

Spoutání slunce



Akademie věd
České republiky

věda 50

kolem
nás
výzvy
a otázky

Tokamak COMPASS

Tokamak COMPASS (z anglického Compact Assembly) je hlavním experimentálním zařízením Ústavu fyziky Plazmatu AV ČR. Původně byl zkonstruován a provozován v devadesátých letech v UKAEA ve Velké Británii a dočasně vyřazen z provozu v roce 2002 z důvodu instalace nového tokamaku MAST.

Tokamak COMPASS se řadí svými rozměry (hlavní poloměr 0,56 m a výška komory přibližně 0,77 m) k menším tokamakům, umožňujícím operaci s H-módem, který představuje standardní referenční režim tokamaku ITER. Důležité je, že díky své velikosti a tvaru odpovídá plazma COMPASSu jedné desetíně (v lineárním měřítku) plazmatu v ITERu. Právě kvůli své relevantnosti byl na podzim roku 2004 COMPASS nabídnut Evropskou komisí a UKAEA Ústavu fyziky plazmatu. Instalace a provoz tokamaku COMPASS řadí Českou republiku mezi země s pokročilým výzkumem vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze. V současnosti existují v Evropě kromě COMPASSu pouze dva tokamaky s konfigurací podobnou ITERu 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.

Parametry tokamaku COMPASS

Parametr	Hodnota
hlavní poloměr R	0,56 m
vedlejší poloměr a	< 0,2 m
proud v plazmatu I_p (max)	350 kA
magnetické pole B_T (max)	0,9–2,1 T
mezí tlak ve vakuové komoře	1×10^{-6} Pa
elongace	1,8
tvar plazmatu	SNT, 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 – experimenty a modelování
- MHD rovnováha a nestability
- interakce plazmatu se stěnou
- fyzika ubíhajících elektronů a disrupcí
- vývoj pokročilých diagnostických metod
- integrované modelování a vývoj kódů

Jaderná fúze je zdrojem energie Slunce a všech ostatních hvězd. Blíží se ale doba, kdy budeme jadernou fúzí vyrábět elektřinu.

Jaderná fúze je perspektivní energetický zdroj, který se v budoucnu nepochybně stane základním energetickým zdrojem lidstva. Důvodem je především to, že zásoby fúzního paliva jsou reálně nevyčerpatelné a bez ohledu na růst energetické spotřeby v budoucích stoletích umožní lidstvu získávat dostatek energie. Při nárůstu celosvětové spotřeby energie podle odhadů OSN jsou pozemské zásoby fúzního paliva dostačující až do doby vyhasnutí Slunce a zániku Země, ve vesmíru pak fúzní palivo tvoří převážnou část viditelné hmoty.

Důležitou vlastností fúzního zdroje energie je, že při získávání a spalování fúzního paliva nedochází k poškozování životního prostředí. Palivem je nepatrná příměs vody a odpadem neškodné a využitelné inertní helium. Fúzní palivo splňuje nej přísnější kritéria kladená na udržitelné i obnovitelné energetické zdroje včetně přirozeného energetického toku z vesmíru do antroposféry. Při porovnání s obnovitelnými zdroji jaderná fúze shodně nevyžaduje fosilní palivo a neprodukuje žádné emise ani škodlivý odpad, avšak není závislá na počasí (jasno, vítr, dostatek vody), nevyžaduje rozsáhlé zábory přírodní a zemědělské půdy ani plošně nenarušuje krajinný ráz.

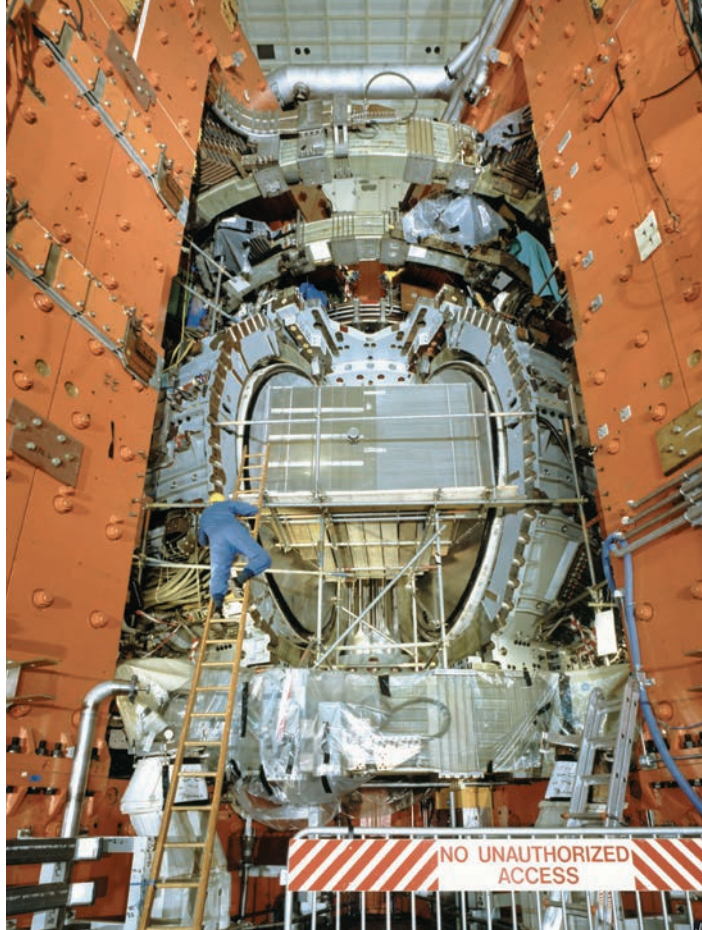
Cesta k energetickému využití jaderné fúze je náročná a ani jiná být nemůže, protože představuje významný krok v dlouhodobé snaze lidstva o ovládnutí energie, zahájené prvním záměrným zapálením ohně. Spoutání slunce vyžaduje vývoj nových hi-tech technologií v širokém spektru oborů, které umožní spolehlivou činnost průmyslového zařízení při teplotách v rozmezí od absolutní nuly do stovek milionů stupňů Celsia a při vysokých energetických tocích. Odměnou za to bude energetický zdroj, který poskytne lidstvu dostatek levné a čisté energie po příštích miliony let.

Jaderná fúze

- nevyčerpatelný zdroj energie
- principiálně bezpečný zdroj energie
- ekologický zdroj energie bez negativního vlivu na životní prostředí
- levné palivo dostupné všem

Historie

Otázka, kde bere Slunce svoji energii, podněcovala myslitele a vědce k různým vysvětlením již od nepaměti. Současnou představu zformulovali na počátku minulého století Arthur Stanley Eddington, George Gamow, Robert Atkinson, Fritz Houtermans, Charles Critchfield a především Hans Bethe v přelomovém článku *Energy Production in Stars*, vydaném v roce 1939. Výzkum jaderné fúze v pozemských podmínkách byl zahájen před druhou světovou válkou. Skutečnost, že jaderná fúze může na Zemi probíhat, byla prokázána odpálením první termojaderné bomby pod názvem Ivy Mike v listopadu 1952 a sérií dalších pokusných výbuchů vodíkových bomb.



Evropský fúzní reaktor JET (*Joint European Torus*) byl spuštěn v roce 1984 v britském Culhamu. Je v současnosti největším fúzním zařízením na světě

Po druhé světové válce byl v USA, Velké Británii a tehdejším Sovětském svazu zahájen výzkum řízené termojaderné fúze. V průběhu několika desetiletí byla vyvinuta řada experimentálních fúzních zařízení. K energetickému využití se nejvíce přiblížila zařízení postavená na bázi ruského konceptu fúzního reaktoru tokamak. Americký tokamak TFTR dosáhl v roce 1994 fúzního výkonu 10,7 MW a následně evropský tokamak JET dosáhl v roce 1997 fúzního výkonu 16 MW.

Od počátku výzkumu mírového využití jaderné fúze se vědci museli potýkat se ztrátami energie z plazmatu, které brání dosažení potřebné četnosti fúzní reakce, a tím i uvolnění využitelného energetického výkonu. Jednou z mála cest, jak zlepšit poměr mezi fúzním výkonem a ztrátami, je zvětšení reaktoru. Energetické ztráty rostou úměrně s poloměrem plazmatu, zatímco fúzní výkon roste mnohem rychleji, úměrně s třetí mocninou tohoto poloměru. Díky tomu se udržení energie se zvětšováním objemu plazmatu zlepšuje úměrně druhé mocnině poloměru. Ve velkém reaktoru se bude uvolňovat mnohem více energie, než kolik jí bude unikat, a je možné dosáhnout energetického zisku. Malý energetický fúzní reaktor na korbě nákladáku je velmi atraktivní, ale bez inovativního konstrukčního zamezení energetickým ztrátám jde o pouhou fikci.

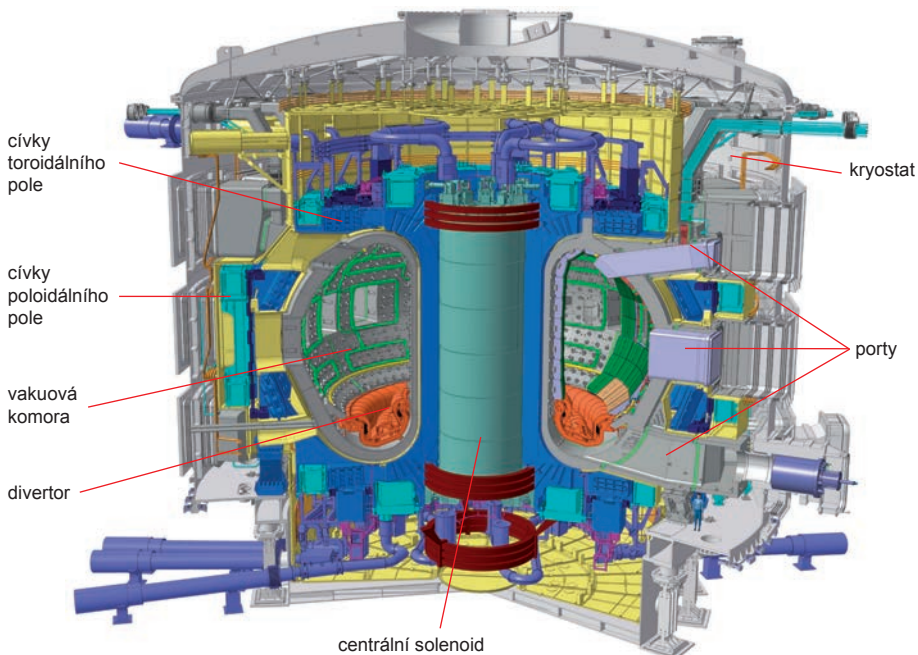
Se zvětšováním velikosti fúzního reaktoru se ale zvyšují náklady na jeho realizaci. Proto již v roce 1973 proběhla první politická jednání o společném mezinárodním vývoji velkého fúzního reaktoru a v roce 1978 byl zahájen projekt mezinárodního reaktoru na bázi tokamaku INTOR (*International Tokamak Reactor*). Tento projekt nebyl realizován, avšak připravil prostředí pro následující projekt ITER.

Projekt ITER

V roce 1985 se Ronald Reagan a Michail Gorbačov na summitu v Ženevě shodli na společném zájmu vyvinout nevyčerpatelný fúzní zdroj energie. Následující smlouvu o projektu mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) podepsaly v roce 1987 USA, SSSR, Evropské společenství a Japonsko. Přistoupení dalších zemí bylo možné prostřednictvím signatářů smlouvy. Tímto způsobem přistoupilo v roce 1989 do projektu i Československo prostřednictvím SSSR.

Odeznění ropné krize a rozpad východního bloku způsobily, že projekt ztratil politickou podporu dvou hlavních aktérů – USA a Ruska. Se ztrátou politické podpory se postupem času vytratily i finanční zdroje a USA v roce 1998 projekt opustily. Proto byl původní projekt v letech 1999–2001 přepracován a reaktor byl zmenšen.

Fúzní reaktor ITER, který se staví u výzkumného střediska CEA Cadarache nedaleko města Aix-en-Provence na jihu Francie. Výška reaktoru bude 29 m a průměr 28 m. Váha reaktoru bude 23 000 t





Staveniště ITER, březen 2016

ITER získal nové silné zázemí až díky ekonomickému rozvoji asijských zemí, když se v roce 2003 do projektu připojily Čína a Jižní Korea. Po vstupu Číny se do projektu vrátila USA a v roce 2005 se do projektu zapojila ještě Indie. V současnosti se projektu účastní sedm mocností: EU, Japonsko, Ruská federace, USA, Čína, Jižní Korea a Indie, které představují více než 50 % populace Země a produkují 80 % celosvětového HDP.

Výstavba reaktoru ITER byla zahájena v roce 2007 u francouzského výzkumného střediska Cadarache. Spuštění reaktoru je odhadováno na rok 2025. Cílem projektu ITER je prokázat možnost energetického využití jaderné fúzní reakce. Po zprovoznění bude reaktor ITER největším fúzním zařízením na světě a současně druhým největším vědeckým projektem v dějinách lidstva po Mezinárodní kosmické stanici ISS.

Vzhledem k politickému charakteru dohod mezi účastníky projektu je reaktor vyráběn po částech v různých zemích světa. To značně zkomplikovalo úkol zajistit vzájemnou kompatibilitu jednotlivých částí reaktoru a jejich přesné sestavení. Při zahájení stavby bylo nutné nejprve překonat množství administrativních, normativních a zvykových rozdílů mezi jednotlivými zeměmi a vytvořit na každý detail reaktoru vlastní výrobní předpis nebo normativ. Projekt ITER je proto jedinečným příkladem celosvětové spolupráce.

Komplikovaná příprava projektu však vedla ke zpoždění výstavby a k nárůstu předpokládané ceny. V současnosti ještě není upřesněna délka zpoždění výstavby, hovoří se přibližně o pěti letech oproti plánovanému termínu spuštění v roce 2020. Celková cena projektu je odhadována na 15 miliard eur, z čehož nemalou část tvoří výzkum, vývoj a testování nových výrobních postupů, komponent a technologií. Výstavba reaktoru je tak plně srovnatelná s dobýváním vesmíru.

Projekt ITER bude demonstrovat řízení plazmatu a řadu reaktorových technologií potřebných pro fúzní elektrárnu: supravodivé magnety, systémy ohřevu plazmatu, vakuový systém, palivový systém a tritiové hospodářství. Reaktor ITER nebude běžně produkovat tritium ani generovat elektřinu, avšak umožní potřebné technologie otestovat. Fúzní výkon reaktoru dosáhne 500 MW.

Evropský výzkum

V roce 1958 byla vytvořena první pracovní skupina pro koordinaci výzkumu jaderné fúze v Evropské unii v rámci Evropského společenství pro atomovou energii (Euratom). V roce 1999 byla na základě výzkumné spolupráce při využívání evropského fúzního reaktoru JET podepsána Evropská dohoda o fúzním výzkumu EFDA (*European Fusion Development Agreement*). V rámci EFDA pak bylo uzavřeno 30 asocičních dohod s evropskými výzkumnými organizacemi včetně asociční dohody EURATOM-IPP.CR Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Dohoda EFDA vypršela v roce 2013 a jejím nástupcem se stalo konsorcium evropských výzkumných organizací EUROfusion. To v současnosti sdružuje 31 výzkumných ústavů a národních asociací z celé Evropy.

Jednou z hlavních náplní činnosti konsorcia EUROfusion je projekt demonstrační fúzní elektrárny DEMO (*Demonstrational Fusion Power Plant*). Projekt DEMO má za cíl vyvinout a postavit elektrárnu s fúzním reaktorem. Přípravné práce na projektu DEMO byly zahájeny v roce 2012 a v současnosti probíhá konceptuální výběr jednotlivých fúzních technologií, které budou v projektu použité.

Energetické využití jaderné fúze bylo vždy jedním z hlavních motorů fúzního výzkumu. Vedle fyziky plazmatu byl studován široký okruh otázek týkajících se zdokonalení technologie fúzního reaktoru a integrace tohoto reaktoru do energetického zařízení. Od devadesátých let minulého století byl hlavním cílem výzkumu návrh a realizace reaktoru ITER, v současnosti již vývoj a výstavba reaktoru probíhá v plné spolupráci s průmyslem (často přímo v podnikových laboratořích) a část vědecké komunity soustřeďuje své síly na projekt fúzní elektrárny.

V roce 2005 byla v rámci EFDA vydána první ucelená studie *A Conceptual Study of commercial fusion power plants*, která shrnula dosavadní práce v oblasti integrace fúzního reaktoru do energetického zařízení. Studie předložila čtyři variantní řešení fúzní elektrárny označená jako modely PPCS (*Power Plant Conceptual Study*) A až D. V roce 2007 byl doplněn ještě pátý model AB. Modelové reaktory jsou variantně chlazeny heliem, vodou nebo tekutým kovem – eutektickou slitinou lithia a olova LiPb. Všechny varianty pak obsahují v různé formě lithium, určené pro výrobu tritia, které bude v prvních fúzních elektrárnách součástí paliva. Modely PPCS se staly východiskem pro další vývojové práce prováděné

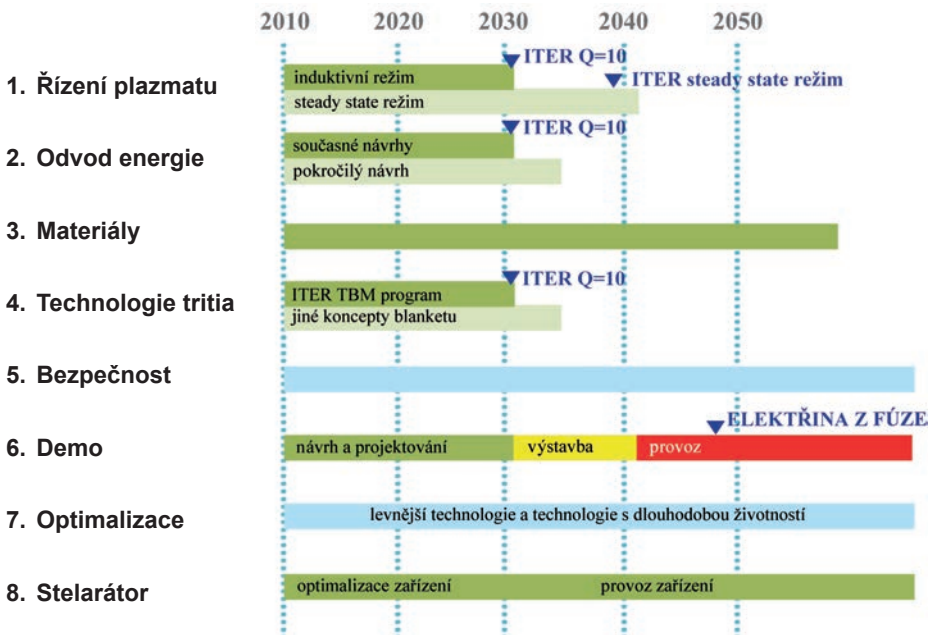
v EU a jsou v tomto smyslu platné doposud, ačkoliv jsou již do značné míry překonané. Vývoj fúzní elektrárny postupně zahájily také USA, Rusko, Čína, Jižní Korea a Indie.

V roce 2012 Evropská unie vydala v rámci EFDA další klíčový dokument *Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy* (zkráceně *Fusion Roadmap*), který popisuje záměr Evropské unie zahájit výrobu elektrické energie pomocí jaderné fúze do roku 2050. Dokument oficiálně ustanovuje označení DEMO pro první fúzní elektrárnu jako zkratku celého názvu *Demonstrational Fusion Power Plant* a definuje strategické úkoly, na které má být soustředěn intenzivní výzkum a vývoj. Za výchozí bod je považován projekt ITER a cíle projektu DEMO jsou v tomto smyslu následující:

- dořešit fyzikální a technologické otázky energetického fúzního reaktoru;
- demonstrovat výrobu několika set MW elektrického výkonu jadernou fúzí;
- dosáhnout soběstačnosti ve výrobě fúzního paliva;
- dosáhnout přijatelné provozuschopnosti fúzní elektrárny.

Podle současné evropské představy bude elektrárna DEMO realizována ve dvou etapách: blízké DEMO, označené jako DEMO1, a pokročilé DEMO, označené jako DEMO2. V etapě DEMO1 bude při návrhu a výstavbě upřednostněn realistický přístup zaručující zprovoznění elektrárny před technicky inovativními, ale zatím nejistými řešeními, přičemž pokročilá řešení budou rozvíjena paralelně pro následující fázi DEMO2.

Osm strategických úkolů *Fusion Roadmap*



Pro plnění úkolů stanovila *Fusion Roadmap* orientační časový plán, vycházející ze závazku zahájit výrobu elektrické energie z jaderné fúze do roku 2050. Předběžný časový plán je následující:

- | | |
|---|------------|
| 1. sestavení koncepčního řešení fúzní elektrárny | 2014–2020 |
| 2. zpracování projektové dokumentace fúzní elektrárny | 2021–2030 |
| 3. výstavba a zprovoznění fúzní elektrárny | 2031–2042. |

Plněním *Fusion Roadmap* bylo pověřeno konsorcium evropských výzkumných laboratoří EUROfusion. Elektrárna DEMO by měla být připojena do elektrické sítě v roce 2047.

Fyzika jaderné fúze

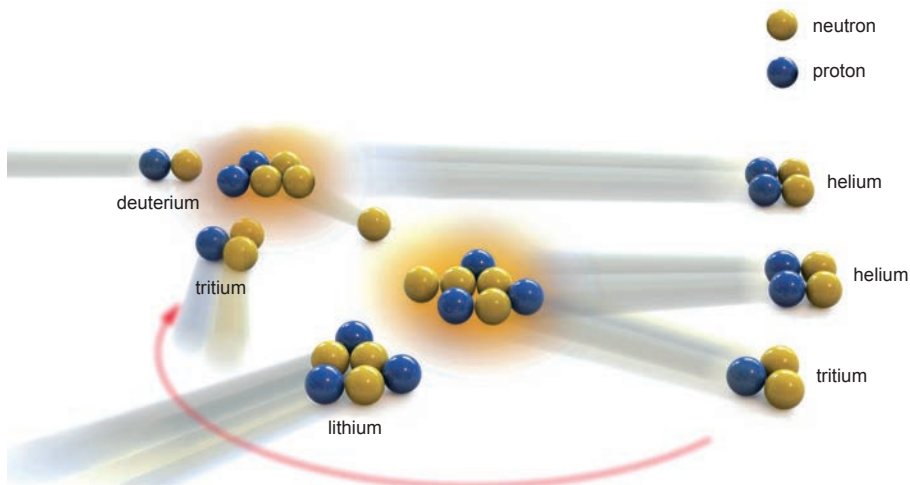
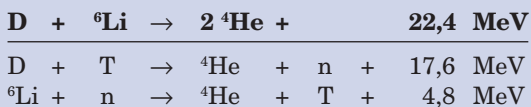
Energetické využití jaderné fúze je založeno na fyzikálním jevu, že při slučování atomových jader lehčích než železo na těžší jádra dochází k uvolnění potenciálu jaderné vazebné energie a vzniklé jádro je lehčí než prostý součet hmotností sloučených jader. Rozdíl hmotností mezi slučovanými jádry a vzniklým jádrem je uvolněn jako volná energie v souladu se vztahem A. Einsteina $E = mc^2$. Nejvíce energie se uvolňuje při slučování jader izotopů nejlehčího chemického prvku vodíku. Chemický prvek vodík má tři izotopy: izotop s jádrem tvořeným jediným protonem označovaný jako vodík (H), izotop s jádrem tvořeným protonem a neutronem označovaný jako deuterium (D) a izotop s jádrem tvořeným protonem a dvěma neutrony označovaný jako tritium (T). Izotopy vodík a deuterium jsou přírodní látky, které se na Zemi hojně vyskytují ve formě sloučenin. Nejvíce vodíku a deuteria se nachází ve světových oceánech jako součást vody, resp. v případě deuteria těžké vody. V průměru na 6240 atomů vodíku připadá 1 atom deuteria. Tritium vzniká přirozeně nejčastěji vlivem ionizujícího kosmického záření ve vrchních vrstvách zemské atmosféry a uměle v jaderných reaktorech. Na Zemi se ale prakticky nevyskytuje, protože není stabilní a β -rozpadem s poločasem rozpadu 12,3 let se mění na izotop helia ^3He .

Aby fúzní reakce proběhla, musí mít jádra dostatečnou energii na překonání elektrostatické coulombovské bariéry. Podle současných poznatků je možné jako zdroj energie použít pouze termojadernou fúzi, při které je atomovým jádrům dodána potřebná energie formou tepla. Jiné mechanismy vyvolání jaderné fúze, například srážky urychlených jader nebo mionová katalýza, spotřebují více energie, než kolik se při následné reakci uvolní.

Fúzní reakce

V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader deuteria a tritia (DT reakce), která je nejreaktivnější a umožňuje nejsnáze ze všech fúzních reakcí dosáhnout energetický zisk. Optimální teplota pro reakci deuteria a tritia je při magnetickém udržení přibližně 160 milionů °C. Tritium se bude vyrábět přímo v reaktoru reakcí lithia a neutronů vznikajících při fúzní reakci. Celkový proces lze zjednodušeně zapsat jako reakci jader deuteria a lithia za vzniku dvou jader helia a uvolnění 22,4 MeV energie. Jde o složenou reakci, deuterium a lithium mohou reagovat i přímo, avšak za mnohem náročnějších podmínek.

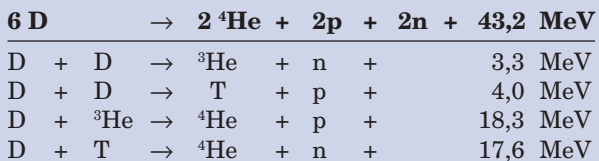
Jaderná reakce I. generace fúzních energetických reaktorů je následující:



První generace fúzních energetických reaktorů bude jako palivo používat deuterium a lithium, odpadem bude inertní plyn helium

Druhá generace fúzních reaktorů bude využívat slučování samotných jader deuteria a lithium již nebude nutné. Většina existujících fúzních zařízení pracuje s fúzní reakcí jader deuteria, avšak dosažení kladného energetického zisku s touto reakcí je obtížnější než v případě reakce deuteria a tritia. Reakční proces lze zapsat jako reakci šesti jader deuteria za vzniku dvou jader helia, dvou protonů, dvou neutronů a uvolnění 43,2 MeV energie.

Jaderná reakce II. generace reaktorů je za předpokladu úplné recyklace reaktantů následující:



V dalších generacích fúzních reaktorů bude využívána tzv. bezneutronová fúze, například fúzní reakce jader vodíku a bóru, při které vznikají pouze elektricky nabitě částice udržitelné magnetickým polem reaktoru. Bezneutronová fúze minimalizuje aktivaci konstrukce reaktoru fúzními neutrony a otevře cestu pro přímé

magnetohydrodynamické generování elektrické energie bez nutnosti použití termodynamického cyklu.

Lawsonovo kritérium

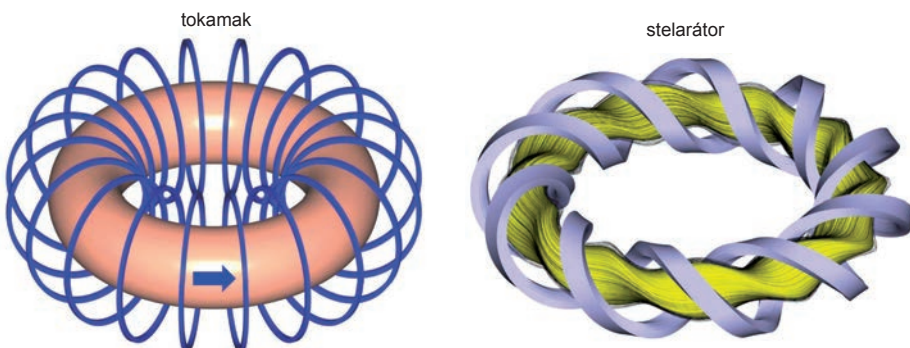
Jednou z prvních důležitých publikací týkajících se energetického využití jaderné fúze byla práce J. D. Lawsona z roku 1955, ve které byla zformulována podmínka pro energetické využití jaderné fúze, tzv. Lawsonovo kritérium. Lawsonovo kritérium obecně označuje rovnice energetické rovnováhy a stanovuje podmínky pro fúzní reaktor, které musí být splněny, aby bylo příslušné energetické rovnováhy dosaženo.

Dosažení rovnováhy fúzního výkonu a výkonu ohřevu plazmatu se označuje jako vědecký zlom (*scientific breakeven*), dosažení rovnováhy fúzního výkonu absorbovaného v plazmatu a ztrátového výkonu plazmatu se označuje jako zapálení (*ignition*). Dosažení rovnováhy výkonu fúzní elektrárny a vlastní spotřeby elektrárny se označuje jako inženýrský zlom (*engineering breakeven*).

Lawsonovo kritérium stanoví jako podmínku dosažení každé uvedené energetické rovnováhy minimální hodnotu součinu hustoty slučovaných atomových jader n za teploty T a časového intervalu τ_E , po který budou tyto parametry plazmatu udrženy:

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

Vzhledem k součinu hustoty a časového intervalu je možné podmínku splnit dvěma různými způsoby: udržet velmi vysokou hustotu jader po velmi krátkou dobu, nebo nízkou hustotu jader udržet po delší dobu. První způsob se označuje jako inerciální udržení a předpokládá dostatečně intenzivní stlačení fúzního paliva laserovými nebo rentgenovými paprsky. Druhý způsob označovaný jako magnetické udržení spočívá ve stabilním spoutání fúzního paliva o vysoké teplotě magnetickým polem.



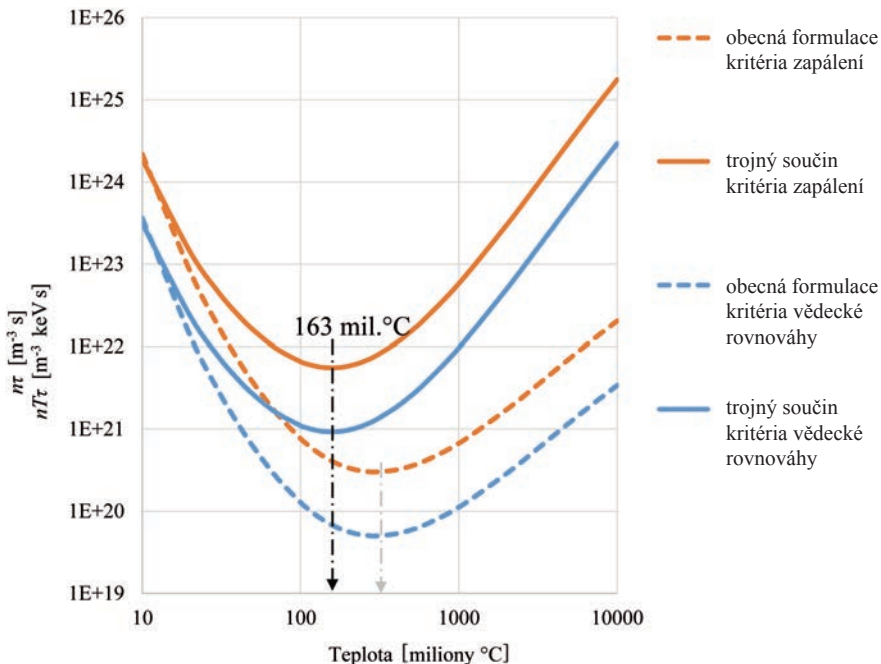
Magnetické udržení plazmatu v zařízeních tokamak a stellarátor. Modré kruhy a šedá páska znázorňují magnetické cívky, modrá šipka znázorňuje indukovaný proud v plazmatu. Výhodou stellarátorů je, že nevyužívají elektromagnetickou indukci pro generování elektrického proudu v plazmatu a natívně pracují v kontinuálním režimu; ze stejného důvodu však nedosahují parametrů plazmatu tokamaků

Inerciální udržení bylo využito ve vodíkových bombách, avšak pro energetické využití není z celé řady důvodů připravené. Vodíkové bomby využívají pro zapálení fúzní náplně štěpnou jadernou roznětku, kterou ale z fyzikálních důvodů nelze vyrobit dostatečně malou, aby mohla být použita ve fúzním reaktoru. Proto se palivo stlačuje energetickými svazky, obvykle lasery, avšak dosažení potřebné hustoty paliva brání nestabilitě stlačovaného terče. Realizaci energetického reaktoru také brání velmi nízká dosahovaná energetická účinnost i nízký součin výkonu a repetice výstřelů laserů. Závažným problémem inerciálního udržení bude také extrémní zatížení vnitroreaktorových komponent opakujícími se mikroexplozemi.

Magnetické udržení vychází ze skutečnosti, že se při termojaderných teplotách (stovky milionů °C) každá látka nachází ve skupenství plně ionizovaného plazmatu. Na ionty a elektrony je možné působit magnetickým polem a takto spoutat látku na teoreticky neomezenou dobu. Vzhledem k velkému pokroku ve vývoji těchto zařízení bude první generace fúzních elektráren postavena na bázi magnetického udržení. Aktuálně budovaný reaktor ITER je také založen na magnetickém udržení a měl by desetinásobně překročit Lawsonovo kritérium vědecké rovnováhy. Pro reaktory s magnetickým udržením, ve kterých magnetické pole udržuje tlak plazmatu $p \sim nT$, má nerovnice Lawsonova kritéria tvar tzv. fúzního nebo trojného součinu:

$$nT\tau_E \geq g(T)$$

Graf Lawsonových kritérií ukazuje optimální teplotu termojaderné fúze v reaktorech s magnetickým udržením 163 mil. °C



V případě DT reakce lze nejnáze dosáhnout splnění kritérií při optimální teplotě přibližně 163 mil. °C, v energetickém vyjádření 14,07 keV. Pro úzký rozsah teplot v okolí optimální teploty se trojný součinn zpravidla považuje za konstantní:

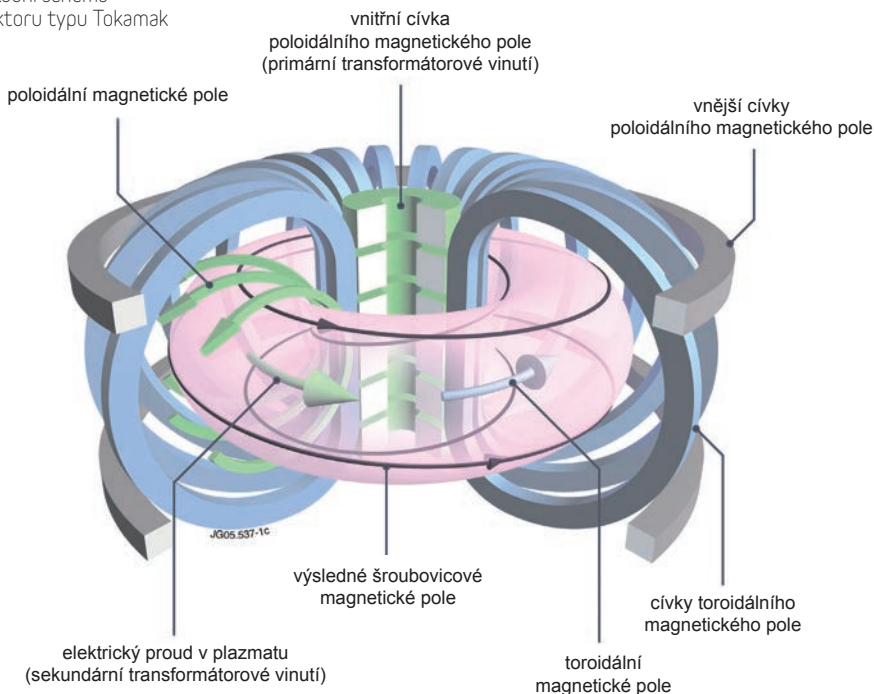
kritérium vědecké rovnováhy	$nT\tau_E \geq 0,926 \times 10^{21} \text{ [m}^{-3}\text{keV s]}$
kritérium zapálení	$nT\tau_E \geq 5,554 \times 10^{21} \text{ [m}^{-3}\text{keV s]}$

Tokamak

Nejpokročilejším fúzním reaktorem je tzv. tokamak. Tokamak je původně ruský koncept charakteristický indukčně generovaným elektrickým proudem v plazmatu, který spoluvytváří magnetické pole a ohřívá plazma.

Hlavní součástí tokamaku je prstencová vakuová komora umístěná na transformátorovém jádru. Současné tokamaky používají vzduchové transformátory s centrálním solenoidem. Transformátor indukuje v plazmatu uvnitř komory vysoký elektrický proud, který generuje poloidální magnetické pole. Okolo vakuové komory jsou navinuty magnetické cívky, které vytvářejí toroidální magnetické pole. Součtem obou polí vzniká šroubovicové magnetické pole, které spoutává plazma. Indukovaný proud současně plazma ohřívá.

Základní schéma reaktoru typu Tokamak



Indukce elektrického proudu v plazmatu je klíčovou předností tokamaků, avšak komplikuje jejich energetické využití. Indukce probíhá pouze při změně elektrického proudu v primárním vinutí transformátoru, a proto tokamaky ze své podstaty pracují v pulzním režimu. Protože výroba elektřiny pro rozvodnou síť vyžaduje konstantní tok energie, musí být fúzní energetický reaktor na bázi tokamaku vybaven zařízením pro neinduktivní generování elektrického proudu. Podle současné koncepce budou fúzní energetické reaktory generovat elektrický proud v plazmatu neinduktivně prostřednictvím vlečných systémů, jako jsou svazky neutrálních atomů a radiofrekvenční vlny, a tzv. bootstrap proudu, který v plazmatu vzniká samovolně v důsledku gradientu tlaku směrem do středu komory. Díky neinduktivní generaci elektrického proudu bude výkon fúzního energetického reaktoru konstantní.

Hlavní podpůrné technologie reaktoru

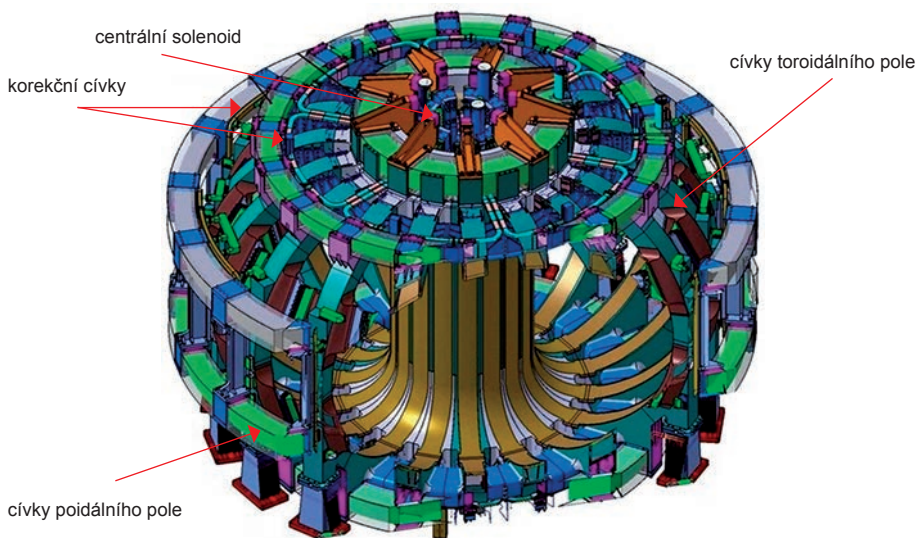
Fúzní reaktor s magnetickým udržením plazmatu vyžaduje dva hlavní podpůrné systémy, které jsou integrální součástí reaktoru: magnetický a vakuový systém. Oba tyto systémy musí být chlazeny, často na velmi nízké teploty, a proto je třetí hlavní technologií fúzního reaktoru chladicí systém.

Magnetický systém se liší podle typu fúzního zařízení. V případě reaktoru typu tokamak se obvykle skládá z následujících skupin magnetických cívek:

- transformátor nebo centrální solenoid (vzduchový transformátor),
- cívky toroidálního pole,
- cívky poloidálního pole,
- korekční cívky,
- rychlé stabilizační cívky.

Transformátor při startu reaktoru vyvolá elektrický průraz a ionizaci plynu v komoře. Pak v ionizovaném plynu indukuje silný toroidální elektrický proud. Elektrický proud generuje podle Ampérova zákona poloidální magnetické pole, které stlačuje plazma a odtahuje je od stěn vakuové komory (tzv. *pinch efekt*). Elektrický proud současně plazma ohřívá. Plazma stlačené magnetickým polem protékajícího elektrického proudu je ale vysoce nestabilní. Proto vakuovou komoru obklopují cívky, které vytvářejí druhé – toroidální – magnetické pole. Poloidální a toroidální magnetická pole se sčítají a vytvářejí výsledné magnetické pole se silokřivkami ve tvaru šroubovice. Reaktory typu tokamak jsou charakteristické silným toroidálním polem a výsledná šroubovice je proto pozvolná, se sklonem optimalizovaným pro maximální stabilitu plazmatu. Cívky poloidálního pole a korekční cívky generují doplňková magnetická pole pro řízení polohy a tvaru plazmatu. Pro rychlou stabilizaci a potlačení nestabilit plazmatu mohou být instalovány také cívky označované podle své funkce, například ELM nebo VDE cívky.

Magnetické pole reaktoru ITER bude vytvářeno soustavou nízkoteplotních supravodivých elektromagnetických cívek chlazených superkritickým heliem na teplotu $-268,65\text{ °C}$ (4,5 K). Maximální toroidální pole reaktoru ITER bude 11,8 T, maximální pole centrálního solenoidu 13 T a poloidálních cívek 6 T.



Systém supravodivých magnetických cívek reaktoru ITER

Pro snížení tepelných ztrát bude celý reaktor se supravodivými cívkami umístěn do vakuového kryostatu. Součástí kryostatu bude tepelné stínění chlazené plyným heliem o teplotě 80 K, jehož hlavním úkolem bude absorbovat tepelné záření z okolních konstrukcí. Kryogenní systém bude mít celkově 5 chladicích heliových větví o teplotách 3,9 K, 4,2 K, 4,5 K, 50 K and 80 K.

Kryogenní systém bude kromě magnetického systému chladit také další technologie, především kryogenní vývěvy vakuového systému. Vakuový systém bude zajišťovat vakuum ve vakuové komoře, kryostatu a v dalších reaktorových zařízeních. Úroveň pracovního vakuu reaktoru ITER se bude pohybovat od 10^{-4} Pa do 10^{-7} Pa.

Ohřev plazmatu

Pro dosažení teplot potřebných pro průběh termojaderné reakce na úrovni stovek milionů °C musí být plazma ohříváno fyzikálně i technicky vysoce sofistikovaným systémem.

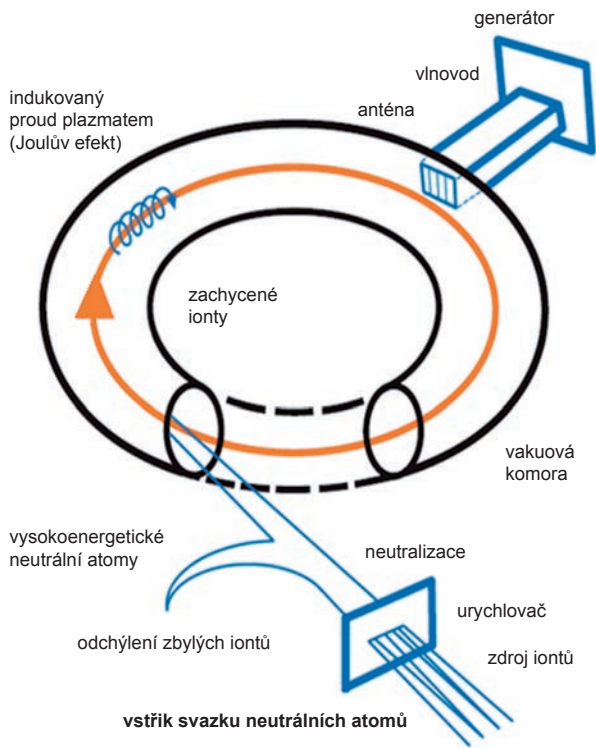
Nejprve je plazma ohříváno vysokým indukovaným elektrickým proudem v řádu milionů ampérů. Ohřev elektrickým proudem patří mezi nejjednodušší metody ohřevu. Se vzrůstající teplotou ale klesá elektrický odpor plazmatu a ohřev se stává neúčinným. Pro další ohřev plazmatu slouží svazky neutrálních atomů a radiofrekvenční vlny.

Ohřev svazkem neutrálních atomů spočívá ve vytvoření svazku urychlených neutrálních atomů deuteria, který je vstřikován do plazmatu. V injektoru neutrálního svazku je deuteriový plyn nejprve ionizován na záporné ionty, a ty jsou elektrickým polem urychleny na vysokou rychlost. Urychlené ionty jsou pak zpětně

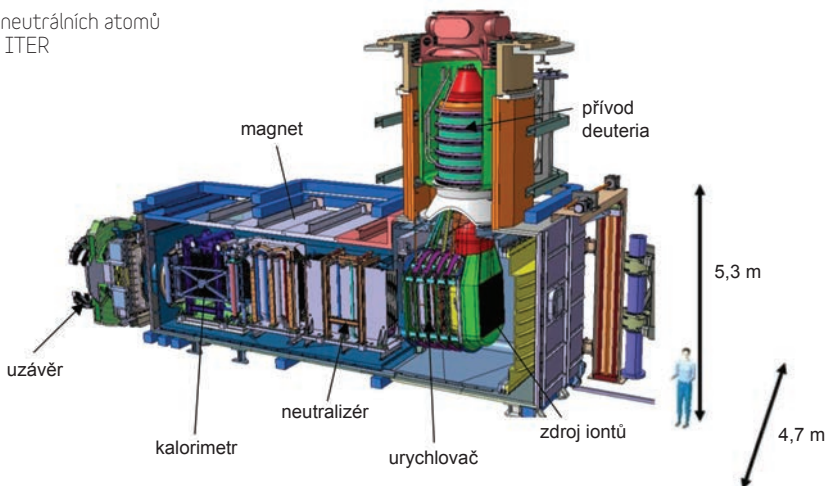
Systém ohřevu a neinduktivního generování elektrického proudu plazmatu

ohmický ohřev

elektromagnetické vlny



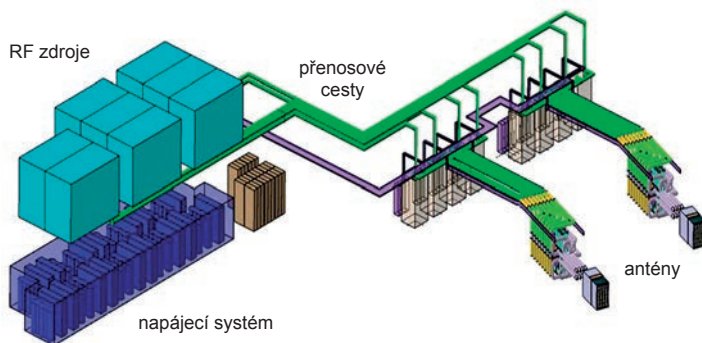
Injektor neutrálních atomů reaktoru ITER



neutralizovány průletem deuteriovým plynem a jako neutrální atomy jsou vysokou rychlostí injektovány do reaktoru. Neutralizace atomům umožňuje průlet magnetickým polem. Neutrální atomy pronikají do plazmatu, kde se opět ionizují, jsou zachyceny magnetickým polem a pak srážkami předávají svou energii částicím plazmatu a tím plazma ohřívají.

Radiofrekvenční ohřev využívá toho, že elektromagnetické vlny jsou pohlcovány ionty a elektrony plazmatu, pokud frekvence vln odpovídá harmonickým násobkům jejich cyklotronové rezonanční frekvence. Protože se cyklotronová frekvence iontů a elektronů liší, rozlišujeme elektronový ohřev a iontový ohřev.

Elektromagnetické vlny jsou generovány mimo prostor reaktoru a k vakuové komoře jsou vedeny koaxiálními kabely nebo vlnovody. Na vnitřní stěně vakuové komory jsou umístěny antény, které vyzařují vlny do plazmatu. Absorbováním energie vln se plazma ohřívá. Přesným směřováním zářičů elektronového ohřevu lze vysokofrekvenční vlny také využít pro zmírňování některých nestabilit plazmatu.



Systém iontového radiofrekvenčního ohřevu reaktoru ITER

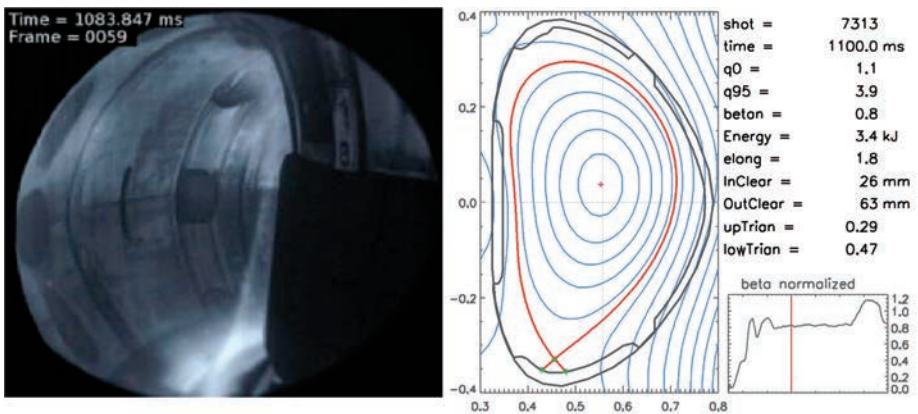
Zařízení ohřevu budou současně využita pro neinduktivní generování elektrického proudu. Vstřikováním tangenciálního svazku urychlených neutrálních atomů dochází mezi svazkem a plazmatem k množství srážek vedoucích kromě ohřevu následně také ke vzniku elektrického proudu. Elektromagnetické vlny systému radiofrekvenčního ohřevu mohou zase na svém čele zachytit nabitě částice plazmatu, tyto částice nést (podobně jako mořské vlny surfaře) a generovat tak elektrický proud. Funkce ohřevu plazmatu a neinduktivní generace elektrického proudu jsou proto obvykle řešeny společně.

Diagnostika plazmatu

Pro provoz fúzního reaktoru je nezbytné v reálném čase monitorovat základní parametry plazmatu, jako je prostorové rozdělení teploty, tlaku a hustoty elektronů a iontů nebo chemické složení plazmatu, a identifikovat probíhající procesy, jako jsou pohyb částic, elektrický proud, změny magnetického pole nebo rychlost fúzní reakce.

Měření a sledování parametrů plazmatu komplikuje jeho vysoká teplota, která až na výjimky vylučuje použití kontaktních senzorů. Proto je diagnostika plazmatu postavena především na měření a analýze záření. Pasivní metody sledují záření, které emituje plazma – rentgenové záření, radiové záření, viditelné a infračervené záření nebo vylétávající neutrální částice a ionty. Aktivní metody analyzují záření, které je emitováno při interakci plazmatu s laserovými, mikrovlnnými nebo částicovými svazky. Důležitou skupinu diagnostiky tvoří také prostorová měření magnetického a elektrického pole a elektrických proudů v plazmatu.

Langmuirovy sondy reprezentují jednu z mála metod kontaktního měření vlastností termojaderného plazmatu. Divertorové Langmuirovy sondy jsou zapuštěny do povrchu divertorových terčů a analyzují dopadající plazma. Reciproké Langmuirovy sondy jsou na krátkou dobu vsunuty do plazmatu a jsou vytaženy dříve, než dojde k jejich destrukci. Langmuirovy sondy měří elektrický potenciál nebo iontový saturační proud úměrný hustotě plazmatu.



Fotografie plazmatu uvnitř vakuové komory tokamaku COMPASS a počítačová rekonstrukce tvaru plazmatu na základě naměřených dat v druhé polovině komory

Jaderné komponenty

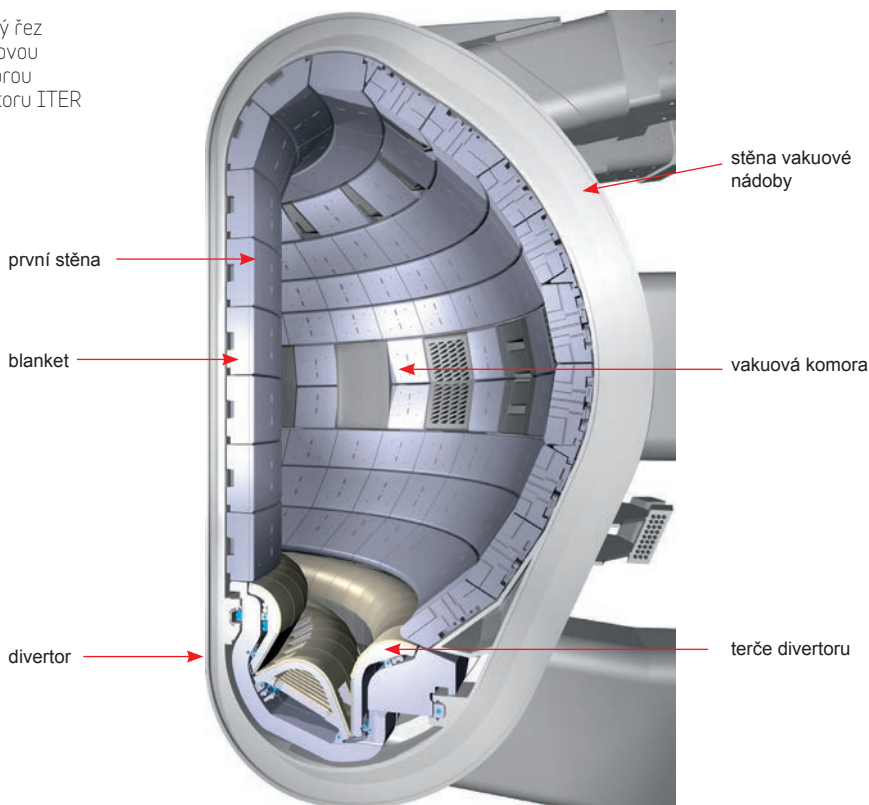
V případě jaderné reakce deuteria a tritia se fúzní energie v reaktoru uvolňuje ve formě kinetické energie heliových jader a neutronů, které vznikají při fúzní reakci. V důsledku zákona zachování hmoty a energie odpovídá rozdělení energie obrácenému poměru hmotnosti heliového jádra a neutronu: přibližně 4/5 uvolněné energie odnáší neutron a 1/5 energie získává heliové jádro. Heliové jádro je kladně nabitě, a proto zůstává spoutáno magnetickým polem v plazmatu, ve kterém předává svou energii ostatním částicím a ohřívá tak plazma. Neutrony bez elektrického náboje opouštějí plazma a pronikají do jaderných komponent reaktoru uvnitř vakuové komory, kde předávají svou energii a jsou pohlceny. Chlazením jaderných komponent je energie neutronů ve formě tepla odváděna ven z reaktoru a může být využita k výrobě elektrické energie.

Fúzní neutrony uvolňované při reakci deuteria a tritia mají energii 14 MeV. V energetickém reaktoru bude tok těchto neutronů dosahovat až $1,5 \text{ MW/m}^2$ a způsobovat rozsáhlá radiační poškození jaderných komponent. Konstrukční materiály jaderných komponent proto musí být vysoce radiačně odolné a poškozené jaderné komponenty musí být vyměnitelné s pomocí dálkových manipulátorů i několikrát za dobu provozu reaktoru.

Protože k pohlcení fúzních neutronů musí dojít v blízkosti plazmatu, hranici jaderné zóny je vnitřní stěna vakuové komory. Komponenty uvnitř vakuové komory jsou označovány jako jaderné komponenty. Jde především o tzv. první stěnu, blanket a divertor.

První stěna (*First Wall*) je stěna bezprostředně vystavená plazmatu. Úkolem první stěny je chránit konstrukci reaktoru před přímým působením plazmatu. První stěna bude nominálně zatížena tepelným tokem do hodnoty přibližně $0,5 \text{ MW/m}^2$, avšak poměrně často bude lokálně vystavena vyšším tepelným tokům při přímé interakci s plazmatem. Při výjimečných poruchách plazmatu může dojít k natavení nebo vypaření tenké povrchové vrstvy stěny. Při vážnějším poškození povrchu bude příslušná část první stěny vyměněna.

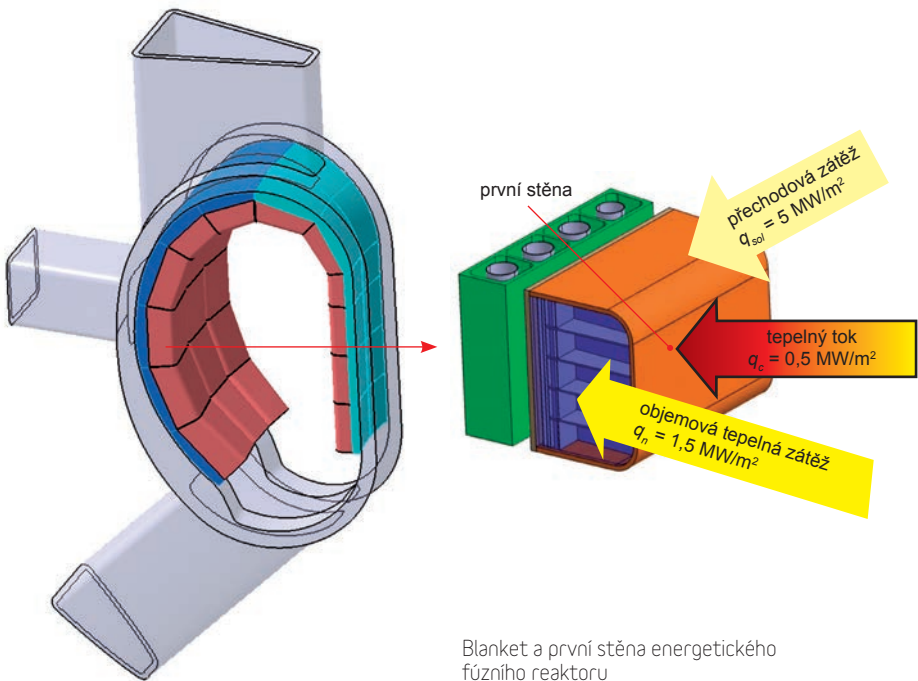
Příčný řez
vakuovou
komorou
reaktoru ITER



Blanket označuje vnitřní obložení vakuové komory, které vyplňuje prostor mezi první stěnou a vakuovou nádobou. První stěna může být součástí blanketu nebo předsazenou samostatnou konstrukcí před blanketem. Blanket energetického reaktoru bude plnit následující důležité funkce:

- absorpce neutronového toku z plazmatu,
- přeměna kinetické energie fúzních neutronů na teplo,
- odvod uvolněné energie z reaktoru,
- produkce tritia pro palivový cyklus reaktoru.

Výroba tritia bude probíhat jadernou reakcí fúzních neutronů s lithiem. Protože je hlavní produkční jaderná reakce exotermická, je vedlejším produktem výroby tritia další energie. Blanket tak nejenom přeměňuje kinetickou energii fúzních neutronů na teplo, ale současně sám generuje další energii. V blanketu tak dochází k energetické multiplikaci fúzního výkonu.

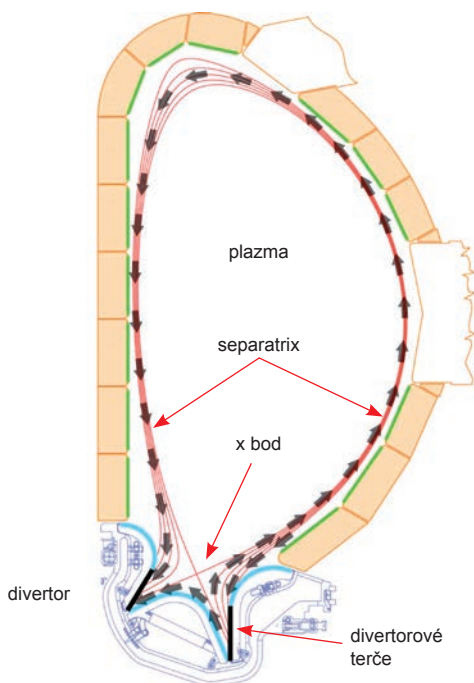


Nejvíce zatíženou jadernou komponentou fúzního reaktoru je divertor, který vymezuje hranice plazmatu a umožňuje odvod odpadního helia a nečistot z reaktoru. Nominální tepelná zátěž divertorových terčů se předpokládá na úrovni 5 MW/m^2 , výkonové špičky na úrovni až 20 MW/m^2 . Divertor je umístěn v dolní (případně dolní i horní) části vakuové komory a skládá se z magnetických cívek, divertorových terčů a nosné konstrukce. Pomocí magnetických cívek divertor odklání (divertuje)

okrajové magnetické siločivky udržující plazma a směruje je na své terče. Povrchová vrstva plazmatu proudí podél odkloněných siločivek do divertoru. Tím dochází ke změně struktury okraje plazmatu a vytvářejí se podmínky pro vznik transportní bariéry a následné zlepšení udržení energie plazmatem. Vyšší udržení energie v důsledku vytvoření tepelné transportní bariéry na okraji plazmatu je označováno jako H-mód, na rozdíl od normálního stavu označovaného jako L-mód. Odvodem části povrchové vrstvy plazmatu divertor současně tvaruje plazma, omezuje interakci plazmatu s konstrukcí reaktoru a chrání tak první stěnu.

Důležitou funkcí divertoru energetického reaktoru je čištění plazmatu od helia vznikajícího jako odpad při fúzní reakci. Zvyšující se množství jader helia v plazmatu snižuje hustotu paliva a zpomaluje fúzní reakci. Protože jádra helia společně s ostatními částicemi plazmatu migrují k okraji plazmatu, odčerpávání okrajové vrstvy divertorem umožňuje odvádět z plazmatu i jádra helia. Současným doplňováním fúzního paliva pak v plazmatu dochází ke snižování koncentrace helia.

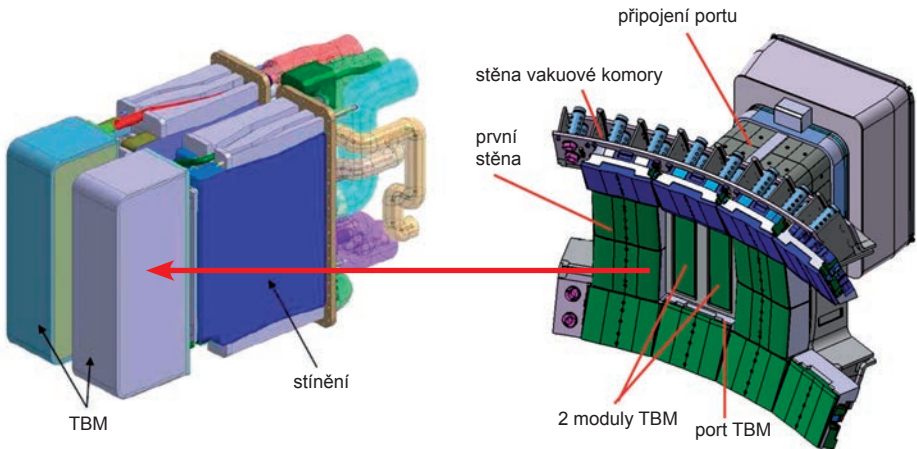
Divertor fúzního reaktoru odklání okrajové siločivky magnetického pole a směruje okrajovou vrstvu plazmatu na divertorové terče. Poslední uzavřený magnetický povrch protínající se v tzv. X-bodu se označuje jako separatrix



Testovací moduly blanketu TBM

Testovací moduly blanketu TBM představují samostatný experiment projektu ITER s cílem ověřit vyvíjená řešení blanketu a vybrat z nich ta nejlepší. Moduly TBM jsou technicky plně funkčním fragmentem blanketu budoucího energetického reaktoru a budou konstrukčně provedeny podle navrženého řešení blanketu

včetně použitých materiálů, chlazení a produkce tritia. Každý modul TBM proto bude vybaven vlastním technologickým zázemím, které bude provádět diagnostiku modulu, odvod tepla, čištění médií a separaci tritia. Pro celkovou analýzu stavu a výměnu TBM budou v blízkosti reaktoru k dispozici horké komory TBM. Za dobu provozu reaktoru ITER proběhnou tři fáze testování TBM, ve kterých budou moduly postupně zdokonalovány a optimalizovány.



Testovací moduly blanketu TBM

Výroba elektrické energie

Fúzní elektrárna se bude podobat současným jaderným elektrárnám. Bude tvořena jaderným a turbínovým ostrovem, palivovým hospodářstvím a dalšími obvyklými technologiemi elektrárny. Reaktor bude umístěn v ochranném kontejnmentu, ke kterému bude přiléhat z jedné strany ochranný kontejnment palivového hospodářství a z druhé strany turbínový ostrov.

Zdrojem tepelné energie pro výrobu elektřiny bude první stěna, blanket a diverzor fúzního reaktoru. Jednotlivé komponenty budou pracovat v různých tepelných režimech a pravděpodobně i s různými chladicími médii. Struktura a technologie primární části elektrárny bude přímo závislá na konstrukčním řešení chlazených komponent. Podle současných návrhů bude mít elektrárna dva až tři různé primární okruhy s kombinací chladicích médií helia, LiPb a vody.

Fúzní reaktory jsou charakteristické vysokým nominálním tepelným tokem z plazmatu do okolních konstrukcí a extrémním tepelným tokem při přímé interakci s plazmatem, který řádově překračuje tepelné toky obvyklé v energetice a v ostatních odvětvích průmyslu. Odvod tepla při těchto tepelných tocích vyžaduje vysokou intenzifikaci přestupu tepla do chladicího média a vývoj nových konstrukčních řešení chladicích kanálů.

Pro sloučení tepelných výkonů jednotlivých primárních okruhů a pro vytvoření bariéry přenosu sekundárně radioaktivních materiálů do turbínové části bude technologie elektrárny dvouokruhová. V závislosti na parametrech primárních okruhů a dosažené výstupní teplotě primárních médií bude sekundární okruh pracovat na bázi Rankin-Clausiova parovodního nebo Braytonova plynového termodynamického cyklu.

Z hlediska nákladů na vývoj a výstavbu zařízení elektrárny se jeví jako výhodné využití stávající technologie chlazení tlakovodních jaderných elektráren PWR/VVER, které by poskytlo standardizaci, funkčnost a spolehlivost nefúzní části elektrárny.

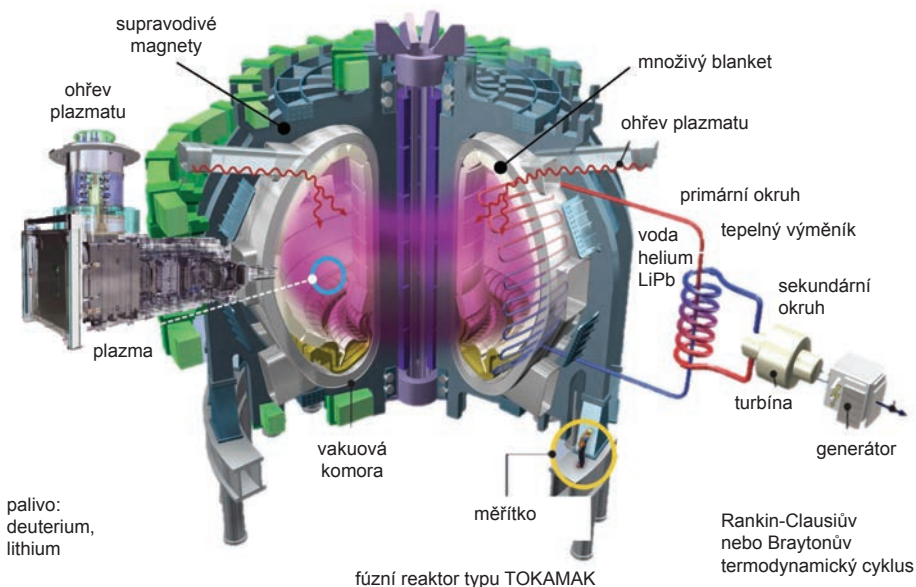


Schéma fúzní elektrárny DEMO

Inherentní bezpečnost fúzních reaktorů

Základním rysem fúzních reaktorů je skutečnost, že termojaderná fúzní reakce probíhá pouze při velmi vysokých teplotách plazmatu. Jakákoliv porucha ovlivňující chod reaktoru automaticky povede k ochlazení plazmatu a tím k okamžitému přerušení fúzní reakce. Stejně tak lze fúzní reakci kdykoliv jednoduše zastavit. Termojaderná reakce je v tomto smyslu mnohem bezpečnější než například oheň. Termojaderný reaktor je inherentně naprosto bezpečný zdroj energie.

Kromě inherentní bezpečnosti bude fúzní reaktor při provozu obsahovat pouze minimální množství paliva, řádově gramy vodíkových izotopů, jejichž havarijný únik do ovzduší by nijak neohrozil životní prostředí.

Působením fúzních neutronů bude docházet k sekundární aktivaci konstrukce reaktoru a korozních produktů v chladicích médiích, a proto budou reaktor a primární

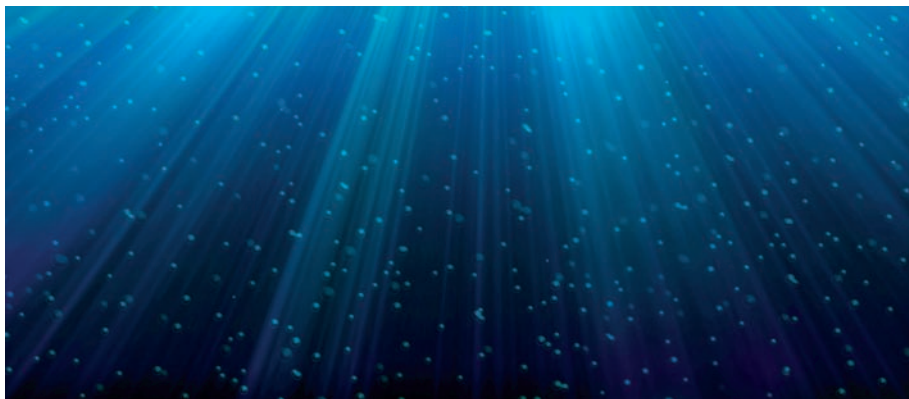
okruh elektrárny umístěny v ochranném kontejnmentu. V druhém ochranném kontejnmentu bude umístěno tritiové hospodářství. Oba kontejnmenty zamezí úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Bezpečnostní opatření ve fúzních elektrárnách budou posuzována podle standardních přísných bezpečnostních pravidel pro jaderné elektrárny a fúzní elektrárny budou získávat jaderné licence podobně jako jiná jaderná zařízení. Jaderné havárie s rizikem vlivu na okolí podle mezinárodní stupnice INES jsou však ve fúzní elektrárně fyzikálně vyloučeny a nemohou nikdy nastat.

Zásoby fúzního paliva

Zásoby fúzního paliva jsou reálně nevyčerpatelné. Ve světových oceánech se nachází až $4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria. Toto množství je dostatečné pro pokrytí celosvětové spotřeby energie roku 2015 ve výši 6×10^{20} J/rok po dobu 8 miliard let. Protože již odhadem za 5 miliard let dojde k vyhoření fúzního paliva na Slunci, má jaderná fúze větší zásoby paliva než obnovitelné zdroje energie.

OSN odhaduje, že populace Země poroste přibližně do roku 2100, kdy se ustálí na 10 miliardách obyvatel. V návaznosti na stabilizaci počtu obyvatel by mělo po roce 2100 dojít i ke stabilizaci spotřeby energie na úrovni $1,53 \times 10^{21}$ J/rok. Bez ohledu na růst celosvětové spotřeby zůstane zachována schopnost jaderné fúze uspokojit veškerou poptávku po energii po celou dobu existence Země. V časovém měřítku miliard let je důležité zmínit, že fúzní palivo také tvoří velkou část viditelné hmoty vesmíru.

Zásoby lithia pro první generaci fúzních elektráren jsou přibližně $1,83 \times 10^{13}$ kg izotopu ${}^6\text{Li}$. Pokud by měla být fúzní reakce DT používána delší dobu, což se nepředpokládá, pak by zásoby lithia v oceánech vystačily na pokrytí celosvětové spotřeby energie po dobu 2,2 milionů let. Všechny stávající fúzní reaktory používají především reakci DD a je proto jen otázkou času, kdy bude možné i v energetických reaktorech slučovat pouze deuterium bez potřeby lithia.



Světové oceány obsahují $4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria. Toto palivo je dostupné všem lidem na Zemi a jeho množství představuje dostatečnou zásobu paliva na miliony let. Ve vesmíru pak fúzní palivo tvoří převážnou část viditelné hmoty

Z antropogenního hlediska je fúzní palivo nevyčerpatelný zdroj energie. Jeho zásoby jsou ve světových oceánech v antropogenním prostoru a jsou dostupné všem obyvatelům Země. Využití jaderné fúze odstraní energetickou nadvládu zemí disponujících zásobami energetických surovin a poskytne i těm nejmenším zemím energetickou nezávislost. Dostupnost fúzního energetického zdroje je také kvalitativně vyšší než dostupnost obnovitelných energetických zdrojů OZE, které jsou ve většině případů závislé na nahodilosti počasí a na geografických podmínkách.

Fúzní energetický tok je kontinuální a zcela přirozený. Při čerpání fúzního paliva z mořské vody dojde k nepatrnému snížení jeho lokální koncentrace v místě čerpání. Přírodní procesy, difuze a proudění vody, budou přirozeně a nepřetržitě tuto koncentraci vyrovnávat s okolní vodou oceánů bez zásahu člověka. Čerpání paliva bude probíhat v malých množstvích, přibližně 2 kg paliva denně pro fúzní elektrárnu o elektrickém výkonu 2 GW_e. Odpadem této elektrárny bude zhruba 1 kg helia denně. Pro srovnání, přirozený únik vodíku a helia ze Země do vesmíru dosahuje až 90 milionů kg ročně a naopak jejich přírůstek z vesmíru činí přibližně 40 milionů kg ročně. Tím dochází k přirozenému energetickému toku fúzního paliva do antroposféry v souladu s definicí OZE.

Pro získání paliva fúzní elektrárny o elektrickém výkonu 2 GW_e na celý den provozu postačí přečerpat 60 m³ vody, z nichž 59,998 m³ se zase vrátí zpět do oceánu. Pro měsíční provoz fúzní elektrárny o velikosti Temelínské jaderné elektrárny bude stačit přefiltrovat vodu z plaveckého bazénu.

Ekonomika

Rychlost vstupu fúzních reaktorů do energetiky závisí na řadě politických a ekonomických faktorů. Z politického hlediska má jaderná fúze jako jediný energetický zdroj potenciál umožnit každé zemi energetickou nezávislost. Je proto na rozhodnutí vlád, zda stojí za to k energetické nezávislosti směřovat.

Z ekonomického hlediska by v první řadě měly být existující energetické zdroje zhodnoceny, zda poskytují energii bezpečně bez vlivu na zdraví obyvatelstva, bez emisí měnících klima nebo jiných negativních vlivů a bez odpadu zatěžujícího budoucí generace. Vznikající externality by měly být v plné výši zahrnuty do ekonomické bilance těchto zdrojů. Pak by jaderná fúze s vysokou pravděpodobností vyšla jako ekonomicky nejvýhodnější, protože umožňuje efektivní, bezemisní, bezodpadovou a ekologickou výrobu elektřiny.

Uvedené externality se však obtížně oceňují a jejich vliv se do investičních záměrů obvykle nezapočítává. Pokud má být fúzní elektrárna konkurenceschopná, tak především musí přes své nesporné výhody vyrábět elektřinu za cenu porovnatelnou se současnou výrobní cenou v existujících elektrárnách. To vyžaduje, aby investiční náklady na výstavbu fúzní elektrárny a provozní náklady na vlastní výrobu elektřiny byly celkově srovnatelné s náklady aktuálně platnými v energetice.

Počáteční nevýhodou fúzní energetiky jsou nedostatečně optimalizované technologie a nedostatek zkušeností. Není proto reálné, aby byly první fúzní elektrárny konkurenceschopné. Až postupné zdokonalování jednotlivých zařízení na základě zkušeností z jejich provozu umožní snížit cenu elektřiny na úroveň srovnatelnou s výrobní cenou elektřiny desítky let využívaných jaderných elektráren. Pozitivní

vliv na snížení investičních a provozních nákladů mohou mít dva faktory: využití moderních technologií jaderných elektráren a nízké palivové náklady.

Využití zkušeností a praxe z výstavby a provozování jaderných elektráren může výrazně omezit ekonomická rizika výstavby elektrárny pouze na fúzní technologie a tím snížit celkové investiční náklady. Konkrétně jde například o využití průmyslově zvládnuté technologie chlazení tlakovodních elektráren PWR/VVER.

Nízké palivové náklady jsou dány minimální spotřebou paliva a nízkou cenou vstupů palivového cyklu – vody a lithia. Výrobní cena elektřiny tak bude určována především investičními a provozními náklady, které budou klesat s optimalizací jednotlivých technologií elektrárny.

V souladu s výše uvedeným se cena výstavby první fúzní elektrárny odhaduje na 12 miliard \$, cena výstavby druhé elektrárny na 9 miliard \$. To je cena srovnatelná s cenou nových jaderných elektráren. Podobně je výrobní cena elektřiny první fúzní elektrárny odhadována přibližně na 0,356 \$/kWh (tj. při aktuálním kurzu cca 3,6 Kč/kWh) a výrobní cena elektřiny druhé fúzní elektrárny na 0,128 \$/kWh (cca 3,2 Kč/kWh). S výstavbou dalších elektráren se cena vyráběné elektřiny postupně sníží pod výrobní cenu elektřiny z jaderných elektráren.

Poděkování

Převzaté obrázky a fotografie byly použity s laskavým svolením ITER (www.iter.org), EUROfusion (www.euro-fusion.org), Fusion for Energy (fusionforenergy.europa.eu), Ústavu fyziky plazmatu AV ČR (www.ipp.cas.cz) a FOM-Rijnhuizen/Verdult – Kennis in Beeld (www.differ.nl).

Poděkování patří Ing. Milanu Řípovi, CSc., a RNDr. Radomíru Pánkovi, Ph.D., za pečlivé přečtení rukopisu a cenné poznámky.

Hlavní systémy

- systém řízení, sběru dat a komunikace (CODAC – Control, Data Acquisition and Communication)
- zdroje napájení
- systém rychlé zpětnovazební regulace
- chlazení
- vakuový systém
- napouštění pracovního plynu
- hydraulický systém pro předepnutí cívek
- ohřev pomocí vstříku 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
 - fotonásobiče (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 rentgeny
 - pomalá infračervená kamera, rychlá divertorová termografie (35 kHz, 1 mm)
- svazková a částicová diagnostika
 - neutronový scintilační detektor
 - diagnostika používající lithiový svazek (BES, ABP)
 - dva analyzátory 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

Jaderná fúze je zdrojem energie Slunce a všech ostatních hvězd. Blíží se ale doba, kdy budeme jadernou fúzí vyrábět elektřinu – v budoucnu se nepochybně stane základním energetickým zdrojem lidstva. Při nárůstu celosvětové spotřeby energie podle odhadů OSN jsou pozemské zásoby fúzního paliva dostačující až do doby vyhasnutí Slunce a zániku Země, ve vesmíru pak fúzní palivo tvoří převážnou část viditelné hmoty. Fúzní palivo splňuje nejpřísnější kritéria kladená na udržitelné i obnovitelné energetické zdroje, neprodukuje žádné emise ani škodlivý odpad, nevyžaduje rozsáhlé zásoby půdy ani plošně nenarušuje krajinný ráz.

Cesta k energetickému využití jaderné fúze je náročná. Spoutání slunce vyžaduje vývoj nových technologií v širokém spektru oborů, které umožní spolehlivou činnost průmyslového zařízení při teplotách v rozmezí od absolutní nuly do stovek milionů stupňů Celsia a při vysokých energetických tocích. Odměnou za to bude energetický zdroj, který poskytne lidstvu dostatek levné a čisté energie po příštích miliony let.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Magdalena Bendová: **Několik vět, které nelze zakázat**

Milan Řípa: **Termojadernou fúzí rozvířil Wirbelrohr**

Libuše Čižmárová: **Česko/Czechia**

DOSUD VYŠLO:

Milan Řípa: **Historie termojaderné fúze v ČR**

Richard Lhotský: **Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce**

M. Ireinová, H. Konečná: **Slovník nářečí českého jazyka**

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky
Spoutání slunce | *Slavomír Ěntler, Jan Mlynář*

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i.
Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa.
Odpovědná redaktorka Petra Královcová.
Vydání 1., 2016. Ediční číslo 12031.
Tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245
Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:
www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz