

Současnost a budoucnost jaderného paliva

Dostupnost energetických zdrojů je základní potřebou lidské společnosti. Tato nutnost se v souvislosti s průmyslovým vývojem a obecným růstem životní úrovně dále zvyšuje. Dnes nelze odmítat jakýkoliv energetický zdroj, který se může podílet na krytí spotřeby. Jaderná energetika je jedním z pilířů výroby elektrické energie ve vyspělých zemích. Celosvětový podíl na výrobě elektřiny dosahuje 16 %, v zemích OECD pak 22 % [1]. Významnějším zdrojem elektřiny jsou již jen elektrárny spalující fosilní paliva. Lidská společnost je tak v největší míře závislá na neobnovitelných zdrojích energie a v dohledné budoucnosti nelze očekávat výraznou změnu. Autor článku uvádí informace o těžbě a přepracování uranu do podoby jaderného paliva, popisuje optimalizaci stávajících paliv a zabývá se palivy pro výzkumné reaktory. Na závěr vyslovuje myšlenku zajištění prakticky neomezeného zásobování palivem pro výrobu elektřiny v jaderných elektrárnách.



Ing. Jan Frýbort

Vystudoval obor Jaderné inženýrství na Katedře jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze. V současné době dokončuje na KJR doktorandské studium a analyzuje možnost realizace thoriového palivového cyklu v různých reaktorových systémech. Od roku 2006 také zaměstnanec KJR. Podílí se na výuce reaktorové fyziky a je součástí provozního personálu Školního reaktoru VR-1.

Převážná většina jaderných elektráren pracuje s lehkododním reaktorem, který má vysoký stupeň bezpečnosti provozu. Fyzikální podstata jeho konstrukce, zejména použité materiály a moderátor vyžadují použití obohaceného paliva. Z potenciálních štěpných izotopů ^{235}U , ^{233}U a ^{239}Pu se v přírodě vyskytuje pouze ^{235}U , a to ve směsi s izotopem ^{238}U . Přírodní podíl ^{235}U v uranu je přibližně 0,7 %. To ovšem není dostačující pro provoz lehkododního reaktoru a je nezbytné tento podíl zvýšit. To se děje pomocí obohacování, kdy pomocí rozdílné hmotnosti mezi izotopy ^{235}U a ^{238}U dochází k jejich oddělení. Obvyklá míra obohacení uranu pro potřeby energetických reaktorů je 3 až 5 % hmotnostního podílu ^{235}U v uranu.

Dalším zdrojem štěpného materiálu je použitelné palivo. Vlivem zachytu neutronu v izotopu ^{238}U vzniká ^{239}Pu a vyšší aktinoidy. V závislosti

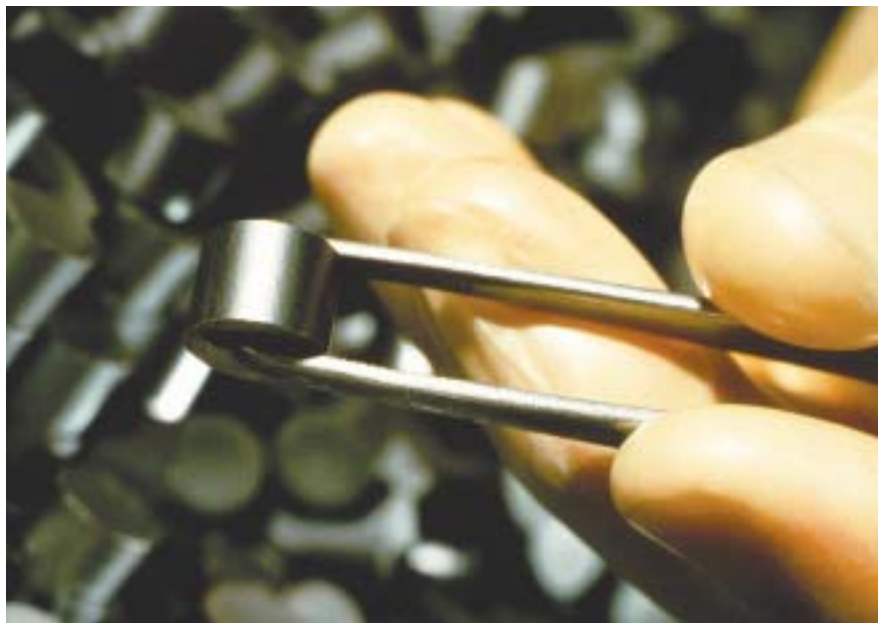
na typu reaktoru a době vyhořívání tvoří přibližně 1 % hmotnosti paliva plutonium, které obsahuje přibližně polovinu štěpného ^{239}Pu . Průmyslově zvládnutým procesem (PUREX) [2] lze takové palivo přepracovat a opět využít ve formě směsného paliva MO_x s ochuzeným uranem, který zůstává z obohacovacího procesu. MO_x palivo se vyrábí především ve Francii a využívá se v několika zemích – Francie, Německo, Švýcarsko, Belgie Japonsko aj. MO_x představuje možnost jak zvýšit využití dostupné uranové rudy a snížit množství odpadu [3].

Do reaktoru se palivo zavází ve formě palivových souborů, které jsou tvořeny palivovými tyčemi obtékanými vodou primárního okruhu. Palivová tyč je tvořena centrální částí obsahující keramické palivo UO_2 obklopené pokrytím ze zirkoniové slitiny. Obvyklý vnější poloměr palivové tyče je přibližně 0,5 cm. Jednotlivé palivové tyče jsou umístěny v pravidelné čtvercové nebo trojúhelníkové mříži.

reaktoru činí 349. Naproti tomu palivový soubor VVER-1000 dosahuje délky blízké se 3,5 m, obsahuje 312 palivových tyčí a aktivní zónu reaktoru tvoří 126 souborů.

Těžba a zpracování uranu

Od těžby přírodního uranu k zavezení paliva do jaderného reaktoru vede dlouhá cesta. Na samotném začátku je přírodní uran, který se v největší míře těží v Kanadě, Austrálii a Kazachstánu. Vytěžená ruda obsahuje uran v podobě U_3O_8 o nízké koncentraci. Uran je nezbytné z horniny odseparovat. Proto se provádí mechanická (drcení, mletí) a chemická úprava rudy (loužení, srážení). Výsledným produktem je tzv. žlutý koláč – diuranát amonný. Zde končí cesta uranu i v Dolní Rožínce, kde se nachází poslední funkční uranový důl v České republice. Další krok, kterým je zvýšení podílu ^{235}U v uranu a fabrikace samotného paliva je již v možnostech pouze několika zemí světa, které mohou vlastnit příslušné



Palivová peleta

Celková délka palivového souboru a množství palivových tyčí se značně liší podle typu reaktoru. Příkladem může být rozdíl mezi reaktory VVER-440 používanými v Jaderné elektrárně Dukovany a VVER-1000 v Jaderné elektrárně Temelín. Celková délka paliva v reaktoru VVER-440 je přibližně 2,5 m, jeden soubor obsahuje 126 palivových tyčí a celkové množství souborů v

technologie. Toto omezení je zakotveno ve Smlouvě o nešíření jaderných zbraní.

Palivové tablety

Obohacování uranu probíhá ve formě plynného UF_6 , proto je prvním krokem výroby palivových tyčí chemická úprava UF_6 na UO_2 . Nejprve je vytvořen prášek, který je následně pod vysokým tlakem

a při vysoké teplotě (sintrace) zformován do požadovaného tvaru, kterým je palivová tableta s obvyklou délkou přes 1 cm. Palivové tablety dosahují až 95 % teoretické hustoty. Vyšší hodnota není výhodou, protože vzhledem k následným procesům během vyhořívání paliva je jistá míra porozity nezbytná.

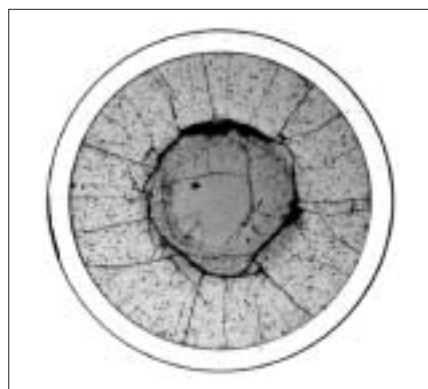
Palivové tablety jsou při výrobě paliva hermeticky uzavřeny v zirkoniovém pokrytí. V palivových tyčích je mezera mezi palivem a pokrytím vyplněna heliem o tlaku několik MPa. Zatížení paliva v reaktoru je enormní. Vzhledem k tepelnému toku, který se pohybuje typicky kolem 200 W/cm, mění palivové tablety od okamžiku zavezení do reaktoru své rozměry. Dochází dále k přerozdělování jednotlivých komponent UO_2 vzhledem ke značnému gradientu teploty. Rozdíl v teplotě mezi středem a okrajem palivové tablety dosahuje několika set stupňů Celsia.

Vzhledem k vyhořívání paliva vznikají v palivu štěpné produkty i transurany. Konečné složení paliva je zásadně odlišné od čerstvého paliva. Značné množství štěpných produktů se uvolňuje v plynné formě. To usnadňuje jejich migraci a únik z paliva. Rozložení vznikajících transuranů – specificky plutonia – je značně prostorově závislé. Nejvyšší koncentrace plutonia se nachází v periferní oblasti.

Uvedené vlastnosti jaderného paliva komplikují modelování jeho chování během doby strávené v reaktoru a během přechodových procesů – náhlé snížení či zvýšení výkonu. Obecně jaderné palivo vykazuje následující vlastnosti:

- dochází k rozpínání paliva a změně jeho mikroskopické struktury,
- palivo praská a migruje ve směru teplotního gradientu.

Tyto procesy jsou dále urychlovány klesající teplotní vodivostí paliva. Výsledkem je uzavření mezery mezi palivem a pokrytím a jejich přímá interakce. To je nejčastějším důvodem selhání



Popraskání a přeskupení paliva v použitém palivu

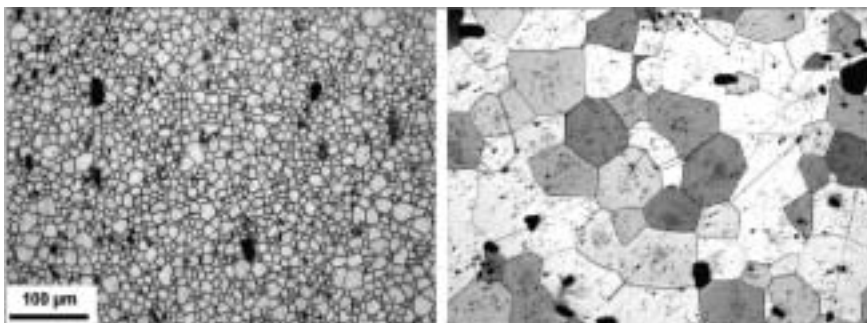
paliva a limitujícím faktorem pro dosažení vyššího vyhořívání paliva.

Pokrytí paliva je bariérou před únikem štěpných produktů do chladiče reaktoru. Pro zachování této funkce po celou dobu vyhořívání byla

vyvinuta řada pokročilých slitin založených na zirkoniu, které je vhodné vzhledem k nízké absorpci neutronů. Pokrok v zirkoniových slitinách je jasně patrný na západních reaktorech, kde se používaly slitiny Zircaloy-2 a Zircaloy-4.

Při zvyšování vyhořívání paliva nad 40 MWd/kg ovšem byly objeveny jejich limitující korozní vlastnosti. Pokrytí si musí zachovat dostatečné mechanické vlastnosti, aby bylo schopné odolat náhlé změně teploty a tlaku v reaktoru v havarijních podmínkách. V návaznosti na výzkumy a zkušenosti s východními slitinami byla ve Francii vyvinuta slitina M5, která je tvořena zirkoniem s přídavkem niobia. Zirkonium s 1 % Nb je dlouhodobě také materiálem pokrytí v reaktorech typu VVER.

Nejsou to ale jen změny na straně pokrytí, které prodlužují dobu, po kterou lze palivo v reaktoru využívat. Vývoj se zaměřil také na mikrostrukturu samotného paliva. Dostatečně velká zrna UO_2 představují možnost jak omezit migraci plyných štěpných produktů v palivu a jejich následný únik. Ukazuje se, že vhodné struktury paliva lze docílit aditivou a úpravou sintrovacího procesu. Obzvláště dobré výsledky se podařilo získat s palivem dotovaným chrómem. [4]



Původní a inovovaná mikrostruktura UO_2 .



Palivový soubor a regulace reaktoru VVER-440

U paliva MO_x je provozní výkon zásadně ovlivněn rovnoměrností rozmístění plutonia. Pomocí aditiv při sintraci a pozmeněným technologickým procesem MIMAS se podařilo docílit téměř homogenního rozložení štěpného materiálu.

Optimalizace stávajících paliv

Vedle fundamentálních změn mikrostruktury paliva probíhá také stálý proces optimalizace stávajících paliv. Jako příklad může sloužit Jaderná elektrárna Dukovany, která prošla za dobu své existence zcela zásadní proměnou palivových souborů a nakládání s nimi. Podle původního návrhu měla být elektrárna provozována v tříletém cyklu s palivem obohaceným na 3,6 %. Během následujících let řadou revolučních a evolučních kroků bylo dosaženo stavu, že vyhořívání paliva bylo zvýšeno z původních 30 MWd/kg na současných 60 MWd/kg. Při překládkách je vyvážena pouze pětina obsahu aktivní zóny. To s sebou přináší značné úspory nákladů a množství použitého paliva.

Aktuální zdokonalený palivový soubor má střední obohacení 4,38 % s horizontálním profilováním. To znamená, že soubor se skládá z palivových tyčí o různých úrovních obohacení (3,6 % až 4,6 %) a vybrané tyče obsahují také vyhořívající absorbatory – Gd_2O_3 – specifický materiál, který na počátku provozu paliva absorbuje neutrony, ale postupně se vyčerpává a umožňuje tak překlenout počáteční přebytek čerstvého paliva v reaktoru. Došlo také prodloužení palivového

sloupce a změně materiálu pokrytí a obálky, která obklopuje palivový soubor reaktoru VVER-440. Těmito úpravami bylo docíleno lepší ekonomičnosti provozu a zvýšení výkonu reaktoru. Možnosti další optimalizace tohoto paliva ale stále nejsou vyčerpány. [5]

Palivo pro výzkumné jaderné reaktory

Specifickým problémem je palivo pro výzkumné jaderné reaktory. Energetické jaderné reaktory mají jednoznačně určené a jsou na ně kladeny jasné požadavky, které spočívají v dlouhodobé spolehlivosti a bezpečnosti při přechodových procesech. Výzkumné reaktory se značně liší účelem. Jejich posláním je poskytovat podmínky vhodné pro provádění výzkumu a testování rozličných komponent. Obvyklým požadavkem je možnost rychlé změny výkonu, schopnost poskytovat vysoké toky neutronů a vysoká míra inhereční bezpečnosti. Podle určení daného reaktoru mohou být také kladeny značně specifické požadavky.

Příkladem je školní reaktor VR-1 provozovaný Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou, ČVUT v Praze. Tepelný výkon tohoto reaktoru je velmi malý – přibližně 1 kW – přizpůsobený využití pro výuku nových odborníků v jaderné oblasti. Palivem reaktoru jsou palivové články IRT-4M, které se skládají ze zaoblených koncentrických trubek tvořených směsnou vrstvou UO_2 a hliníku uzavřenou v hliníkovém pokrytí. Uran použitý při výrobě tohoto paliva je obohacen na 19,7 % ^{235}U . Hlavním požadavkem kladeným na toto palivo je jeho mechanická odolnost, snadná manipulovatelnost a vysoká míra bezpečnosti. To je dáno tím, že během výuky studentů dochází k častým manipulacím s palivem během vytváření nových konfigurací aktivní zóny. [6]

Velkou výhodou reaktoru VR-1 je také fakt, že vzhledem k nízkému výkonu palivo zůstává stále čerstvé. To znamená, že je v něm pouze velmi nízká

koncentrace štěpných produktů a aktinoidů, které by omezovali možnost přímých manipulací.

Bezpečný (nebezpečný) uran

Přírodní i obohacený uran představují materiál s velmi nízkou aktivitou. Je to dáno skutečností, že oba izotopy uranu mají velmi dlouhý poločas rozpadu a proto se přeměňují jen velmi pomalu. Navíc, jako většina aktinoidů, podléhají alfa rozpadu, proto nepředstavují problém při vnějším ozáření, ale pouze v případě vnitřní kontaminace.

Oproti tomu, palivo vyvážené z energetických reaktorů při významné úrovni vyhoření představují bezprostřední zdravotní riziko. Nejdůležitějším rizikem je opět vnitřní kontaminace a navíc vysoká úroveň gama záření, které doprovází rozpad radioaktivních izotopů. Vzhledem k poločasům rozpadu štěpných produktů a aktinoidů, představuje použité jaderné palivo riziko pro životní prostředí minimálně po dobu několika stovek tisíc let. Použité palivo však lze z větší části stále upotřebit. Lze odseparovat zbývající uran a plutonium využívané již dnes v MO_x palivu. Jen několik procent hmotnosti použitého paliva je skutečným odpadem, který je potřeba trvale oddělit od biosféry. Jsou vyvíjeny transmutační technologie, které umožní zkrácení nezbytné doby uložení odpadu na několik stovek let.

Závěr

V budoucnosti lze očekávat, že veškeré úsilí bude směřovat k většímu využití jaderného paliva a elektráren. To znamená optimalizovat palivo a jeho překládky na vyšší vyhoření. To vyžaduje

materiálový pokrok na straně paliva i pokrytí. Stávající typy elektráren lze zásobovat uranem po dobu minimálně sta let. Přepřerování paliva a využití plutonia tuto dobu prodlužuje. Plutonium lze dále cíleně vytvářet ve speciálních množivých reaktorech. Probíhají také výzkumy využití thoriového paliva, ze kterého vzniká další štěpný izotop ^{233}U . Výsledkem je, že lze zajistit prakticky neomezené zásobování palivem pro výrobu elektřiny v jaderných elektrárnách.

Ing. Jan Frýbort,

Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze, frybort@jfifi.cvut.cz

- [1] Nuclear Energy Data 2010, Nuclear Energy Agency, ISBN: 9789264091986, 2010
- [2] Treatment and Recycling of Spent Nuclear Fuel, CEA Saclay, ISBN: 9782281113778, 2008
- [3] Status and Trends of Nuclear Technologies, Report of the INPRO Project, IAEA, Vienna, 2009
- [4] Nuclear Fuels, CEA Saclay, ISBN: 9782281113457, 2009
- [5] Possibility of realization of a six-year fuel cycle for VVER-440 reactor, Lenka Heraltová, Proceedings of IYNC 2010, Cape Town, 2010
- [6] Školní reaktor VR-1, Katedra jaderných reaktorů, ČVUT v Praze, online: www.reaktorvr1.eu, cit. 30. září 2010

The present and future of nuclear fuel

Access to energy sources is a basic demand of human society. This need is continually growing because of industrial development and the general increase in living standards. Today no energy source that may help to cover consumption can be rejected. Nuclear energy is one of the pillars of producing electric energy in highly industrialized countries. The world percentage in producing electric energy is 16 %, in OECD countries 22 % [1]. Power plants burning fossil fuels are a more important electricity source. Human society mainly depends on non-renewable energy sources and no significant change can be expected in the near future. The author of the article gives information about exploiting and processing uranium into nuclear fuel, describes how existing fuel can be optimised and covers fuel for research reactors. In the conclusion he expresses the idea of having a practically unlimited supply of fuel for producing electricity in nuclear power plants.

Настоящее и будущее ядерного топлива

Доступность энергетических источников является основной потребностью человеческого общества. Эта необходимость постоянно повышается в связи с промышленным развитием и общим ростом жизненного уровня. Сегодня необходимо использовать любой источник энергии, который может участвовать в покрытии этих потребностей. Атомная энергетика является одним из основных видов производства электрической энергии в развитых странах. Мировая часть производства энергии из атома достигает 16%, в странах ОЭСР 22% (1). Самым распространённым источником энергии являются электростанции, сжигающие природный газ и уголь. Таким образом, человеческое общество в большой степени зависит от невозобновляемых источников энергии и в ближайшем будущем не стоит ждать каких-либо изменений. Автор статьи приводит информацию о добыче урана и переработке его в ядерное топливо, описывает оптимизацию современного топлива, отмечает и топливо для опытных реакторов. В заключение высказывает мысль об обеспечении атомных электростанций практически неограниченным количеством топлива для получения электроэнергии.