Systémy pro jadernou energetiku

Systems for Nuclear Power Industry

Radomír Pánek
Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Slavomír Entler
Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Jaderná energie představuje nejefektivnější a nejsilnější známý energetický zdroj. Přitom jde o nízkoemisní zdroj, který umožňuje účinně snižovat emise při výrobě elektřiny, a pomáhat tak v boji proti globálnímu oteplování a klimatickým změnám. Jaderné reaktory jsou na základě fyzikálního a technologického výzkumu zdokonalovány směrem k vyšší bezpečnosti, vyššímu využití paliva a snižování množství odpadu. Vyvíjené elektrárny na bázi jaderné fúze budou inherentně bezpečné a zásoby jejich paliva budou prakticky nevyčerpatelné. Česká republika je jednou ze zemí stojících v čele světového výzkumu energetického využití jaderné fúze.

Státní energetická koncepce České republiky stanovuje jako jeden z hlavních cílů výzkumu a vývoje v oblasti energetiky zvýšení zapojení tuzemských výzkumných kapacit do stávajících i budoucích mezinárodních aktivit a projektů, jako jsou jaderné reaktory IV. generace, jaderná fúze, vývoj nových materiálů využitelných v energetice a energetickém strojírenství a využití dalších možností vědy, výzkumu a inovací. Energetický mix naší země bude podle této koncepce založen na využití jaderné energie a obnovitelných zdrojů energie. Právě takový mix poskytuje podle všech dosavadních zkušeností z řady evropských zemí nejvyšší ochranu životního prostředí a umožňuje efektivně snižovat emise skleníkového plynu CO_2.

Jednou z vědeckých reflexí Státní energetické koncepce je výzkumný program „Systémy pro jadernou energetiku" Strategie AV21 Akademie věd ČR, který se soustředí na jaderné reaktory IV. generace, fúzní reaktory a pokročilé radiačně a tepelně odolné materiály. Cílem programu je vývoj bezpečného a nevyčerpatelného energetického zdroje v rámci široké mezinárodní spolupráce. Na programu se podílejí Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Ústav fyziky materiálů AV ČR, Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR a Sociologický ústav AV ČR.

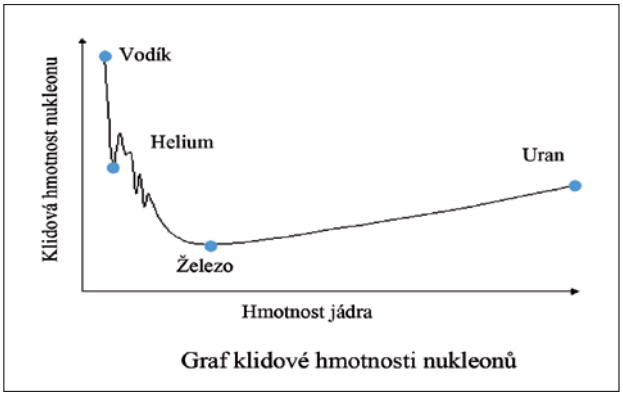
Jaderná energie

Jaderná energie má jako jediný známý energetický zdroj potenciál účinně snižovat emise skleníkových plynů, a zpomalit tak globální oteplování. Jak ukazují výsledky neúspěšného německého přechodu od fosilních a jaderných paliv na obnovitelné zdroje energie Energiewende, snižování emisí CO_2 není možné bez využití jaderné energie. Obnovitelné zdroje energie hrají a budou hrát v energetice důležitou roli, avšak z fyzikálních důvodů nemohou jadernou energetiku nahradit. Hlavními důvody jsou především velmi nízký energetický tok obnovitelných zdrojů a závislost jejich výkonu na geografických a klimatických podmínkách.

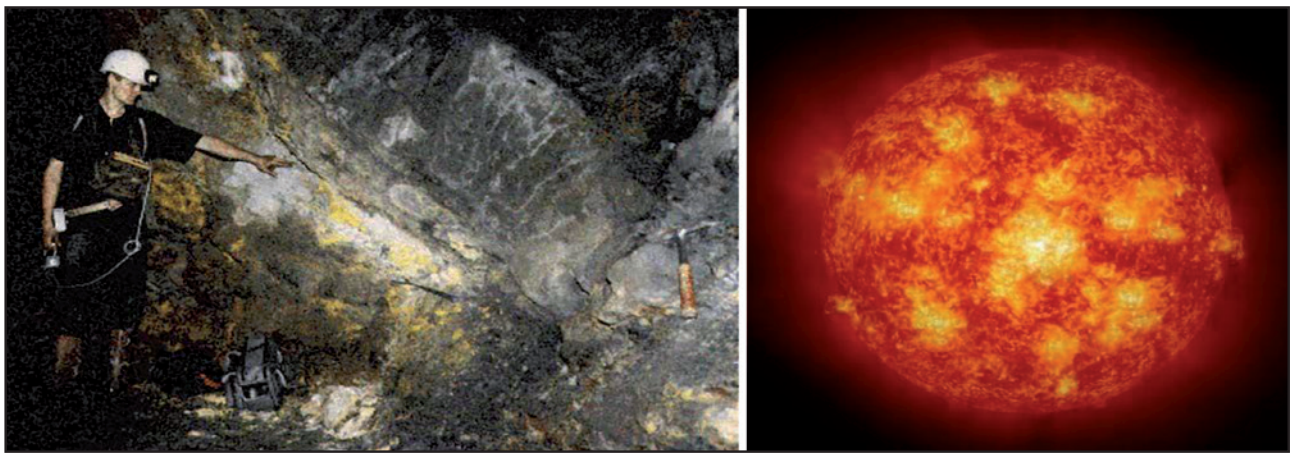
Tyto typy zdrojů mají systémově odlišné role: obnovitelné zdroje energie umožňují efektivní decentralizovanou výrobu elektrické energie o nízkém výkonu, jaderné zdroje umožňují naopak efektivní průmyslovou centralizovanou výrobu elektrické energie o vysokém výkonu. Nesprávná aplikace obou typů zdrojů vede k neúměrnému poškozování životního prostředí a k plýtvání s veřejnými prostředky, zatímco vhodná kombinace obnovitelných zdrojů a jaderné energetiky umožní plně využít jejich výhody a vyrábět elektřinu efektivně, bez emisí a s minimálními dopady na životní prostředí.

Štěpení versus slučování

Uvolňovat jadernou energii je možné dvěma různými způsoby. První způsob spočívá ve štěpení těžkých



Obr. 1: ***Graf klidové hmotnosti nukleonů***



Obr. 2: ***Na levém obrázku je přírodní štěpný reaktor v africkém Gabonu, na pravém je přírodní fúzní reaktor – Slunce***

atomových jader na lehčí jádra, druhý spočívá ve slučování lehkých atomových jader na těžší jádra. Důvod, proč tomu tak je, vyplývá ze závislosti klidové hmotnosti nukleonů na velikosti atomových jader. Graf klidové hmotnosti nukleonů na **obr. 1** ukazuje, že nejnižší klidovou hmotnost mají nukleony v jádru atomů železa. Štěpení těžkých jader uranu nebo slučování lehkých jader vodíku uvolňuje energii odpovídající rozdílu klidových hmotností nukleonů vstupujících (štěpených nebo slučovaných) a produktů reakce podle Einsteinova vzorce $E = \Delta mc^2$.

Rozbíjet je často snazší než něco spojovat a platí to i v případě atomového jádra. Štěpení uranu bylo experimentálně prokázáno v roce 1938 a již v roce 1942 Enrico Fermi postavil první funkční jaderný reaktor v tribunách stadionu Chicagské univerzity. Díky nestabilitě jádra izotopu ^{235}U v principu stačilo rozmístit mezi grafitové cihly dostatek uranu a jeden neutron, který nastartoval řetězovou štěpnou reakci. Kritická hmotnost čistého ^{235}U je zhruba 52 kilogramů, což odpovídá kouli o průměru pouhých 17 cm. V roce 1972 byl v západní rovníkové Africe dokonce objeven přírodní jaderný reaktor, ve kterém ložiska uranu umožnila vznik a udržení samovolné štěpné reakce.

Dosáhnout sloučení atomových jader je naopak velmi obtížné. Jaderná fúze vyžaduje pro svůj průběh takové podmínky, které na Zemi nemohou nastat přirozenou cestou. Dokonce ani jejich cílevědomé vytvoření není snadné. Jde především o dosažení velmi vysoké teploty a hustoty paliva. Úspěšně se to podařilo ve vodíkových bombách, ve kterých palivo ohřála a stlačila malá štěpná jaderná bomba sloužící jako roznětka. Pro energetické reaktory ale tento postup není možný a trvalo dlouhá desetiletí výzkumu, než se díky sofistikovaným technologiím fúzní reaktory přiblížily k potřebným parametrům.

Jaderné štěpení i jaderná fúze jsou přírodními zdroji energie. Důležitý rozdíl je ale v tom, že štěpení může v pozemských podmínkách probíhat samovolně, zatímco jaderná fúze ne.

Obr. 3: ***Energetická kapacita deuteria ve světových oceánech uspokojí energetickou spotřebu lidstva po několik miliard let***

Jaderná bezpečnost

Každá mince má dvě strany. Relativně snadná iniciace řetězové štěpné reakce v pozemských podmínkách, která umožnila rychlý rozvoj jaderné energetiky, tvoří v současnosti významnou překážku dalšího využívání štěpných reaktorů. Jaderné havárie vyvolávají strach, který již několik desítek let ovlivňuje veřejnost, a instalace pokročilých bezpečnostních systémů prodražuje výstavbu nových jaderných bloků. Protijaderná hnutí původně vzniklá v éře studené války jako odpor proti jaderným zbraním a horečnému zbrojení začala po ukončení studené války bojovat i proti mírovému využití jaderné energie a využívat obav veřejnosti pro své politické cíle. Přestože objektivně patří jaderná energetika mezi nejčistší energetické zdroje, je vytvářen její obraz jako jaderného nebezpečí, a to bez ohledu na skutečné problémy ochrany životního prostředí. Například zmíněná německá energetická koncepce Energiewende, uplatňovaná od počátku tohoto století, sice prosadila celkový útlum německé jaderné energetiky, avšak selhala v ochraně životního prostředí, která byla označována jako její hlavní cíl. Po více než 15 letech aplikace Energiewende Německo pokrývá svou energetickou

spotřebu více než z 55 % fosilními zdroji se všemi negativními dopady na životní prostředí a není schopné splnit ani své závazky na snižování emisí CO_2.

Oproti štěpné reakci nemůže fúzní reakce v termojaderných reaktorech v pozemských podmínkách z fyzikálních důvodů probíhat bez rozsáhlé externí podpory. Náročné vytvoření a udržování vhodných podmínek pro průběh fúzní reakce způsobuje, že ve vyvíjených fúzních reaktorech nebude možná nekontrolovaná fúzní reakce a bez činnosti podpůrných systémů reaktoru se probíhající reakce rychle samovolně zastaví. Důležitým bezpečnostním faktorem je také minimální množství paliva ve fúzním reaktoru. Ve fúzním reaktoru bude při provozu pouze několik gramů vodíkových izotopů, které nemohou způsobit žádnou havárii a jejichž případný únik do ovzduší by nijak neohrozil životní prostředí. Jaderná fúze představuje inherentně bezpečný zdroj energie.

Fúzní reaktory budou uvolňovat vazebnou energii atomového jádra jako štěpné reaktory, avšak odlišný způsob jejího uvolňování odstraní riziko jaderných havárií a jaderná energetika bude stejně bezpečná a ekologická jako obnovitelné zdroje energie.

Energetická kapacita paliva

Jedním z charakteristických rysů využití jaderné energie je vysoká energetická kapacita paliva. Jestliže uhelná elektrárna o elektrickém výkonu 2 GW_e spotřebuje denně ~40 000 000 kg uhlí, jaderná elektrárna spotřebuje denně pouze ~125 kg oxidu uranu a fúzní elektrárna méně než 2 kg vodíkových izotopů. Důsledkem velkého množství spalovaného uhlí je mimo jiné také relativně vysoká radioaktivita uhelného popela vyvolaná stopovým množstvím uranu a dalších radioaktivních látek v uhlí, která způsobuje, že uhelné elektrárny mají často vyšší radiační pozadí než jaderné elektrárny. Energetická kapacita zásob štěpného paliva vystačí na několik staletí a může být několikanásobně zvýšena použitím rychlých štěpných reaktorů umožňujících získávat štěpné palivo z přírodních izotopů uranu ^{238}U, thoria ^{232}Th a z vyhořelého paliva. Rychlé reaktory by umožnily uzavřít jaderný palivový cyklus a tím snížit množství vysokoaktivního jaderného odpadu. Tyto reaktory tvoří jeden z hlavních směrů vývoje štěpných reaktorů IV. generace a patří mezi ně rychlé reaktory chlazené plynem GFR, sodíkem chlazené rychlé reaktory SFR a olovem chlazené rychlé reaktory LFR.

Zásoby paliva pro jadernou fúzi jsou prakticky nevyčerpatelné a snadno dostupné. Základní složkou fúzního paliva je deuterium, které je přirozenou součástí vody. Při využití fúzní reakce jader izotopu vodíku deuteria by pro provoz fúzní elektrárny o elektrickém výkonu Jaderné elektrárny Temelín stačilo přefiltrovat přibližně 60 m^3 vody denně, z nichž by se 59,99 m^3 vrátilo zase zpět do vodního zdroje. Ve světových oceánech se nachází až $4{,}76 \times 10^{16}$ kg deuteria. Tyto zásoby jsou natolik bohaté, že mohou pokrýt energetickou potřebu celého lidstva po miliardy let. Energetická kapacita deuteria v mořských oceánech je až $1{,}64 \times 10^{31}$ J, zatímco celosvětová spotřeba energie v současnosti činí přibližně 6×10^{20} J/rok. Zdokonalení fúzních reaktorů navíc v budoucnu umožní energeticky využívat i další lehké prvky a několikanásobně zvýšit účinnost výroby elektrické energie použitím MHD generátorů. První generace fúzních elektráren bude kromě deuteria používat také lithium. Pozemské zásoby lithia by v případě nutnosti umožnily pokrýt spotřebu celého lidstva více než milion let, přičemž jako fúzní palivo by mohly být použity třeba i vyřazené lithiové baterie.

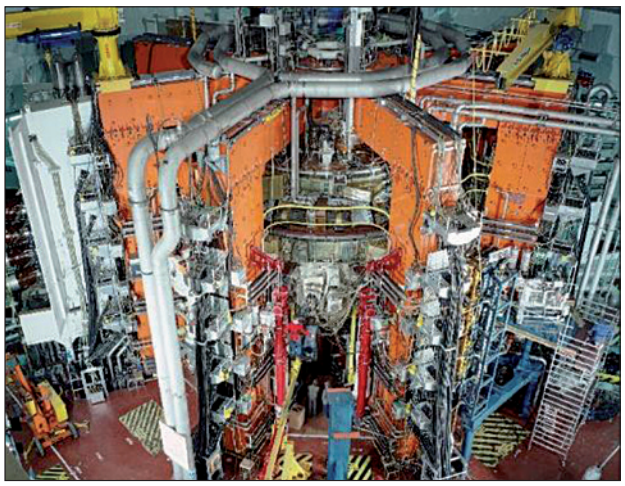
Pro porovnání s obnovitelnými zdroji energie je možné použít hustotu energetického toku. Jaderná elektrárna o elektrickém výkonu 2 GW_e zabere plochu ~1,5 km^2 oproti ~96 km^2 fotovoltaické elektrárny. Příčinou obrovské plochy nutné pro fotovoltaiku je velice nízká hustota energetického toku slunečního záření dopadajícího na zemský povrch. Podobně nízkou hustotu energetického toku mají i větrné elektrárny. Výstavba fotovoltaických nebo větrných parků o vysokém výkonu proto neúměrně devastuje velké množství biotopů a zdrojů surovin pro výstavbu těchto parků. Známým problémem obnovitelných zdrojů je také závislost hustoty energetického toku na počasí, vyžadující udržovat v provozní záloze fosilní zdroje o podobném výkonu pro období, kdy zrovna nesvítí slunce nebo nefouká vítr.

Emise a odpad

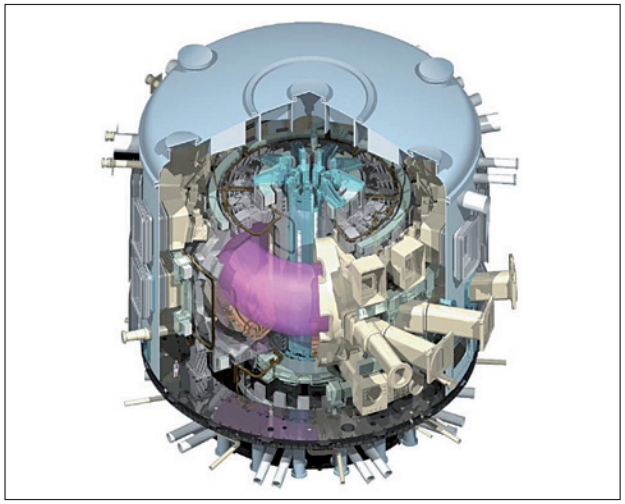
Důležitým rysem jaderné energetiky je bezemisní získávání energie. Při uvolňování jaderné energie se neuvolňují žádné emise a tím ani žádné skleníkové plyny. Spalování fosilních paliv doprovázené uvolňováním CO_2 je jednou z hlavních příčin globálního oteplování s možnými katastrofickými důsledky pro celé lidstvo. Naopak jaderná energetika jako jediná nabízí dostatečný potenciál toto oteplování zpomalit nebo zastavit. Obnovitelné zdroje energie neumožňují účinně snižovat emise skleníkových plynů, pokud je jejich záskok při nepřízni počasí založen na fosilních zdrojích.

Při výrobě elektrické energie v jaderných a fosilních zdrojích vzniká odpad, přičemž jaderné štěpení produkuje mnohem méně odpadu než fosilní zdroje, avšak tento odpad je z části vysoce radioaktivní. Úložiště tohoto odpadu pak vyvolávají otázky týkající se našeho odkazu budoucím generacím. Částečným řešením problému jsou zmíněné rychlé štěpné reaktory schopné využít recyklovaný uran, plutonium a další transurany z vyhořelého paliva a tím snížit množství vysokoaktivního odpadu.

Ve fúzních reaktorech nebude vznikat žádné vyhořelé palivo, odpadem fúzní reakce bude pouze inertní plyn helium, který bude využit pro technologie přímo v elektrárně. Jediným odpadem bude sekundárně aktivovaná konstrukce jaderné zóny reaktoru. Pečlivým výběrem konstrukčních materiálů ale bude vyloučen



Obr. 4: ***Evropský fúzní reaktor JET v britském Culhamu***



Obr. 6: ***Fúzní reaktor ITER***

vznik radioizotopů s dlouhým poločasem rozpadu a materiály bude možné recyklovat již po 50 až 100 letech od vyjmutí z reaktoru. Příkladem takových materiálů jsou vyvíjené pokročilé wolframové materiály nebo nízkoaktivovatelné feriticko-martenzitické oceli EUROFER, F82H nebo RUSFER. Na základě výzkumu termojaderného plazmatu a vývoje fúzních reaktorů se v budoucnu počítá s využitím bezneutronové fúze, která sekundární aktivaci materiálů prakticky vyloučí a žádný radioaktivní odpad nebude vznikat.

Pozoruhodným rysem jaderné fúze je také potenciál v budoucnu vyloučit z výroby termodynamický cyklus a transformovat energii termojaderného plazmatu přímo na elektrickou v MHD generátorech. Díky tomu několikanásobně stoupne účinnost výroby elektrické energie a z obrazu elektráren zmizí vysoké chladicí věže.

Štěpné reaktory IV. generace

Cílem vývoje štěpných reaktorů IV. generace je dosažení vyšší bezpečnosti jaderné energetiky, lepšího využití zásob štěpitelných materiálů současně se snížením množství radioaktivního odpadu implementací uzavřeného palivového cyklu a dosažení vyšší ekonomické efektivnosti jaderných elektráren.

Vyšší bezpečnost bude zajištěna především pasivními bezpečnostními systémy s minimem pohyblivých částí a opatřeními založenými na jednoduchých fyzikálních principech, která budou schopná za jakékoliv situace spolehlivě odstavit reaktor, a zabránit tak nekontrolované jaderné reakci. Vzhledem k dnešním hrozbám bude bezpečnost reaktorů zajištěna i v případě teroristických útoků. Uzavřený palivový cyklus využívající vyhořelé palivo představuje řešení jak omezených zásob štěpitelného uranu, tak množství produkovaného vysokoaktivního odpadu. Vyšší ekonomické efektivnosti jaderných elektráren bude dosaženo prodloužením životnosti jaderných reaktorů díky použití nových pokročilých radiačně odolných materiálů, dosažením vyššího stupně vyhoření paliva a využitím vysokých pracovních teplot vhodných pro vysokoteplotní termodynamický cyklus s vysokou účinností nebo vysokoteplotní výrobu vodíku.

Štěpné reaktory IV. generace jsou v současnosti ve fázi přípravy koncepcí. Proto je celkem přirozená poměrně velká různorodost jednotlivých návrhů. Nejblíže k realizaci jsou reaktory s velmi vysokou teplotou VHTR, které mohou využít zkušeností z provozu britských reaktorů Magnox a AGR, a rychlé reaktory chlazené sodíkem SFR podobné ruskému reaktoru BN-800 nebo francouzskému reaktoru Superphénix. Dlouhodobě také probíhá výzkum použití fluoridových solí v reaktorech založených na roztavených solích MSR.

Vývoj štěpných reaktorů IV. generace je do značné míry synergický s vývojem fúzních reaktorů. Synergie se týká především vývoje radiačně a tepelně odolných materiálů, odvodu vysokých tepelných toků, zpracování a recyklace radioaktivních odpadů nebo optimalizace termodynamických cyklů elektráren.

Fúzní reaktory

Fúzní reaktory představují pomyslné jaderné reaktory V. generace. Odlišná konstrukce reaktoru umožňuje splnit všechny stanovené cíle vývoje jaderné energetiky – vnitřní jadernou bezpečnost, dlouhodobý dostatek paliva a úplnou recyklaci odpadu.

Srdcem první generace fúzních elektráren budou fúzní reaktory typu tokamak využívající magnetické pole k udržení termojaderného plazmatu. Palivem bude deuterium (izotop vodíku ^{2}H) a lithium ^{6}Li. V uzavřeném palivovém cyklu bude lithium v reaktoru přeměňováno na tritium (izotop vodíku ^{3}H), které se bude slučovat s deuteriem za vzniku helia ^{4}He. Fúzní reakce deuteria a tritia bude probíhat v plazmatu za extrémních teplot okolo 160 milionů °C. Pro zamezení kontaktu plazmatu s konstrukcí reaktoru bude reaktor vybaven silným supravodivým magnetickým systémem. Ohřev plazmatu na potřebnou teplotu zajistí sofistikovaný

Obr. 7: ***Výstavba mezinárodního fúzního reaktoru ITER ve francouzském Cadarache***

systém ohřevu svazky urychlených neutrálních atomů a elektromagnetickými vlnami.

Fúzní reaktor ITER

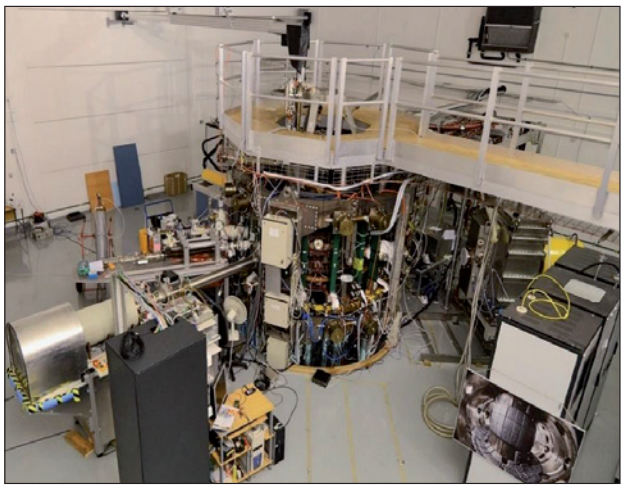
Vývoj fúzních reaktorů je koordinován na evropské i celosvětové úrovni a je zcela otevřený. Cílem mezinárodní spolupráce je dosáhnout v blízké budoucnosti integrace jaderné fúze do energetiky. Vlajkovou lodí současného fúzního výzkumu je mezinárodní projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), na kterém se podílejí Evropská unie, USA, Rusko, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea. Reaktor ITER dosáhne 500 MW fúzního výkonu a bude testovat řízení termojaderného plazmatu a řadu reaktorových technologií potřebných pro fúzní elektrárny, jako jsou supravodivé magnety, systémy ohřevu plazmatu, vakuový systém nebo palivový systém. Výstavba reaktoru ITER byla zahájena v roce 2007 v jihofrancouzské Provence v sousedství výzkumného střediska CEA Cadarache. První plazma je plánováno na rok 2025 a dosažení plného fúzního výkonu na rok 2036.

Na projekt ITER přímo navazují projekty DEMO (Demonstrational Fusion Power Plant). Jejich cílem je vyvinout a postavit elektrárnu s fúzním reaktorem, která bude demonstrovat výrobu elektřiny z jaderné fúze. Přípravné práce na evropském projektu DEMO byly zahájeny v roce 2014 a v současnosti probíhá konceptuální výběr jednotlivých fúzních technologií, které budou v projektu použité.

Evropský výzkum

Evropská komise schválila v roce 2012 klíčový dokument *Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy*, zkráceně nazývaný *Fusion Roadmap*, který definuje záměr Evropské unie zahájit výrobu elektrické energie pomocí jaderné fúze. Pro dosažení stanoveného cíle *Fusion Roadmap* identifikuje 8 rámcových oblastí fúzního výzkumu a vývoje, na které je potřeba soustředit úsilí výzkumníků:

1. Provozní režimy plazmatu – vývoj metod řízení termojaderného plazmatu, diagnostiky a snížení zátěže komponent vystavených plazmatu.



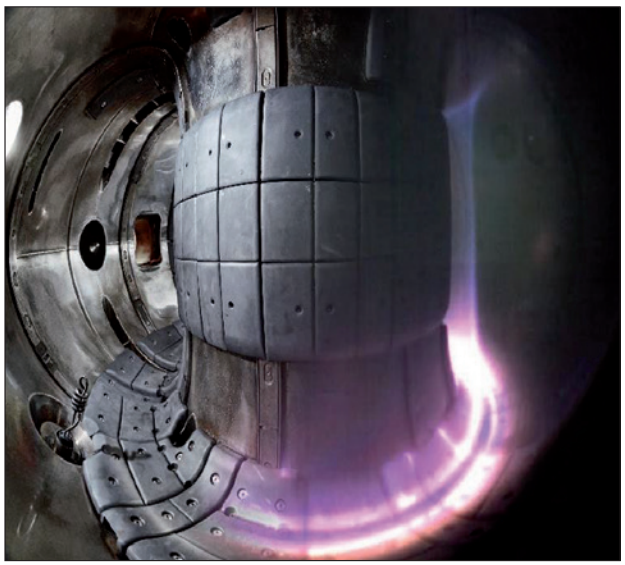
Obr. 8: ***Fúzní reaktor COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR***

2. Odvod výkonu – výzkum a vývoj vhodného řešení divertoru fúzního energetického reaktoru, který je kontinuálně zatížený vysokým tepelným tokem.
3. Radiačně odolné materiály – vývoj materiálů odolných vůči vysokým neutronovým tokům.
4. Tritiová soběstačnost – výzkum a vývoj technologií výroby fúzního paliva a palivového cyklu.
5. Bezpečnost zařízení – analýza bezpečnostních rizik fúzních reaktorů.
6. Fúzní elektrárna DEMO – integrace fúzního reaktoru do energetického zařízení.
7. Konkurenceschopná cena elektrické energie – optimalizace jednotlivých fúzních technologií s cílem zvýšení účinnosti výroby elektrické energie a snížení nákladů na výstavbu a provoz fúzních elektráren.
8. Stelarátor – výzkum alternativního typu fúzních reaktorů na bázi magnetického udržení plazmatu. Stelarátory nevyužívají induktivní generování elektrického proudu a pracují v ustáleném režimu. Doposud ale nedosahují parametrů plazmatu srovnatelného s tokamaky.

Plněním programu *Fusion Roadmap* je pověřeno konsorcium evropských výzkumných organizací EUROfusion se sídlem v německém Garchingu. Konsorcium EUROfusion v současnosti sdružuje 31 výzkumných ústavů a národních asociací z celé Evropy včetně české asociace EURATOM-IPP.CR, jejímž garantem je Ústav fyziky plazmatu AV ČR (ÚFP).

Tuzemský výzkum

V Česku byl výzkum plazmatu zahájen po roce 1963. V roce 1977 byl v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV zprovozněn tokamak CASTOR, který byl později, v roce 2006, nahrazen moderním tokamakem COMPASS s geometrií magnetického pole a provozním režimem relevantním reaktoru ITER. Tokamak CASTOR pod názvem GOLEM v dnešní době funguje jako výukový tokamak na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT



Obr. 9: ***Vnitřek tokamaku COMPASS, v pravé polovině v kombinaci s fotografií plazmatu***

v Praze. Instalace tokamaku COMPASS a jeho vědecké využívání zařadilo Českou republiku mezi země s pokročilým výzkumem jaderné fúze.

V loňském roce ÚFP získal finanční podporu pro projekt COMPASS Upgrade (COMPASS-U) v rámci výzvy Excelentní výzkum v Operačním programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Cílem projektu je konstrukce nového tokamaku COMPASS-U a upgrade současné výzkumné infrastruktury. Zcela nový tokamak COMPASS-U bude mít po svém spuštění v roce 2022 unikátní vlastnosti, neboť bude schopen generovat vysoké magnetické pole o velikosti až 5 Tesla a proud v plazmatu až 2 mil. ampér. Díky tomu bude pracovat v režimech v mnoha parametrech blízkých nejen současně budovanému tokamaku ITER, ale především prvním energetickým reaktorům DEMO, kde bude schopen významně přispět k řešení klíčových problémů. Realizace projektu zařadí ÚFP mezi klíčové světové laboratoře.

Výchova nové generace odborníků

Důležitou součástí činnosti je výchova a příprava odborníků pro jaderný výzkum. Již více než 10 let probíhá na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze (FJFI) ve spolupráci s ÚFP výuka studentů v oboru Fyzika a technika termojaderného plazmatu a v nedávné době zde byl zahájen také navazující doktorský studijní program. Na Strojní fakultě ČVUT probíhá od loňského roku ve spolupráci s ÚFP výuka předmětu Jaderná fúze zaměřená na fúzní technologie. Pracovníci Sociologického ústavu AV ČR, ÚFP a FJFI získali tříletý grant v programu Erasmus+ pro mezinárodní projekt zabývající se vzděláváním technických pracovníků v oboru energetiky v oblasti sociálních věd TEACHENER – Integrating Social Sciences and Humanities into Teaching about Energy.

Celosvětově unikátní jsou každoročně pořádané mezinárodní experimentální školy Summer Training Course a Erasmus Mundus Training Course na tokamaku COMPASS. V jejich rámci studenti získávají praktické znalosti a dovednosti v oblasti provozu tokamaků a fyziky termojaderného plazmatu. Druhá z výše zmíněných škol je součástí evropského vzdělávacího programu Erasmus Mundus Fusion Master. Česká republika je také zapojena do evropské vzdělávací sítě FUSENET.

Závěr

Jaderná energetika umožňuje již dnes sestavit energetický mix z nízkoemisních energetických zdrojů. Má dostatečný potenciál nahradit spalování fosilních paliv, a zpomalit tak proces globálního oteplování. Pokrok jak ve vývoji reaktorů IV. generace, tak i ve fyzice termojaderného plazmatu a fúzních technologiích umožní v tomto století integrovat do energetiky nové typy pokročilých jaderných reaktorů. Fúzní reaktory mají přitom potenciál poskytnout lidstvu v blízké budoucnosti výkonný, bezpečný a čistý zdroj energie s prakticky nevyčerpatelnými zásobami paliva.

Poděkování

Převzaté fotografie byly použity s laskavým svolením konsorcia EUROfusion (www.euro-fusion.org), ITER Organization (www.iter.org) a Ústavu fyziky plazmatu AV ČR (www.ipp.cas.cz). Aktivita byla podpořena Strategií Akademie věd AV21 v rámci výzkumného programu „Systémy pro jadernou energetiku".

Ing. Slavomír Entler, Ph.D. *– pracuje v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a zabývá se vývojem magnetické diagnostiky pro fúzní reaktory. Současně působí jako pedagogický pracovník v Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze, kde řeší otázky integrace jaderné fúze do energetiky. Dříve působil ve funkci vedoucího výzkumné aktivity Technologie první stěny fúzního reaktoru Centra výzkumu Řež v Řeži u Prahy, byl členem evropské projektové skupiny pro vývoj divertoru fúzního reaktoru DEMO konsorcia EUROfusion a zástupcem ČR v radě evropských fúzních laboratoří při agentuře Fusion for Energy.*

RNDr. Radomír Pánek, Ph.D. *– působí v oddělení Tokamak v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v němž se zabývá výzkumem termojaderné fúze jako zdroje energie, a to především fyzikou vysokoteplotního plazmatu. Jeho zásluhou byl v roce 2006 z UKAEA ve Velké Británii do Prahy přivezen a instalován tokamak COMPASS. V letech 2008–2017 vedl oddělení Tokamak. Od roku 2015 je ředitelem Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Je členem řady mezinárodních vědeckých rad a odborných komisí, přednáší na třech univerzitách a na mezinárodních konferencích.*