

Systemy pro jadernou energetiku



Akademie věd
České republiky



věda 92

kolem
nás
výzvy
a otázky

Státní energetická koncepce České republiky stanovuje jako jeden z hlavních cílů výzkumu a vývoje v oblasti energetiky zvýšení zapojení tuzemských výzkumných kapacit do mezinárodních aktivit a projektů, jako jsou jaderné reaktory IV. generace a jaderná fúze. 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, protože jaderná energetika má dostatečný potenciál nahradit spalování fosilních paliv a zpomalit tak proces globálního oteplování. Pokrok ve výzkumu jaderné fúze navíc umožní v tomto století integrovat do energetiky fúzní reaktory, které přinesou lidstvu bezpečný a čistý zdroj energie s prakticky nevyčerpatelnými zásobami paliva.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Gabriela Ůzel Volfová: **Islámský feminismus**

Václav Źürek: **Centre for Medieval Studies**

Dalibor Dobiáš: **The Forged Manuscripts of Dvůr Králové
and Zelená Hora**

DOSUD VYŠLO:

Martin Pivokonský: **Úprava pitné vody**

Alena Nováková: **Mikroskopické houby na poštovních známkách**

Dana Hašková: **Meziválečná ruská emigrace a SLŮ**

Edice Věda kolem nás | Co to je...

Systémy pro jadernou energetiku | Slavomír Entler, Radomír Pánek, Martin Hron

Vydalo Středisko společných činností AV ŹR, v. v. i. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2019. Ediční číslo 12595. Tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jínonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ŹR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemнас.cz | www.academia.cz | www.eknihy.academia.cz

Atomové jádro představuje nejefektivnější a nejsilnější energetický zdroj, jaký známe. Přitom jde o zdroj bezemisní, jehož využití tak pomáhá v boji proti globálnímu oteplování a klimatickým změnám.

Jaderné reaktory jsou na základě fyzikálního a technologického výzkumu dlouhodobě zdokonalovány směrem k vyšší bezpečnosti, lepšímu využití paliva a snižování množství odpadu. Vytvořené reaktory na bázi jaderné fúze jsou inherentně bezpečné a neřízená jaderná reakce v nich není fyzikálně možná. Zásoby paliva pro fúzní elektrárny jsou dostupné všem a uspokojí energetickou spotřebu lidstva po miliardy let.

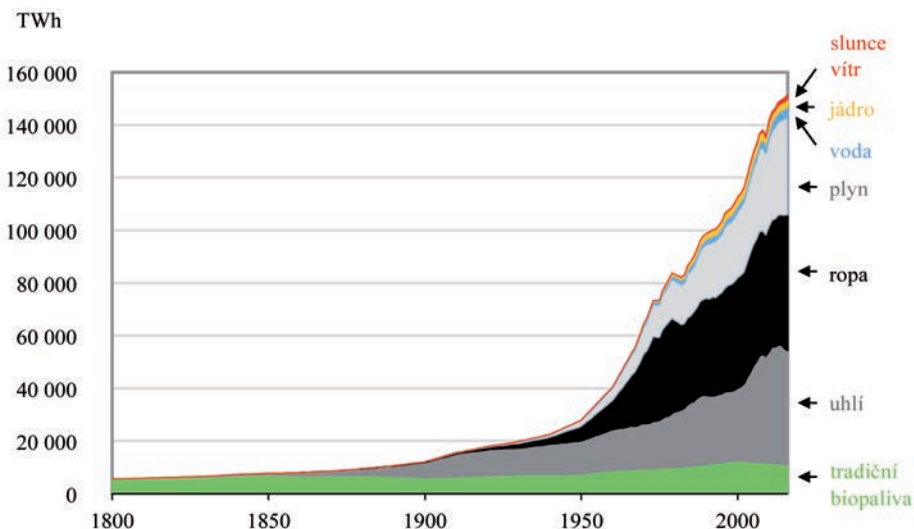
Fúzní reaktory budou vysoce ekologické a budou vyrábět elektrickou energii bez emisí a prakticky bez odpadu. Z pohledu ochrany přírody a životního prostředí budou fúzní elektrárny dokonce ekologičtější než obnovitelné zdroje, protože umožní provozovat elektrárny o vysokém výkonu bez nutnosti záboru rozsáhlých přírodních ploch a bez nutnosti udržování záložních uhelných a plynových elektráren pro dobu, kdy nesvítí slunce nebo nefouká vítr. Proto budou plnohodnotným čistým průmyslovým protějškem malých decentralizovaných obnovitelných zdrojů.

Systémy pro jadernou energetiku

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

Celosvětová spotřeba energie pochází až z 85 % z fosilních zdrojů paliva, při jejichž spalování se uvolňuje skleníkový plyn CO_2 (ÚFP AV ČR, v. v. i., data BP Statistical Review of World Energy, 2017)

Roční celosvětová spotřeba energie



jaderné reaktory IV. generace, jaderná fúze, vývoj nových materiálů využitelných v energetice a energetickém strojírenství a využití dalších možností vědy, výzkumu a inovací. Energetický arzenál naší země bude podle této koncepce založen na využití jaderné energie a obnovitelných zdrojů. Právě takový mix poskytuje podle všech dosavadních zkušeností z řady evropských zemí nejvyšší ochranu životního prostředí a umožňuje efektivně snižovat emise skleníkového plynu CO₂.

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, v. v. i., Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i., Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., a Sociologický ústav AV ČR, v. v. i.

Jaderná energie

Jaderná energie má jako jediný známý energetický zdroj potenciál účinně snižovat emise skleníkových plynů a zpomalit tak globální oteplování. Jak ukazují výsledky německého přechodu od fosilních a jaderných paliv na obnovitelné zdroje energie Energiewende, snižování emisí CO₂ 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.

Tok energie získávané ze slunce, větru nebo paliva v různých typech elektráren v kW/m²

Fotovoltaická elektrárna	Větrná elektrárna	Uhelná elektrárna	Jaderná elektrárna	Fúzní elektrárna
0,1–0,5	0,1–0,8	10–100	500–1500	1000–20 000

Štěpení versus slučování

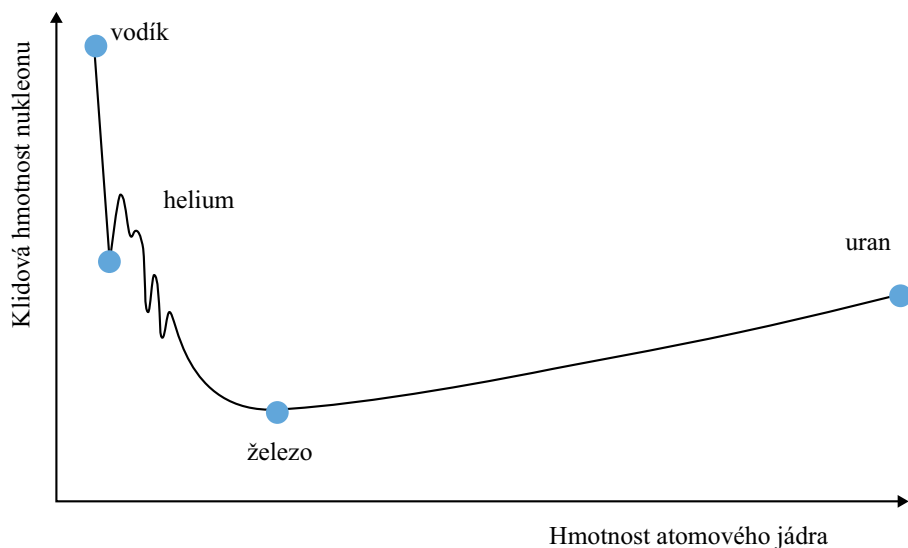
Uvolňovat jadernou energii je možné dvěma různými způsoby. První způsob spočívá ve štěpení těžkých atomových jader na lehčí jádra, druhý spočívá ve slučování

vání 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 obrázku ukazuje, že nejnížší 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 jaderné reakce podle Einsteinova vzorce $E = \Delta mc^2$.

Často je snazší věci rozbít než spojit, 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 nízké stabilitě jádra izotopu uranu ^{235}U v principu stačilo rozmístit mezi grafitové cihly dostatek uranu a dodat 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 slučení 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 například 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 fúzní reaktory přiblížily k potřebným parametřům díky vývoji sofistikovaných technologií.

Graf klidové hmotnosti nukleonů



Jaderná bezpečnost

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.

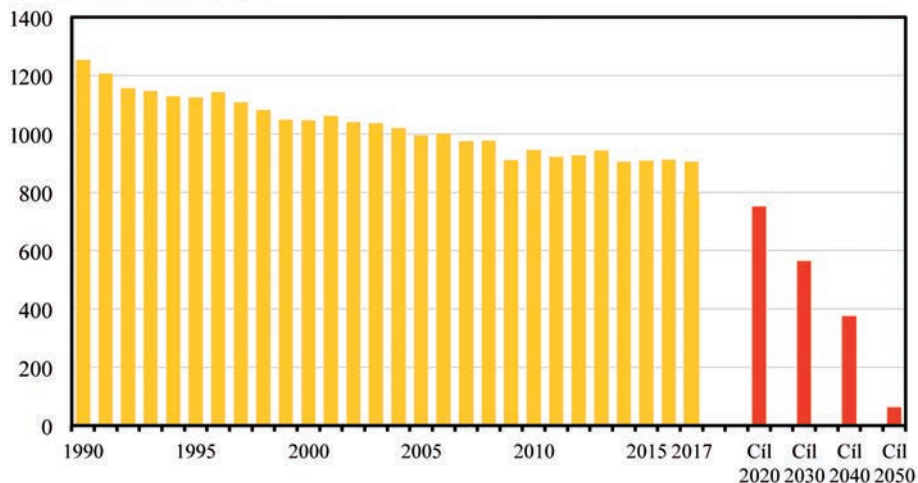
Přestože objektivně patří jaderná energetika mezi nejčistší energetické zdroje, je ve společnosti vytvářen její obraz jako jaderného nebezpečí, a to bez ohledu na skutečné problémy ochrany životního prostředí. Například zmíněná německá energetická koncepce Energiewende uplatňovaná od počátku tohoto století sice prosadila celkový útlum německé jaderné energetiky, avšak selhala v ochraně životního prostředí, která byla uváděna jako její hlavní cíl. Po více než 15 letech aplikace Energiewende Německo pokrývá svou energetickou spotřebu z více než 55 % fosilními zdroji se všemi negativními dopady na životní prostředí.

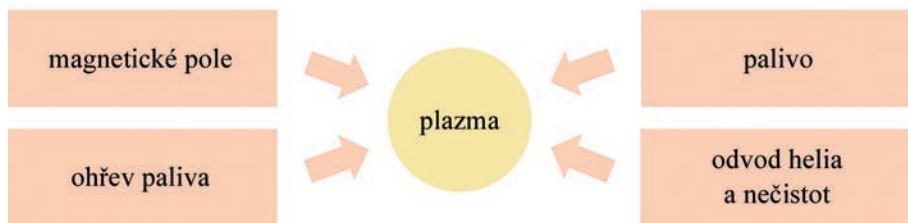
Oproti štěpné reakci nemůže fúzní reakce v termojaderných reaktorech v pozemských podmínkách z fyzikálních důvodů probíhat bez rozsáhlé externí podpory. Náročné vytvoření a udržování vhodných podmínek pro průběh fúzní reakce způsobuje, že ve vyvíjených fúzních reaktorech není možná nekontrolovaná fúzní reakce a bez aktivní činnosti podpůrných systémů reaktoru se probíhající reakce samovolně zastaví. Jaderná fúze představuje inherentně bezpečný zdroj energie.

Protože jaderná fúze probíhá při jakémkoliv množství reaktantů, je důležitým aspektem inherentní bezpečnosti fúzních reaktorů také velmi malé množství fúzního

Emise skleníkových plynů v Německu od roku 1990: útlum jaderné energetiky brání účinnému snižování emisí (ÚFP AV ČR, v. v. i., data German Environment Agency, National Inventory Reports for the German Greenhouse Gas Inventory, 1990 až 2017)

Miliony tun
ekvivalentu oxidu uhličitého





Fúzní reakce musí být aktivně podporována externími systémy, při jejichž odpojení nebo poruše dojde k přirozenému zastavení probíhající reakce

paliva v reaktoru (v řádu gramů). Palivo bude do reaktoru průběžně doplňováno a v případě zastavení palivového systému dojde k přirozenému ukončení fúzní reakce. Malé množství paliva v reaktoru také umožní rychlé a nedestruktivní ochlazení paliva prostým kontaktem s konstrukcí reaktoru.

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

Energetická kapacita paliva

Jedním z charakteristických rysů využití jaderné energie je vysoká energetická kapacita paliva. Jestliže uhelná elektrárna o elektrickém výkonu 2 GW_e (jako jaderná elektrárna Temelín) 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.

Přibližná denní spotřeba paliva (v kg) v různých typech elektráren o elektrickém výkonu 2 GW_e

Fotovoltaická elektrárna	Větrná elektrárna	Uhelná elektrárna	Jaderná elektrárna	Fúzní elektrárna
0	0	40 000 000	125	2

Pro porovnání energetické kapacity paliva s obnovitelnými zdroji energie lze použít zastavěnou plochu elektrárny. Jaderná elektrárna o elektrickém výkonu 2 GW_e zabere plochu ~1,5 km², zatímco fotovoltaická elektrárna o stejném výkonu potřebuje ~96 km². Příčinou obrovské plochy nutné pro fotovoltaiku je velmi nízká kapacita energetického toku slunečního záření dopadajícího na zemský povrch.

Podobně nízkou kapacitu mají i větrné elektrárny. Výstavba fotovoltaických nebo větrných elektráren o vysokém výkonu proto neúměrně devastuje velké množství biotopů a současně také zdroje surovin nutných pro výstavbu těchto elektráren. Znáмым problémem obnovitelných zdrojů je také závislost energetického toku na počasí, vyžadující udržovat v provozní záloze fosilní zdroje o podobném výkonu pro období, kdy zrovna nesvítlí slunce nebo nefouká vítr.

Zastavěná plocha (zábor půdy v km²) elektrárny o elektrickém výkonu 2 GW_e

Fotovoltaická elektrárna	Větrná elektrárna	Uhelná elektrárna	Jaderná elektrárna	Fúzní elektrárna
96	32	2	1,5	1,5

Zásoby paliva

Zásoby štěpného paliva vystačí po několik staletí a mohou být několikanásobně navýšeny použitím rychlých množivých štěpných reaktorů umožňujících získávat štěpné palivo z izotopu uranu ²³⁸U, thoria ²³²Th nebo z vyhořelého paliva. Rychlé množivé 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. Nevýhodou množivých reaktorů je možnost použití produkovaného štěpného materiálu pro výrobu jaderných bomb, která omezí jejich výstavbu pouze na jaderné mocnosti.

Zásoby paliva pro jadernou fúzi jsou prakticky nevyčerpatelné a snadno dostupné. Základní složkou fúzního paliva je izotop vodíku deuterium, který je přirozenou součástí vody. Při využití fúzní reakce jader deuteria by pro provoz fúzní elektrárny o elektrickém výkonu jaderné elektrárny Temelín stačilo přefiltrovat přibližně 60 m³ vody denně, z nichž by se 59,99 m³ vrátilo zase zpět do vodního zdroje.

Ve světových oceánech se nachází až $4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria. Tyto zásoby mohou pokrýt energetickou potřebu celého lidstva po miliardy let. Energetická kapacita deuteria v mořských vodách je až $1,64 \times 10^{31}$ J, zatímco celková celosvětová spotřeba energie v současnosti činí přibližně 6×10^{20} J/rok. Zdokonalení fúzních reaktorů 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 druhý izotop vodíku, tritium, které se bude přímo v reaktoru vyrábět z lithia. Pozemské zásoby lithia by v případě nutnosti umožnily pokrýt energetickou spotřebu celého lidstva na více než milion let, přičemž by pro výrobu fúzního paliva mohly být použity třeba i vyřazené lithiové baterie.

Riziko zneužití fúzního paliva je přitom zanedbatelné, protože vodíkové bomby vyžadují štěpnou jadernou roznětku a jejich výroba je velmi náročná. Navíc bude množství paliva v elektrárně velmi malé, protože bude získáváno průběžně při provozu reaktoru.

Emise a odpad

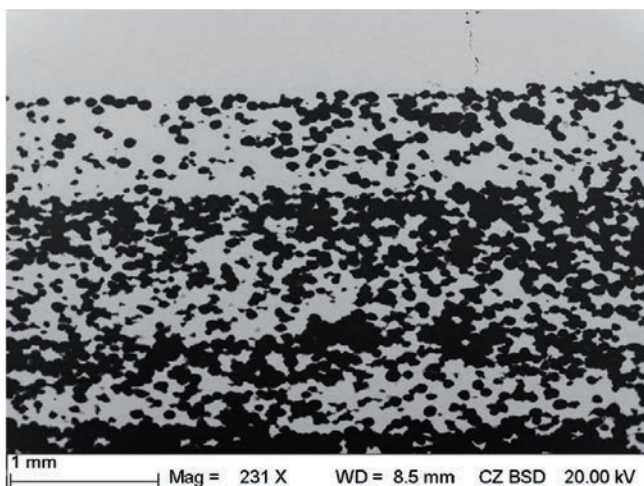
Důležitým rysem jaderné energetiky je bezemisní získávání energie. Při získávání jaderné energie se neuvolňují žádné emise, tedy ani žádné skleníkové plyny. Spalování fosilních paliv doprovázené uvolňováním CO_2 je jednou z hlavních příčin globálního oteplování s možnými katastrofickými důsledky pro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

Při výrobě elektrické energie v jaderných a fosilních elektrárnách 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 uran, plutonium a další transurany z vyhořelého paliva a tím snížit množství radioaktivního odpadu.

Ve fúzních reaktorech nebude vznikat žádné vyhořelé palivo. Při fúzní reakci bude vznikat užitečný inertní plyn helium, který bude technologicky využit přímo v elektrárně. Jediným odpadem bude sekundárně aktivovaná konstrukce jaderné zóny reaktoru. Pečlivým výběrem konstrukčních materiálů bude však vyloučen 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 EURO-FER, F82H nebo RUSFER. Na základě výzkumu termojaderného plazmatu a vývoje fúzních reaktorů se v budoucnu počítá s využitím bezneutronové fúze, která sekundárně aktivaci materiálů prakticky vyloučí a žádný aktivní 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 magnetohydrodynamických (MHD) generátorech. Díky tomu

Řez pokročilým funkčně gradovaným materiálem na bázi wolframu a oceli, vyvinutým v ÚFP AV ČR, v. v. i.: v elektronovém mikroskopu při 231násobném zvětšení představují světlé plochy wolfram a tmavé plochy ocel (ÚFP AV ČR)



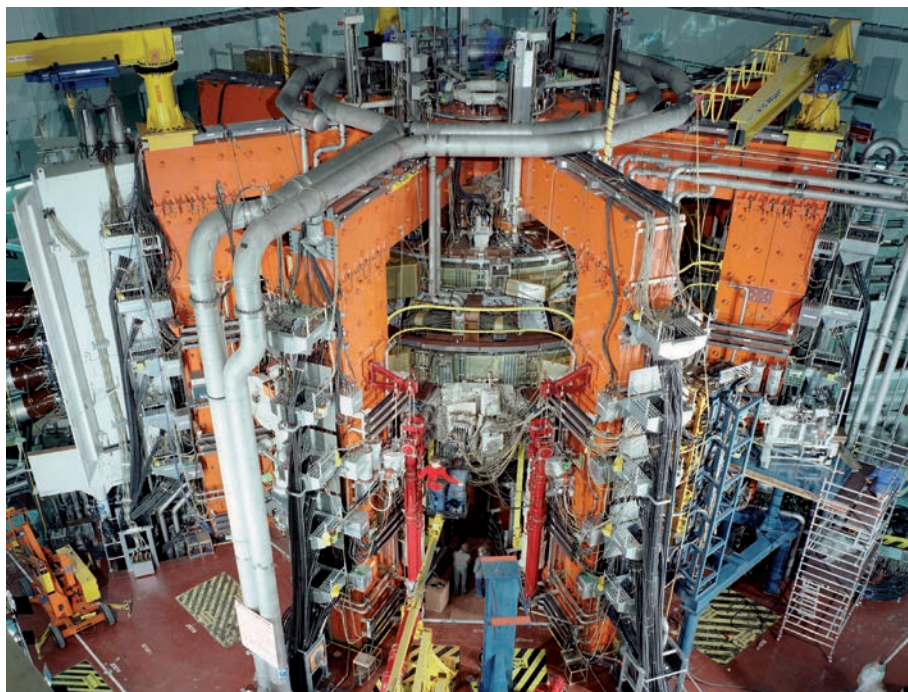
několikanásobně stoupne účinnost výroby elektrické energie a z obrazu elektráren zmizí vysoké chladičí věže.

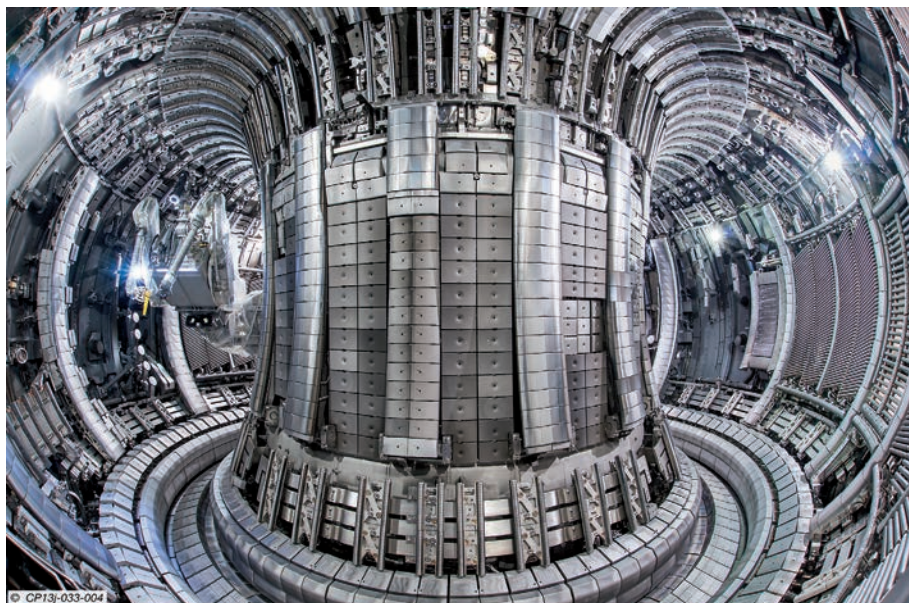
Fúzní reaktory

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

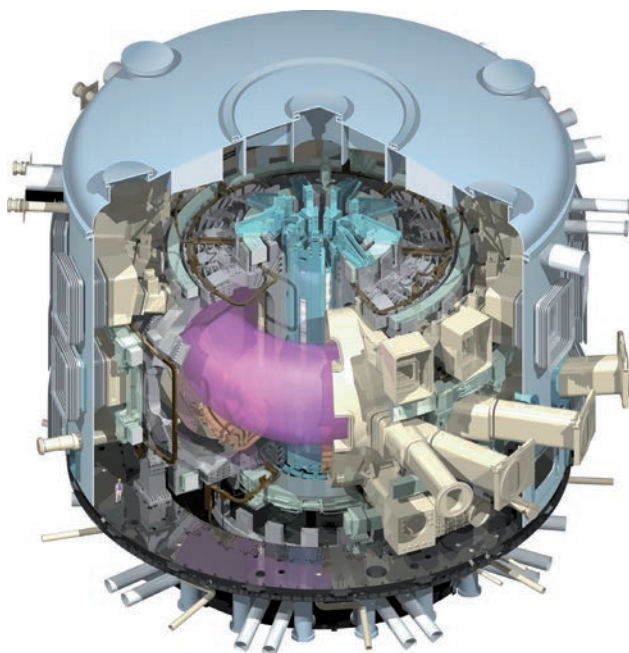
Srdcem první generace fúzních elektráren budou fúzní reaktory typu tokamak, využívající magnetické pole k udržení termojaderného plazmatu. Palivem bude deuterium (izotop vodíku ^2H) a lithium ^6Li . V uzavřeném palivovém cyklu bude lithium v reaktoru přeměňováno na tritium (izotop vodíku ^3H), které se bude slučovat s deuteriem za vzniku helia ^4He . Fúzní reakce deuteria a tritia bude probíhat v plazmatu za extrémních teplot okolo 160 milionů $^{\circ}\text{C}$. Pro zamezení kontaktu plazmatu s konstrukcí reaktoru bude reaktor vybaven silným magnetickým polem. Potřebnou teplotu plazmatu zajistí sofistikovaný systém ohřevu pomocí svazků urychlených neutrálních atomů a elektromagnetických vln.

Evropský fúzní reaktor JET v britském Culhamu dosáhl v roce 1997 fúzního výkonu 16 MW (EUROfusion Consortium Research Institutions)

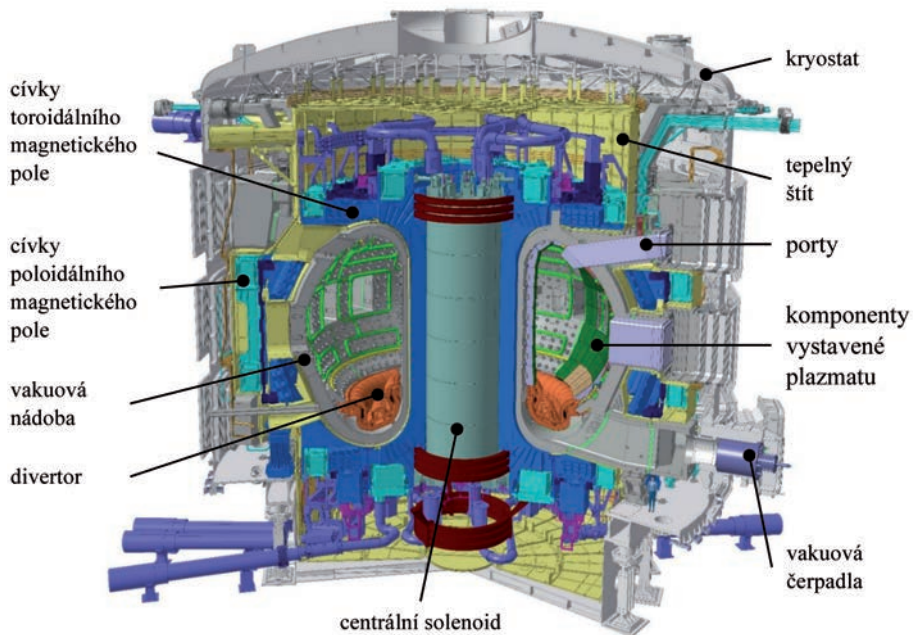




Komponenty vystavené plazmatu reaktoru JET, vlevo robotický manipulátor
(EUROfusion Consortium Research Institutions)



Fúzní reaktor ITER bude
30 m vysoký, 30 m široký
a bude vážit 23 tisíc tun
(ITER Organization)



Hlavní součásti reaktoru ITER ve schematicém řezu reaktorem (ITER Organization)

Staveniště reaktoru ITER ve francouzském Cadarache (ITER Organization)





Prostor pro reaktor (ITER Organization)

Vývoj fúzních reaktorů je koordinován na evropské i celosvětové úrovni a je zcela otevřený. Cílem mezinárodní spolupráce je integrace jaderné fúze do energetiky. Vlajkovou lodí současného fúzního výzkumu je mezinárodní projekt ITER, na kterém se podílejí Evropská unie, USA, Rusko, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea. Reaktor ITER dosáhne fúzního výkonu 500 MW a bude testovat řízení termojaderného plazmatu a reaktorové technologie potřebné 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. 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*). Projekty DEMO mají za cíl vyvinout a postavit prototyp elektrárny s fúzním reaktorem, který bude demonstrovat výrobu elektřiny z jaderné fúze. Přípravné práce na evropském projektu DEMO byly zahájeny v roce 2014 a v současnosti probíhá konceptuální výběr vhodných 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. Tento plán byl v roce 2018 aktualizován a zprovoznění prototypu fúzní elektrárny DEMO se předpokládá do 20 let od dosažení plného výkonu reaktoru ITER.

Pro splnění stanoveného cíle *Fusion Roadmap* definuje 8 rámcových oblastí fúzního výzkumu a vývoje, na které je potřeba paralelně s projektem ITER soustředit úsilí vědců a inženýrů:

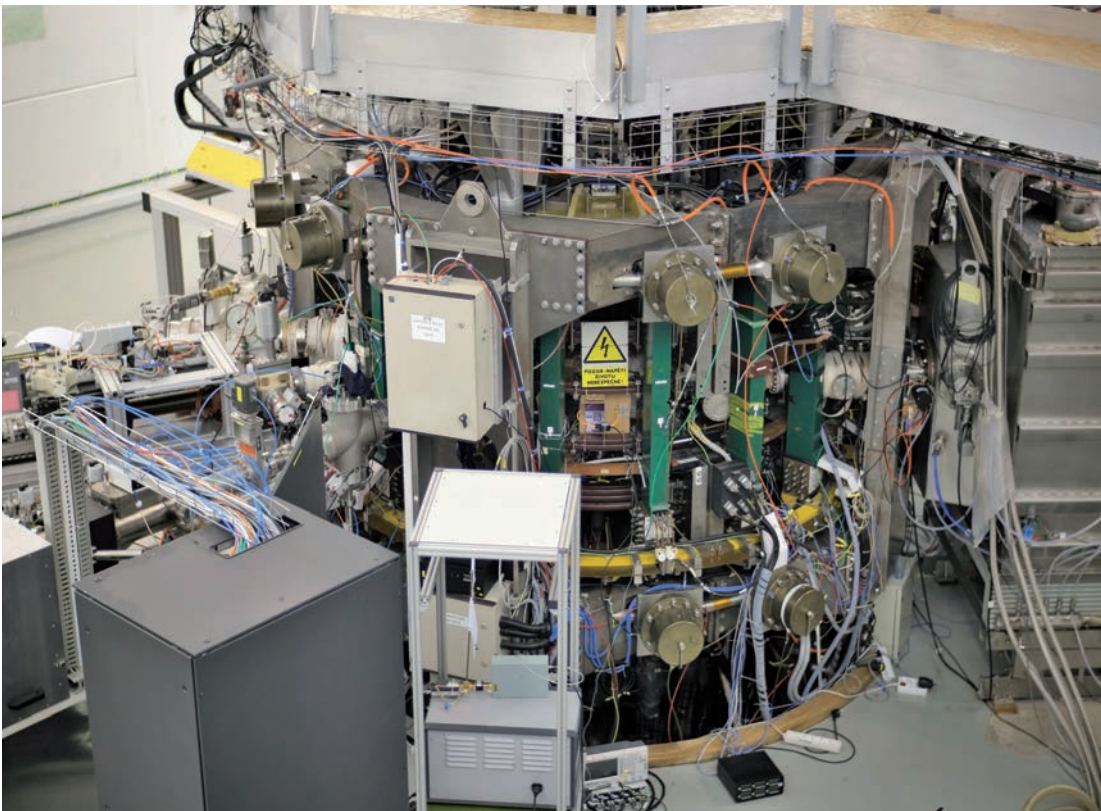
1. Provozní režimy plazmatu – vývoj metod diagnostiky a řízení termojaderného plazmatu, snížení zátěže komponent vystavených plazmatu.
2. Odvod výkonu – výzkum a vývoj vhodného řešení komponent vystavených plazmatu, které musí být schopné dlouhodobě odvádět vysoké tepelné toky.
3. Neutronově odolné materiály – vývoj materiálů odolných vůči vysokým neutronovým tokům.
4. Tritiová soběstačnost – výzkum a vývoj technologií výroby fúzního paliva a palivového cyklu.
5. Bezpečnost zařízení – analýza a systémové řešení bezpečnostních rizik fúzních energetických 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 však nedosahují parametrů plazmatu srovnatelných s tokamaky.

Plněním programu *Fusion Roadmap* je pověřeno konsorcium evropských výzkumných organizací EUROfusion. Konsorcium EUROfusion v současnosti sdružuje 31 výzkumných ústavů a národních asociací z celé Evropy, včetně české výzkumné skupiny IPP.CR, jejímž garantem je Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.

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 v dnešní době funguje pod názvem GOLEM jako výukový tokamak na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Instalace tokamaku COMPASS a jeho vědecké využívání zařadilo Českou republiku mezi země s pokročilým výzkumem jaderné fúze. K hlavním cílům výzkumu



Tokamak COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. (ÚFP AV ČR)

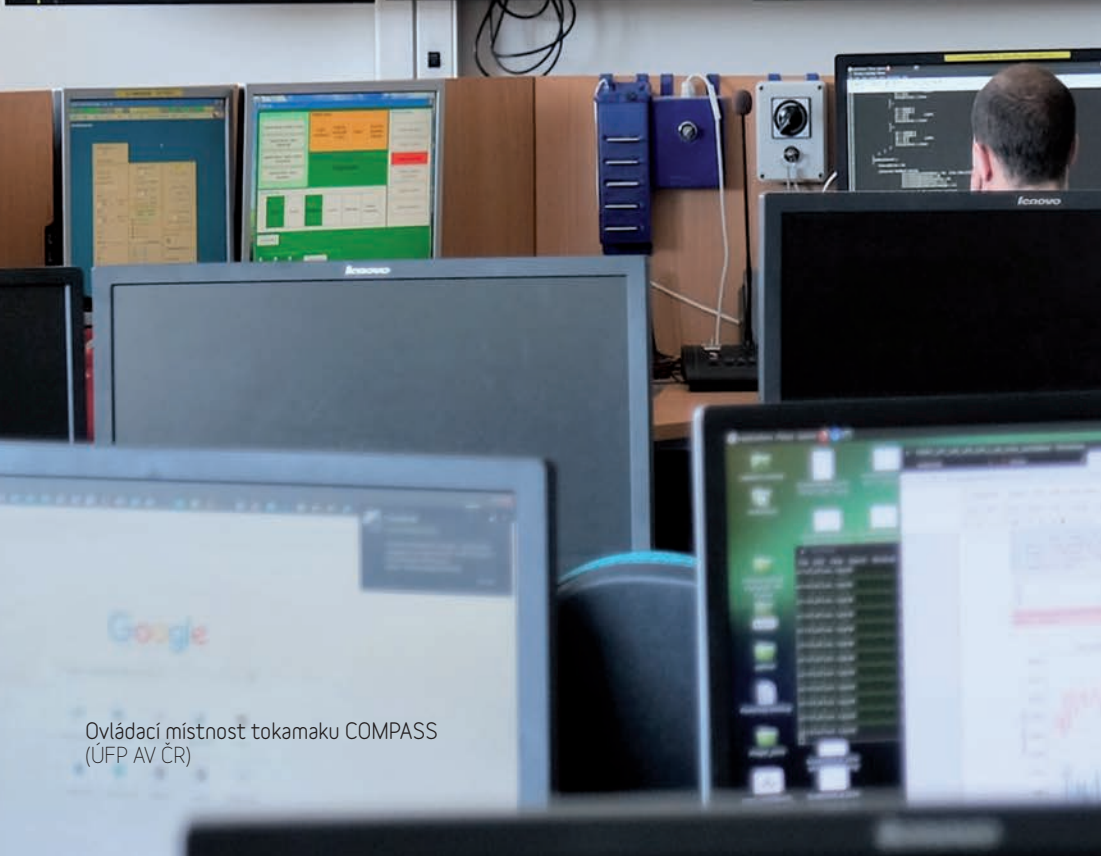
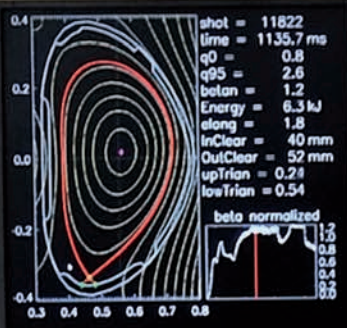
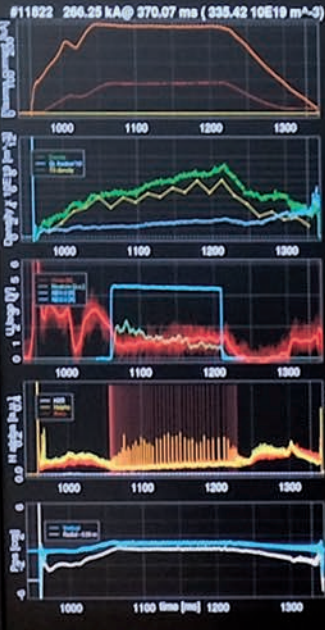
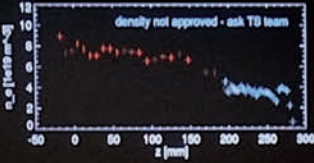
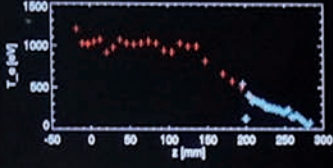
patří studium procesů v okrajovém plazmatu a souvisejících tepelných toků, studium přechodu do provozních režimů se zvýšeným udržením energie, studium plazmových nestabilit nebo studium tzv. ubíhajících elektronů.

Na mezinárodní úrovni je výzkumná činnost oddělení Tokamak plně integrována do programu EURATOM v rámci konsorcia EUROfusion, kde se tým oddělení podílí na využívání společného evropského tokamaku JET a dalších konsorciálních zařízení, tokamaků ASDEX Upgrade a TCV. Oddělení Tokamak se mj. podílí i na vývoji diagnostik pro reaktory ITER a DEMO a intenzivně spolupracuje s pracovišti ve Francii, Rakousku, Belgii, Itálii, Velké Británii, Švýcarsku, Německu, Maďarsku, Španělsku, Portugalsku, Bulharsku, USA, Rusku a v dalších zemích.

V roce 2017 ÚFP zahájil projekt COMPASS Upgrade (COMPASS-U). Cílem projektu je konstrukce nového tokamaku COMPASS-U a upgrade výzkumné infrastruktury. Modernizovaný tokamak COMPASS-U bude mít po svém spuštění v roce 2022 unikátní vlastnosti: bude schopen generovat vysoké magnetické pole

Thomson scattering

Shot #11022



Ovládací místnost tokamaku COMPASS (ÚFP AV ČR)

10:40:25 15.4. 2019

Showing shot: **#11822** 14:04:43 14.04. 2016

Campaign: CCJ4.06 Heat flux measurements
Shot: small tring, 250kA, advanced density feedback

Next shot: **#18540**

Capacitor bank 0 %

TRIGGER Pressure: 3.50-6 Pa

GENERATOR 1: 1400 rpm GENERATOR 2: 0 rpm

RS02 GG2

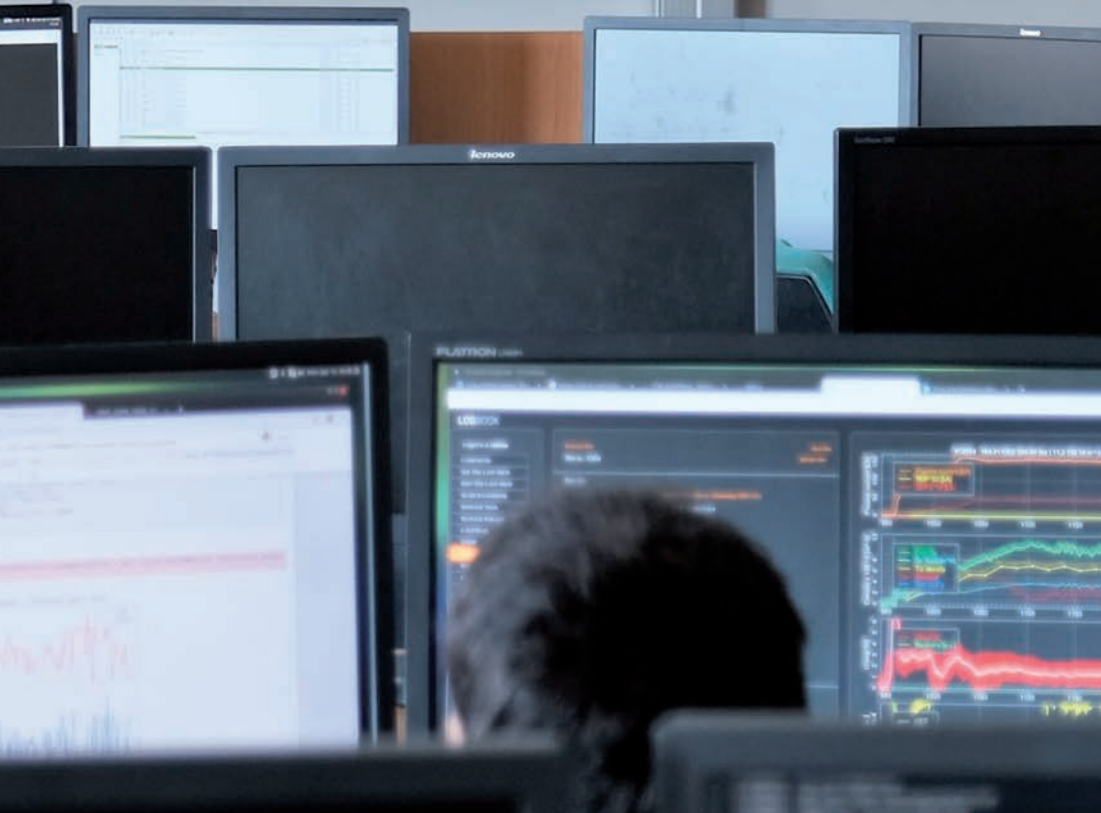
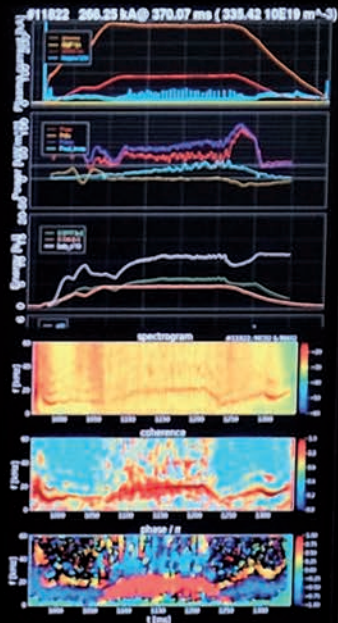
POWER DISTRIBUTION

NSI

COOLING

Power input (ac/mas/beam): 193 kW / 145 kW / 404 kW

DTACQ216: 1 2 3 4 5 6 7 8





Britský premiér David Cameron a předseda vlády ČR Petr Nečas u tokamaku COMPASS společně s ředitelem ÚFP Radomírem Pánkem (ÚFP AV ČR, 2011)

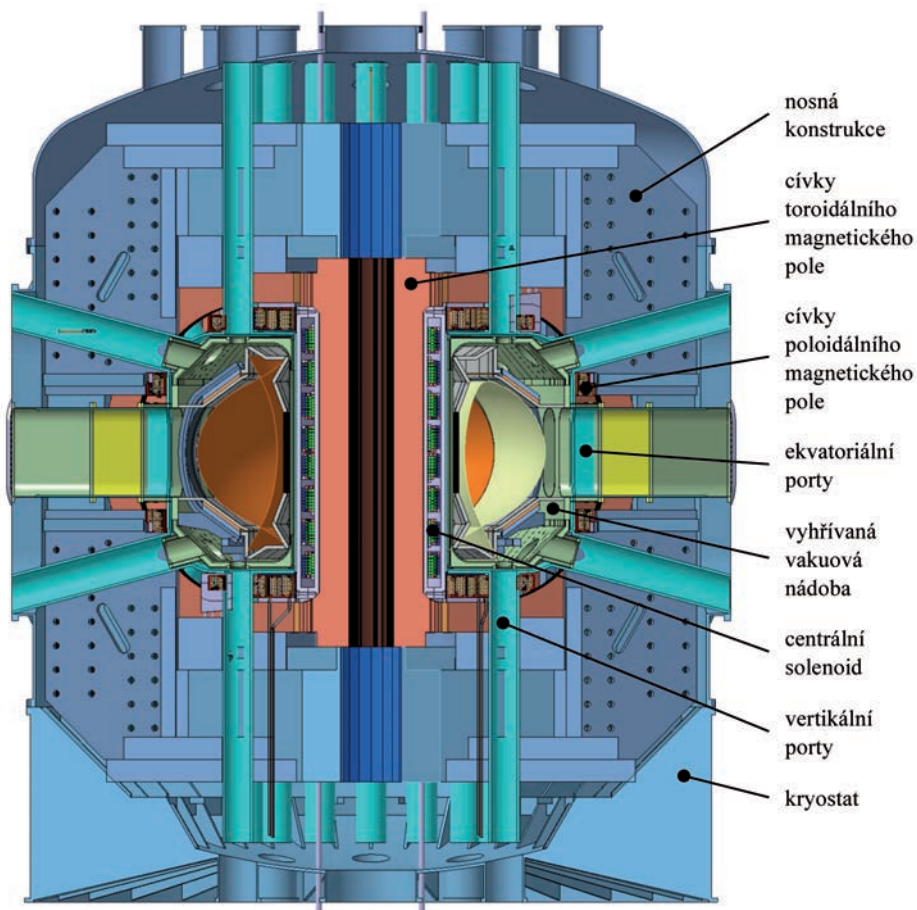
o velikosti až 5 Tesla a proud v plazmatu až 2 mil. ampér. Díky tomu bude pracovat v režimech v mnoha parametrech blízkých jak budovanému tokamaku ITER, tak především prvním energetickým reaktorům DEMO, takže bude schopen významně přispět k řešení jejich klíčových problémů. Zároveň si však zachová flexibilitu středního experimentálního zařízení a nízké provozní náklady.

Další unikátní vlastností nového tokamaku bude možnost provozovat první stěnu na teplotě 300–500 °C podobně, jako tomu bude v reaktoru DEMO, což bude mít zásadní vliv na fyziku okrajového plazmatu i použité konstrukční materiály. Tokamak také umožní aplikaci uzavřeného divertoru tvořeného tekutými kovy. Technologie tekutých kovů se jeví jako slibná metoda, která by mohla vyřešit problém degradace materiálů pod extrémním tokem energie ve fúzních energetických reaktorech. V Evropské cestovní mapě pro realizaci fúzní energetiky je tokamak COMPASS Upgrade zahrnut jako budoucí evropské fúzní zařízení pro testování technologie tekutých kovů.

Samotná konstrukce zařízení bude na hranici technologických možností. Konstrukce bude muset být především odolná proti extrémním silám působícím na jednotlivé části během experimentů – na některé magnetické cívky bude působit síla až 3500 tun. Magnetické cívky budou vyrobeny z mědi chlazené heliem na teplotu -200 °C, aby se snížila energetická spotřeba magnetického systému. Proto bude celý tokamak s průměrem přes 5 metrů a váhou přes 250 tun uzavřen v kryostatu. I přes chlazení cívek na kryogenní teploty dosáhne při experimentech

Předseda vlády ČR Andrej Babiš a ředitel ÚFP Radomír Pánek u tokamaku COMPASS (ÚFP AV ČR, 2019)



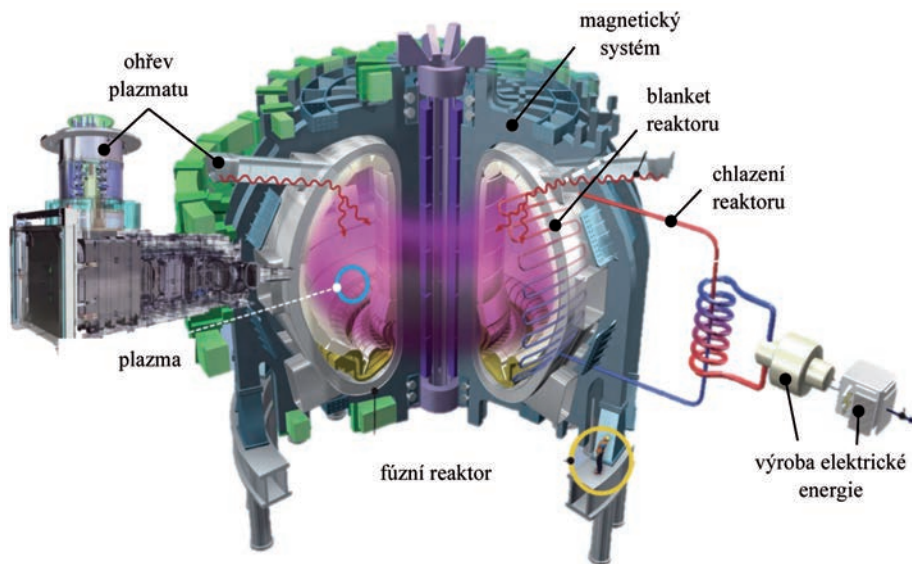


Řez tokamakem COMPASS-U (ÚFP AV ČR)

příkon zařízení na několik sekund až 200 MW. Tento příkon bude dodán rázovými generátory. Výkon ohřevu plazmatu pomocí injektorů neutrálních atomů dosáhne 4 MW a později bude navýšen o další 4 MW mikrovlnného ohřevu.

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 termojaderné fúze a v nedávné době zde byl zahájen také navazující doktorský studijní program jaderné inženýrství – zaměření fyzika a technika termojaderné fúze. Na Strojní fakultě ČVUT probíhá od roku 2017 výuka předmětu jaderná fúze zaměřená na fúzní technologie.



Chlazením blanketu fúzního reaktoru bude získáváno teplo pro výrobu elektrické energie (EUROfusion Consortium Research Institutions - FOM-Rijnhuizen/Verdulet - Kennis in Beeld)

Pracovníci Sociologického ústavu AV ČR, ÚFP a FJFI získali 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.

Cesta do budoucnosti

Jaderná energetika umožňuje již dnes sestavit energetický mix z bezemisních energetických zdrojů. Jako jediná má dostatečný potenciál nahradit spalování fosilních paliv a zpomalit tak proces globálního oteplování.

Pokrok ve výzkumu jaderné fúze umožní v tomto století integrovat do energetiky fúzní reaktory. Jaderná fúze pak navěky vyřeší energetické potřeby lidstva. Fúzní reaktory poskytnou lidstvu výkonný, bezpečný a čistý zdroj energie s prakticky nevyčerpatelnými zásobami paliva.

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, který umožní dosáhnout konkurenceschopné ceny fúzí vyráběné elektřiny.

Poděkování

Převzaté fotografie byly použity s laskavým svolením EUROfusion Consortium Research Institutions (www.euro-fusion.org), ITER Organization (www.iter.org), Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., (www.ipp.cas.cz) a FOM-Rijnhuizen/Verdult – Kennis in Beeld (www.differ.nl).

Tokamak COMPASS

Tokamak COMPASS je hlavním experimentálním zařízením oddělení Tokamak **Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.** Tokamak se řadí svými rozměry (hlavní poloměr 0,6 m a výška komory přibližně 0,7 m) k menším tokamakům, umožňujícím provoz v H-módu, který představuje standardní referenční režim tokamaku ITER. Důležité je, že díky své velikosti a tvaru odpovídá plazma tokamaku COMPASS jedné desetině (v lineárním měřítku) plazmatu v ITER. V současnosti existují v Evropě kromě tokamaku COMPASS pouze dva tokamaky s konfigurací podobnou ITER a s H-mód režimem. Jedná se o JET (*Joint European Torus*) a německý tokamak ASDEX-U (Institut für Plasmaphysik, Garching). JET je momentálně největším experimentálním zařízením tohoto typu na světě.

Základní parametry tokamaku COMPASS

Hlavní poloměr R	0,56 m
Vedlejší poloměr a	0,23 m
Proud v plazmatu I_p (max)	400 kA
Magnetické pole B_T (max)	0,9–2,1 T
Tlak vakua	1×10^{-6} Pa
Elongace	1,8
Tvar plazmatu	D, SND, elipsa, kruh
Délka pulzu	~ 1 s
Ohřev svazky P_{NBI} 40 keV	$2 \times 0,4$ MW

Fyzikální program

- fyzika H-módu
- fyzika pedestalu
- práh L-H přechodu, izotopický efekt
- nestability ELM (*Edge Localized Modes*), jejich kontrola pomocí magnetické perturbace a vertikálních rázů
- zonální toky
- transport v okrajovém plazmatu a *scrape-off layer*
- turbulentní struktury a intermitence v okrajovém plazmatu
- MHD rovnováha a nestability
- interakce plazmatu se stěnou
- fyzika ubíhajících elektronů a disrupcí
- vývoj pokročilých diagnostických metod
- integrované modelování a vývoj kódů

(Na obálce prostor pro reaktor, foto ITER Organization)

Hlavní systémy

- systém řízení, sběru dat a komunikace (CODAC – *Control, Data Acquisition and Communication*)
- zdroje napájení
- systém rychlé zpětnovazební regulace
- chlazení
- vakuum
- napouštění pracovního plynu
- systém hydraulického předpětí
- ohřev pomocí vstřiku svazků neutrálních částic
- systém vypékání komory
- systém pro doutnavý výboj

Systémy diagnostiky plazmatu

- magnetická diagnostika (400 cívek)
- mikrovlnná diagnostika
 - 2mm interferometr
 - okrajový mikrovlnný reflektometr (K & Ka pásma)
 - ECE/EBW radiometr
- spektroskopická diagnostika
 - Thomsonův rozptyl s vysokým rozlišením pro středové a okrajové plazma
 - dvě rychlé kamery pro viditelné světlo
 - fotomultiplikátory (viditelné světlo, Ha, CIII + kontinuum pro Zeff)
 - HR2000+ spektrometry pro blízké UV, viditelné a blízké infračervené záření
 - rychlé AXUV bolometry (pole)
 - polovodičové detektory rentgenového záření (pole)
 - scintilační detektor a kamera pro tvrdé rentgenové záření
 - infračervená kamera, rychlá divertorová termografie
- svazková a částicová diagnostika
 - HR2000+ spektrometr pro Ha & Da vyzařování
 - neutronový scintilační detektor
 - diagnostika používající lithiový svazek (BES, ABP)
 - dva analyzátoři neutrálních částic
 - spektroskopie rekombinace výměnou náboje (*charge exchange*)
 - detekce fúzních produktů
- sondy
 - 39 divertorových sond a sada sond na vnitřní straně divertoru
 - divertorové ball-pen sondy
 - dva vratné manipulátory (horizontální a vertikální)
 - Langmuirovy sondy na vnitřní straně limiterových dlaždic.