechanickou zátěž. Také bylo vyvinuto a otestováno uranové náhradní palivo.

KAERI se připojilo do projektu MEGAPIE v roce 2001 kvůli výzkumu problematiky slitin Pb-Bi. KAERI také v roce 2003 instalovalo zařízení s nehybným Pb-Bi terčem na testování koroze a začalo s experimenty. Bylo v plánu dokončit v roce 2004 výstavbu korozní smyčky Pb-Bi. Testování ochrany oceli by mělo probíhat pomocí kyslíkové kontrolní metody; proto je nutné vyvinout kyslíkové sensory.

Výzkum ADS v KAERI se skládá ze tří částí:

1. základní koncept zařízení HYPER (1997–2000)
2. výzkum základních technologií zařízení HYPER a vylepšení původního návrhu (2001–2003)
3. dokončení koncepce AZ zařízení HYPER, průzkum klíčových technologií (2004–2006)

KAERI také spustilo v roce 2004 program I-NERI se zaměřením na výzkum korozivních vlastností slitin olova. [21]

Kapitola 3

Projekt SAD

3.1 Úvod

Pro zdárný rozvoj ADS je nutné detailně prozkoumat všechny aspekty této problematiky. Experimentální informace o chování takových systémů jsou zatím nedostatečné, proto je výstavba prototypů ADS (byť v malém provedení) prioritním úkolem, protože nemůže být dosaženo úplného pochopení vlastností chování takových zařízení jen na základě výpočtových modelů. Úkoly vyžadující řešení jsou následující:

- bezpečnost provozu takových systémů by měla pramenit přímo z jejich fyzikální podstaty
- výpočet a měření výkonu získaného v ADS
- volba vhodného paliva, typu terčíku a reflektorů
- návrh provedení AZ
- vývoj metod na spolehlivé sledování k_{ef}
- měření příspěvku vysokoenergetické ($E > 10$ MeV) části neutronového spektra, což je obzvláště důležité pro tvorbu spolehlivé radiační ochrany

V SÚJV (JINR—Dubna, Rusko) se provádějí experimentální a teoretické práce na elektrojaderné technologii už od poloviny 50. let 20. století. Zjišťuje se tam výtěžek neutronů a jejich spektrum v olovených a uranových terčících různých typů, měří se neutronové účinné průřezy pro množství izotopů, což je důležité pro odhad efektivitu různých módů transmutace, vytvářejí se matematické modely s příslušnými databázemi konstant a software pro výpočet vlastností elektrojaderných systémů. JINR má povolení pro provoz výzkumných jaderných reaktorů s aktivními zónami s kovovým plutoniem a oxidem plutonia. Tyto reaktory jsou provozovány spolehlivě a bezpečně už více než 35 let. JINR má také dlouhodobé zkušenosti s provozem protonových urychlovačů. Všechny výše zmíněné věci jsou dobrým základem pro výstavbu a následné použití experimentálního ADS s palivem MOX v Dubně. [19]

3.2 Cíle projektu

Účelem projektu je vývoj a výstavba experimentálního zařízení SAD s využitím urychlovače protonů s energií 660 MeV a podkritickým MOX blanketem s urano-plutoniovým palivem.

Současný návrh projektu tohoto zařízení v Dubně je založen na palivové části blanketu s nominálním tepelným výkonem 15–20 kW. To odpovídá koeficientu násobení $k_{\text{ef}} = 0,95$ a výkonu svazku urychlovače 0,5 kW. Základní otázky, které budou řešeny během uskutečňování projektu jsou následující:

- Návrh provedení a výstavba experimentálního prototypu podkritického systému řízeného protonovým urychlovačem SAD pro následnou realizaci širokého výzkumného programu.
- Studium charakteristik terčků produkujících těžké neutrony (neutronový výtěžek, spektrální a úhlová distribuce, složení a vlastnosti produktů interakce primárních protonů a částice jaderných kaskád s terčíkem).
- Vytvoření a testování technik měření a monitorování reaktivity, neutronových šumů a bezpečnosti založené na fyzikální podstatě celého systému.
- Úprava a testování relevantních počítačových kódů a databází užívaných pro výpočty charakteristik ADS.

Během uskutečňování tohoto projektu budou vytvořeny tyto hlavní komponenty plánovaného experimentálního zařízení:

- Podkritický systém založený na modernizovaných palivových elementech typu BN-600 s palivem MOX. Palivové elementy obsahují 27% PuO_2 a 73% UO_2 , průměrná hustota paliva je $10,2 \text{ g/cm}^3$. Obsah ^{239}Pu v PuO_2 není menší než 95%. Uran v oxidu UO_2 je ochuzený na 0,4% ^{235}U .
- Těžký vyměnitelný terčík (Pb, W, Pb-Bi).
- Urychlovač schopný urychlit protony na energii 660 MeV.
- Kanál pro transport svazku.

Po realizaci projektu zařízení SAD je plánováno uskutečnění dalšího výzkumného programu:

- Studium provozních vlastností podkritického systému v kombinaci s protonovým urychlovačem, vývoj technik měření a kontroly parametrů zařízení.
- Studium problémů terčíku a integrace podkritického systému, včetně vlivu velikosti terčíku a jeho pozice na hlavní charakteristiky zařízení SAD.
- Měření absolutních hodnot výkonového zisku zařízení—pro studování tohoto problému jsou nejvhodnější právě reaktory nízkého výkonu.
- Měření efektivity stínění (zvláště ve směru primárního protonového svazku).
- Analýza terčků produkujících neutrony po dlouhém ozařování protony, analýza speciálních vzorků (MA, LLFP) ozářených v experimentálních kanálech ADS (včetně radiochemické analýzy).
- Měření výtěžků transmutace pro MA a LLFP v odlišných neutronových spektrech.

3.3 Popis zařízení

3.3.1 Základní údaje

Základní vlastnosti zařízení SAD jsou určeny charakteristikami protonového urychlovače Fá-zotron v SÚJV a výběrem ruských palivových elementů (MOX) používaných v reaktorech typu BN-600. Protonový proud (max. $3,2 \mu\text{A}$) a odpovídající proud ztlumený ve spalačném terči určují společně s hodnotou koeficientu násobení AZ k_{ef} tepelný výkon celého zařízení. [52]

Základní informace o zařízení SAD, parametry urychlovače a charakteristiky paliva MOX jsou ukázány v následujících tabulkách:

Tabulka 3.1: Základní parametry zařízení SAD ([52], Table 2)

| | |
|--|-----------------------------------|
| Tepelný výkon | až 30 kW |
| Energie protonů | 660 MeV |
| Výkon svazku | až 1 kW |
| Protonový svazek / orientace terčiku | vertikální |
| Orientace palivových elementů | vertikální |
| Koeficient násobení | $k_{\text{ef}} = 0,95$ |
| Palivo | MOX, $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$ |
| Max. teplota pokrytí palivových elementů | 400 °C |
| Spalačnický terč | vyměnitelný (Pb, Pb-Bi, W) |
| Reflektor | Pb |
| Chladivo | vzduch |

Tabulka 3.2: Parametry svazku ([52], Table 3)

| | |
|---|---|
| Intenzita vyvedeného protonového svazku | $3,2 \mu\text{A}$ ($1,997 \times 10^{13}$ protonů/s) |
| Rychlé vyvedení | |
| Frekvence | 250 Hz |
| FWHM | 20 ms |
| Počet protonů v pulzu | $0,8 \times 10^{11}$ |
| Pomalé vyvedení | |
| Frekvence | 250 Hz |
| Šířka pulzu | 3500 ms |
| Mikrostruktura svazku | |
| FWHM mikropulzu | 10 ns |
| délka trvání mikropulzu | 70 ns |

Zařízení bude vybaveno experimentálními kanály, které umožní umístění detektorů a vzorků izotopů do různých částí zařízení a jejich vyjmutí po ozařování.

Tabulka 3.3: Základní parametry paliva pro zařízení SAD ([52], Table 4)

| | |
|--|------------------------------------|
| Složení paliva | UO ₂ + PuO ₂ |
| Obsah dioxidů plutonia v palivu | až 30% (přibližně) |
| Minimální obsah ²³⁹ Pu v Pu | 95% |
| Hustota paliva | 10,0–10,7 g/cm ³ |
| Průměr palivových pelet | 5,95 mm (přibližně) |

3.3.2 Palivo

Základní informace

Provedení palivových elementů pochází od paliva pro reaktory BN-600, jak ukazuje Obrázek 3.1.

Provozní podmínky:

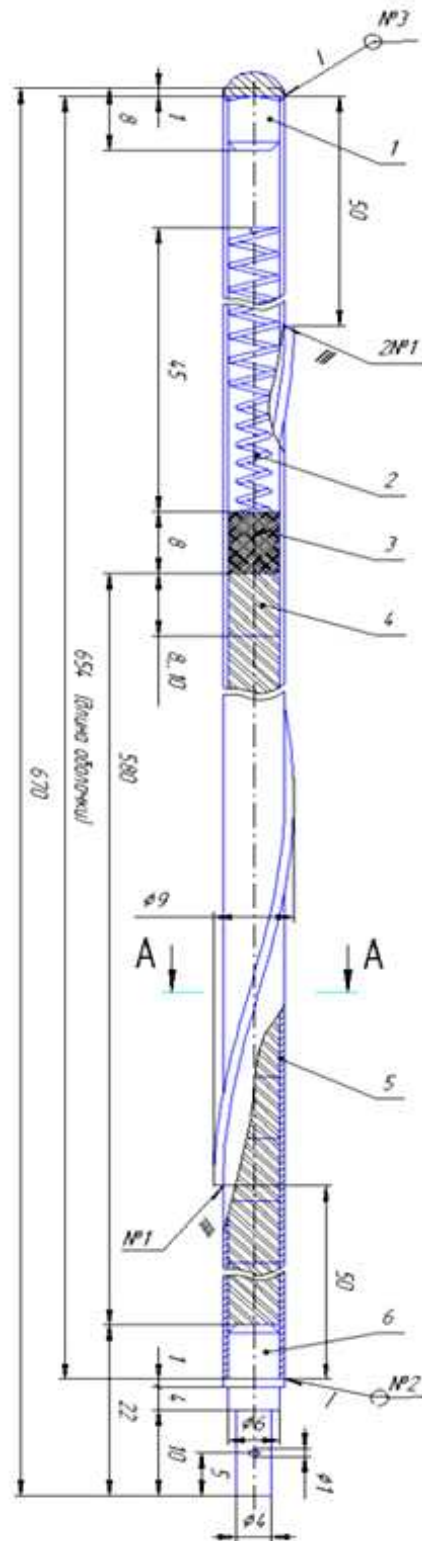
- Max. dávka pro konstrukční materiály palivových elementů: 0,25 dpa.
- Max. vyhoření paliva: 0,1% h.a.
- Max. lineární tepelný výkon palivového elementu: 0,275 kW/cm.
- Max. teplota pokrytí palivového elementu: 150 °C.
- Chladivo AZ: suchý, prachu zbavený vzduch.
- Max. teplota chladiva na výstupu z AZ: 125 °C.
- Zásoba paliva pro provoz zařízení na nominálním výkonu (27 kW): 10000 h.
- Střední doba pobytu paliva v reaktoru: 10 let.

Požadavky na výrobu palivových elementů:

- Uranové a plutoniové lisované palivové tablety, které jsou používány na výrobu paliva MOX pro BN-600.
- Konstrukční materiály standardních palivových elementů BN-600.
- Výroba palivových pelet MOX v zařízení „Mayak“.
- Kontrola kvality palivových elementů pomocí kontrolních procedur „Mayak“ a vybavení.
- Výroba součástí v MSZ JSC (JSC Mashinostroitelnny Zavod).

Parametry paliva SAD:

- Celkový podíl hmoty U a Pu dohromady není menší než 87,6%.
- Předpokládaná hmota ²³⁹Pu v dioxidu Pu není menší než 95%.
- Předpokládaná hmota ²³⁵U v dioxidu U není větší než 0,7%.



Obrázek 3.1: Řez palivovým elementem ([52], Figure 1)

Legenda: 1—čepička; 2—uzávěr; 3—porézní ucpávka; 4—palivová peleta; 5—pokrytí;
6—patka; 7—polohovací drátek.

- Předpokládaný podíl hmoty Pu ku U a Pu dohromady $30 \pm 0,3\%$.
- Podíl kyslíku 1,98.
- Hustota $10,4 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$.
- Velikost zrna není větší než $70 \text{ }\mu\text{m}$.

Nyní věnujme několik slov nečistotám v palivu. Obsah Fe v palivu je max. 0,03% a podíl Al, Ca, Mg, Si, Ni, Cr nepřesáhne 0,02%. Koncentrace N a C nepřestoupí 0,01%; podíl F a Cl dokonce nepřesáhne ani 0,005%.

Vývoj technologie produkce práškového dioxidu plutonia v keramické kvalitě

V souhlase s Usnesením č. 2267 (Projekt SAD), FGUP „PO Mayak“ provedly práce za účelem získání práškového PuO_2 keramické kvality, včetně vývoje filtrování a módů vyhřívání plutoniového oxalátu. Plutoniový oxalát byl zahříván ve vrstvách 40–50 mm silných prouděním vzduchu o teplotě 600–750 °C po dobu 6–8 hodin.

Na základě dokončených pokusů byly doporučeny následující vyhřívací módy:

- Ohřívací teplota: 750 °C.
- Ohřívací doba: 6 h.
- Množství vyměňovaného vzduchu: 150 l/h.

Ke splnění celého rozsahu programu SAD na produkci paliva MOX bylo vyprodukováno okolo 250 kg dioxidu plutonia.

Naměřená data o fyzikálních a chemických parametrech získaného práškového PuO_2 byla odeslána VNIINM a SÚJV. Ve výsledku VNIINM vybralo části dodávky a vyčlenilo je—vzhledem k jejich složení—pro produkci paliva MOX (Agreement Protocol of IA „Mayak“ č. 20-256 z 1. dubna 2004).

Výzkum fyzikálních a chemických vlastností vyčerpaného dioxidu uranu

Výzkum možného využití vyčerpaného dioxidu uranu s překročenou dobou skladování byl prováděn v laboratorních podmínkách a na zařízení „Paket“.

Byly určeny fyzikálně-chemické parametry práškového UO_2 :

- Specifický povrch: $4 \pm 0,5 \text{ m}^2/\text{g}$.
- Index kyslíku: $2,10 \pm 0,02$.
- Hustota substrátu: $2,25 \text{ g/cm}^3$.

Vlhkost prášku se mění v závislosti na ročním období, a pravděpodobně i na kvalitě balení v rozmezí od 0,45 do 1,1 % (obsah vody).

Byl proveden test spékavosti vyčerpaného uranového prášku a ukázal možnosti jeho dalšího využití v produkčních technologiích paliva MOX. Také byla podána doporučení na opravné zahřátí vyčerpaného dioxidu uranu dostupného v IA „Mayak“.

Laboratorní ověření spékavosti získaného práškového dioxidu plutonia s vyčerpaným dioxidem uranu

Schopnost získaného práškového PuO_2 být spečen s vyčerpaným dioxidem uranu byla zkontrolována v laboratorních podmínkách. Hustota palivových pelet MOX ($\text{UO}_2 + 30\% \text{PuO}_2$) po spékání byla rovna $10,3 \text{ g/cm}^3$.

Byl též vypracován program provádění experimentálních prací na produkci palivových pelet MOX na zařízení „Paket“ pro jaderné zařízení SAD.

Tovární příprava na výrobu kalibračních zařízení pro palivové pelety MOX

Protože se v souvislosti s tímto projektem uvažuje o palivu MOX s plutoniovým obohacením 30% (dříve se vyrábělo palivo s 25% obohacením), bylo nezbytné udělit povolení továrně pro takový druh činnosti. IA „Mayak“ připravil a poslal GAN RF (jaderná dohledná agentura) žádost o udělení povolení k produkci paliva MOX na zařízení „Paket“.

Po předložení dokumentů vydal úřad (GAN) 16. ledna 2004 první dodatek ke stávající licenci. Informace o plánovaných pracích na zařízení „Paket“ byla odeslána příslušným úřadům.

Poté, co vzaly úřady v úvahu zasláné dokumenty, bylo uděleno povolení provádět experimentální výzkumné práce zaměřené na technologii produkce paliva MOX na zařízení „Paket“.

Množství dokumentů, které SÚJV odeslal, bylo posouzeno a odsouhlaseno na základě:

1. dodatku ke smlouvě o projektu č. 2267 mezi SÚJV a FGUP „IA Mayak“
2. protokolu o rozložení zodpovědnostních zón mezi organizace spolupracujících na projektu SAD
3. specifikace požadavků

Byly vzneseny připomínky na konstrukční směrnice pelet paliva MOX a postup technické realizace palivového elementu pro zařízení SAD.

Vyčerpaný dioxid plutonia s překročenou dobou skladování prošel ověřovací zkouškou pro ověření shody s technickými podmínkami Technical Conditions 95.213-80.

Byla pořízena výkresová dokumentace pro tlakové nástroje a technologické vybavení, též byly vyrobeny předprodukční modely. Následovaly primární testy tlakových nástrojů (tlakové zkoušky) a experimentálních operací ve výrobě pelet paliva MOX.

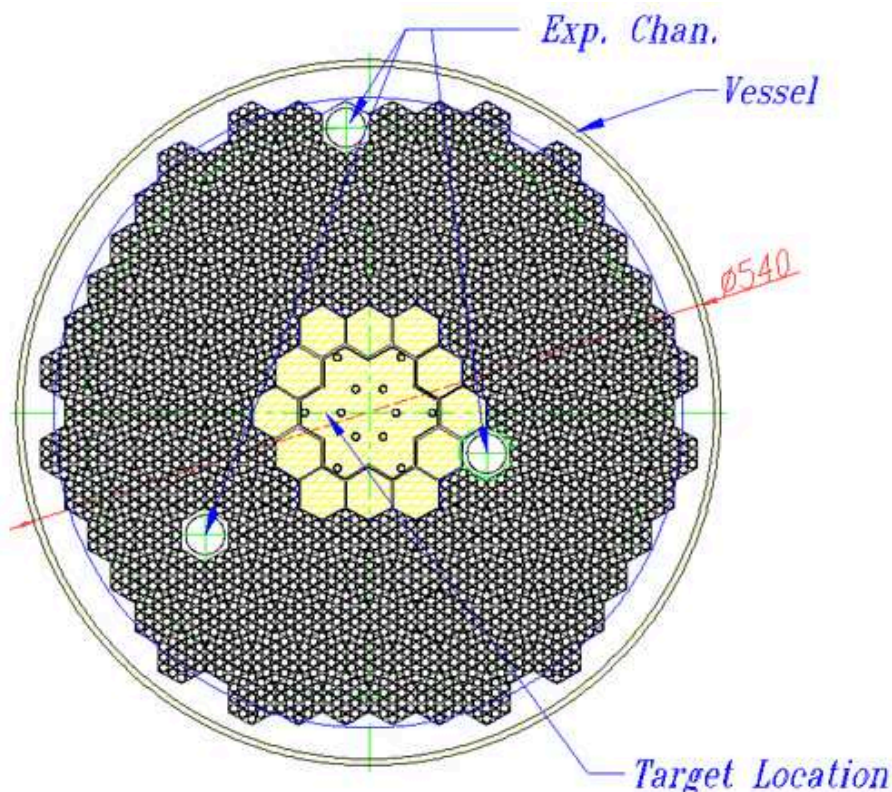
3.3.3 Podkritický systém

Podkritický blanket zařízení SAD je umístěn uvnitř biologického stínění, které je z těžkého betonu a nachází se v radiální a vrchní části směrem od aktivní zóny (AZ). Umístění trubek je předpokládáno ve stínících blocích, aby bylo zajištěno dobré rozvržení chladicích smyček terčíku, aktivní zóny, experimentálních kanálů (vertikálních a horizontálních), kanálů kontroly výkonu, vedení svazku atd. Horní část biologického stínění umožní přístup k blanketu a k experimentálním kanálům během manipulací s palivem a kvůli experimentům s detektory a vzorky.

Aktivní zóna zařízení SAD sestává z 141 palivových kazet, z nichž každá obsahuje 18 palivových proutků, oddělených pomocí drátků navařených na jejich pokrytí spirálovitým způsobem. Palivová kazeta nemá boční stěny, pouze dolní a horní rámečky, ke kterým jsou při-

chyceny palivové elementy. Celistvost je dosažena pomocí centrální podpůrné tyče z nerezové oceli.

Díky malé produkci energie umožňuje tento systém použití vzduchového chlazení, jak pro terčik, tak i pro aktivní zónu. Průřez aktivní zónou je zobrazen na Obrázku 3.2.



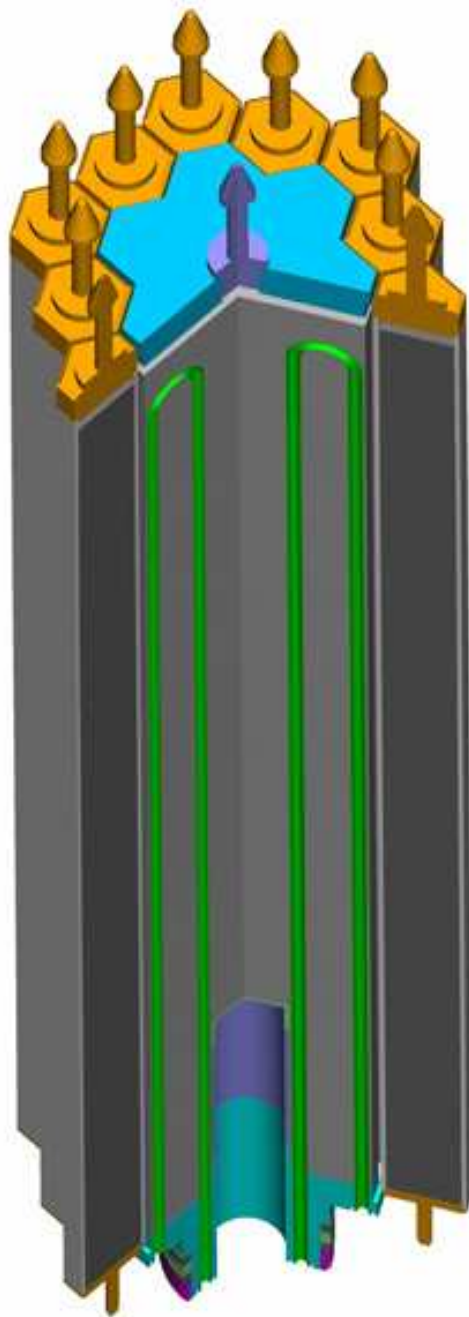
Obrázek 3.2: Průřez podkritickou AZ zařízení SAD ([52], Figure 4)

Parametry navrhované AZ jsou uvedeny v Tabulce 3.4. Nutno ovšem podotknout, že specifikace terčiku se týká jeho prvního provedení. Bude vyměnitelný kvůli výzkumu různých velikostí a materiálů.

První terčikový systém se skládá ze sady hexagonálních olověných hranolů a centrálních 7 je chlazen vzduchem (Obrázek 3.3). Jiné materiály než olovo a jiné rozměry budou použity pro terč v rámci experimentálního programu projektu SAD.

Aktivní zóna je obklopena olověným reflektorem o tloušťce 60 cm v radiálním směru a 20 cm v axiálním směru nahoře a dole. Hustota oceli je $11,15 \text{ g/cm}^3$. Mezi olověným reflektorem a betonovým stíněním v radiálním směru se nachází vrstva B_4C o tloušťce 3 cm, která slouží ke snížení počtu nízkoenergetických neutronů absorbovaných v betonu. Celkový pohled na AZ zařízení SAD bez reflektorů je na Obrázku 3.4.

Na základě výše uvedených dat byla pomocí MCNP vypočtena předběžná neutronová spektra v experimentálních kanálech. Výsledky pro 3 kanály v palivové části AZ (1–3) a pro 3 vertikální kanály v bočním reflektoru (4–6) jsou ukázány na Obrázku 3.5. Kanály jsou číslovány vzestupně podle vzdálenosti od terčiku.



Obrázek 3.3: První terčkový systém skládající se ze sady hexagonálních olověných hranolů, centrálních 7 chlazených vzduchem ([52], Figure 5)

Tabulka 3.4: Parametry navrhované AZ SAD ([52], Table 6)

| system | parametr | hodnota |
|------------------|--|--------------------------|
| terčik | počet elementů | 19 hexagonálních hranolů |
| | materiál | olovo |
| | krok mříže | 36 mm |
| | mezera mezi hranoly | 1,5 mm |
| | výška | 60 cm |
| AZ | počet palivových kazet | 141 |
| | počet palivových elementů v jedné kazetě | 18 |
| | hustota paliva | 10,2 g/cm ³ |
| | obsah dioxidu plutonia v palivu | 29,5% |
| | obsah ²³⁵ U v uranu | 0,4% |
| palivový element | krok mříže | 7,95 mm |
| | průměr trubky pokrytí | 6,9 mm |
| | tloušťka trubky pokrytí | 0,4 mm |
| | průměr palivové pelety | 5,95 mm |
| | výška paliva | 58 cm |

3.3.4 Stavební přípravy a řešení

Předběžné technické a ekonomické odhady vykonané během přípravy návrhu ISTC ukázaly, že zařízení SAD může být umístěno v nové budově, která bude stát na volném prostranství mezi existující budovou urychlovače a stávajícími hospodářskými staveními (Obrázek 3.6).

Celkový plán zařízení počítá s injekcí svazku zezdola, takže protonový svazek bude zahřívát terčik zespodu a je nezbytné mít dobře dimenzované stínění ve směru svazku, tj. v horní části nad terčikem. Vlastnosti biologického stínění budou určeny nejvyššími energiemi neutronů.

Horizontální svazek přicházející z Fázotronu je nejprve odchylen o 20° dolů do urychlovačové haly, tam se otáčí o 110° do budovy zařízení SAD a dopadá zespodu na terčik nacházející se uvnitř blanketu. Tato konstrukce dovoluje vyhnout se bezpečnostním problémům s možnou havárií vnikem vody, která by mohla nastat v případě injekce svazku z horní strany a s chladičí vodou na ohýbacích magnetech nad podkritickou AZ (Obrázek 3.7).

Hlavní parametry zařízení SAD jsou v Tabulce 3.5.

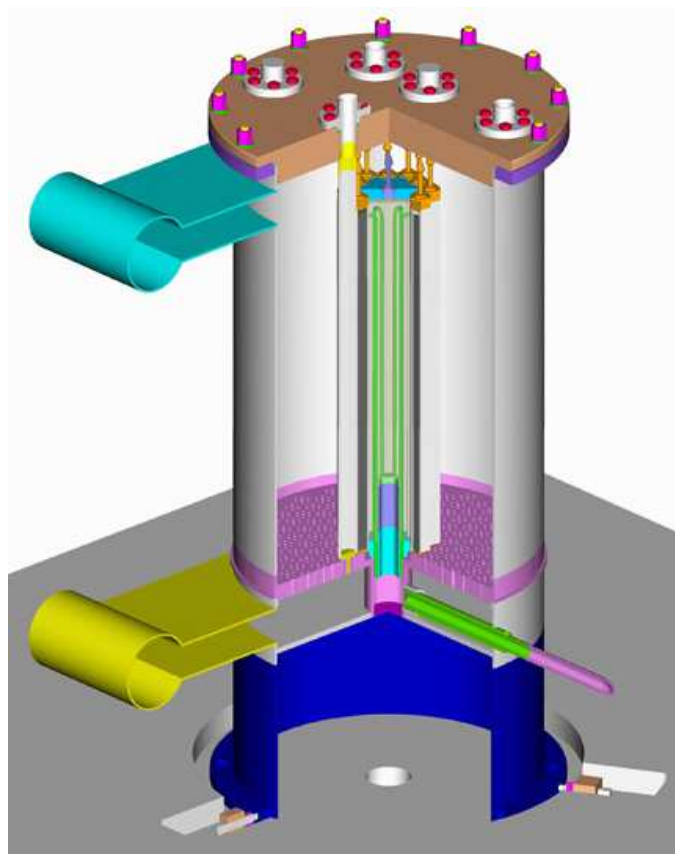
3.3.5 Zařízení na vedení svazku

Protonový urychlovač Fázotron v SÚJV má 10 svazkových kanálů užívaných pro nejrůznější experimenty. Ztráty normálního svazku při průchodu nejdělsími cestami nepřekročí 5%.

V transportním systému svazku budou použity magnety typu OM-1 a kvadrupólové čočky typu ML-3. Tyto standardní magnetické prvky byly navrženy a vyrobeny v mnoha kopiích během využívání urychlovače Fázotron.

Přesun svazku z horizontální do vertikální roviny bude uskutečněn pomocí dvou silných ohýbacích magnetů, které musejí být navrženy a zkontruovány.

Celkový počet magnetických prvků na trase svazku je okolo 40, když počítáme i diagnostické prvky a korekční magnety. Proud svazku a jeho prostorové rozdělení bude monitorováno v různých místech podél jeho trasy pomocí indukčních sensorů, ionizačních komor a zařízení

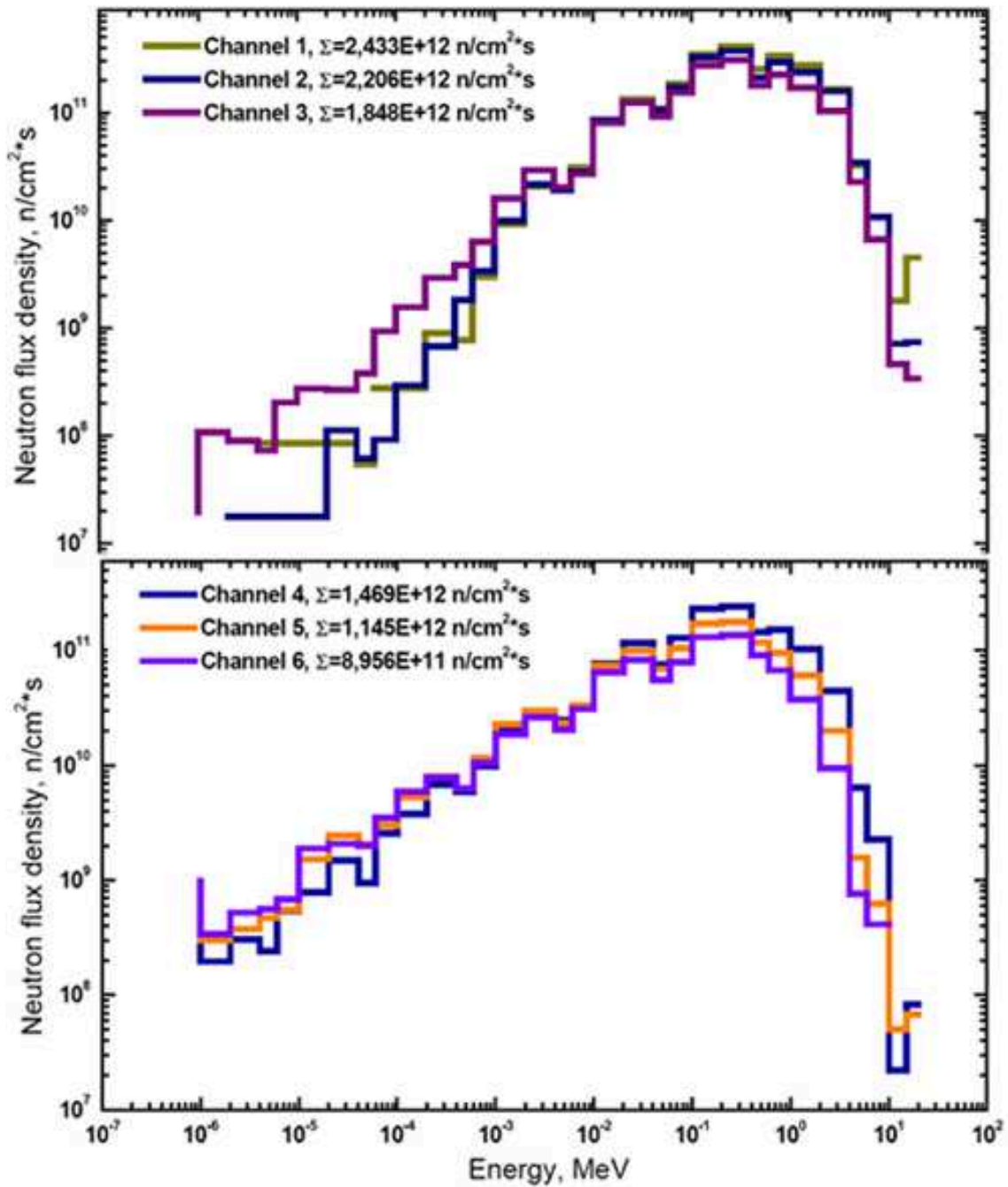


Obrázek 3.4: Celkový pohled na AZ zařízení SAD bez reflektorů ([52], Figure 6)

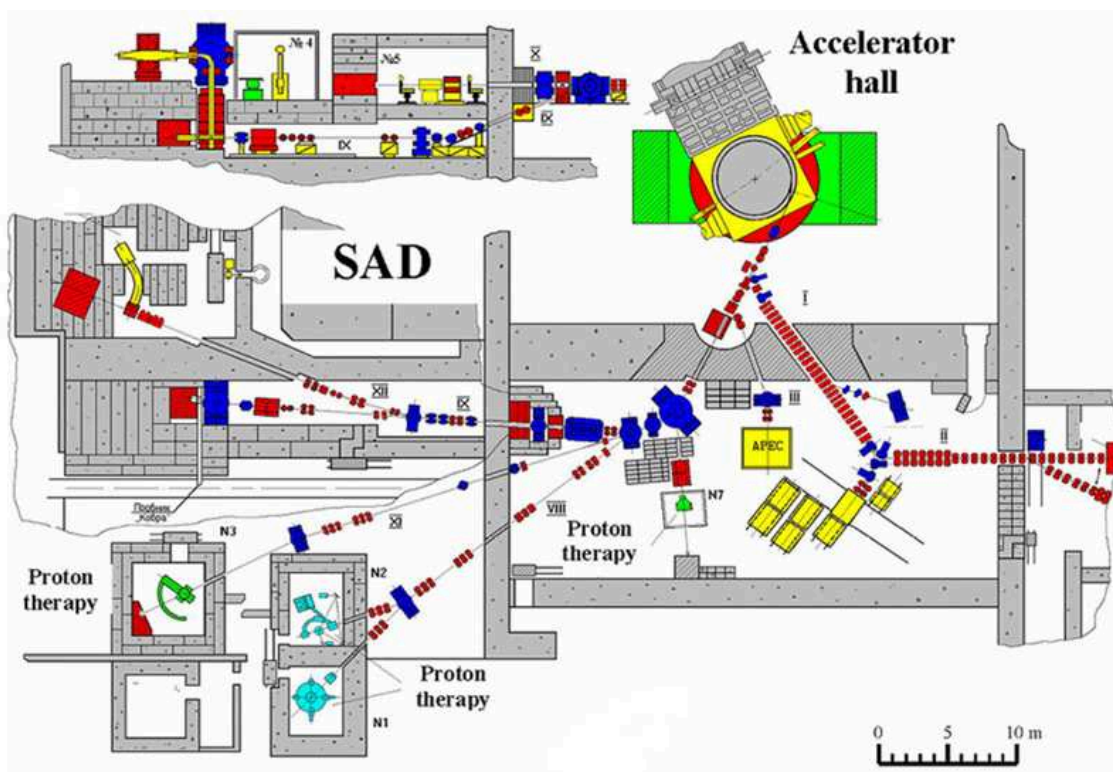
Tabulka 3.5: Kvalitativní charakteristika zařízení SAD ([52], Table 7)

| parametr | hodnota |
|-----------------------------------|---------------------|
| zastavěná plocha | 350 m ² |
| celková plocha | 950 m ² |
| obestavěný prostor | 8300 m ³ |
| objem betonu (biologické stínění) | 1900 m ³ |
| ocelové stínění | 290 t |
| objem těžkého betonu (=3,6 a 4,5) | 25 m ³ |
| objem stínící zeminy | 2000 m ³ |
| objem vykopané zeminy | 4000 m ³ |
| objem betonové podezdívky | 250 m ³ |

na měření profilu svazku. Proud svazku bude měřen s vysokou přesností, což je dobrým předpokladem pro kvalitní experimentální pozorování závislosti výkonu AZ na výkonu svazku. [20]



Obrázek 3.5: Vypočtená předběžná neutronová spektra pro exp. kanály ([52], Figure 7)



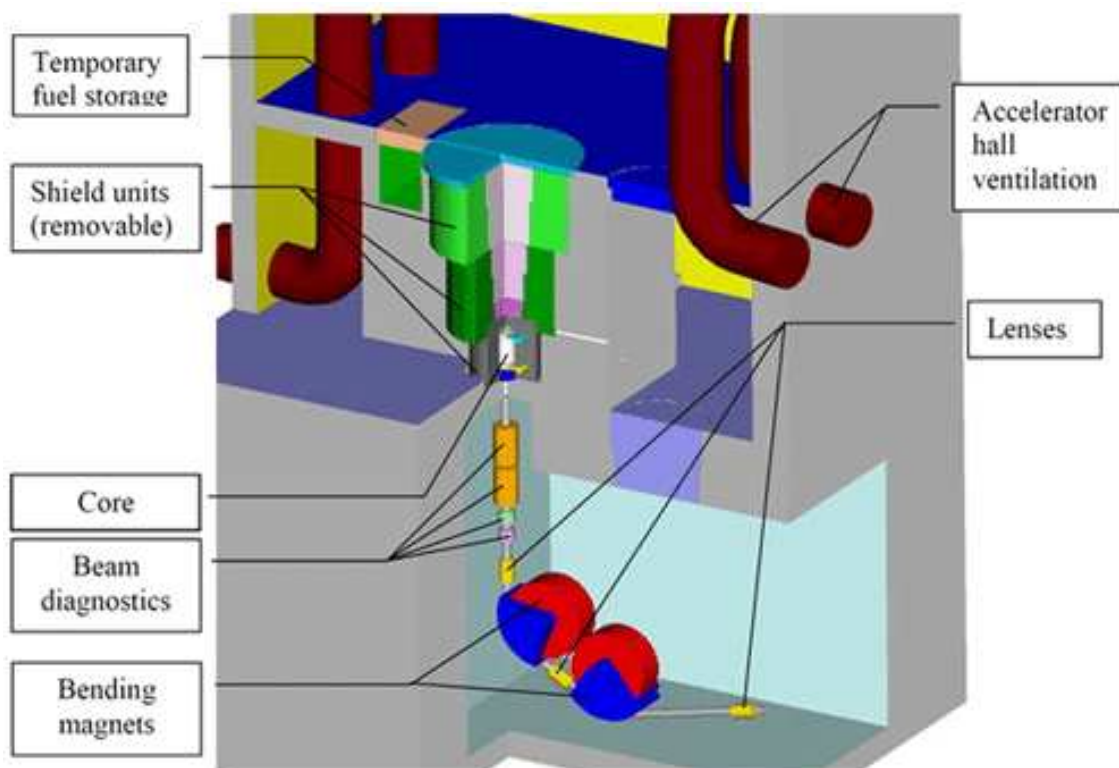
Obrázek 3.6: Plán areálu urychlovače Fázotron (v levém horním rohu boční pohled na neutron-mesonový terapeutický komplex) ([52], Figure 8)

3.3.6 Experimentální program

V současnosti ještě není k dispozici detailní přehled budoucího experimentálního programu, protože ne všechny parametry zařízení jsou pevně dány. Přesto můžeme uvést hlavní zamýšlené experimentální směry:

- Měření reaktivity a její monitorování.
- Měření neutronových charakteristik v AZ: spektrální hustota neutronového toku, rozložení výkonu v různých částech zařízení, doba života okamžitých neutronů, efektivní podíl zpožděných neutronů.
- Měření rychlostí štěpení minoritních aktinidů, uranových a plutoniových izotopů.
- Měření výtěžků transmutace dlouhožijící štěpných produktů.
- Měření spalačního výtěžku uvnitř terčíku.
- Studie zpětných vazeb reaktivity.

Důležitou činností bude příprava podmínek srovnávacích testů pro porovnávání experimentálních dat s výsledky výpočtů za účelem ověření a úpravy počítačových kódů.



Obrázek 3.7: Vnitřní uspořádání budovy zařízení SAD ([52], Figure 9)

3.3.7 Očekávané výsledky a jejich aplikace

V 1. fázi projektu (návrh projektu a technologická příprava) byla vytvořena projektová dokumentace, která je nezbytná pro získání licencí od příslušných státních institucí. Také byly vyčísleny náklady.

Během technologické části 1. fáze byla v technickém projektu vyvinuta technologie výroby palivových elementů. Souběžně s tím byla u současného ISTC projektu vyrobena a certifikována nultá série (3–5kg) palivových pelet, což jedině potvrzuje to, že hromadná výroba palivových elementů a kazet může být realizována během 1,5–2 let, jak bylo předpovídáno ve 2. fázi projektu (výstavba zařízení).

V soulase se současným plánováním by mělo být experimentální zařízení SAD první technickou realizací urychlovačem řízeného podkritického systému nízkého výkonu, skládajícího se ze všech neodmyslitelných komponent projektovaných a vyhrazených jaderných systémů určených ke spalování minoritních aktinidů a dlouhijících štěpných produktů, vyprodukovaných během vývoje jaderné energie; jmenovitě protonový urychlovač, spalační terčik a podkritická AZ pracující s rychlými neutrony.

3.3.8 Spolupracující instituce

Vedoucí instituce:

International Intergovernmental Organization Joint Institute for Nuclear Research (JINR,

Dubna, Russia)

Další spolupracující instituce:

- Federal State Unitary Enterprise Research and Development Institute of Power Engineering (NIKIET—ruská zkratka)
- Industrial Association „Mayak“
- Federal State Unitary Enterprise State Special Project Institute (GSPI—ruská zkratka)
- Russian Scientific Research Institute of Inorganic Materials (VNIINM—ruská zkratka)

Zahraniční spolupráce:

- Kungliga Tekniska Hogskolan—KTH, Nuclear and Reactor Physics, Dr. Wacław Gudowski
- Forschungszentrum Karlsruhe—FZK, Institut für Reaktorsicherheit, Dr. Cornelis Broeders
- Centro de Investigaciones Energeticas Medioambientales y Technologies—CIEMAT, Dr. Enrique Miguel Gonzalez Romero
- Commissariat l’Energie Atomique—CEA, Cadarache, Dr. Frederic Mellier

3.4 Současný stav projektu

Technický návrh zařízení SAD byl dokončen a připravuje se zpráva o bezpečnostní analýze. Technologie výroby palivových pelet byla dokončena a použita k výrobě první experimentální dávky palivových pelet.

Projekt SAD je tedy v principu připraven na licencování a následnou realizaci. Jestliže nenastanou žádné komplikace, první proton může být vystřelen na spalační terč v roce 2010.

Srovnáme-li původní plány (viz [52]) se současným stavem (viz [20]), dojdeme k závěru, že projekt je opožděn přibližně o 1,5 roku. To ovšem není u projektů takových zařízení, jako je SAD, nic neobvyklého.

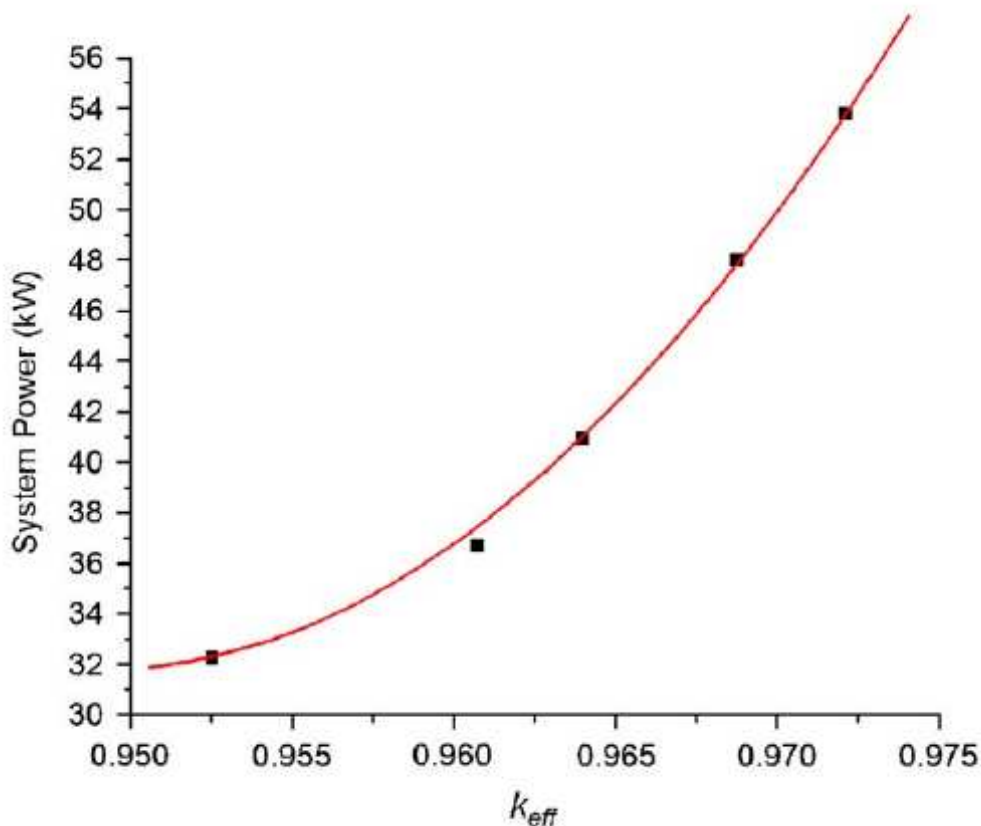
Jedním z důvodů zdržení je jistě i požár, ke kterému došlo v březnu 2005. Od zkratu na elektroinstalaci se vzhály kabelové trasy a vlivem vysokých teplot se různě pokřivily a poškodily systémy vedení svazku a jeho vývodů do experimentálního sálu. Urychlovač zůstal nepoškozen. Prioritou je opravit vývody k medicínskému použití, a pak se věnovat projektu SAD. [10]

3.5 Dosavadní výsledky výzkumu

3.5.1 Klíčové parametry zařízení SAD a podpůrné experimenty

Bylo provedeno mnoho simulací pomocí kódů MCNPX [23] a LAHET [18] za účelem volby optimálních parametrů pro SAD. Uvažovaly se různé kombinace materiálů terčiku, paliva a reflektoru. Obzvláště byl studován tepelný výkon podkritické AZ řízené 1 kW protonovým svazkem jako funkce k_{ef} , jak je ukázáno na Obrázku 3.8.

Obrázek 3.9 navazuje na předchozí, a sice ukazuje neutronový tok v experimentálním kanálu jako funkci k_{ef} při výkonu protonového svazku 1 kW.



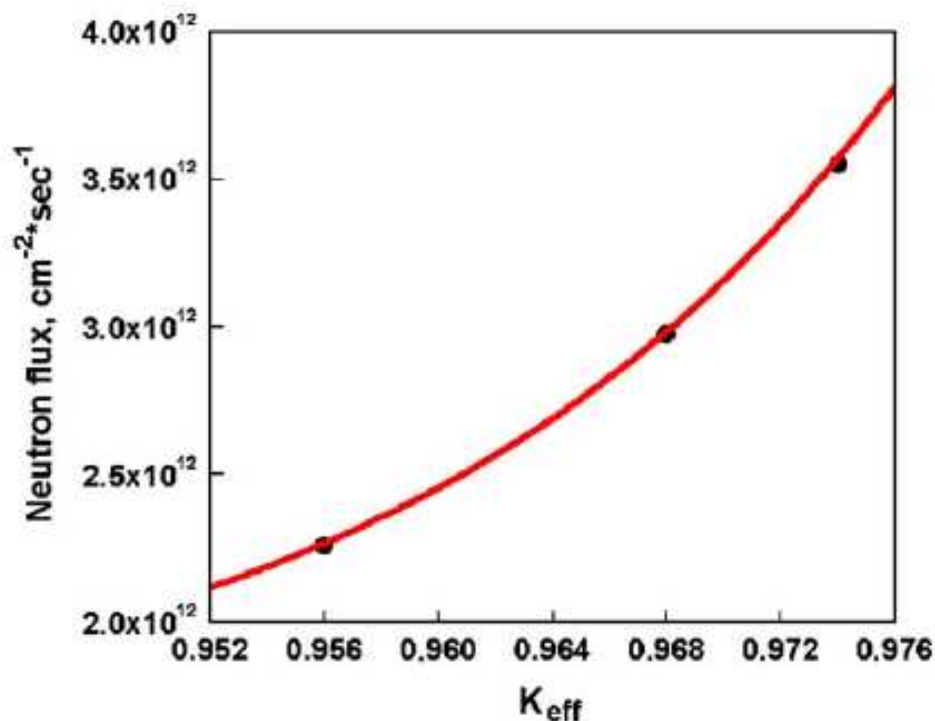
Obrázek 3.8: Výkon AZ jako funkce k_{eff} při použití protonového svazku o výkonu 1 kW ([4], Fig. 1)

3.5.2 Vývin tepla a neutronový tok v terčiku a experimentálních kanálech pro různé materiály terčiku a jeho různé pozice v podkritickém systému

Zvláštní pozornost ve výzkumném programu projektu SAD bude věnována ověřování vztahu výkonu AZ s proudem svazku jako hlavního nástroje pro sledování podkritičnosti tohoto zařízení.

Proud svazku a jeho tvar budou monitorovány v různých místech trasy svazku, jak bylo již popsáno v oddíle 3.3.5. Tvar průměrného profilu svazku je na Obrázku 3.10.

Hladina výkonu zařízení SAD bude sledována ve dvou vyhrazených kanálech se třemi neutronovými sensory (vysoce-citlivá štěpná komora, nízko-citlivá štěpná komora, borová proudová komora). Dodatečné neutronové detektory mohou být také instalovány v experimentálních kanálech. SAD byl od počátku navrhován jako vysoce přesné ověřovací a testovací zařízení pro simulační kódy ADS. Každý palivový element, „weapon grade“ Pu-MOX bude mít svůj vlastní certifikát s přesným izotopickým složením paliva. Konstrukční materiály budou také certifikovány. Toto zařízení tak bude představovat unikátní příležitost pro precizní modelování tohoto podkritického systému a ověřování nebo testování výpočtových kódů.



Obrázek 3.9: Závislost neutronového toku v experimentálním kanále na k_{ef} ([4], Fig. 2)

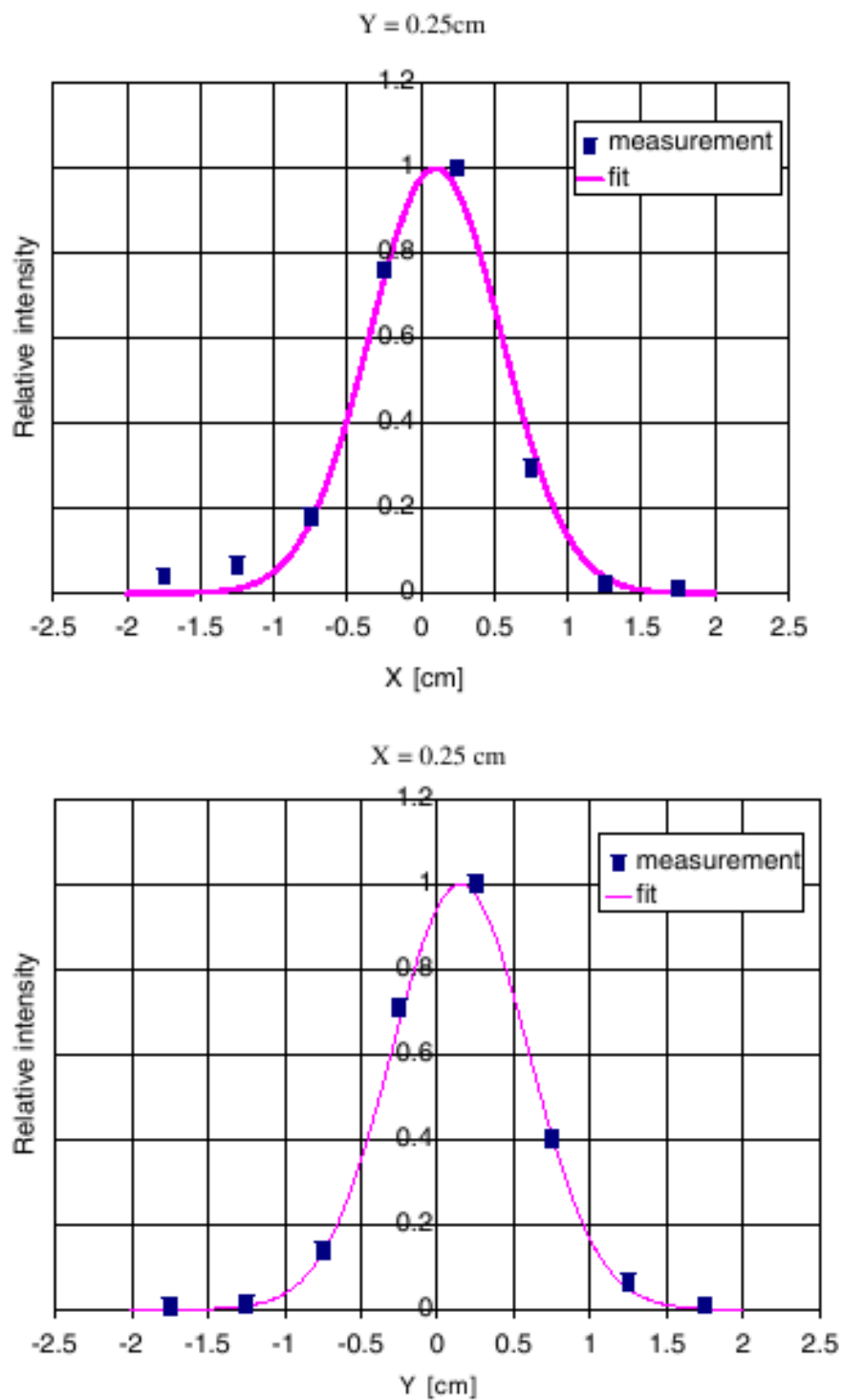
Pro měření prostorových a energetických charakteristik neutronového pole uvnitř podkritického systému budou terčik i blanket vybaveny prahovými aktivačními detektory (fóliemi). Pro průzkum vysokoenergetické části neutronového spektra budou stanoveny absolutní reakční rychlosti pro fólie z ^{12}C , ^{27}Al , ^{59}Co , ^{63}Cu , ^{115}In , ^{197}Au a ^{209}Bi .

K měření (n, γ) reakční rychlosti v tepelné a rezonanční oblasti (do 1 MeV) bude také použita vícesložková slitina $^{55}Mn + ^{63}Cu + ^{197}Au + ^{176}Lu$.

Následující spektrální indexy neutronového pole budou měřeny pomocí ^{235}U , ^{239}Pu a ^{238}U :

- $^{235}U(n,f)/^{238}U(n,\gamma)$
- $^{239}Pu(n,f)/^{235}U(n,f)$
- $^{238}U(n,f)/^{235}U(n,f)$

Také je v plánu vybavit spalační terčik zařízeními registrující výtěžky spalačních produktů v kombinovaném proton-neutronovém poli. Zvláště bude navržena a postavena heliová smyčka procházející terčikem v různých vzdálenostech od místa vstupu svazku. Odražené spalační produkty budou pronikat do této smyčky a procházet společně s proudem He γ -spektroskopickou aparaturou analyzující izotopické složení a absolutní hodnoty aktivit spalačních produktů. Extrémně krátký čas potřebný k průchodu této trasy (1–5 s) dovolí měřit produkty s velmi krátkým poločasem rozpadu s dobrou přesností. Tomuto zařízení se říká Helium-Jet.



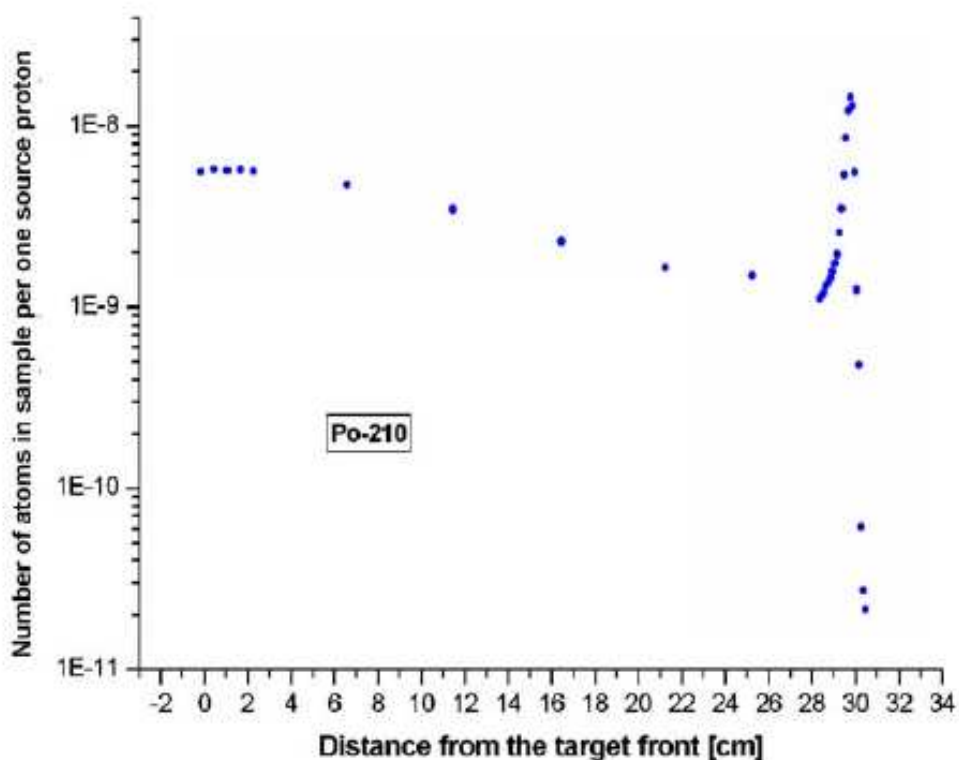
Obrázek 3.10: Průměrný profil protonového svazku v různých průřezích X,Y ([4], Fig. 3)

3.5.3 Radioaktivita vyvolaná v terčiku

SAD bude mít výměnný spalační terčik, uvažovány jsou varianty Pb a W v různých velikostech. Budou měřeny rychlosti štěpení aktinidů pro různé izotopy. Pro detekci štěpných produktů budou použity pevnolátkové trackové detektory (SSNTD), které využívají své odolnosti vůči radiaci. V každém měření bude jedna sada obsahující studovaný izotop a trackový detektor umístěna v určených místech uvnitř AZ společně s podobnou sadou skládající se z detektoru stejného typu a monitorovacího izotopu (^{235}U nebo ^{239}Pu).

Aby byly dobře připraveny odpovídající experimentální techniky pro zařízení SAD, byla provedena předběžná měření pomocí aktivačních detektorů z ^{12}C , ^{27}Al , ^{59}Co , ^{63}Cu , ^{115}In , ^{197}Au , ^{209}Bi s Pb a W terčíky.

Některé nuklidy byly vybrány pro kvantitativní vyhodnocení a studium jejich axiálního rozdělení uvnitř Pb terčiku. Výsledky pro ^{210}Po ukazuje Obrázek 3.11.



Obrázek 3.11: Rozložení aktivity ^{210}Po ve vzorcích ^{209}Bi podél Pb terčiku ozařovaného 660 MeV protony ([4], Fig. 5)

3.5.4 Kinetika zařízení SAD

Jeden z nejdůležitějších úkolů studií podkritických systémů je měření a monitorování reaktivity ve zvlášť hluboké podkritičnosti.

Uvažuje se o speciálních experimentech s metodou fast neutron pile (měřením odezvy pulzu (harmonické charakteristiky) se měří reaktivita, používá se rychlý pulzní generátor ne-

utronů) na existující BFS v Obninsku v konfiguraci podobné zařízení SAD s malým pulzním neutronovým generátorem (PNG— 10^8 n/s, šířka pulzu $1 \mu\text{s}$, frekvence 20 Hz). Experimenty budou prováděny od referenční kritické konfigurace směrem dolů k hluboké podkritičnosti. Na základě těchto experimentů budou vyvinuty experimentální techniky soustředící všechny zkušenosti z experimentů MUSE, YALINA a experimentů s reaktorem IBR-30 v SÚJV. Experimentální technika vytvořená během experimentů na BFS bude přenesena přímo na zařízení SAD a aplikována během fyzikálního spouštění.

3.5.5 Radiační ochrana a problematika stínění vysokoenergetických neutronů a protonů

Spalační neutronový zdroj řízený 660 MeV protonovým svazkem generuje neutrony o energiích, které dosahují velikostí energií dopadajících protonů, a proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost problematice stínění. Zde nastíníme některé možnosti pro experimenty zaměřené na tuto problematiku:

1. Aktivační metody založené na jednoduchých reakcích jako např. $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{209-x}\text{Bi}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ a spalačních produktech na ^{197}Au terčíku.
2. Pro měření neutronového spektra a úbytku vysokoenergetických neutronů jsou uvažovány aktivační detektory zabudované v různých místech betonového stínění.
3. Pro měření spektra vysokoenergetických neutronů za stíněním se uvažuje o metodě „odrazu“.
4. V různých místech mohou být použity Bonnerovy sféry.

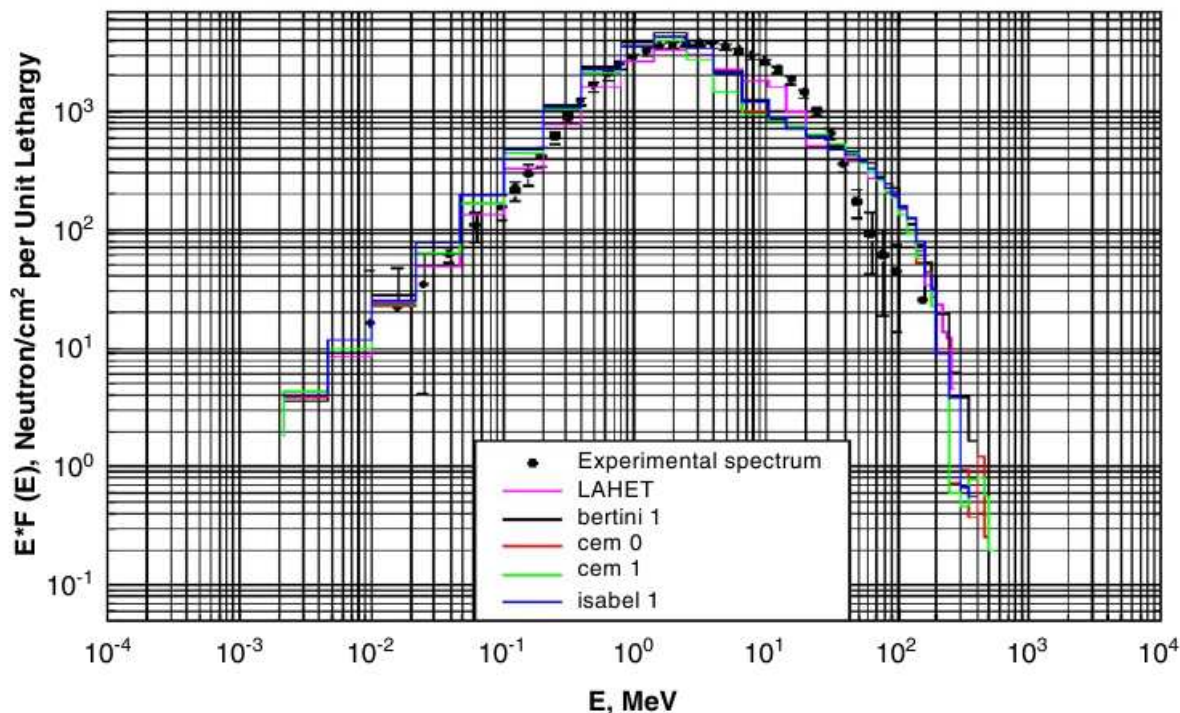
Příklad měření neutronového spektra okolo Pb terčíku pomocí metody Bonnerových sfér je na Obrázku 3.12.

Můžeme konstatovat, že pro tento typ experimentů se rozdíly mezi různými vysokoenergetickými transportními modely používanými v kódech LAHET a MCNPX zdají být velmi malé, a že je potřeba mnohem více přesných měření a lepších statistik v simulacích, aby bylo možno učinit závěry o výkonnosti specifických modelů. Toto je v principu dobrá zpráva pro ty, kdo se zabývají simulacemi ADS, a sice že neutronové výtěžky a jejich spektra ve vysokoenergetické oblasti nejsou příliš citlivá vůči různým modelům používaných pro vysokoenergetické transportní simulace. [4]

3.5.6 Možnost zvýšení výkonu zařízení SAD

Od počátku byla velká pozornost věnována problematice vyměnitelného terčíku a podkritické soustavě různých úrovní podkritičnosti. Byly zkoumány terčíky z různých materiálů (W, Pb, Be). Pro každou konfiguraci byl též vypočten energetický zisk. Tyto simulace byly prováděny pomocí kódů Dubna CASCADE a MCNPX. Bylo zjištěno, že zvětšení koeficientu násobení z hodnoty 0,952 na 0,972 může vést ke zvýšení výkonu zařízení SAD až na 100 kW. Toho může být dosaženo dvěma způsoby:

1. Výměnou centrální části oloveného terčíku za wolframovou část a nahrazením poslední vrstvy oloveného terčíku beryliem. Současně by bylo třeba zvýšit výkon dopadajícího svazku na 2 kW.



Obrázek 3.12: Porovnání experimentálních výsledků z měření neutronových spekter pod specifickým úhlem s počítačovou simulací LAHET a MCNPX používající různé možnosti vysokoenergetických interakcí ([4], Fig. 6)

2. Nahrazením poslední vrstvy olověného terčíku palivovými kazetami a výměnou centrální části olověného terčíku za wolfram. I v této variantě se počítá se zvýšením výkonu svazku na 2 kW.

Hlavní část výkonu urychlovačového svazku se absorbuje v centrální části terčíku, a proto je rozumné pro tuto část uvažovat o použití wolframu, který má vyšší teplotu tavení a vyšší hustotu. V případě, že by se k tomuto kroku přistoupilo, bylo by nutné nejprve důkladně prozkoumat problematiku chlazení takového terčíku. První odhady však nenaznačují, že by to měl být vážný problém.

Více informací o tomto návrhu a o jeho příp. dopadu na charakteristiky systému SAD lze najít v [17].

3.6 Zhodnocení

Zařízení SAD bude teď intenzivně sledováno, protože fakt, že má velkou šanci dostat se během 4 let do provozu, otevírá nové experimentální možnosti pro mezinárodní ADS komunitu. Dále je třeba připomenout, že experimentální program tohoto zařízení velmi vyhovuje cílům Evropského projektu EUROTRANS (viz oddíl 2.4.2) a může tedy velmi přispět k jeho úspěšnému vývoji. [4]

3.7 Návrh dalších měření

KJR FJFI ČVUT se podílela na přípravě projektu SAD a je připravena dále spolupracovat hlavně na měření vlastností neutronového pole v experimentálních kanálech budovaného zařízení. Tomuto tématu byla také věnována jednání vedoucího KJR, pana prof. Ing. Karla Matějky, CSc. s vedoucím projektu SAD, Dr. Valery Shvetsovem. Bylo přislíbeno, že se KJR bude moci těchto měření zúčastnit.

Na tato měření je na KJR dostatek vybavení—např. koronové detektory typu SNM, které se používají k měření na školním reaktoru VR-1. Ty jsou ale citlivé jen na tepelné a epitermální neutrony.

Další věcí, kterou může KJR projektu SAD přispět, je zkušenost s experimentálním měřením energetického a prostorového rozložení neutronů v kanále pomocí aktivačních prahových fólií. K tomu je potřeba použít velké množství různých fólií citlivých na vysoké energie neutronů (viz str. 46), protože podle předběžných výpočtů bude spektrum přibližně takové, jak jej uvádíme na Obrázcích 3.5 a 3.12. KJR proto navrhuje použít fólií z dalších materiálů, jako např. Nb, Mo, W, Lu, Dy, Ta a dalších. KJR má zkušenosti jak z měření na školním reaktoru VR-1, tak z měření z SÚJV na IBR-2 či LJJaP.

Dále je možné měřit pole neutronů i metodami, které se zatím na KJR nezkoušely, tj. např. pomocí Bonnerových sfér, scintilačních detektorů nebo detektory typu MicroMegas (vznikly v průběhu projektu nTOF a jsou ideální pro měření právě na ADS). Poslední jmenované by ale bylo nutno zakoupit. Jejich výhodou je citlivost na vysoké i nízké energie neutronů. [53] [54] Zatím se však na KJR počítá s metodou výše zmíněných fólií—jejich ozáření na stálém toku a následným přenesením (manuálně nebo potrubní poštou) k HPGe detektoru, změření ploch γ -píků, pak zpracování a rekonstrukce spektra metodou neutron spectra unfolding.

Měření výtěžků reakcí (viz Obrázek 3.11) se na KJR plánuje dělat obdobným způsobem: ozáření, doprava k HPGe detektoru a měření. K měření nejlépe plyných produktů štěpení (Kr, Ar, Xe) i dalších odražených produktů (viz str. 46) je výhodné použít transportní systém typu Helium-Jet. V případě měření výtěžků spalačních produktů v terči by se ozařovala fólie ze stejného materiálu jako je terč (Pb, Bi, W) v konkrétním místě na terči, a pak by se změřila. Totožná procedura by byla provedena i s palivem (fólie z U, Pu) či konstrukčními materiály.

KJR navrhuje změřit spektrální indexy (zmíněné na str. 46) i pro ^{232}Th , jakožto velice nadějně palivo a zároveň výborný detektor rychlých neutronů. V kanálech SAD lze ozařovat i vzorky materiálů, které KJR studuje ve spolupráci s ÚJV Řež a ŠKODA JS, např. MoNiCr, vyvinutý ŠKODA JS pro použití v transmutačních systémech. Lze také měřit transmutační výtěžky materiálů jako je ^{129}I , ^{99}Tc a dalších štěpných produktů nebo nebezpečných vyšších aktinidů (^{241}Am , ^{238}Pu , ^{237}Np atd.).

KJR počítá se spoluprací s laboratoří neutronové fyziky (LNF) SÚJV, a také s prací na SAD prostřednictvím spolupráce s LJJaP (laboratoří jaderných problémů) SÚJV, se kterou má rozvinutou spolupráci v oblasti měření aktivačními detektory a detektory HPGe.

Bylo by dobré poznamenat, že KJR může pomoci projektu SAD i v teoretické rovině, protože je členem beta tester teamu výpočtového kódu MCNPX a z tohoto titulu může udělat nezávislý model některé části zařízení SAD. [9]

Kapitola 4

Závěr

V této práci jsem se snažil seznámit se základními pojmy a aspekty problematiky podkritických systémů řízených urychlovačem (ADS). Provedl jsem rešerši převážně Internetových zdrojů a získal množství materiálů o nejrůznějších výzkumných projektech zaměřených na získání základních informací o těchto systémech. S ohledem na téma a přiměřený rozsah této práce jsem se zaměřil zejména na evropské projekty a výzkumná centra.

V další části jsem se věnoval samotnému projektu SAD, provedl detailní popis celého zařízení a okomentoval výsledky předběžných výpočtů a měření, podle kterých pak byly určeny základní parametry připravovaného zařízení. V závěru jsem se pak věnoval jeho možnému využití a také plánované účasti KJR FJFI ČVUT na výzkumných pracích na tomto zajímavém projektu.

Na základě získaných poznatků usuzuji, že projekt SAD představuje velmi významný počin nejen pro mezinárodní vědeckou komunitu zabývající se přímo ADS, ale v obecné rovině i pro tu část vědecké obce, která se specializuje na technologie likvidace RAO vznikajících při provozu nejrůznějších jaderných zařízení. Proto si myslím, že je třeba projekty na výstavbu a výzkum ADS co nejvíce podporovat, protože jaderná energetika představuje pro naši civilizaci jediný, skutečně ekologický zdroj energie pro nadcházející staletí.

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Závislost výtěžku neutronů ze spalace na energii dopadajícího protonu | 5 |
| 1.2 | Schema spalační reakce | 6 |
| 3.1 | Řez palivovým elementem | 34 |
| 3.2 | Průřez podkritickou AZ zařízení SAD | 37 |
| 3.3 | První terčíkový systém | 38 |
| 3.4 | Celkový pohled na AZ zařízení SAD bez reflektorů | 40 |
| 3.5 | Vypočtená předběžná neutronová spektra pro exp. kanály | 41 |
| 3.6 | Plán areálu urychlovače Fázotron | 42 |
| 3.7 | Vnitřní uspořádání budovy zařízení SAD | 43 |
| 3.8 | Výkon AZ jako funkce k_{ef} při použití protonového svazku o výkonu 1 kW . . | 45 |
| 3.9 | Závislost neutronového toku v experimentálním kanále na k_{ef} | 46 |
| 3.10 | Průměrný profil protonového svazku v různých průřezích X,Y | 47 |
| 3.11 | Rozložení aktivity ^{210}Po ve vzorcích ^{209}Bi podél Pb terčíku ozařovaného 660 MeV protony | 48 |
| 3.12 | Porovnání experimentálních výsledků z měření neutronových spekter s počíta- čovou simulací LAHET a MCNPX | 50 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Fyzikální vlastnosti materiálů navrhovaných pro terče | 3 |
| 3.1 | Základní parametry zařízení SAD | 32 |
| 3.2 | Parametry svazku | 32 |
| 3.3 | Základní parametry paliva pro zařízení SAD | 33 |
| 3.4 | Parametry navrhované AZ SAD | 39 |
| 3.5 | Kvalitativní charakteristika zařízení SAD | 40 |

Literatura

- [1] ADAM, J., BALABEKYAN, A., et al.: *Transmutation studies with GAMMA-2 setup using relativistic proton beams of the JINR Nuclotron*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562 (2006) 741-742
- [2] ALIBERTI, G., IMEL, G., PALMIOTTI, G.: *MUSE-4 Experiment Measurements and Analysis*, Argonne National Laboratory, Nuclear Engineering Division, Argonne, IL, September 2003
- [3] CONDÉ, H.: *Introduction to ADS For Waste Incineration and Energy Production*, Dept. of Neutron Research, Uppsala University, Uppsala, Sweden
- [4] GUDOWSKI, W., SHVETSOV, V., POLANSKI, A., BROEDERS, C.: *The Subcritical Assembly in Dubna (SAD)–Part II: Research program for ADS-demo experiment*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562 (2006) 887-891
- [5] HENZL, V.: *Experimentální studium transmutace aktinidů a štěpných produktů—Diplomová práce*, MFF UK, Praha, květen 2001
- [6] KATOVSKÝ, K.: *Experimentální výzkum jaderných dat pro urychlovačem řízené transmutační systémy v SÚJV Dubna—Podkladová studie ke státní doktorské zkoušce*, KJR FJFI ČVUT, Praha, únor 2005
- [7] KATOVSKÝ, K.: *ústní sdělení* ze dne 19.7.2006.
- [8] KATOVSKÝ, K.: *ústní sdělení* ze dne 21.7.2006.
- [9] KATOVSKÝ, K.: *ústní sdělení* ze dne 25.7.2006.
- [10] KATOVSKÝ, K.: *ústní sdělení* ze dne 26.7.2006.
- [11] KOZODAEV, A. M., SHVEDOV, O. V., et al.: *Development and Construction of Experimental ADS at ITEP*, ITEP, Moscow, Russia, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France
- [12] LEGRAND, V., COEYTAUX, X., SCHNEIDER, M., FAÏD, Y. B.: *The European Spallation Source Project and Nuclear Waste Transmutation*, WISE-PARIS, Paris, 27 November 2002
- [13] MIKISEK, M.: *Transmutační systémy založené na podkritických jaderných reaktorech řízených vnějším neutronovým zdrojem—Diplomová práce*, KJR FJFI ČVUT, Praha, květen 1998

- [14] MIKISEK, M.: *Neutronově fyzikální aspekty transmutačního reaktoru s kapalným palivem založeným na použití roztavených fluoridových solí—Disertační práce*, KJR FJFI ČVUT, Praha, září 2005
- [15] MIZUMOTO, M., OUCHI, N., et al.: *Development of Superconducting Linac for the KEK/JAERI Joint Project*, JAERI (Tokai), KEK (Tsukuba), MELCO (Kobe), Toshiba Corporation (Kawasaki), MHI (Kobe), Japan
- [16] PATTON, P. W., RUDIN, M. J., BOYACK, B. J., ANDRADE, T.: *Development of Dose Conversion Coefficients for Radionuclides Produced in Spallation Neutron Sources*, August 11, 2001
- [17] POLANSKI, A., PETROCHENKOV, S., SHVETSOV, V., GUDOWSKI, W., SELTBORG, P.: *Power upgrade of the subcritical assembly in Dubna (SAD) to 100 kW*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562 (2006) 879-882
- [18] PRAEL, R. E., LICHTENSTEIN, H.: *User guide to LCS: The LAHET code system*, Report LA-UR-89-3014, Los-Alamos National Laboratory, New Mexico, USA.
- [19] SHVETSOV, V. N., BAMBLEVSKI, V. P., KRYLOV, A. R., POLANSKI, A., TIMOSHENKO, G. N.: *Project on Creation of Subcritical Assembly Driven by Proton Accelerator in Dubna*, Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, Russia
- [20] SHVETSOV, V., BROEDERS, C., GOLOVNIN, I., GONZALES, E., GUDOWSKI, W., et al.: *The Subcritical Assembly in Dubna (SAD)—Part I: Coupling all major components of an Accelerator Driven System (ADS)*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562 (2006) 883-886
- [21] SONG, T. Y., CHA, J. E., et al.: *HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor) Project*, Korea Atomic Energy Research Institute, Yuseong, Daejeon, Korea
- [22] The TARC Collaboration: *Results from the TARC experiment: spallation neutron phenomenology in lead and neutron-driven nuclear transmutation by adiabatic resonance crossing*, CERN-SL-2001-033 EET, CERN, Geneva, Switzerland, 1 August 2001
- [23] WATERS, L. S.: *MCNPXTM Users Manual Version 2.1.5*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 14 November, 1999.
- [24] ZEMAN, J.: *Reaktorová fyzika I*, ISBN 80-01-01933-0, Vydavatelství ČVUT, 2003
- [25] Webové stránky <http://www.uic.com.au/reactors.htm> ze dne 19.6.2006.
- [26] Webové stránky <http://www.uic.com.au/nip65.htm> ze dne 19.6.2006.
- [27] Webové stránky http://ec.europa.eu/research/fp5/fp5-intro_en.html ze dne 10.7.2006.
- [28] Webové stránky <http://megapie.web.psi.ch> ze dne 18.6.2006.
- [29] Webové stránky <http://sinq.web.psi.ch> ze dne 18.6.2006.
- [30] Webové stránky http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.-simplifiedocument&PJ_RCN=4796581&CFID=9488810&CFTOKEN=27246705 ze dne 12.7.2006.

- [31] Webové stránky http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.-simplifiedocument&PJ_RCN=4862780&CFID=9488810&CFTOKEN=27246705 ze dne 12.7.2006.
- [32] Webové stránky http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.-simplifiedocument&PJ_RCN=5265088&CFID=9488810&CFTOKEN=27246705 ze dne 12.7.2006.
- [33] Webové stránky <http://www3.sckcen.be/adopt> ze dne 10.7.2006.
- [34] Webové stránky http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.-simplifiedocument&PJ_RCN=5223928&CFID=9488810&CFTOKEN=27246705 ze dne 10.7.2006.
- [35] Webové stránky http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.-simplifiedocument&PJ_RCN=4862804&CFID=9488810&CFTOKEN=27246705 ze dne 10.7.2006.
- [36] Webové stránky http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.-simplifiedocument&PJ_RCN=4796697&CFID=9488810&CFTOKEN=27246705 ze dne 10.7.2006.
- [37] Webové stránky http://ec.europa.eu/research/energy/fi/fi_cpa/article-1178_en.htm ze dne 6.7.2006.
- [38] Webové stránky http://ec.europa.eu/research/energy/fi/fi_cpa/waste/article_2517_en.htm ze dne 6.7.2006.
- [39] Webové stránky <http://www.europart-project.org> ze dne 6.7.2006.
- [40] Webové stránky http://ec.europa.eu/research/energy/fi/fi_cpa/waste/article_3849_en.htm ze dne 10.7.2006.
- [41] Webové stránky <http://www.red-impact.proj.kth.se> ze dne 6.7.2006.
- [42] Webové stránky http://www.ciemat.es/eng/actividad/programas/-p_innovacionnuc.html ze dne 27.6.2006.
- [43] Webové stránky <http://nfdfn.jinr.ru/flnph/iren/iren.html> ze dne 15.6.2006.
- [44] Webové stránky <http://www.sckcen.be/myrrha> ze dne 20.6.2006.
- [45] Webové stránky <http://science.istc.ru/ISTC/sc.nsf/html/ta.htm?open&id=0743> ze dne 21.6.2006.
- [46] Webové stránky http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-97332003000200018&script=sci_arttext ze dne 21.6.2006.
- [47] Webové stránky <http://trasco.lnl.infn.it> ze dne 15.7.2006.
- [48] Webové stránky <http://www.trade.enea.it> ze dne 16.7.2006.
- [49] Webové stránky http://en.wikipedia.org/wiki/Spallation_Neutron_Source ze dne 17.7.2006.
- [50] Webové stránky <http://www.sns.gov> ze dne 17.7.2006.
- [51] Webové stránky <http://www.jaeri.go.jp/english/research/re06.html> ze dne 17.7.2006.

- [52] Webové stránky <http://sad.dubna.ru> ze dne 21.7.2006.
- [53] Webové stránky http://hal.in2p3.fr/view_by_stamp.php?label=LPC-CAEN-&langue=en&action_todo=view&id=in2p3-00082332&version=1 ze dne 25.7.2006.
- [54] Webové stránky <http://www-ist.cea.fr/publiccea/exl-php/00000028738-the-micromegas-neutron-detector-for-cern-n-tof.html> ze dne 25.7.2006.
- [55] Webové stránky http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=PROJ_EURATOM_FP6&ACTION=D&RCN=74119&DOC=7&CAT=PROJ&QUERY=1 ze dne 25.7.2006.