

Jaderná bezpečnost fúzních elektráren a jejich vliv na životní prostředí

Slavomír ENTLER (entler@ipp.cas.cz), Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR, Praha
Václav DOSTÁL, Strojní fakulta ČVUT, Praha

Deskriptory *INIS*: DESIGN; REACTOR SAFETY; THERMONUCLEAR FUELS; THERMONUCLEAR REACTIONS; THERMONUCLEAR REACTOR MATERIALS; THERMONUCLEAR REACTORS; TOKAMAK DEVICES

Podle plánu Evropské unie a dalších světových velmocí má být první fúzní elektrárna uvedena do provozu do roku 2050. Klíčovými rysy budoucí fúzní energetiky budou palivo z lehkých chemických prvků umožňující bezemisní průmyslovou výrobu elektrické energie s prakticky nevyčerpatelnými a globálně dostupnými zásobami paliva, vysoká teplota paliva poskytující inherentní jadernou bezpečnost fúzních reaktorů a vysoké tepelné a neutronové zatížení fúzních reaktorů vyžadující odolné materiálové a konstrukční řešení jaderných komponent reaktorů. Tyto rysy budou každý svým způsobem ovlivňovat jadernou bezpečnost fúzních elektráren a jejich vliv na životní prostředí.

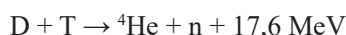
1. ÚVOD

V roce 1997 vyvinul fúzní reaktor JET (Joint European Torus) řízenou termojadernou reakcí fúzní výkon 16 MW a prokázal tak možnost energetického využití jaderné fúze. V současné době po celém světě pracují desítky výzkumných zařízení, které rozvíjejí znalosti o chování termojaderného plazmatu a potřebných technologiích. Testovat zařízení a technologie pro první fúzní elektrárny bude mezinárodní termojaderný experimentální reaktor ITER o fúzním výkonu 500 MW, který se staví ve francouzské Provence [1]. Uvedení reaktoru do provozu je naplánováno na rok 2025, plného výkonu reaktor dosáhne v roce 2036. Na základě získaných zkušeností budou postaveny první demonstrační fúzní elektrárny označované zkratkou DEMO.

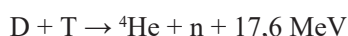
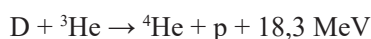
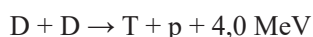
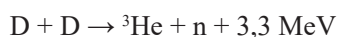
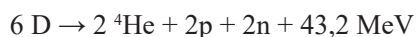
Podle plánu Evropské unie by měla být první elektrárna z jaderné fúze vyrobena do roku 2050 [2].

2. FÚZNÍ REAKCE

V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader izotopů vodíku deuteria a tritia (DT reakce), protože z existujících fúzních reakcí umožňuje nejsnáze vytvořit energetický zisk. Optimální teplotou pro průběh DT reakce je přibližně 163 milionů °C. Při takto vysokých teplotách budou reaktanty ve skupenství plně ionizovaného plazmatu [3]. Deuterium se bude získávat separací z vody, tritium se bude získávat jadernou reakcí ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ izotopu lithia ${}^6\text{Li}$ s neutrony vznikajícími při fúzní reakci přímo v reaktoru. Celkový proces lze zjednodušeně zapsat jako souhrnnou reakci deuteria a lithia se vznikem helia:



Druhá generace fúzních reaktorů bude uvolňovat energii slučováním samotných jader deuteria (DD reakce) a tritium již nebude nutné. Většina existujících fúzních zařízení tuto reakci využívá, avšak dosažení energetického zisku je obtížnější než v případě DT reakce. Reakční proces zahrnuje čtyři jaderné reakce a lze jej za předpokladu úplné recyklace reaktantů souhrnně zapsat jako reakci šesti jader deuteria za vzniku dvou jader helia, dvou protonů, dvou neutronů a uvolnění 43,2 MeV energie:



V dalších generacích fúzních reaktorů bude využívána bezneutronová fúze, například fúzní reakce jader vodíku a bóru, při které vznikají pouze elektricky nabitě částice udržitelné magnetickým polem reaktoru:

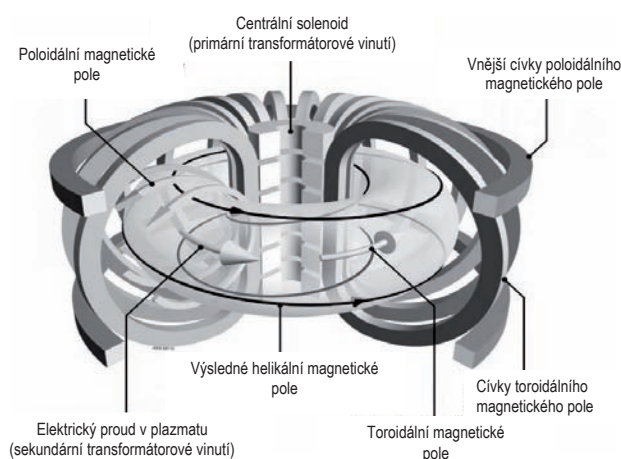


Bezneutronová fúze odstraní sekundární aktivaci konstrukce reaktoru fúzními neutrony a otevře cestu pro přímé magnetohydrodynamické generování elektrické energie bez použití termodynamického cyklu [3].

3. TOKAMAKY

Nejpokročilejšími fúzními reaktory jsou tzv. tokamaky na bázi magnetického udržení plazmatu (*obr. 1*). Tokamak je původně ruský koncept toroidálního reaktoru charakteristický indukčně generovaným elektrickým proudem v plazmatu, který spoluvytváří magnetické pole a ohřívá plazma [3].

Hlavní částí tokamaku je prstencová vakuová nádoba, umístěná na transformátorovém jádru. Současně tokamaky používají vzduchové transformátory s centrálním solenoidem. Transformátor indukce v plazmatu uvnitř nádoby vysoký elektrický proud, který generuje poloidální magnetické pole. Okolo vakuové nádoby jsou navinuty magnetické cívky, které generují toroidální magnetické pole. Součtem obou polí vzniká helikální magnetické pole, které spoutává plazma. Indukovaný proud v plazmatu současně plazma ohřívá.

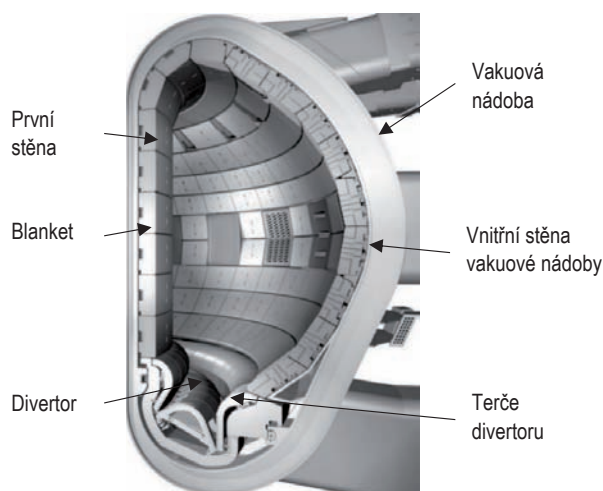


Obr. 1 Základní schéma reaktoru typu tokamak

Pro dosažení teplot potřebných pro průběh termojaderné reakce na úrovni stovek milionů °C je plazma ohříváno fyzikálně a technicky sofistikovaným systémem ohřevu a vlečení elektrického proudu plazmatem. Nejprve je plazma ohříváno indukovaným elektrickým proudem o velikosti až desítek megaampér. Se vzrůstající teplotou ale klesá elektrický odpor plazmatu a ohřev elektrickým proudem se stává neúčinným. Další ohřev plazmatu pak zajišťují svazky urychlených neutrálních atomů vstříkovaných do plazmatu a elektromagnetické vlny.

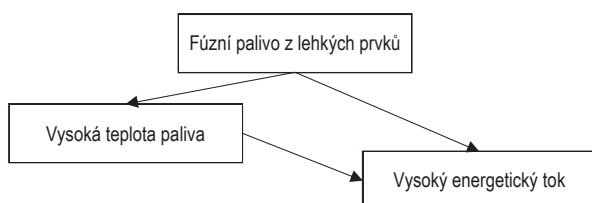
4. JADERNÁ ZÓNA

Při DT reakci, zvolené pro první fúzní energetické reaktory, se fúzní energie uvolňuje ve formě kinetické energie heliových jader a neutronů vznikajících při reakci. Rozdělení energie odpovídá obrácenému poměru hmotnosti heliového jádra a neutronu: přibližně 4/5 uvolněné energie (~14 MeV) odnáší neutron a 1/5 energie (~3,6 MeV) získává heliové jádro. Heliové jádro je kladně nabitě, a proto zůstává v plazmatu zachyceno magnetickým polem reaktoru, předává svou energii ostatním částicím plazmatu a ohřívá tak plazma. Neutrony bez elektrického náboje opouštějí plazma a pronikají do jaderných komponent reaktoru, kde předávají svou energii. Hranicí jaderné zóny je vnitřní stěna vakuové nádoby. Hlavními částmi jaderné zóny jsou první stěna, divertor a blanket reaktoru (*obr. 2*). První stěna a divertorové terče se společně označují jako komponenty vystavené plazmatu [4]. Vysokoenergetické neutrony a tepelný tok z horkého paliva vytvářejí energetický tok působící na jaderné komponenty.



Obr. 2 Jaderné komponenty fúzního reaktoru

Palivo z lehkých prvků, vysoká pracovní teplota paliva a vysoký energetický tok jsou klíčovými rysy budoucích fúzních energetických zdrojů (obr. 3). Tyto rysy pak implikují sekundární rysy fúzních zdrojů, především inherentní jadernou bezpečnost a nízký vliv na životní prostředí.



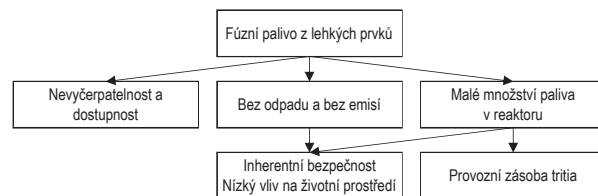
Obr. 3 Klíčové charakteristické rysy fúzních zdrojů energie

5. FÚZNÍ PALIVO Z LEHKÝCH PRVKŮ

Fenomenologicky představuje využití paliva z lehkých prvků další krok směrem ke zrodu vesmíru. První fúzní palivo vzniklo nukleosyntézou již krátce po velkém třesku a umožnilo zrození prvních hvězd syntetizujících další lehké prvky. Štěpné palivo z těžkých prvků se začalo tvořit až v závěru prvního hvězdného cyklu jadernou fúzí při explozích prvních supernov. Zahájení tvorby fosilních paliv se datuje nesrovnatelně později do dějin Země v období Karbonu před cca 350 miliony let. Původ paliv přímo implikuje jejich dostupné množství – lehké prvky fúzního paliva tvoří většinu viditelné hmoty vesmíru.

Na Zemi se lehké prvky použitelné jako palivo pro fúzní elektrárny nacházejí ve velkém množství ve vodě, především ve světových oceánech. Díky tomu

je fúzní palivo dostupné kdekoli na Zemi. Zjednodušený strom kauzálních vztahů fúzního paliva z lehkých prvků ukazuje obr. 4 (s výjimkou vztahů na obr. 3).



Obr. 4 Zjednodušený strom kauzálních vztahů fúzního paliva z lehkých prvků

První generace fúzních elektráren bude využívat fúzi jader deuteria a tritia vyráběného z lithia přímo ve fúzním reaktoru. Do palivového cyklu bude proto vstupovat deuterium a lithium jako DLi palivo. Druhá generace fúzních elektráren bude používat jako palivo pouze deuterium označované jako DD palivo.

Izotop vodíku deuterium je přírodní látka, která se přirozeně vyskytuje ve vodě. Ve světových oceánech se nachází $\sim 4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria. Energetická kapacita zásob této součásti vody je přibližně $1,6 \times 10^{31}$ J [5].

OSN odhaduje, že populace Země poroste přibližně do roku 2100, kdy se ustálí na 10 miliardách obyvatel [6]. V tomto roce dosáhne spotřeba energie podle nejhoršího scénáře přibližně $1,75 \times 10^{21}$ J/rok [7]. Při úplném pokrytí této spotřeby jadernou fúzí by zásoby deuteria vystačily 2,81 miliardy let, při pravděpodobnějším pokrytí poloviny celosvětové spotřeby by vystačily přibližně 5,6 miliardy let. To je více než dostatečná doba, protože asi za 5,3 miliardy let dojde k vyhoření fúzního paliva na Slunci a k zániku Země.

Lithium, druhá složka DLi paliva první generace fúzních elektráren, je také přírodní látka. V zemské kůře je přibližně $9,9 \times 10^{10}$ kg lithia a v oceánech $2,47 \times 10^{14}$ kg. Zásoby izotopu lithia ${}^6\text{Li}$ pro první generaci fúzních elektráren jsou celkově $1,83 \times 10^{13}$ kg [5]. Pokud by měla být fúzní reakce DT používána delší dobu, což se nepředpokládá, zásoby lithia v oceánech by stačily na pokrytí poloviny předpokládané celosvětové spotřeby roku 2100 po dobu až 1,53 milionu let.

Stávající fúzní reaktory pracují především s DD plazmatem a je jen otázkou pokroku fúzních technologií, kdy bude možné DD reakci využít i v energetických reaktorech. Deuterium se nachází v běžně dostupné vodě. Tím je dána jeho univerzální dostupnost ve všech zemích po celém světě, v celém antropogen-

ním prostoru. Dostupnost deuteria je kvalitativně vyšší než dostupnost obnovitelných zdrojů energie, které jsou závislé na geografických podmínkách a na nahodilosti počasí. Klimatické výkyvy, např. dlouhotrvající sucho, sice mohou omezit dostupnost fúzního paliva, avšak jeho vysoká energetická kapacita a bezpečnost umožňují jeho snadný transport. Denní spotřeba DD paliva ve fúzní elektrárně o elektrickém výkonu 1 GW_e bude činit zhruba 0,83 kg. Toto množství paliva lze teoreticky získat z pouhých 25 m³ vody. I po započítání reálné výtěžnosti deuteria a jeho ztrát, bude pro zajištění paliva uvažované elektrárny o výkonu 1 GW_e stačit několik desítek krychlových metrů vody denně. Při separaci deuteria z vody dojde ke snížení jeho lokální koncentrace v místě návratu vody do vodního zdroje. Přírodní procesy, jako je difúze a proudění vody, budou přirozeně a nepřetržitě tuto koncentraci vyrovnávat s okolní vodou bez zásahu člověka. Protože čerpání deuteria bude probíhat v malých množstvích v řádu několika kilogramů denně, vliv na životní prostředí bude zanedbatelný.

Primární dostupnost lithia, druhé složky dočasného DLi paliva, je dána jeho nerostnou povahou. Současná těžba lithia probíhá ve velkých suchozemských nalezištích v Chile, Bolívii, USA, Číně a Austrálii. Velké zásoby lithia jsou také u nás v Krušných horách nebo v Srbsku. V oceánech je až 10 000 krát více lithia než na pevnině, avšak jeho získávání doposud nebylo nutné. Zásoby lithia v oceánech potenciálně nabízejí podobně neomezenou dostupnost jako zásoby deuteria. Konkrétní zdroj lithia pro fúzní reaktory tak bude záviset na vývoji komoditní ceny lithia ze suchozemských nalezišť. Cílem vývoje fúzních technologií ale bude přechod fúzní energetiky na DD palivo a vyloučení lithia z palivového cyklu. Využití jaderné fúze dalších prvků, např. vodíku a bóru, dále rozšíří zásoby fúzního paliva. Přímá výroba elektrické energie bez termodynamického cyklu použitím MHD generátorů v budoucnosti umožní až trojnásobně zvýšit účinnost využití fúzní energie. V antropogenním časovém měřítku používaném pro hodnocení obnovitelných zdrojů energie, tj. v období srovnatelném s délkou existence lidstva, proto lze zásoby fúzního paliva v antropogenním prostoru považovat za nevyčerpatelné a dostupné.

Fúzní zdroje energie nebudou vytvářet žádné emise. Jde o bezuhlíkovou metodu výroby elektrické energie, při které se neuvolňují žádné skleníkové plyny. Odpadem fúzní reakce bude přírodní inertní plyn he-

lium, kterého je na Zemi nedostatek. Fúzní elektrárna o elektrickém výkonu 1 GW_e vyprodukuje 0,5 – 1,5 kg helia denně. Helium je základním chladivem používaným v kryogenní technice a ve fúzních elektrárnách se bude používat především pro chlazení supravodivých magnetických cívek. Vyprodukované helium proto bude využito přímo v elektrárně na doplnění chladících systémů.

Protože jaderná fúze probíhá při jakémkoliv množství reaktantů, bude důležitým aspektem inherentní bezpečnosti fúzních reaktorů malé množství fúzního paliva v reaktoru v řádu gramů. Palivo bude do reaktoru průběžně doplňováno a v případě zastavení palivového systému dojde k přirozenému zastavení fúzní reakce. Malé množství paliva v reaktoru také umožní rychlé a nedestruktivní ochlazení paliva prostým kontaktem s konstrukcí reaktoru. Vzhledem k malému množství paliva nepředstavuje bezpečnostní riziko ani jeho havarijný únik z reaktoru.

Podobně jako u štěpných jaderných elektráren bude fúzní reaktor umístěn v ochranném kontejnmentu, jehož úkolem bude zabránit při mimořádných událostech rozšíření radioaktivních látek (tritia a sekundárně aktivovaných materiálů reaktoru) mimo kontrolovaný prostor. V druhém ochranném kontejnmentu bude umístěno tritiové hospodářství. V tritiovém kontejnmentu bude probíhat extrakce deuteria a tritia z transportních médií, uskladnění provozní zásoby deuteria a tritia, uskladnění ³He vznikajícího rozpadem tritia a příprava fúzního paliva. V obou ochranných kontejnmentech bude probíhat kontinuální detritiace vzduchu.

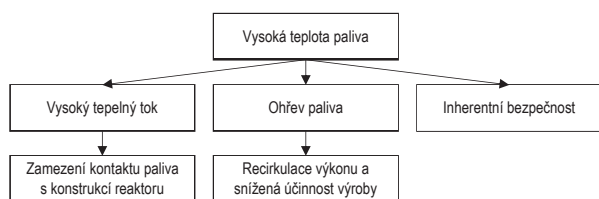
Pro provoz fúzní elektrárny bude nezbytné udržovat provozní zásobu fúzního paliva. V první generaci fúzních elektráren využívajících DT reakci si provozní zásoba paliva vyžádá uskladnění několika kg tritia v tritiovém kontejnmentu. Uskladněné tritium s aktivitou na úrovni ~10⁶ TBq bude představovat největší bezpečnostní riziko fúzních elektráren první generace. Tritium je velice slabý β zářič, který se s poločasem 12,3 let rozpadá na stabilní izotop helia ³He. K jeho odstínění stačí 6 mm vzduchu nebo 1 μm kovu. Zdravotní nebezpečí však hrozí při jeho požití, vdechnutí, anebo pokud se jinou cestou dostane do organismu, kde se může hromadit a z blízkosti ozařovat tělesné tkáně. Důležitou vlastností tritia, stejně jako všech izotopů vodíku, je vysoká permeabilita, která znesnadňuje jeho skladování. Úniku tritia ze skladovacích nádrží lze ale efektivně zabránit vícestěnnými zásobníky. V přípa-

dě úniku plynného tritia mimo kontejnment bude hrát roli, že jde o velmi lehký plyn, který bude přirozeně stoupat vzhůru a rychle se rozptýlovat do atmosféry.

Rizikovým faktorem z hlediska úniku tritia bude zemětřesení a jeho doprovodné jevy. Antiseismická opatření musí v maximální míře garantovat celistvost úložiště tritia a obou kontejnmentů. Seismická ochrana bude zajištěna prostřednictvím řady aktivních a pasivních opatření. Pasivní opatření spočívají především v uložení reaktorového a tritiového kontejnmentu na společnou seismickou izolaci, která utlumí otřesy kontejnmentů a minimalizuje riziko poškození fúzních zařízení a potrubních rozvodů. Mezi aktivní antiseismická opatření patří především monitorovací systém a systém včasného varování před přicházejícím zemětřesením, který zastaví probíhající fúzní reakci v reaktoru ochlazením plazmatu, odstaví fúzní technologie a uzavře zásobníky paliva [8].

6. VYSOKÁ TEPLOTA PALIVA

Fundamentálním rysem termojaderné fúze je, že probíhá pouze při velmi vysokých teplotách paliva. Optimální teplota paliva pro DT reakci je 163 milionů °C [3], optimální teplota jiných fúzních reakcí je ještě vyšší. Při poklesu teploty paliva klesá četnost fúzních reakcí, až se při teplotě několika desítek milionů °C reakce zcela zastaví. Vysoká teplota paliva determinuje celý návrh fúzního reaktoru. Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysoké teploty paliva ukazuje obr. 5.



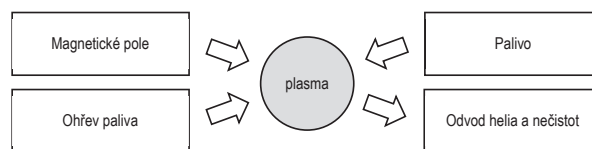
Obr. 5 Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysoké teploty paliva

Vysoká teplota paliva na úrovni stovek milionů °C vyžaduje zamezení kontaktu horkého paliva s konstrukcí reaktoru. Projektované reaktory typu tokamak pro tento účel využívají magnetické pole. Fyzika termojaderného plazmatu v magnetickém poli je ale velmi komplikovaná a vyžaduje náročný výzkum. Nestability plazmatu se projevují stochastickým zatěžováním komponent obklopujících plazma výkonovými špičkami, které mohou lokálně poškodit povrch

komponent. Velmi malé množství horkého paliva v reaktoru a celkově nízká energie plazmatu ale zaručují okamžité ochlazení paliva pouhým kontaktem s povrchem komponent obklopujících plazma.

Ohřev paliva na vysoké teploty vyžaduje sofistikovaný systém ohřevu, jehož spotřeba bude hrát významnou roli ve výkonové bilanci elektrárny. Výkon ohřevu absorbovaný v plazmatu však bude z velké části vyzařen zpět jako součást tepelného výkonu reaktoru a znovu využit pro výrobu elektrické energie. Čistá účinnost elektrárny proto nebude snížena spotřebou systému ohřevu, ale pouze ztrátami při recirkulaci výkonu ohřevu.

Jaderná bezpečnost fúzních reaktorů vychází z toho, že dosažení a udržení teploty paliva v reaktoru vyžaduje aktivní činnost řady reaktorových technologií. V případě selhání těchto technologií dojde pouhým kontaktem horkého plazmatu s první stěnou reaktoru k jeho prudkému ochlazení a jaderná reakce se okamžitě ukončí (obr. 6). Stejně tak lze fúzní reakci kdykoliv podle potřeby zastavit například vstříknutím inertního plynu do plazmatu, který vyvolá ochlazení plazmatu.

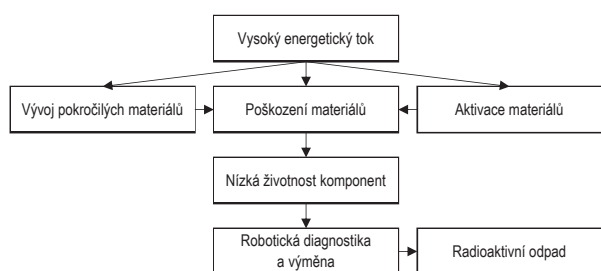


Obr. 6 Nezbytná sofistikovaná podpora fúzní reakce

Protože ve fúzním reaktoru nemůže jaderná reakce z fyzikálních důvodů probíhat bez externí podpory reaktorových technologií, je fúzní reaktor inherentně (vnitřně) bezpečný zdroj energie. To přinese zásadní změnu do bezpečnosti jaderných elektráren. Fúzní reaktory budou stejně jako štěpné reaktory uvolňovat vazebnou energii atomového jádra, avšak odlišný způsob jejího uvolňování odstraní riziko nekontrolované jaderné reakce.

7. VYSOKÝ ENERGETICKÝ TOK

Jaderné komponenty budou vystavené vysokému energetickému toku z plazmatu tvořenému vysokoenergetickými fúzními neutrony, tepelnou radiací z horkého plazmatu a tepelnou kondukcí při přímé interakci s horkým plazmatem. Tento tok způsobí degradaci konstrukčních materiálů komponent. Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysokého energetického toku ukazuje obr. 7.



Obr. 7 Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysokého energetického toku

Neutronové zatížení jaderných komponent fúzními neutrony o energii 14 MeV dosáhne 10^{17} - 10^{18} n/m²s [9] a za 40 let provozu reaktoru může způsobit poškození materiálu komponent až 500 dpa, pokud by nedošlo k jejich výměně [9].

Tepelné zatížení první stěny bude v rozmezí 0,5–5 MW/m² v závislosti na poloze v reaktoru [9]. Při některých nestabilitách plazmatu může tepelný tok na velice krátkou dobu vzrůst až na 300 GW/m² a způsobit natavení nebo vypaření povrchové vrstvy první stěny [10]. Nominální tepelná zátěž divertorových terčů bude 5 – 10 MW/m² [4]. Pulsní výkonové špičky v divertoru mohou při nestabilitách plazmatu dosáhnout až 20 GW/m² [11].

Materiálový výzkum radiačně a tepelně odolných materiálů se soustředí na pokročilé materiály na bázi wolframových kompozitů, laminátů nebo funkčně gradovaných materiálů a na nízkoaktivovatelné feriticko-martenzitické oceli RAFMS. Současné technologické možnosti ale neumožňují zajistit životnost jaderných komponent po celou dobu provozu elektrárny. Průměrná životnost divertorových terčů se odhaduje na 4,5 roku, životnost modulů první stěny a blanketu přibližně na 10 let. Při pravidelných odstávkách elektrárny bude prováděna detailní prohlídka jaderných komponent v reaktoru a poškozené nebo limitně opotřeбенé moduly budou dálkovými manipulátory vyjmuty z reaktoru a nahrazeny novými moduly.

Vyjmuté moduly budou tvořit radioaktivní odpad. Budou převezeny do skladu radioaktivního odpadu a později recyklovány. Komponenty jaderné zóny vyrobené z wolframových materiálů a RAFMS umožní recyklaci po 50-100 let od vyjmutí z reaktoru [9].

8. ZÁVĚR

Uvedené klíčové rysy fúzních zdrojů energie determinují jejich jadernou bezpečnost a vliv na životní prostředí. Z pohledu jaderné bezpečnosti budou fúzní

elektrárny inherentně bezpečné a budou uvolňovat jadernou energii bez rizika neřízené fúzní reakce a bez vytváření vysokoaktivních odpadů. Vliv fúzních zdrojů energie na životní prostředí lze shrnout do následujících vlastností:

- jsou přírodní,
- jsou inherentně bezpečné,
- palivo se nalézá se v antropogenním prostoru v dosahu činnosti lidstva a je antropogenním časovým měřítku nevyčerpatelné,
- palivo je při čerpání průběžně doplňované přírodními přirozenými procesy a toky a vrací se do svého původního stavu,
- produkují recyklovatelný odpad,
- při získávání energie nepoškozují životní prostředí,
- neohrožují své budoucí využívání a mohou být proto použity znovu a znovu,
- umožňují získávat konstantní vysoký výkon a omezit tak vliv na životní prostředí.

Vliv fúzních zdrojů energie na životní prostředí tak bude plně srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie.

Jaderné fúzní elektrárny poskytnou stejně bezpečnou a ekologickou produkci elektřiny jako fotovoltaické nebo větrné elektrárny, avšak s vysokým a konstantním elektrickým výkonem. Budou proto vhodným průmyslovým protějškem malých decentralizovaných obnovitelných zdrojů energie a umožní sestavit energetické mixy z bezemisních zdrojů s minimálním vlivem na životní prostředí a s prakticky nevyčerpatelnými zásobami paliva.

Poděkování: Aktivita byla podpořena Strategií Akademie věd AV21 v rámci výzkumného programu „Systémy pro jadernou energetiku“.

Literatura

- [1] ENTLER, S. – MLYNÁŘ, J. – DOSTÁL, V.: Základy fúzní energetiky I. – Historie, TZB-info 30 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14482-zaklady-fuzni-energetiky-i-historie>>.
- [2] ROMANELLI, F.: Fusion Electricity, A roadmap to the realization of fusion energy, EFDA, EU, 2012.
- [3] ENTLER, S. – MLYNÁŘ, J. – DOSTÁL, V.: Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů, TZB-info 32 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538>>.

zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>.

- [4] ENTLER, S. – MLYNÁŘ, J. – DOSTÁL, V.: Základy fúzní energetiky III. – Reaktorové technologie, TZB-info 34 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14587-zaklady-fuzni-energetiky-iii-reaktorove-technologie>>.
- [5] ENTLER, S.: Fúzní palivo a obnovitelné zdroje, Energetika 5 (2015) 249-252.
- [6] UN, The World at Six Billion, UN DESA, Population Division (1999).
- [7] DETLEF, P. van Vuuren, et al: The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change (2011) 109:5–31.
- [8] ENTLER, S. – MÁLEK, J. – BROKEŠOVÁ, J.: Moderní trendy seismického zabezpečení jaderných elektráren, Bezpečnost jaderné energie 7/8 (2017) 218-224.

- [9] FEDERICI, G. – BIEL, W. – GILBERT, M. R. – KEMP, R. – TAYLOR, N. – WENNINGER, R.: European DEMO design strategy and consequences for materials, Nucl. Fusion 57 (2017) 092002.
- [10] ENTLER, S. – MLYNÁŘ, J. – DOSTÁL, V.: Základy fúzní energetiky IV. – Jaderné komponenty, TZB-info 37 (2016), <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14669-zaklady-fuzni-energetiky-iv-jaderne-komponenty>>.
- [11] HORACEK, J. – DOBIAS, P. – CUNNINGHAM, G. – DUBAN, R. – IMRISEK, M. – MARKOVIC, T. – HAVLICEK, J. – VLCEK, J. – ENTLER, S.: Feasibility study of fast swept divertor strike point suppressing transient heat fluxes in tokamaks DEMO and COMPASS-Upgrade, Fusion Eng. Des., DOI 10.1016/j.fusengdes.2017.01.027.



ZPRÁVY

Nový ředitel ENS

News in Brief č. 134, 7. 7. 2017

European Nuclear Society (ENS) jmenovala nového generálního ředitele. Stal se jím Fernando Naredo. Nový ředitel byl před tím ředitelem firmy Westinghouse pro Evropu a 10 let pracoval v orgánech EU.

Kurs MAAE

News in Brief č. 147, 26. 7. 2017

MAAE vyhlásila týdenní kurs pro začínající odborníky v jaderné energetice. Kurs se konal začátkem listopadu 2017 v Nice. Detaily na <http://bit.ly/2vliOsG>.

Indie

VVER 1000 pro Indii

News in Brief č. 109, 2. 6. 2017

Ruský Atomstrojexport podepsal s indickou společností NPCIL kontrakt na výstavbu 4 bloků VVER 1000 v lokalitě JE Kudankulam v Tamil Nadu na jihu Indie. Výstavba bloků 3 a 4 bude zahájena již v tomto roce. Kontrakt na tuto stavbu byl podepsán již dříve.

Deset nových jaderných reaktorů

Nuclear Politics č. 5, 31. 5. 2017

Indická vláda odsouhlasila výstavbu 10 nových těžkovodních reaktorů (PHWR) s celkovou kapacitou 7000 MW. Výstavba bude stát 11 miliard USD a vytvoří 33 000 pracovních míst. Podrobnosti na <http://bit.ly/2qV0y0d>.

Kanada

SMR pro Kanadu

News in Brief č. 110, 5. 6. 2017

Kanadská výzkumná laboratoř Canadian Nuclear Laboratories (CNL) zahájila hodnocení a výběr lokalit pro malé jaderné modulární reaktory (SMR) jako ideální energetický zdroj pro průmysl a obyvatelstvo. Podrobnosti na <http://bit.ly/2svpFUP>.

JE Point Lepreau prodloužení provozu

News in Brief č. 219, 16. 6. 2017

Kanadský dozorný orgán nad jadernou bezpečností (CNSC) prodloužil povolení k provozu do roku 2022 pro JE Point Lepreau v New Brunswicku na východě Kanady. Jedná se 660 MW CANDU reaktor, který je v provozu od roku 1983. Detaily na <http://bit.ly/2rDJnvU>.