

Jaderná fúze – budoucnost energetiky

Slavomír Entler

ABSTRAKT: Jaderná fúze může být vnímána jako svatý grál, jehož nalezení spasí lidstvo před energetickým hladem. V podstatě je to pravda, protože jaderná fúze skutečně navěky vyřeší energetické potřeby lidstva. Fúzní elektrárnu je možné postavit již nyní, protože neexistuje zásadní technický nebo fyzikální problém, který by tomu bránil. Je ale nezbytný další výzkum a vývoj fúzních technologií, který umožní snížit cenu fúzí vyráběné elektřiny na konkurenceschopnou úroveň.

KLÍČOVÁ SLOVA: jaderná fúze, fúzní elektrárna, ITER, DEMO, tokamak

ABSTRACT: Nuclear fusion definitely solves the energy needs of humanity. A fusion power plant can be built right now because there are no principal technical or physical problems obstructing the construction. But further technological research and development of fusion technology is necessary, which will reduce the cost of electricity produced by fusion to a competitive level.

KEYWORDS: nuclear fusion, fusion power plant, ITER, DEMO, tokamak

Úvod

V roce 1997 dosáhl fúzní reaktor JET (Joint European Torus) v britském Culhamu fúzního výkonu 16 MW. Prokázal možnost energetického využití jaderné fúze v pozemských podmínkách a otevřel cestu k fúzní energetice. Kromě reaktoru JET pracují na celém světě desítky dalších fúzních zařízení, potvrzujících znalosti o jaderné fúzi. Desítky let výzkumu ukázaly, jak fúzní reakci ovládat. Průmyslové zvládnutí fúzní reakce ale vyžaduje, aby byla reaktorová fyzika popsána natolik, aby ji mohli převzít provozní inženýři, podobně jako na jiných elektrárnách. Proto se v současnosti staví mezinárodní termojaderný experimentální reaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) a stávající fúzní zařízení se přestavují se zaměřením na vývoj energetického reaktoru. Plazmoví fyzici mají za úkol plně stabilizovat fúzní plazma a nalézt co nejjednodušší pravidla řízení reaktoru.

Fúze atomových jader je velmi silný energetický zdroj, který vyžaduje adekvátně silné a výkonné technologické základy. Odhlédneme-li od obvyklého zařízení elektráren, cena a účinnost fúzní elektrárny bude dána právě cenou a účinností podpůrných technologických systémů fúzního reaktoru. Velkou roli hraje také výběr materiálů pro jeho vnitroreaktorové komponenty. Tyto komponenty budou zatíženy vysokým energetickým tokem, který ovlivní jejich životnost. Proto je důležitý materiálový výzkum, podobný například dřívějšímu vývoji keramických dlaždic pro ochranu raketoplánů. Fúzní energetický reaktor sice umožní průběžnou výměnu poškozených vnitroreaktorových komponent, avšak vyšší životnost těchto komponent sníží výslednou cenu vyráběné elektřiny.

V roce 2012 byla pod patronací Mezinárodní agentury pro atomovou energii ve Vídni zahájena příprava výstavby první fúzní elektrárny. Ve stejném roce schválila Evropská komise dokument „Fusion electricity, A roadmap to the realisation of fusion energy“ [1], který definuje plán Evropské unie zahájit výrobu elektrické energie jadernou fúzí do roku 2050. Podobné plány přijaly také USA, Čína, Jižní Korea, Japonsko a Indie.

Fúzní zdroje energie

Fúzní zdroje energie jsou standardní a zcela přirozenou součástí vesmíru. Lidská společnost existuje ve své podobě jen díky fúznímu zdroji energie, Slunci. Začleněním pozemských fúzních zdrojů do energetiky bude možné získávat levnou

energii v neomezeném množství a bez jakéhokoli ohrožení životního prostředí.

Fúzní palivo:

- je přirozenou součástí vody,
- je k dispozici v antropogenním prostoru a je dosažitelné v kterékoliv části světa,
- po dobu existence Země je nevyčerpatelné,
- jeho využívání nijak neohroží životní prostředí.

Fúzní energetický zdroj:

- má konstantní výkon škálovatelný podle potřeby,
- nemá žádné emise,
- neprodukuje žádné vyhořelé palivo,
- odpadem je inertní plyn helium, na Zemi nedostatkový a využitelný,
- v pozemských podmínkách nemůže samovolně explodovat,
- vyvolává pouze sekundární radioaktivitu vnitroreaktorových komponent o minimálním objemu.

Podrobný popis vlastností fúzního zdroje energie je uveden v rámečku.

VLASTNOSTI FÚZNÍHO ZDROJE ENERGIE

Přírodní zdroj

Fúzní energie se uvolňuje ve všech hvězdách a je to základní energetický zdroj celého vesmíru. Bez jaderné fúze by neexistoval vesmír v podobě, v jaké jej známe. Lidstvo a celá biosféra od svého vzniku závisí na fúzním zdroji energie – Slunci.

Antropogenní prostor

Zásoby fúzního paliva, deuteria a lithia, se nacházejí v dostatečné míře v přímém dosahu celého lidstva ve světových oceánech.

Nevyčerpatelný zdroj energie

V pozemských oceánech se nachází přibližně $4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria a $2,44 \times 10^{14}$ kg lithia. Toto množství zajistí energetické potřeby lidstva po celou dobu existence Země. Zásoby při současné celosvětové spotřebě energie vystačí zhruba 8 mld. let, avšak životnost Slunce se odhaduje pouze na 5,3 mld. let. V době zániku Země tak bude vyčerpáno asi 66 % zásob fúzního paliva. Kromě pozemských zásob se prakticky neomezené množství fúzního paliva nachází ve vesmíru.

Neomezený a škálovatelný výkon

Na rozdíl od jiných energetických zdrojů jaderná fúze umožňuje vytvářet energetické zdroje bez omezení výkonu, od pozemských reaktorů až po supernovy.

Bezpečný zdroj

Fúzní zdroj energie je inherentně (vnitřně) plně bezpečný. V pozemských podmínkách neexistuje žádná možnost samovolné jaderné exploze fúzního paliva. Navíc bude množství paliva v reaktoru velice malé, v řádu gramů. Proto ani únik paliva do ovzduší nezpůsobí žádné ohrožení životního prostředí.

Nulové emise

Výroba energie ve fúzních zdrojích probíhá zcela bez emisí.

Helium jako odpad

Odpadem fúzní reakce je helium. Helium je přírodní, inertní, neškodný plyn, kterého je na Zemi nedostatek. Produkce odpadního helia ve fúzních elektrárnách způsobí revoluci v řadě odvětví, například v letecké dopravě. Převážnou část nákladní dopravy bude možné například přenést na bezpilotní drony-vzducholodě, které budou přepravovat náklad mnohem levněji, ekologičtěji a bez požadavku na letiště až na místo určení, tj. s úplným vyloučením silniční přepravy.

Sekundární radioaktivita

V prvních generacích fúzních reaktorů budou nositeli energie vysokoenergetické neutrony. Tyto neutrony způsobí sekundární radioaktivitu vnitřních komponent reaktoru. Objemově však půjde o malé množství speciálních nízkooaktivitních materiálů. V budoucnu bude ve fúzních reaktorech probíhat bezneutronová fúze, která sekundární aktivaci ještě dále výrazně sníží.

Zdroj levné energie

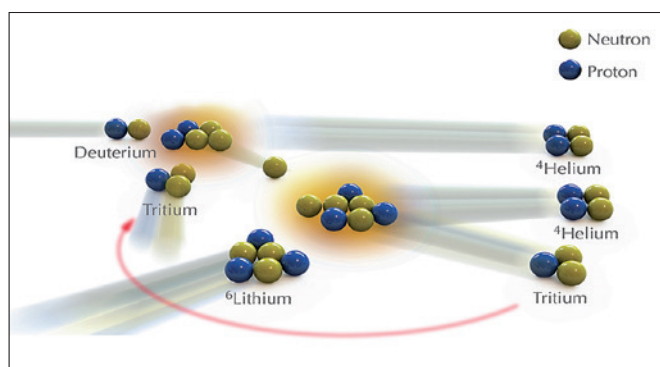
Po zvládnutí technologie fúzních reaktorů bude cena vyrobené elektřiny nižší než cena elektřiny vyrobené v jiných typech elektráren. Důvodem je, že zdrojem paliva bude mořská voda a odpadem využitelné helium, kterého je na Zemi nedostatek. Zdražování paliva je vzhledem k jeho nevyčerpatelnému a globálně přístupnému zásobám vyloučené. Fúzní elektrárny nebudou závislé na klimatických vlivech, a proto nebudou vyžadovat zásokovou kapacitu jako současné obnovitelné zdroje. Levná elektrická energie způsobí technologickou a ekologickou revoluci ve všech odvětvích dopravy a průmyslu a tím rozhodujícím způsobem přispěje k ochraně životního prostředí.

Palivo přístupné kdekoli po celém světě

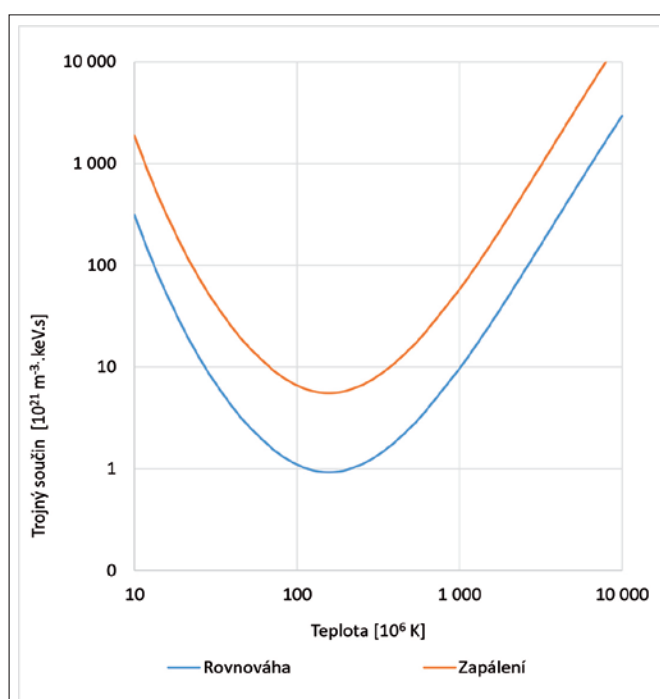
Vzhledem k rozloze oceánů bude fúzní palivo dostupné po celém světě. Fúzní zdroje energie proto odstraní spory a války o přístup k energetickým surovinám a zmizí energetická závislost jedněch zemí na druhých.

Fyzika jaderné fúze

Fúze atomových jader představuje jeden ze základních fyzikálních procesů, díky kterým vypadá vesmír tak, jak ho známe. Jadernou fúzí vznikly po Velkém třesku z jader vodíku a helia postupně všechny ostatní chemické prvky. Při jaderné fúzi vznikají z lehčích atomových jader těžší jádra a až po železo se při tom uvolňuje energie. Nejvíce energie se uvolňuje při fúzi nejjednoduchších atomových jader. Z těchto reakcí je v pozemských podmínkách nejnázřejší fúze jader izotopů vodíku deuteria a tritia, o něco obtížnější je dosažitelná reakce dvou jader deuteria. Většina existujících fúzních zařízení pracuje s fúzní reakcí jader deuteria, avšak dosažení kladného energetického zisku vyžaduje vyšší technické parametry reaktoru než v případě fúzní reakce jader deuteria



Obr. 1. První generace fúzních energetických reaktorů bude jako palivo používat izotop vodíku deuterium a lithium. Odpadem reakce bude helium [1].

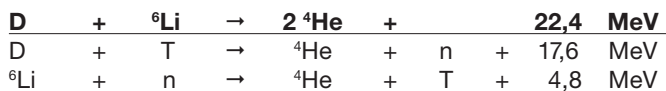


Obr. 2. Lawsonovo kritérium pro fúzní reakci deuteria a tritia.

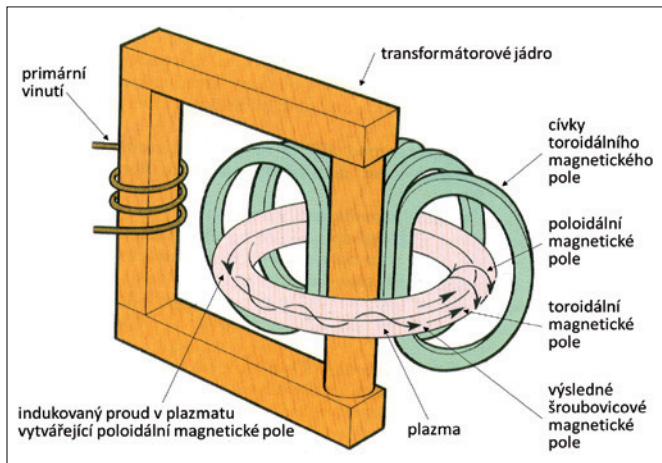
Křivka „Rovnováha“ označuje stav vyrovnané energetické bilance energetických toků vstupujících do plazmatu a vystupujících z plazmatu. Křivka „Zapálení“ označuje stav vyrovnané energetické bilance autonomního ohřevu a tepelných ztrát plazmatu.

a tritia. Proto bude v první generaci fúzních elektráren probíhat fúze deuteria a tritia.

Deuterium je přírodní látka, která se běžně vyskytuje v přírodě, především ve vodě. Tritium se v přírodě nevyskytuje, lze je ale vyrábět reakcí lithia a fúzních neutronů souběžně s probíhající fúzí přímo v reaktoru. Výsledný proces lze zjednodušeně zapsat jako reakci jader deuteria a lithia za vzniku dvou jader helia a uvolnění 22,4 MeV energie (**obr. 1**). Jde o složenou reakci, deuterium a lithium mohou reagovat i přímo, avšak za mnohem náročnějších podmínek.

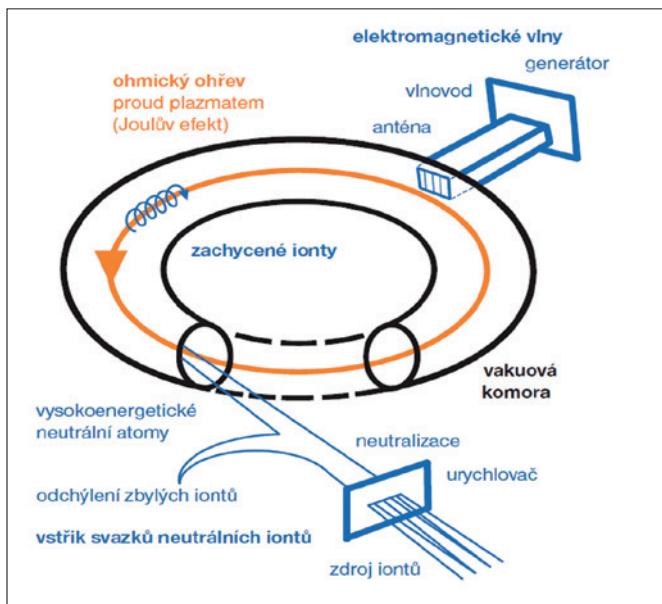


Druhá generace fúzních reaktorů bude využívat slučování jader deuteria a lithium již nebude nutné. Reakční proces lze



Obr. 3. Základní schéma koncepce Tokamak.

Vakuová komora je umístěna na transformátorovém jádru a je ovinuta magnetickými cívkami. Indukovaný proud v plazmatu a magnetické cívkami společně vytvářejí šroubovicové magnetické pole [2].



Obr. 4. Systém ohřevu plazmatu a neinduktivního generování elektrického proudu [3]

zapsat jako reakci šesti jader deuteria za vzniku dvou jader helia, protonu, dvou neutronů a uvolnění 43,2 MeV energie.

6 D	→	2 ⁴ He	+	2 p	+	2n	+ 43,2 MeV
D + D	→	³ He	+	n	+	3,3	MeV
D + D	→	T	+	p	+	4,0	MeV
D + ³ He	→	⁴ He	+	p	+	18,3	MeV
D + T	→	⁴ He	+	n	+	17,6	MeV

Fúzní reakce probíhají pouze za podmínek, které umožňují překonat elektrostatické odpuzování shodně nabitých atomových jader. Aby fúzní reakce proběhla, musí mít jádra dostatečnou energii pro překonání elektrostatické bariéry, například ve formě tepelné energie. Jednou z cest k dosažení fúze je proto zahřátí atomových jader na velmi vysokou teplotu. Pro energetické využití musí navíc proběhnout takové množství fúzních reakcí, při kterém se uvolní více energie, než jsou energetické ztráty reagujících jader. Základní energetickou

bilanci fúzní elektrárny sestavil již v roce 1955 britský inženýr J. D. Lawson, který popsal vztah mezi teplotou a hustotou atomových jader a minimální dobou udržení jader při této teplotě a hustotě. Po něm pojmenované Lawsonovo kritérium stanovuje minimální parametry pro dosažení kladné energetické bilance fúzního reaktoru a má obecný tvar

$$n \cdot \tau_E \geq f(T)$$

kde n je hustota atomových jader, τ_E je doba udržení energie atomovými jádry a T je teplota jader. Průběh Lawsonova kritéria pro reakci deuteria a tritia ve formě tzv. trojného součinu je zobrazen na obr. 2. Optimální teplota pro fúzní reakci deuteria a tritia s kladnou energetickou bilancí je přibližně 160 milionů stupňů K. Při této teplotě lze energetický zisk reaktoru dosáhnout nejsnáze.

Při takto vysokých teplotách je každá látka plně ionizovaná plazma, složené z atomových jader a elektronů, které vznikne odtržením všech elektronů z elektronového obalu atomů látky. Atomová jádra i elektrony jsou elektricky nabitě částice, a proto je možné na ně působit magnetickým polem a spoutat je magnetickými siločárami.

Lawsonovo kritérium ale umožňuje více cest, jak dosáhnout potřebných parametrů plazmatu. Ze součinu $n \cdot \tau_E$ vyplývá, že buď lze plazma silně stlačit a dosáhnout jeho vysoké hustoty po relativně krátkou dobu, anebo jej stlačit málo na menší hustotu, ale na delší dobu. Proto rozlišujeme dva hlavní mechanismy udržení plazmatu, inerciální a magnetický.

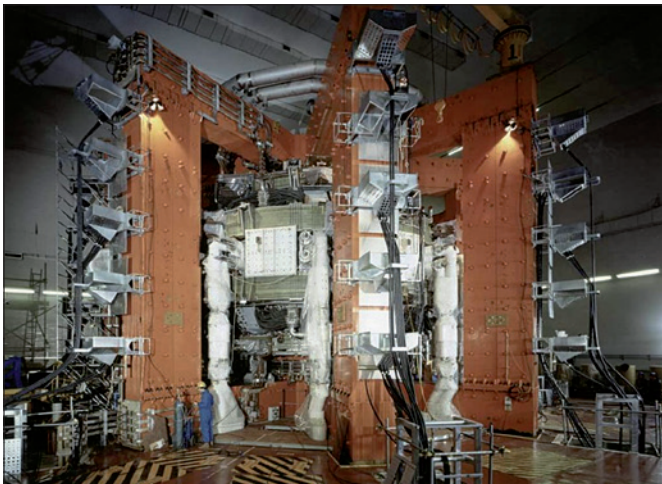
Stlačení plazmatu na velmi vysokou hustotu a jeho udržení v tomto stavu po dobu cca 10^{-10} sekundy odpovídá inerciálnímu udržení plazmatu. Palivo je velmi silně stlačeno například laserovými svazky a fúzní reakce proběhne dříve, než se jádra rozletí od sebe. Čas potřebný pro průběh reakce zajistí setrvačnost (inercie) atomových jader.

Naopak malé stlačení plazmatu magnetickým polem tlakem v řádu barů a jeho udržení po několik sekund odpovídá magnetickému udržení plazmatu. Ačkoliv jsou zařízení inerciální fúze technicky zajímavá, fúzní zařízení na bázi magnetického udržení jsou k energetickému využití nesrovnatelně blíže.

Tokamaky

Způsobů jak magneticky spoutat plazma je mnoho. Od padesátých let minulého století byly postaveny stovky nejrůznějších fúzních experimentálních zařízení: pinče, magnetické pasti, magnetická zrcadla, stelarátory, sféromaky, tokamaky a další. Nejlepších výsledků dosahoval ruský koncept Tokamak a v náročném soupeření vědeckých týmů celého světa byla postupně opouštěna jednotlivá originální zařízení ve prospěch tokamaků. Přesto se dávno překonané koncepty periodicky vrací, aby nabídly zdánlivě novou a zázračnou cestu k úspěchu bez náročné a dlouholeté výzkumné práce, jako například nedávno zveřejněná studie Compact Fusion Reactor firmy Lockheed Martin, slibující do 10 let fúzní elektrárnu na korbě nákladního auta. Studie obsahuje zásadní technické chyby a nemůže být myšlena vážně. Zázraky se dějí jen málokdy.

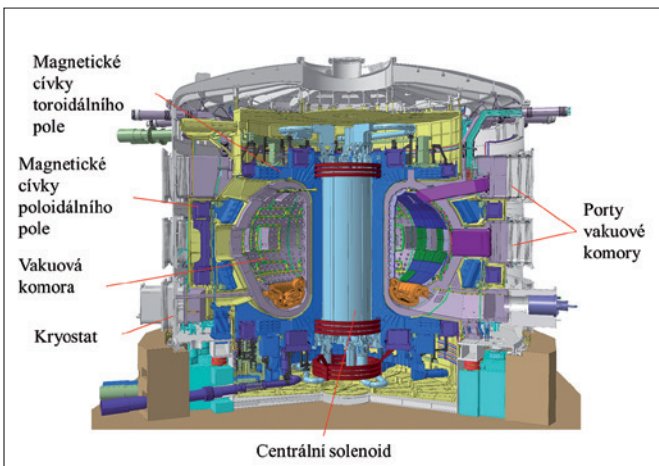
Hlavní součástí tokamaku je prstencová vakuová komora, umístěná na transformátorovém feromagnetickém jádru (obr. 3) nebo na primární cívkě vzduchového transformátoru. Nejmodernější tokamaky používají vzduchové transformátory s centrálním supravodivým solenoidem (obr. 6). Transformátor indukuje v plazmatu uvnitř komory silný elektrický proud, který vytváří poloidální magnetické pole. Okolo tubusu vakuové komory jsou navinuty velké magnetické cívkami, které vytvářejí druhé,



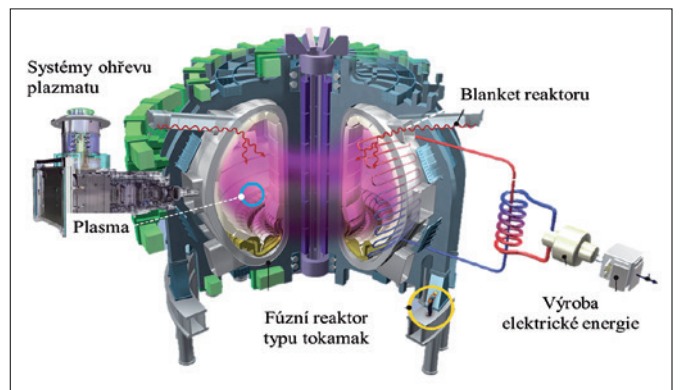
Obr. 5. Fúzní reaktor JET. © EFDA



Obr. 7. Staveniště reaktoru ITER ve francouzském Cadarache [5]



Obr. 6. Řez reaktorem ITER [4]



Obr. 8. Zjednodušené schéma fúzní elektrárny [6]

toroidální, magnetické pole. Součtem poloidálního a toroidálního pole vzniká šroubovicové magnetické pole, které spoutává plazma. Indukovaný proud současně plazma účinně ohřívá. Indukce elektrického proudu v plazmatu byla jedním z klíčových faktorů úspěchu tokamaků, avšak dnes komplikuje jejich energetické využití. Indukce probíhá pouze při technologicky omezené změně elektrického proudu v primárním vinutí transformátoru. Tokamaky proto z fyzikální podstaty pracují v pulzním režimu. Protože výrobní zařízení elektráren vyžaduje konstantní energetický tok, bude fúzní energetický reaktor vybaven zařízením pro neinduktivní generování elektrického proudu. Podle současné koncepce bude první fúzní elektrárna pracovat v indukčních pulzech o délce přibližně 2,5 hodiny s následujícím restartem indukčního režimu o délce přibližně 15 minut. V těchto 15 minutách bude elektrický proud v plazmatu generován neinduktivně prostřednictvím radiofrekvenčních vln v tzv. vlečném režimu (Current drive). Radiofrekvenční vlny o vhodné frekvenci zachytí na svém čele nabitě částice plazmatu a podobně jako mořské vlny surfaře ponесou tyto částice. Ve vlečném režimu bude také využíván tzv. bootstrap proud, který v plazmatu samovolně vzniká v důsledku tlakových gradientů směrem do středu komory. Radiofrekvenční vlny a bootstrap proud nahradí elektromagnetickou indukci. Díky kombinaci induktivního a vlečného režimu bude energetický výkon reaktoru konstantní.

Ohřev plazmatu

Plazma bude nejprve ohřáto indukovaným elektrickým proudem. Ohmický ohřev elektrickým proudem je funkční do teploty zhruba 50 milionů stupňů K. Se vzrůstající teplotou klesá elektrický odpor plazmatu a ohmický ohřev se stává neúčinným. Proto jsou nezbytnou součástí fúzního reaktoru systémy pro následný ohřev plazmatu. V současnosti se používají dva hlavní způsoby, ohřev svazkem neutrálních částic a ohřev radiofrekvenčními vlnami (obr. 4).

První metoda spočívá ve vytvoření svazku urychlených neutrálních atomů deuteria, který je pomocí injektoru vstříkovan do plazmatu. V plazmatu atomy předávají srážkami svoji kinetickou energii a plazma ohřeje. Tato metoda ohřevu umožňuje současně dílčí doplňování paliva. Druhá metoda spočívá v ohřevu plazmatu radiofrekvenčními vlnami o cyklotronové frekvenci elektronů nebo iontů plazmatu. Radiofrekvenční vlny mohou být generovány mimo prostor reaktoru a k reaktoru jsou přivedeny vlnovody. Na stěně vakuové komory jsou umístěny antény, které vysílají vlny do plazmatu. Přesným nasměrováním pohyblivými zářiči lze radiofrekvenční vlny využít také pro odstraňování některých nestabilit plazmatu. Zařízení ohřevu mohou být současně určena pro neinduktivní generování elektrického proudu v plazmatu, a proto jsou funkce ohřevu plazmatu a neinduktivní generace elektrického proudu obvykle řešeny společně.

Reaktor ITER

Reaktor ITER bude největším fúzním zařízením na světě. Na jeho výstavbě se podílí 7 partnerů – EU, USA, Ruská federace, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea. Účastníci projektu reprezentují více než 50 % lidské populace a produkují 80 % celosvětového HDP. Účelem této mezinárodní spolupráce je

prokázat možnost energetického využití jaderné fúze a připravit podklady pro výstavbu fúzní elektrárny. Doposud žádný fúzní reaktor neprodukoval více energie, než kolik potřeboval k provozu. Na počátku zmíněný fúzní reaktor JET (**obr. 5**) v britském Culhamu dosáhl fúzního výkonu 16 MW, avšak při současném ohřevu plazmatu o výkonu 24 MW.

Reaktor ITER oproti tomu bude uvolňovat 500 MW fúzního výkonu při současném ohřevu plazmatu ve výši 50 MW. Protože se jedná o experimentální reaktor, nebude fúzní výkon využit k výrobě elektřiny. Výroba elektřiny z jaderné fúze bude realizována až v následujícím kroku, kterým je demonstrační fúzní elektrárna.

Reaktor ITER bude 29 m vysoký válec o průměru 28 m a váže 23 tisíc tun (**obr. 6**). Vakuová komora reaktoru o vnějším průměru 19 m a výšce 11 m bude vybavena 44 porty pro připojení nejrůznějších provozních, diagnostických a výzkumných zařízení. Magnetické pole bude vytvářeno elektrickým proudem, indukovaným v plazmatu pomocí centrálního solenoidu, toroidálními cívkami a stabilizačními poloidálními cívkami. Centrální solenoid a magnetické cívky budou vyrobené ze superovodivých slitin Nb₃Sn a NbTi a budou chlazené kapalným heliem na teplotu 4,5 K. Pro ohřev plazmatu bude reaktor vybaven dvojicí injektorů svazku neutrálních částic o celkovém výkonu 33 MW, dvojicí antén iontového cyklotronového ohřevu o celkovém výkonu 20 MW a pěti anténami elektronového cyklotronového ohřevu o celkovém výkonu také 20 MW.

Výstavba reaktoru ITER byla zahájena v roce 2007 ve francouzském Cadarache a má být ukončena v roce 2020. V roce 2021 by měl být reaktor spuštěn. V současnosti probíhá na staveništi intenzivní stavební činnost (**obr. 7**) a zahajuje se transport a montáž prvních technologických zařízení. Na dodávkách technologických zařízení se bude podílet i Česká republika.

Fúzní elektrárna

Všechny země účastníci se projektu ITER se shodují, že reaktor ITER není hlavním cílem jejich činnosti. Hlavním cílem je výstavba fúzní elektrárny. ITER je důležitý mezikrok, který má ověřit základní fúzní technologie a poskytnout data potřebná pro výstavbu a provoz elektrárny. Prototyp této elektrárny je označován jako Demonstrační fúzní elektrárna, zkráceně DEMO.

Světové velmoci se shodly na časovém plánu, podle něhož by měla být první fúzní elektrárna zprovozněna nejpozději do roku 2050. Prozatím ale nedošlo k dohodě o společné výstavbě a každá ze zúčastněných zemí si připravuje vlastní plány elektrárny. V Evropské unii byla v roce 2012 zahájena konceptuální fáze projektu, která potrvá do roku 2020. Zpracování projektové dokumentace je naplánované na období 2020-2030 a zahájení výstavby elektrárny na rok 2031.

Pokud nedojde k vědeckému zvratu, bude elektrárna DEMO postavena na bázi tokamaku (**obr. 8**). Velikost reaktoru a jeho výkon jsou předmětem koncepčního řešení, které se zpracovává v současnosti.

Reaktor ITER umožní otestovat technologie reaktoru DEMO včetně tzv. blanketu. Blanket reaktoru je vnitřní obal vakuové komory, který bude zajišťovat odvod uvolněné fúzní energie z reaktoru a výrobu tritia. V reaktoru ITER bude umístěno celkem 6 experimentálních

modulů pro testování blanketu označovaných jako TBM, Test Blanket Module. Vývoj a výroba TBM není společná a jednotlivé moduly si řeší partneři projektu samostatně. Dva moduly TBM dodá Evropská unie, po jednom modulu dodají Japonsko, Čína, Jižní Korea a Indie.

Technologická část elektrárny se nebude výrazně odlišovat od jiných elektráren. Prozatím ale není rozhodnuto, jaká chladicí média budou použita. Konceptuální fáze projektu má za úkol tuto otázku rozhodnout. Zvažují se možnosti chladit reaktor tlakovou vodou, superkritickou vodou, heliem nebo tekutými kovy. Možná je i kombinace uvedených médií v několika primárních okruzích. Aby byla vytvořena bariéra přenosu sekundárně radioaktivních materiálů do turbínové části, bude technologie elektrárny dvouokruhová. Sekundární okruh bude pracovat na bázi Rankinova nebo Braytonova termodynamického cyklu v závislosti na zvolených parametrech primárního okruhu. Jako výhodné se jeví kompletní využití technologie chlazení tlakovodních jaderných elektráren PWR/VVER, které by poskytlo standardizaci, jistotu a spolehlivost nefúzní části elektrárny, avšak vysoký tlak chladicí vody se může ukázat jako zbytečné bezpečnostní riziko bez funkčního přínosu.

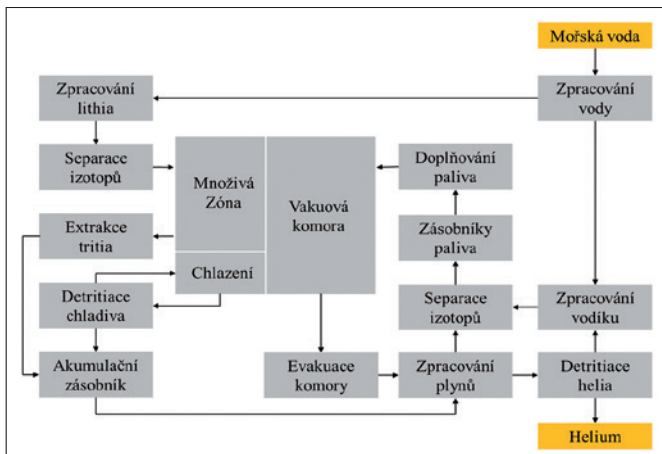
Vnitroreaktorové komponenty

Fúzní energie se v reaktoru uvolňuje ve formě kinetické energie heliových jader a neutronů, které vznikají při fúzní reakci. Rozdělení energie odpovídá obrácenému poměru hmotnosti heliového jádra a neutronu a 4/5 uvolněné energie odnášejí neutrony, 1/5 energie získává heliové jádro fyziky označované jako alfa částice. Heliové jádro je kladně nabitě, a proto zůstává v plazmatu spoutáno magnetickým polem. V plazmatu předává svou energii ostatním částicím, a ohřívá tak plazma. Neutrony bez elektrického náboje opouštějí plazma a pronikají první stěnou reaktoru do blanketu, kde srážkami s atomy předávají svoji kinetickou energii. Při jaderné reakci neutronů s lithiem dochází k výrobě tritia a k uvolnění další energie, tzv. energetické multiplikaci (viz. popsání reakce ⁶Li a neutronu). Blanket přeměňuje kinetickou energii neutronů na teplo a současně generuje další energii. Teplo je z blanketu odváděno primárním chladicím okruhem elektrárny a slouží k výrobě elektřiny.

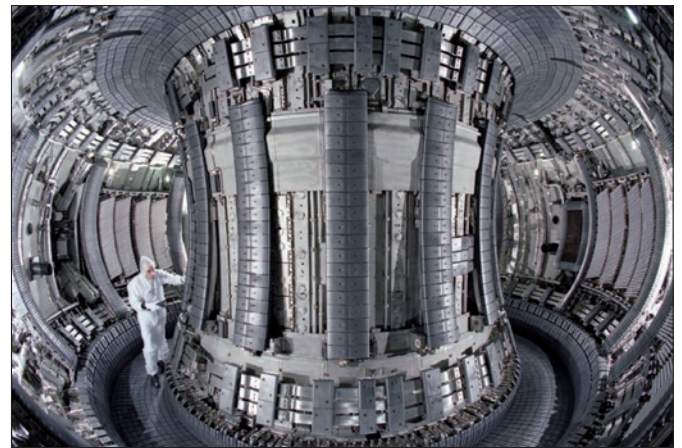
Jednou z podstatných vlastností energetického fúzního reaktoru je vysoký tepelný tok. Jestliže je tepelný tok v jaderných reaktorech přibližně 0,5 MW/m², v případě fúzních reaktorů se může náhodně pohybovat až do 40 000 MW/m², i když jen po velmi krátkou dobu při poruchách stability plazmatu nebo při působení tzv. ubíhajících elektronů. První stěna reaktoru bude podle polohy nominálně zatížena tepelným tokem až 5 MW/m². Nezatíženějším zařízením fúzního reaktoru je divertor, vnitroreaktorová komponenta určená k formování a čištění plazmatu. Nominální tepelná zátěž divertoru se bude pohybovat od 5 do 20 MW/m². Pro zvládnutí vysokých tepelných toků jsou hledána materiálová a konstrukční řešení vnitroreaktorových komponent, která zajistí jejich dostatečné chlazení a zabrání jejich poškození při provozu reaktoru.

Tab. 1. Orientační porovnání některých charakteristik fúzní elektrárny

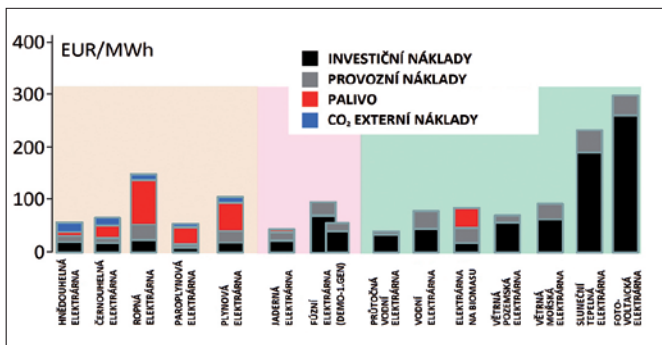
Výkon 1 GW _{EL}	Uhelná elektrárna	Jaderná elektrárna	Fúzní elektrárna	Fotovoltaická elektrárna
Hustota toku energie, kW/m ²	1	500	5 000	0,2
Spotřeba paliva, kg/den	20 000 000	63	1	-
Zastavěná plocha, km ²	0,8	1	1	20



Obr. 9. Palivový cyklus fúzní elektrárny 1. generace. Ve druhé generaci elektráren odpadne levá část cyklu, protože lithium a množivá zóna nebudou zapotřebí



Obr. 11. Pohled do vnitřku fúzního reaktoru JET. © EFDA



Obr. 10. Orientační porovnání ceny elektrické energie z různých energetických zdrojů [7]

Velké teplotní gradienty v povrchové vrstvě vnitroreaktorových komponent, kromě vysokých nároků na materiály a konstrukci komponent, také limitují výběr a dosažitelnou teplotu chladicího média. Odvod tepla a výběr chladicího média je proto součástí komplexního řešení reaktoru.

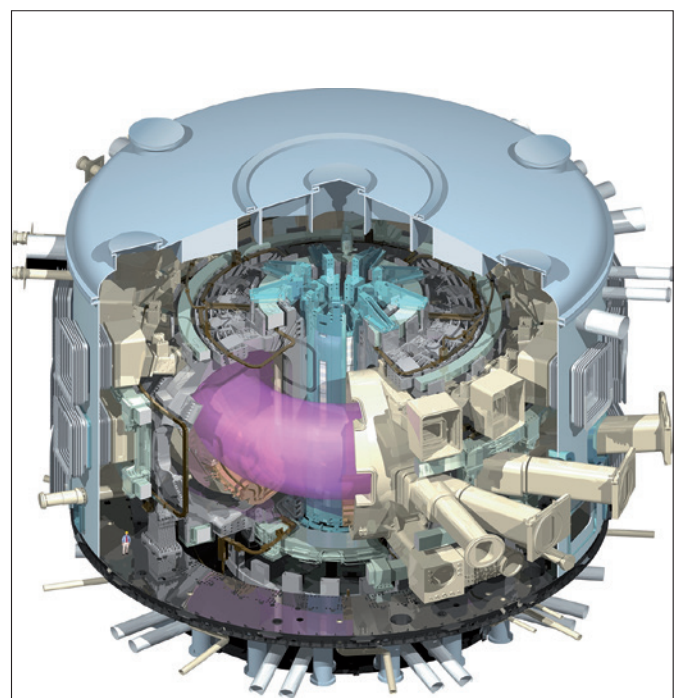
Dalším závažným faktorem je vysoký neutronový tok, který bude poškozovat konstrukční materiály vnitroreaktorových komponent a způsobovat jejich sekundární radioaktivitu. S vysokým neutronovým tokem a vlivem blízkého plazmatu souvisí vodíkové a heliové křehnutí kovových povrchových vrstev komponent. Proto jsou vyvíjeny radiačně odolné nízkoaktivovatelné materiály, například feriticko-martenzitická ocel EUROFER, a poškozené komponenty bude možné v průběhu odstávky reaktoru robotickým procesem vyměňovat za nové.

Stojí za zmínku, že v Plzni vzniká evropské centrum nácviku robotické výměny komponent modulů TBM reaktoru ITER s maketou portu reaktoru a podpůrných systémů TBM v měřítku 1:1.

Bezpečnost fúzních elektráren

V pozemských podmínkách nemůže jaderná fúze samovolně probíhat. Tím se liší od spalování fosilních paliv nebo štěpení atomových jader a je v plném smyslu vnitřně bezpečná. Jakékoliv narušení pracovních podmínek fúzního reaktoru vede k přirozenému ukončení probíhající reakce.

Fúzní reaktor bude obsahovat pouze minimální množství paliva, řádově gramy vodíkových izotopů. Pokud by v krajním



Obr. 12. Reaktor ITER. © ITER Organization

případě došlo k úniku tohoto paliva do ovzduší, nedojde k žádnému ohrožení životního prostředí.

Bez ohledu na vnitřní bezpečnost jaderné fúze budou fúzní reaktor a primární okruh elektrárny umístěny v ochranném kontejneru a výstavba prvních fúzních elektráren bude posuzována podle standardních velmi přísných bezpečnostních pravidel pro jaderné elektrárny.

Ekonomická bilance fúzní elektrárny

První demonstrační fúzní elektrárna nebude vyrábět elektřinu za konkurenceschopnou cenu. Půjde o zcela novou technologii, která bude muset být následně optimalizována. Na základě předpokladu o použití existujícího technologického zařízení lze ale sestavit reálný odhad účinnosti fúzních elektráren a ceny vyrobené elektřiny.

Vlastní fúzní reaktor vyžaduje zcela odlišné podpůrné systémy než například jaderný reaktor, především magnetický systém, systém ohřevu plazmatu, kryogenní systém nebo vakuový systém. Dominantním z hlediska vlastní spotřeby

energie je systém ohřevu plazmatu. Proto je pro hodnocení různých koncepcí fúzních reaktorů používán koeficient zesílení Q , který udává poměr uvolňovaného fúzní výkonu k výkonu systému ohřevu.

Reaktor JET, který prokázal možnost uvolňovat využitelnou fúzní energii, dosáhl $Q = 0,65$. Reaktor ITER je navržen pro $Q = 10$ a jeho fúzní výkon desetinásobně přesáhne výkon systému ohřevu. Demonstrační fúzní elektrárna bude pracovat s koeficientem zesílení 35 a více.

Spotřeba paliva fúzní elektrárny bude nesrovnatelně nižší než u obvyklých palivových elektráren, včetně jaderných. Pro provoz fúzní elektrárny o elektrickém výkonu 1 000 MW postačí zhruba 1 kg vodíku (přesněji vodíkových izotopů) denně. Orientační porovnání spotřeby několika typů elektráren je shrnuto v **tab. 1**. Pro uhelnou elektrárnu je uvedena spotřeba uhlí v Elektrárně Počerady, pro jadernou elektrárnu je uvedena spotřeba UO_2 v Jaderné elektrárně Temelín.

Do palivového cyklu vstupuje mořská voda a vystupuje z něj jako odpad helium (**obr. 9**). Je pravděpodobné, že lithium pro první fúzní elektrárny bude vzhledem k minimální spotřebě získáváno ze suchozemských nalezišť a do palivového cyklu bude vstupovat samostatně. S příchodem druhé generace fúzních reaktorů odpadne nutnost lithium používat a v palivovém cyklu zůstane pouze deuterium získávané z mořské vody.

V důsledku vysokých investičních a nízkých provozních nákladů bude v prvním období cena výroby fúzní elektřiny na úrovni ceny elektřiny z hydroelektráren a bude vyšší než cena elektřiny vyráběné v jaderných elektrárnách. Na rozdíl od jaderných elektráren však fúzní elektrárny nebudou produkovat radioaktivní vyhořelé palivo a budou inherentně bezpečné. Odhadovaná cena fúzní elektřiny je přibližně 1,35 Kč/kWh (**obr. 10**). Po zdokonalení fúzních technologií se očekává snížení ceny fúzní elektřiny až na třetinu této částky.

Ekologický zdroj elektřiny

Fúzní elektrárna bude čistý, bezpečný a nevyčerpátný zdroj levné elektrické energie, výkonově škálovatelný a nezávislý na počasí. Díky levné a ekologické produkci elektřiny umožní zajistit dopravu, vytápění a převážnou část průmyslové produkce elektrickými bezemisními zdroji. Dostupnost levného odpadního helia může znamenat ekologickou revoluci v nákladní dopravě. Implementace fúzních elektráren do energetiky proto vyřeší nejen problém omezených zásob energetických paliv, ale také zásadní měrou přispěje k ochraně životního prostředí a k trvale udržitelnému rozvoji lidské společnosti.

Ve srovnání s dnešními obnovitelnými zdroji poskytnou fúzní elektrárny stejně ekologickou produkci elektřiny, avšak s konstantním elektrickým výkonem. Proto nebudou vyžadovat zásokové a přenosové kapacity energetické sítě v rozsahu, v jakém je vyžadují stávající obnovitelné zdroje. Z hlediska ochrany krajinného rázu budou fúzní elektrárny dokonce výrazně ekologičtější než obnovitelné zdroje, protože umožní provozovat elektrárny o vysokém výkonu na mnohonásobně menší ploše (viz **tab. 1**). Budou proto plnohodnotným průmyslovým protějškem malých decentralizovaných obnovitelných zdrojů.

Cesta k fúzní elektřině

Lidová moudrost říká, že nic není zadarmo. Cesta k ovládnutí jaderné fúze je velmi složitá a pro dosažení výroby elektřiny z jaderné fúze musí být vyřešeno ještě mnoho úkolů. Fúzní elektrárna představuje jeden z vrcholů vědeckého

a technologického úsilí lidstva a na velmi dlouhou dobu pokryje jeho energetické potřeby. Současně umožní snížit poškozování životního prostředí při výrobě elektřiny v porovnání se všemi ostatními energetickými zdroji.

Minulý rok schválila Evropská komise vznik konsorcia evropských fúzních laboratoří EUROfusion, které bude koordinovat úsilí zemí EU při vývoji fúzního energetického zdroje. Členy konsorcia jsou výzkumné organizace z celé Evropy, z České republiky se na výzkumu podílí Ústav fyziky plazmatu AV ČR a Centrum výzkumu Řež.

Česká republika jako jedna z mála zemí světa disponuje současně dvěma experimentálními fúzními reaktory typu tokamak a třemi experimentálními štěpnými reaktory. Tokamak Compass Ústavu fyziky plazmatu patří do hlavní skupiny evropských fúzních výzkumných zařízení. Centrum výzkumu Řež provozuje jeden z mála evropských experimentálních štěpných reaktorů vhodných pro fúzní aplikovaný výzkum a buduje v rámci projektu Udržitelná energetika SUSEN novou výzkumnou infrastrukturu, zaměřenou na jadernou fúzi. Výchovu nových odborníků zajišťují Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT provozující vlastní tokamak Golem, Elektrotechnická fakulta ČVUT a Matematicko-fyzikální fakulta UK. Další vysoké školy projevují o výuku jaderné fúze zájem, například Fakulta strojní ČVUT nebo Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Potenciál naší země nám dává šanci být mezi těmi, kteří se zaslouží o energetickou soběstačnost lidstva a ochrání čistou přírodu.

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory projektu SUSEN CZ.1.05/2.1.00/03.0108 (ERDF).

Literatura:

- [1] F. Romanelli: *Fusion Electricity, A roadmap to the realization of fusion energy*, EFDA, EU, 2012
- [2] G. McCracken, P. Stott: *Fúze – energie vesmíru*. Mladá Fronta, Praha, 2006
- [3] M. Řípa, J. Mlynář, V. Weinzettl, F. Žáček: *Rízená termojaderná syntéza pro každého*. ÚFP AV ČR, Praha, 2011
- [4] *The largest tokamak in the world*, <http://www.iter.org/album/media/7%20-%20technical#2044>, ITER Organization, 01/2014
- [5] *The Tokamak Complex floor is in place*, <http://www.iter.org/album/media/5%20-%20site%20milestones#3037>, ITER Organization, 04/2014
- [6] *Fusion Energy – Cleaner Energy for the Future*, EFDA, 2006, © Copyright 2005 FOM-Rijnhuizen/Verdult – Kennis in Beeld, the Netherlands
- [7] D. Ward, I. Cook, Y. Lechon, R. Saez: *The economic viability of fusion power*. *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005), 1221

Další informace:

www.euro-fusion.org
www.fusenet.eu
www.iter.org
fusionforenergy.europa.eu
www.ipp.cas.cz
ftf.fjfi.cvut.cz
golem.fjfi.cvut.cz
www.cvrez.cz
www.susen2020.cz
www.czechforiter.cz



Ing. Slavomír Entler (1963) – Centrum výzkumu Řež, Hlavní 130, Husinec-Řež, vedoucí výzkumné aktivity Technologie první stěny fúzního reaktoru, člen evropské projektové skupiny pro vývoj divertoru reaktoru DEMO konsorcia EUROfusion a zástupce ČR v radě Evropských fúzních laboratoří při evropské agentuře Fusion for Energy (EFLO)

Recenze: **Ing. Lenka Heraltová**
Ing. Jan Rataj, Ph.D.