

# TRANSMUTAČNÍ TECHNOLOGIE

## ADTT

Michaela Martínková

### Úvod

V posledních letech se věnuje zvýšená pozornost problematice systémů, které jsou souhrnně označovány zkratkou ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies), tedy urychlovačem řízené transmutační technologie, které by mohly přispět ke splnění podmínek akceptovatelnosti využívání jaderné energie. Označované také ATW (Accelerator Transmutation of Waste), nebo ADS (Accelerator Driven Systems).

Současná koncepce geologického ukládání vysoceaktivního a dlouhodobého odpadu z vyhořelého jaderného paliva příliš velkou důvěru společnosti vůči výstavbě a provozu jaderných elektráren nevyvolává. Hlubinné ukládání vyhořelého paliva do geologických formací je sice dosud na celém světě považováno za nejvhodnější způsob jeho oddělení od životního prostředí, avšak, jak ukazují nové poznatky a technologie, nemusí být konečným řešením v tak rozsáhlé míře. Podle odborných odhadů by vhodnými transmutacemi mohlo dojít ke zkrácení doby kontrolovaného uložení odpadů pouze na stovky let. Přitom by celkové množství odpadů proti stávajícímu stavu bylo sníženo téměř 10-krát. I když se ani tyto technologie bez úložiště odpadů neobejdou, mohou především časově, ale i objemem redukovat stávající problém na mnohem přijatelnější úroveň. To vše dokonce při zisku další energie.

### 1. Charakteristika vyhořelého jaderného paliva

V průběhu vyhořívání jaderného paliva dochází v jaderném reaktoru ke vzniku širokého spektra radionuklidů. Tyto většinou vysoce aktivní nuklidy, často klasifikované jako odpady (High Level Waste - HLW), lze rozdělit z hlediska aplikací v transmutačních systémech do několika skupin:

- uran ( $^{238}\text{U}$  a nevyhořelý  $^{235}\text{U}$ ),
- plutonium, tj. izotopická směs  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,
- vyšší aktinidy (higher actinides - HA), tj.  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242\text{m}}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Cm}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,
- štěpné produkty (fission products - FP). Tyto lze rozdělit ještě na stabilní a krátkodobé, tj. s krátkým poločasem rozpadu (stable and short-lived fission products - SLFP) a na dlouhodobé (long-lived fission products - LLFP). Dělící hranice mezi těmito druhy štěpných produktů není pevná a obvykle se klade na úroveň poločasu rozpadu 11 let.

Prakticky všechny takto vzniklé radionuklidy jsou nestabilní a rozpadají se. To je doprovázeno emisí různých druhů záření, které může být škodlivé pro živé organismy. Některé nuklidy s dlouhým poločasem rozpadu – např.  $^{99}\text{Tc}$ ,  $T_{1/2} = 2,12 \cdot 10^5$  let nebo  $^{129}\text{I}$ ,  $T_{1/2} = 1,7 \cdot 10^7$  let – mohou být nebezpečné po velmi dlouhý čas, řádově několik stovek tisíciletí až milionů let. Po tuto dobu je tedy potřebné zabezpečit účinnou izolaci vyhořelého jaderného paliva a zamezit jeho kontaktu s biosférou. (Obr. 1)

Vyhořelé palivo obsahuje stále asi 96% původního množství uranu (včetně nevyhořelého  $^{235}\text{U}$ ) a 1% plutonia a dalších vyšších aktinidů, což jsou všechno materiály štěpitelné, ať již samy o sobě nebo po vhodných jaderných přeměnách, a tím i energeticky využitelné. Zbývající zhruba (podle původního obohacení a hloubky vyhoření paliva) 3%-ní podíl ve vyhořelém palivu zaujímají štěpné produkty.

Vyhořelé palivo lze po vyjmutí z reaktoru buď považovat za již neupotřebitelnou surovinu a v konečném důsledku připravovat pro hlubinné uložení, nebo jej po jisté době dále přepracovat a oddělit využitelné izotopy aktinidů. Dle současných postupů se chemickou separací odstraní štěpné produkty, přičemž se zvláště oddělí izotopy uranu a plutonia. Ty se potom mohou využít na výrobu nového, tzv. MOX (mixed-oxide) paliva.

### 2. Jaderné transmutace štěpných produktů a aktinidů

Jaderná transmutace je obecně jakákoliv jaderná přeměna, při níž dochází ke změně složení atomového jádra. Patří sem proto i např. tvorba plutonia v jaderném palivu v průběhu jeho vyhořívání. Účelem cíleného transmutačního procesu (ADTT resp. ADS) je likvidace radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu a vysokou

relativní radiotoxicitou a jejich přeměna na krátkodobé nebo dokonce stabilní isotopy. V případě štěpných produktů je transmutace uskutečňována zachytem neutronu (i několikanásobným) případně doprovázeným též  $\beta^-$  rozpadem.

U aktinidů se může jednat jak o jejich „přímou“ jadernou přeměnu (transmutaci), tak i o štěpení těžkého jádra, tedy obdobnou reakci jako u uranu  $^{235}\text{U}$ .

### 3. Transmutační technologie a jejich využití

ADS jsou systémy sestávající se ze tří hlavních komponentů: urychlovače částic, zejména protonů; terčiku pro spalační (tříštivou) reakci, produkujícího vnější zdroj neutronů; a podkryticky uspořádaného reaktoru, umožňující štepnu reakci. Podkritické uspořádání blanketu je velmi podobné zóně klasického kritického reaktoru. Paprsek iontů je zaměřen na terčik, který je umístěn v centru aktivní zóny. Interakcemi mezi urychlenými částicemi a terčikem z těžkého kovu se generují neutrony, které udržují štepnu reakci v reaktoru. Jiné možné uspořádání blanketu využívá průtočného terčiku s větším výkonovým zatížením a vyšším stupněm vyhoření. (Obr 2.)

První možností, pro kterou mohou být využity je definitivní izotopická likvidace plutonia, vzniklého hlavně při demontážích zbraňového plutonia zejména v zemích bývalého SSSR, namísto jeho oddělení od životního prostředí (např. trvalým kontrolovatelným uložením), a tak předejít jeho zneužití. Navíc štěpitelné izotopy plutonia představují velký energetický potenciál. Příčiny přebytku plutonia:

- snížení výroby jaderných zbraní, snížení počtu hlavic a jejich demontáž,
- produkční reaktory (zaměřené zejména na výrobu plutonia) nemohly být v řadě lokalit odstaveny, protože jsou současně využívány i jako zdroj elektrické energie a tepla, a to často pro rozsáhlý a jinak odlehlý region,
- dříve předpokládaný nástup rychlých reaktorů, ve kterých bude plutonium používáno jako palivo, se prakticky zastavil a v nejbližších letech se s jeho obnovou ve významném měřítku spíše nepočítá.

Druhou možností je transmutace izotopů s "rozumným" účinným průřezem pro zachyt (absorpci) neutronů. To se ve velké míře týká jak aktinidů, tak i převážně části dlouhodobých štěpných produktů. Klasickým příkladem je známé schéma transmutace technecia  $^{99}\text{Tc}$ , které vede po několikanásobné přeměně na stabilní rubidium  $^{102}\text{Ru}$ . U aktinidů patří mezi nejznámější schéma transmutace neptunia  $^{237}\text{Np}$ .

Transmutační technologie mohou tedy velmi významným způsobem přispět k řešení problémů spojených s konečnou likvidací vyhořelého jaderného paliva, a:

- ke snížení celkového množství vysoce radioaktivních (ra) látek,
- ke "zkrácení poločasu rozpadu" zbývajících ra látek na přijatelnou mez z hlediska nezbytné kontroly jejich stavu a oddělení od životního prostředí (řádově stovky let).

Transmutační technologie nemohou vyřešit problémy nakládání s vyhořelým palivem "beze zbytku". Vždy určité množství radioaktivních látek, které bude nutné uložit, nejsou tedy ve své podstatě alternativou k uložení jako takovému, ale k celému "klasickému" řešení koncové části jaderného palivového cyklu.

Zatímco dvě předchozí varianty využití transmutačních technologií se týkají spíše minulosti v tom smyslu, že se snaží lépe vypořádat s důsledky dosavadních způsobů využívání jaderné energie, je třetí možnost zaměřena výrazně do blízké budoucnosti. Hlavní její myšlenka spočívá v tom, že výroba energie "z jádra" bude organizována tak, aby vyhořelé jaderné palivo v klasickém slova smyslu prakticky nevznikalo a štěpné produkty i aktinidy byly průběžně transmutovány a nehromadily se. Tím by se mělo jednat o prakticky čistý zdroj energie. Představa vychází z tekutého paliva a nevylučuje se ani možnost používání thoria (uran-thoriový cyklus).

To je také záměrem národního projektu TRANSMUTACE, kterého se účastní Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., Ústav jaderné fyziky AV ČR, Škoda JS, a.s. Plzeň a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze.

### 4. Základní podmínky pro využití transmutačních technologií

**První podmínkou** je vyloučení nekontrolovatelného rozvoje štěpné řetězové reakce, která může v posledu vést u nevhodných typů reaktoru až ke katastrofě obdobné Černobyli v roce 1986.

**Druhou podmínkou** je vyloučit možnost zneužití jaderných materiálů a jaderných technologií k výrobě zbraní. Jedná se především o vysoce obohacený uran a izotop plutonia 239 resp. i 241. Vysoce obohacený uran není dostupný ani v klasických jaderných elektrárnách a stejně tak se s ním nepočítá ani v systémech ADS.

**Třetí podmínkou** je naprosto spolehlivé a konečné řešení problémů spojených s vyhořelým jaderným palivem. Je tedy zřejmé, že i v této (nebo dokonce právě v této) oblasti mohou mít transmutační technologie mimořádně významné uplatnění.

## 5. Závěr

Principy transmutačních technologií jsou známé, je však nutné dořešit zejména všechny hlavní problémy (neutronový zdroj, blanket, separaci), a to z fyzikálních, technologických, provozních, časových a bezpečnostních hledisek.

Realizace systémů ADS by měla do značné míry řešit zejména:

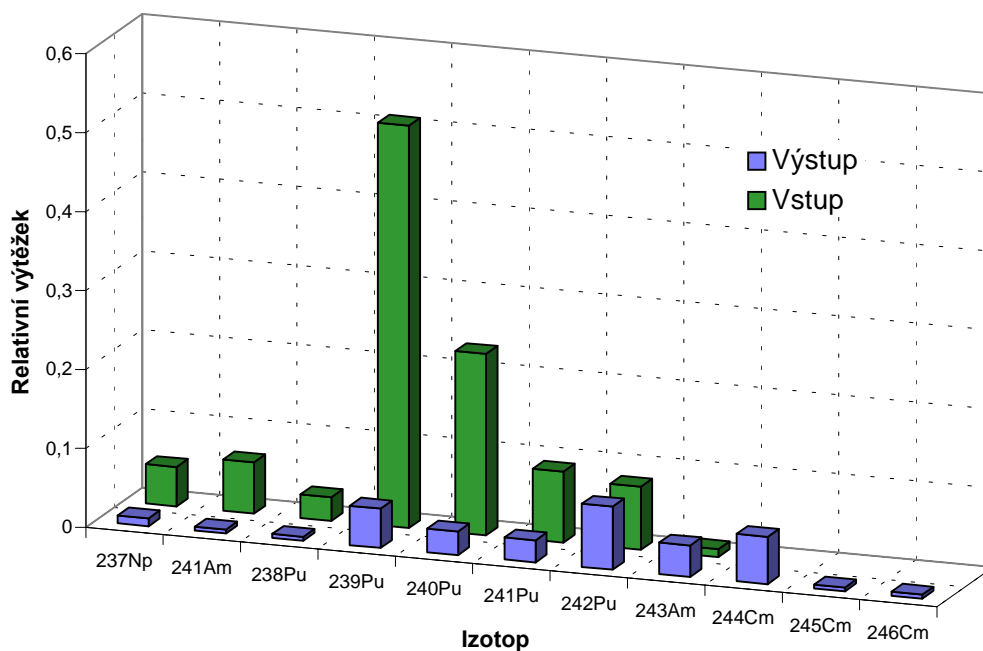
- přebytek plutonia, způsobený jednak demontáží jaderných hlavic a jednak velice malým podílem (zřejmě bez větší perspektivy) rychlých reaktorů,
- likvidaci, resp. výraznou redukcí štěpných produktů a aktinidů ve vyhořelém jaderném palivu, zejména dlouhodobých,
- čistou výrobu energie pro budoucí pokolení.

Ačkoli byl v posledních letech dosažen zřetelný pokrok, a opuštěna řada neschůdných cest, tři hlavní oblasti (zdroj, blanket, separace) ve stadiu přímého průmyslového použití zdaleka nejsou. Použití systémů ADS nepovede k eliminaci hlubinných úložišť, je však velká naděje na jejich nižší kapacitu (velká redukce objemu) a výrazně kratší dobu jejich možného negativního vlivu na životní prostředí.

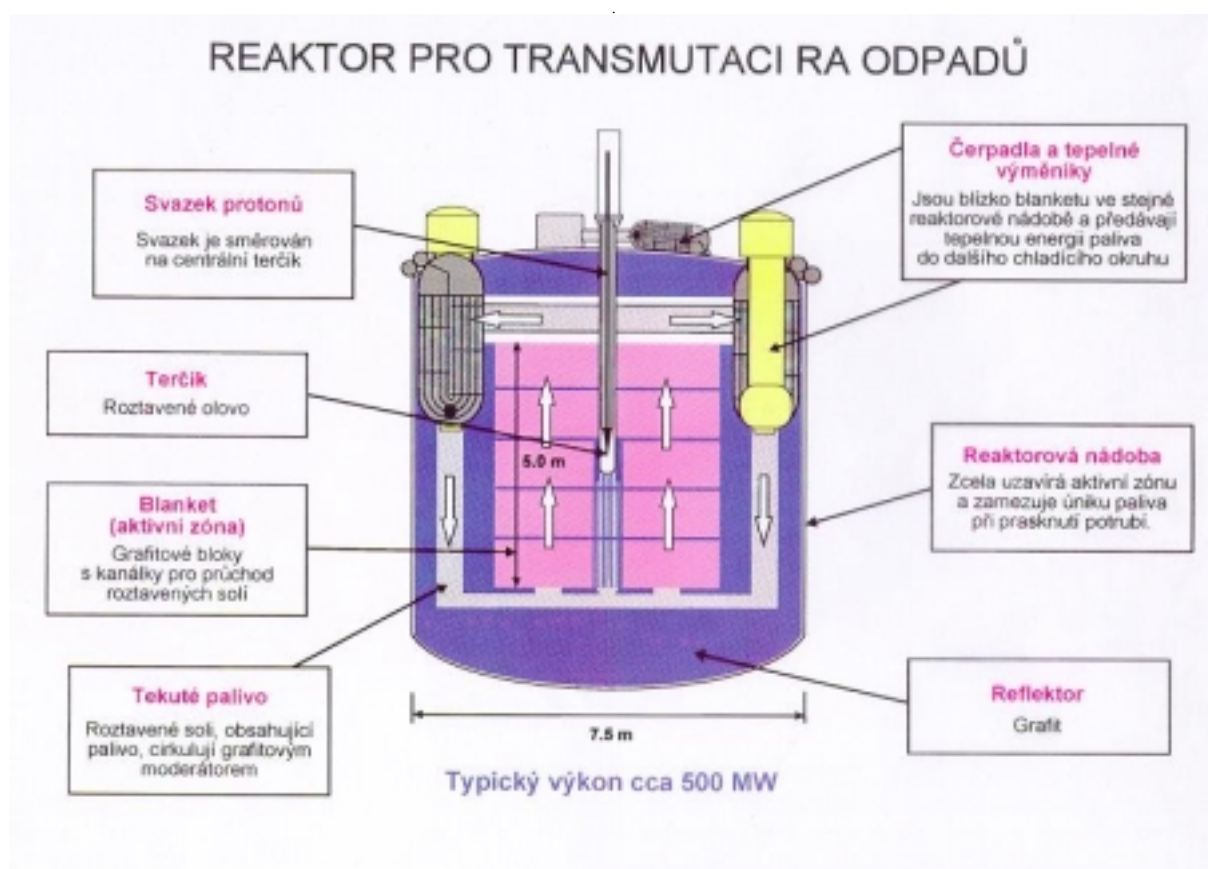
Systémy ADS se tedy nabízejí jako efektivní prostředek pro redukcii objemu a radiotoxicity vyhořelého jaderného paliva, což může významně přispět k širší akceptovatelnosti koncepce hlubinného ukládání. Urychlovačem řízené reaktory by měly také plnit tři základní podmínky akceptovatelnosti jaderné energetiky, viz výše. Uvedení projektů urychlovačem řízených systémů do praxe má velkou naději na produkci čisté, téměř bezodpadové energie. Myšlenky obsažené v návrzích těchto systémů se stávají duchem projektů dnešní jaderné fyziky.

## 6. Použitá literatura

- [1] Status and assessment report on actinide and fission product partitioning and transmutation, Final version of P&T document, (final draft), NEA/PTS/DOC(98)4, January 1999
- [2] MATĚJKA, K. a kol.: Vyhořelé jaderné palivo, FJFI ČVUT Praha, 1996
- [3] MATĚJKA, K. - ZEMAN, J.: Zhodnocení transmutačních technologií, ÚJV Řež, a.s. – FJFI ČVUT Praha, březen 1999
- [4] BÉM, P. a kol.: Nové technologie pro jaderné spalování vyhořelého paliva z reaktorů typu VVER (podrobný návrh výzkumného projektu), ÚJV Řež, a.s., listopad 1998
- [5] BOWMAN, CH. D.: Once-through thermal-spectrum accelerator-driven system for LWR waste destruction without reprocessing: Tier-1 description, report ADNA/98-04, august 25, 1998
- [6] UHLÍŘ, Jan.: Transmutace - fluoridová chemie, ÚJV Řež, a.s., prosinec 1998



Obr. 1 Srovnání izotopického složení aktinidů před a po transmutaci v systému ADS o výkonu 750 MW<sub>t</sub>



Obr. 2