

Jaderné elektrárny

Energetické koncepce velké většiny států včetně ČR počítají s rostoucí spotřebou elektrické energie, největší trend vzrůstu její výroby bude u ekonomicky rychle rostoucích zemí, především v Asii, Jižní Americe a Severní Africe. Svou roli hraje i populační rozvoj. To zákonitě vyvolá potřebu výstavby dalších zdrojů energie, především elektráren a tepláren. Zásoby ekonomicky výhodných fosilních zdrojů jsou však v současné době odhadovány na několik desítek až stovek let. Vzhledem k budoucnosti je proto nutné hledat a rozvíjet nové zdroje a efektivnější způsoby výroby tepelné a elektrické energie a zvyšovat účinnost jejího transportu a spotřeby.

Jednou z relativně nových forem využitelné energie, kterou se během posledních šedesáti let podařilo zvládnout, je energie jaderná. Ta by zřejmě po dořešení technologických problémů rychlých množivých reaktorů a především zvládnutím jaderné fúze odsunula pomyslnou hranici vyčerpání neobnovitelných energetických zdrojů do nedohledna.

V posledních letech však prožívá jaderná energetika určitou krizi. Přes rychlý poválečný rozvoj, příznivé prognózy a euforii šedesátých a sedmdesátých let probíhá od druhé poloviny osmdesátých let útlum jejího rozvoje, nejprve v USA a později i v Evropě. Jedním z hlavních důvodů je reakce veřejnosti na havárie jaderných elektráren (Three Mile Island, Černobyl a Fukušima), ty jsou zřejmé z *obr. 3.1*. Proč tomu tak je, když negativní dopady jejich provozu na životní prostředí na jednotku vyrobené energie jsou podle nezaujatých komparačních studií v porovnání s většinou ostatních zdrojů ve většině parametrů podstatně nižší a důsledky některých ekologických katastrof jsou přinejmenším srovnatelné (Bóphál, aj.)? Důvody souvisí především se specifikem jaderných elektráren ve vztahu k ostatním zdrojům elektrické energie, s obavou obyvatel (a jejím častým zneužíváním) z následků havárií a následným únikem radioaktivních prvků, s nakládáním s radioaktivním "vyhořelým" palivem i s odpady vzniklými během provozu a zpracování, či přepracování jaderného paliva. Svou úlohu hraje i nebezpečí zneužití radioaktivních i štěpitelných produktů pro vojenské a teroristické účely.

Ve vyspělých zemích vzrůstá v současnosti tlak na přehodnocování energetické situace a snižování finančních prostředků na výzkum i výstavbu jaderných zařízení. Na druhé straně významně vzrostly investiční náklady na stavby nových elektráren, především díky náročnějším podmínkám pro udělování licencí. Svou roli sehrála i nasycenost optimálního podílu jaderných elektráren v elektrizačních soustavách některých států, omezení vývozu jaderných technologií do krizových oblastí a v neposlední řadě i lobby ostatních výrobců elektrické energie, která tuto situaci využila. Snížení finančních prostředků mj. poznamenalo negativně i vývoj moderních typů reaktorů.

Jaderná energetika bude obecně akceptována až její příznivci prokáží převahu jejích pozitiv nad negativy. Současně však musí navrhnout i její oponenti proveditelné alternativy s bezpečnějšími, realizovatelnými a ekonomickými zdroji energie, které uspokojí budoucí poptávku a nebudou neúměrně zatěžovat rozpočet domácností. Společným cílem obou stran musí být udržitelný rozvoj na naší planetě.

Omezený rozsah dovoluje prezentovat jen základní informace z oblasti jaderné energetiky. Poměrně rozsáhlá část týkající se elementárních fyzikálních základů je uvedena pro

usnadnění pochopení problematiky týkající se provozu jaderných elektráren a v tomto smyslu je doplněna o názorné příklady.

Vzhledem k tomu, že v ČR jsou instalovány a v perspektivě příštích desetiletí i plánovány jen jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory a také ve světě je v současnosti většina provozovaných, stavěných i projektovaných elektráren tlakovodních, je i obsah kapitoly zaměřen především na tento typ, speciálně na jejich primární část.

Specifika jaderné elektrárny

V jaderných elektrárnách se využívá tepelná energie vznikající při řízené nukleární (jaderné) reakci. Dosud je zvládnuta a využívána pouze řízená štěpná reakce, na bezpečném zvládnutí řízené termojaderné reakce (termojaderné syntézy), která by prakticky vyřešila problematiku energetických zásob, se intenzivně pracuje v řadě výzkumných pracovišť. Termojadernou syntézu se k výrobě energie bohužel podařilo využít resp. zneužít pouze spontánně – v tzv. vodíkové bombě.

Jaderné elektrárny vyrábí tepelnou a z ní elektrickou energii zcela odlišným způsobem než klasické tepelné elektrárny, kde teplo získáváme chemickou exotermickou reakcí – oxidací zejména fosilních paliv. Kromě principu tepelného zdroje jsou zde i další podstatné rozdíly:

- "Palivo" pro výrobu tepla na určité období (kampaň) je prakticky ve všech jaderných elektrárnách umístěno v reaktoru, oproti kontinuální dodávce zvenku u tepelných elektráren.
- Koncentrace energie v palivu na jednotku hmotnosti je v jaderných elektrárnách podstatně vyšší. Z 1 Kg hnědého uhlí vyrobí tepelná elektrárna asi 1 kWh elektrické energie. Jaderná elektrárna s tlakovodními reaktory vyrobí z 1 kg jaderného paliva přibližně 1 GWh, tj. asi 10^6 krát více. Srovnáme-li množství vytěžené horniny, jsou tyto poměry vzhledem k nízkému obsahu uranu v rudách podstatně mírnější, přesto opět vypovídají ve prospěch jaderných elektráren. Na jednotku vyrobené energie je třeba u tepelných elektráren vytěžit řádově 10 až 100krát více horniny (včetně hlušiny) než pro jaderné
- Při štěpných reakcích vznikají radioaktivní izotopy s různě dlouhými poločasy rozpadu, tzn., že s palivem, ani se zařízením, které se nacházelo v okolí štěpné reakce, nelze volně nakládat několik desítek až milionů let a po celou tuto dobu musí být zabezpečeno proti úniku škodlivého záření a možnému zneužití
- V jaderných reaktorech nelze skokem přerušit vývin tepla, neboť i po "odstavení" reaktoru, dochází v aktivní zóně k reakcím (rozpadům), doprovázeným vývinem tepelné energie. Např. tlakovodní reaktory produkují ještě minutu po odstavení víc než 1% původně generované tepelné energie. To je např. u reaktoru v elektrárně Temelín 30 MW_t, které je potřeba bezpečně odvést tak, aby nedošlo k varu chladiva, přehřátí palivových elementů v aktivní zóně a porušení jejich pokrytí spojeným s únikem radioaktivního materiálu.
- Odvod zbytkového tepla po odstavení reaktoru lze zpravidla provést jen prostřednictvím tepelných výměníků. To je jedním z důvodů, proč je v jaderných elektrárnách více chladicích smyček (okruhů, vek kterých se předává teplo z reaktoru směrem k turbínám). Tímto opatřením se podstatně zvyšuje spolehlivost odvodu tepla z reaktoru při poruše na technologickém zařízení chladicího okruhu.

- Během kampaně reaktoru, tj. provozu s jednou vsázkou, se mění struktura paliva – snižuje se obsah štěpitelné složky (tzv. vyhořívání). Tento stav je s ohledem na povolené rozsahy regulačních, řídicích a bezpečnostních orgánů reaktoru nutné průběžně kompenzovat množstvím absorbátoru v aktivní zóně.
- Poměrně strmé teplotní spády mezi palivem a chladivem, s tím spojená možnost poškození palivových elementů nebo jejich pokrytí a úniku radioaktivních štěpných produktů.
- Technicky, technologicky i ekonomicky náročnější palivový cyklus, tj. cesta paliva od těžby až po ukládání nebo přepracování vyhořelých palivových článků.
- Absence škodlivin CO_2 , NO_x a SO_2 vypouštěných do ovzduší.

Popis jaderné elektrárny

V zásadě každou jadernou elektrárnu lze prostorově rozdělit z hlediska technologií, provozního režimu a zabezpečení na část zajišťující provoz reaktoru, část strojní – zajišťující provoz turbín a výroby elektrické energie a část zajišťující technologicky provoz elektrárenského bloku. Reaktorová část se strojní zpravidla tvoří jeden společný stavební celek, tzv. **hlavní výrobní blok**, rozdělený vnitřními vestavbami na zařízení s aktivními provozy – reaktorovnu a část se strojním a k němu příslušejícím technologickým zařízením – strojovnu.

V reaktorovně jsou umístěny technologie podílející se na výrobě tepelné energie a jejím přenosu do strojovny. Hlavními komponentami jsou: reaktor, hlavní kompenzátor objemu (u tlakovodních reaktorů), barbotážní systém, zásobníky vody sloužící k dochlazování reaktoru, bazény čerstvého a vyhořelého paliva, systémy kontinuálního čištění chladiva, systémy doplňování chladiva, regulační a bezpečnostní systémy, systémy měření a kontroly aj. Zařízení, v nichž se nacházejí aktivní části, včetně chladiva reaktoru o provozních parametrech (tlak a teplota), je u novějších elektráren umístěno v tzv. kontejnmentu. Kontejnment je ochranná obálka lokalizující dopad případné poruchy. Jeho úkolem je zajistit bezpečnost okolí před účinky havárie v primárním okruhu i jeho bezpečnost před vnějšími vlivy. Kontejnment vytváří hermeticky oddělený prostor. Jeho pevnost je navržena tak, aby vydržel přetlak při úniku chladiva i při maximální projektové havárii (roztržení hlavního cirkulačního potrubí). Za normálního provozu je v kontejnmentu udržován mírný podtlak a proudění vzduchu ve směru vzrůstající aktivity tak, aby nedocházelo k případnému úniku radioaktivních izotopů atmosférou do okolí. Některé v současnosti stavěné elektrárny mají kontejnmenty dva, jeden ocelový – vnitřní (zajišťující mj. lépe hermetičnost a umožňující chlazení z vnějšku) a druhý z předpjatého betonu.

V reaktorovně musí být jednotlivé technologie účelně uspořádány tak, aby zaujímaly co nejmenší prostor a snížily se tak hydraulické ztráty i ztráty přenosem tepla o nízkých parametrech, v neposlední řadě i stavební náklady (kontejnment nestavebně a tím i finančně velmi náročná komponenta). Jaderný reaktor je zpravidla umístěn ve vertikální ose reaktorové části a symetricky obklopen biologickým stíněním, tepelnými výměníky a oběhovými čerpadly. Nad víkem (u varných pod dnem) reaktoru je volný prostor, zaručující bezpečnou výměnu paliva i dalších vestaveb reaktoru a přístup k regulačnímu a bezpečnostnímu systému. Tepelné výměníky, oběhová čerpadla a spojovací potrubí jsou s ohledem na co nejmenší mechanické namáhání způsobené teplotními dilatacemi umístěny v pružném nebo pohyblivém loži. Z hlediska prostoru je výhodnější vertikální poloha tepelných výměníků, u

tlakovodních reaktorů VVER jsou však parogenerátory uloženy horizontálně. Parogenerátory u vodou chlazených reaktorů mají být uloženy v takové výši, aby při odkrytí víka reaktoru zůstala zaplavena celá chladicí smyčka vodou.

Pro reaktorovou část platí zpřísněné bezpečnostní předpisy. Vstup do ní má jen omezený počet zaměstnanců. Je rozdělena do několika zón, zpravidla hermeticky oddělených, s různými stupni povoleného přístupu až zákazu vstupu během provozu reaktoru.

Strojovna se prakticky neliší od tepelných elektráren, turbíny však pracují při velkých výkonech s nižšími parametry páry, u tlakovodních a varných reaktorů se sytou párou. Tomu odpovídají větší rozměry trubiny, separátorů, potrubí a armatur, i požadavek na co nejkratší cestu páry od výměníku k turbíně.

Ve většině případů se i u velkých výkonů používá čistě blokové uspořádání, tzn. jedna turbína na reaktor, bez zásadního požadavku na orientaci osy turbíny. Výjimku tvoří např. bloky s reaktory VVER 440 (např. Dukovany) se dvěma podélně uspořádanými turbínami o výkonu 220 MW.

V jaderných elektrárnách se musí i strojovna zabezpečit proti případným únikům radioaktivních částic z páry a kondenzátu. Tyto se mohou do sekundárního okruhu dostat netěsnostmi v tepelných výměnících (parogenerátorech) mezi primárním a sekundárním okruhem. Z těchto důvodů je zvýšený požadavek i na těsnost zařízení strojovny a na vrácení úniků do parovodního cyklu. Pokud jsou v sekundárním oběhu obsaženy radioaktivní plyny (H₃, O₁₉, N₁₆, N₁₇) jsou pomocí ejektoru spolu se vzduchem průběžně odsávány a přes zásobník, který slouží jako zpoždovací člen zajišťující pokles aktivity a přes filtry, vypouštěny komínem do atmosféry.

Mezistrojovna – prostor mezi reaktorovou částí a strojovnou, ve kterém jsou mj. instalovány technologie související se sekundární částí parogenerátorů, např. turbonapáječky včetně kondenzátorů, napájecí hlavy, napájecí a parní kolektor. Mezi důležité zařízení zde instalované patří i pomocné napáječky používané při najíždění a odstavování elektrárny i při jejím udržování v tzv. horké rezervě (stav, kdy je elektrárna připravena na připojení k elektrizační soustavě a výrobou pokrývá jen svoji vlastní spotřebu) a olejové hospodářství. V mezistrojovně bývá umístěn i velín bloku.

Pomocné provozy. V jaderné elektrárně pracuje celá řada provozů, které sice nejsou součástí hlavního technologického procesu, ale bez nichž by nebyl možný řádný chod elektrárny. V sekundární části jsou pomocné provozy obdobně pomocným provozům parní části tepelné elektrárny. Jejich požadovaná spolehlivost je však u jaderných elektráren vyšší. V primární části je mnoho pomocných provozů se speciálním režimem, neboť pracují s radioaktivními látkami.

Mezi nejdůležitější pomocné provozy primární části patří: sklady kontejnerů s palivem; systémy úpravy a čištění vody primárního okruhu a vody z bazénu výměny paliva; systémy speciální kanalizace a čištění odpadních vod z různých filtrů, odluhů, odkalů, úniků netěsnostmi, prádelen atd.; sklad a zahušťování kapalných aktivních odpadů; sklad pevných aktivních odpadů; příprava dezaktivních roztoků; speciální kontrolní laboratoře; zásobníky technických plynů atd. Pomocné provozy primární části bývají umístěny v samostatné budově a jsou často společné pro více hlavních výrobních bloků.

Jedním z důležitých provozů z hlediska bezpečnosti jsou redundantní dieselgenerátorové stanice. Tyto mají za úkol v případě ztráty hlavního i rezervního napájení vlastní spotřeby elektrárny elektrickou energií toto napájení nahradit v takovém rozsahu, aby bylo možné reaktor bezpečně odstavit, udržovat je v podkritickém stavu a zajistit odvod zbytkového tepla v potřebném množství a po potřebnou dobu a zajistit napájení všech aktivních systémů souvisejících s jadernou bezpečností.

Jaderná elektrárna a její okolí se dělí do několika pásem podle povolené úrovně radioaktivity na pásmo kontrolované, čisté pásmo, hygienické ochranné pásmo a pásmo sledování a ochrany okolí. Např. celý primární okruh spadá do kontrolovaného pásma.

Okruhy v jaderných elektrárnách

Teplu vzniklé při štěpení jaderného paliva se odvádí z reaktoru uzavřeným okruhem prostřednictvím teplonosného média – *chladiwa*, kterým může být voda, plyn, nebo tekutý kov (Na), buď přímo do turbíny, je-li elektrárna jednookruhová, nebo častěji do tepelného výměníku, je-li elektrárna dvojnookruhová. Ve výměníku, kterému se říká parogenerátor, se vyrobí pára o příslušných parametrech, která podobně jako v tepelné elektrárně pohání turbínu mechanicky spojenou s alternátorem. V elektrárnách, kde je jako chladivo používán tekutý kov (sodík), bývá z hlediska bezpečnosti mezi primárním a sekundárním okruhem ještě tzv. **vložený okruh**, kde proudí také tekutý kov zpravidla s vyšším tlakem než v primárním okruhu. Jeho úkolem je zabránit úniku radioaktivních štěpných produktů směrem k sekundárnímu okruhu. Tyto elektrárny mají často přívlastek *tříokruhové*.

Oběh chladiva mezi zdrojem (reaktorem) a odběrem tepla (turbínou, výměníkem) včetně příslušného technologického zařízení se nazývá **primární okruh** (primární smyčka, primár).

Oběh teplonosného média (páry) mezi parogenerátorem a turbínou se nazývá **sekundární okruh** (sekundární smyčka, sekundár).

Základní typy jaderných reaktorů

Součástí reaktoru jsou tyto hlavní komponenty: Jaderné palivo, moderátor, látka pro odvod tepla z aktivní zóny – chladivo, hermetický systém, stínění, reflektor, množivá zóna a systémy řízení, měření, ochrany a diagnostiky.

Kombinací především prvních tří jmenovaných komponent spolu s energetickým spektrem štěpicích neutronů lze vytvořit celou řadu typů jaderných reaktorů. Prakticky každá z komponent může mít různou, význam některých může být potlačen (moderátor u rychlých reaktorů) nebo naopak přebírá funkce jiných částí (moderátor může být současně chladivem, reflektor součástí řídicího systému atd.), a tak existuje mnoho kombinací a tím i možných koncepcí reaktoru. Ne všechny jsou z mnoha důvodů vhodné. Během více jak půlstoletí výroby jaderných reaktorů se osvědčilo několik typů, které jsou v současnosti projektovány a stavěny, pochopitelně s výraznými inovacemi vedoucími k vyšší spolehlivosti a bezpečnosti včetně orientace na pasivní a inherentní principy.

Rozdělení do skupin je možné podle více hledisek. V počátcích jaderné energetiky to byly dvě základní skupiny určené vzájemným *uspořádáním paliva a moderátoru* v reaktoru:

Homogenní reaktory – v nich je palivo rozptýleno v moderátoru buď formou roztoku, chemické sloučeniny, slitiny nebo prosté suspenze práškového paliva v kapalině. Jejich výhodou je možnost plynulé výměny paliva během provozu reaktoru.

Heterogenní reaktory – v nich je jaderné palivo odděleno od moderátoru uložením v palivových elementech s hermetickým pokrytím tak, aby se zabránilo úniku aktivních látek do chladiva nebo do moderátoru. U heterogenních reaktorů bývá chladivo zároveň i moderátorem.

V energetice jsou využívány především heterogenní reaktory, které jsou technologicky více zvládnuté. V provozu je několik demonstračních a experimentálních vysokoteplotních reaktorů, o kterých lze hovořit jako o (kvazi)homogenních. Jejich palivo je ve formě koulí sestávajících z mikroelementů paliva (peletek UO_2) s vyšším obohacením a grafitu, které jsou průběžně vsypávány do reaktoru a ze dna po "vyhoření" odebírány. Grafit zde slouží jako moderátor i bariéra proti úniku štěpných fragmentů do prostředí. Homogenní reaktory najdou zřejmě uplatnění v blízké budoucnosti jako tzv. podkritické systémy, se kterými se počítá při likvidaci (transmutaci) vysokoaktivních jaderných odpadů. Jaderné palivo spolu s vysokoaktivními odpady zde budou obsaženy v roztavených solích plnících funkci chladiva.

Z fyzikálního hlediska, tj. podle energie neutronů, při které dochází ke štěpení, a tím i podle jejich rychlosti, dělíme reaktory v zásadě na tepelné a rychlé.

Tepelné reaktory – ke štěpení jaderného paliva u nich dochází především tepelnými neutrony, to jsou neutrony s energií do 1 eV. Tento typ reaktorů musí obsahovat moderátor snižující hladinu energie právě vzniklých neutronů o 6 až 7 řádů při jejich nízké absorpci.

Rychlé reaktory – jsou to reaktory v podstatě bez moderátoru, které využívají ke štěpení především rychlé neutrony, tj. neutrony s energií nad 0,1 MeV. Protože zároveň se štěpením ve většině těchto reaktorů vzniká nový štěpitelný materiál, nazýváme je též množivé reaktory.

V oblasti energií neutronů mezi tepelnými a rychlými pracují reaktory epitermální a intermediální. Epitermální (netepelné) reaktory – v nich je štěpení způsobeno především neutrony s energiemi ležícími v oblasti nad 1 eV, ale nedosahující vyšších energií. Intermediální reaktory pracují převážně s neutrony středních energií, tj. s neutrony o energiích řádově desítky eV až desítky keV. Oba uvedené typy reaktorů se v energetice prakticky neuplatnily.

Reaktory je možno dělit do skupin i podle účelu na:

- Energetické – vyrábějící tepelnou energii určenou k distribuci a přímé spotřebě (jaderné vytápny) nebo k její přeměně na jinou konečnou formu, nejčastěji elektrickou (jaderné elektrárny) či mechanickou (jaderné pohony). Častá je i výroba více druhů energií (jaderné teplárny).
- Výzkumné – s různou hustotou neutronového toku (výkonu), sloužící k výzkumu především v oblasti jaderné fyziky, záření a vlivů záření na materiály a živé organismy.
- Vývojové (experimentální) – určené k získání fyzikálních údajů potřebných pro projektování a vývoj nových koncepcí reaktorů a modelování jejich různých provozních

i havarijních stavů. Speciální část tvoří tzv. prototypové nebo demonstrační reaktory mající stejné vlastnosti, ale nižší parametry oproti reaktoru vyráběnému v budoucnu sériově.

- Průmyslové – používané např. v chemickém průmyslu k realizaci radiačně chemických přeměn ve větším měřítku, k výrobě vodíku, v potravinářském průmyslu k výrobě pitné vody, ke konzervaci, ve farmakologii, v zemědělství (osiva), při konzervaci a restauraci starožitností atd.
- Produkční - slouží k výrobě různých izotopů, zářičů i k výrobě sekundárního paliva (tzv. breederů).
- Školní – s nízkým až velmi nízkým výkonem (tzv. nulový), s vysokým stupněm zajištění s ohledem na možnost bez rizika modelově řešit i různé krizové stavy reaktoru či elektrárny. Jsou využívány spolu s trenážery pro výcvik budoucí obsluhy reaktoru, k průběžnému ověřování jejich znalostí, k řešení různých modelových situací atd.

Energetické reaktory

Energetické reaktory jsou nejčastěji rozdělovány do skupin podle použitého chladiva a moderátoru. Pokud se reaktor svou fyzikální podstatou nebo parametry liší od obvyklých typů, uvádí se v označení i tato vlastnost (rychlý, pokročilý, vysokoteplotní atd.). Palivo se v označení typu reaktoru neuvádí vzhledem k tomu, že se dosud téměř výhradně používá uran lišící se pouze formou a stupněm obohacení. Tabulka uvádějící nejvíce provozované typy energetických reaktorů je uvedena spolu s jejich procentním zastoupením na *obr 3.11*.

Na konci roku 2011 bylo provozováno celkem na 434 jaderných energetických reaktorů s celkovým instalovaným elektrickým výkonem téměř 368 GW a 64 reaktorů bylo ve výstavbě s celkovým výkonem téměř 62 GW (aktualizovaná data PRIS z 5.12.2011). Jednotlivé typy reaktorů jsou z technologických, bezpečnostních i ekonomických důvodů zastoupeny nerovnoměrně. Na obrázku je uvedeno procentní zastoupení provozovaných energetických reaktorů v součtu jejich instalovaných výkonů. Toto rozdělení se v nejbližší budoucnosti zřejmě ještě více změní ve prospěch bezpečných tlakovodních reaktorů (z nově budovaných reaktorů je 83% tlakovodních).

Formy jaderného paliva

Jadernými palivy v reaktoru jsou nejčastěji přírodní uran obohacený uranem ^{235}U (1,5 ÷ 5 %); přírodní uran (s izotopickým složením 99,276% ^{238}U , 0,718% ^{235}U a cca 0,004% ^{234}U); směsné palivo MOX (mixed oxide fuel) vyrobené z ochuzeného uranu z obohacovacích závodů a plutonia, které se získává separací z "vyhořelého" jaderného paliva, popřípadě z vyřazených jaderných hlavic. U tohoto paliva odpadá energeticky náročná fáze obohacování. Ve směsi je 7% Pu, v případě použití vojenského plutonia cca 5%) a thorium ^{232}Th , které se po zachycení neutronu změní na protaktinium a následněm β^- rozpadu na dobře štěpitelný ^{233}U . Palivo je možné vyrobit ve formě kovu nebo v keramické formě, zpravidla jako oxid, výhledově i jako karbid, nitrid nebo sicilid.

Kovový uran – používal se především v počátcích jaderné energetiky u grafitem moderovaných reaktorů i u některých reaktorů tlakovodních. Jeho výhodou je dobrá tepelná vodivost, vyšší koncentrace štěpitelných jader a jednodušší přepracování vyhořelého paliva. Taví se však již při teplotě 1133°C a má poměrně malou chemickou odolnost. Vzhledem k

těmto nepříznivým vlastnostem se uran v čisté kovové formě v současné době prakticky nepoužívá. Pokud je použití kovového uranu účelné, zlepšují se chemické a tepelné vlastnosti různými přísadami (Cr, Ni, Zr, Mo, Al).

Keramické palivo – nejčastěji používaný UO_2 má řadu výhod: vysoká teplota tavení (2878 °C), nereaguje s ostatními materiály, nemá fázové přeměny. Nevýhodou keramického paliva je jeho nižší tepelná vodivost, nižší koncentrace jader a z toho vyplývající potřeba vyššího obohacení. Keramická paliva se z práškové formy lisují do tablet (pelet), pak se spékají a velmi přesně opracovávají. Vloží se do povlakové trubky, vakuově vysuší, naplní ochranným plynem pod tlakem a hermeticky uzavřou (zavaří).

Samotná peleta tvoří tzv. první ochrannou bariéru, pokud nedojde k jejímu poškození (tavení) zůstává v ní 99% radioaktivních látek.

Palivové elementy

Vlastní palivo uzavřené v ochranném obalu zabraňujícím úniku štěpných produktů včetně příslušných komponent (např. plnicí plyn přítlačné pružiny zajišťující bezpečnou dilataci a minimální ztráty neutronů mezi palivovými tabletami, aj.) nazýváme palivový element. Palivový element je často ve vztahu k jeho tvaru nazýván též palivový prut, proutek, palivová tyč nebo peleta (kulový tvar, používaná jako volně sypané palivo). Palivový element tedy základní, hermeticky uzavřený palivový stavební prvek, ze kterých se skládá palivový soubor. Na kvalitě palivových elementů a jejich pokrytí závisí bezpečný provoz reaktoru. Porušení těsnosti pokrytí paliva znamená prolomení druhé ochranné bariéry a možnost vyšší kontaminace chladiva radioaktivními štěpnými produkty.

Poruchy pokrytí se eliminují vysokou kvalitou povlakových materiálů, dokonalým vakuovým vysušením před hermetickým uzavřením, vhodně zvoleným tlakem plynu v povlakové trubce a nízkými trendy změn výkonu reaktoru. Povlakové materiály musí být vyrobeny z materiálů vyhovujícím těmto požadavkům:

- nízká absorpce neutronů, nízká sekundární reaktivita, stálost materiálu
- vysoký součinitel tepelné vodivosti, nízký součinitel tepelné roztažnosti resp. minimální rozdíl součinitelů tepelné roztažnosti paliva a povlakové trubky
- maximální hermetičnost
- vysoká mechanická pevnost i při vysokých teplotách
- vysoká odolnost proti korozi i erozi ze strany chladiva i paliva
- dobrá tažnost a svařitelnost
- cenově příznivý