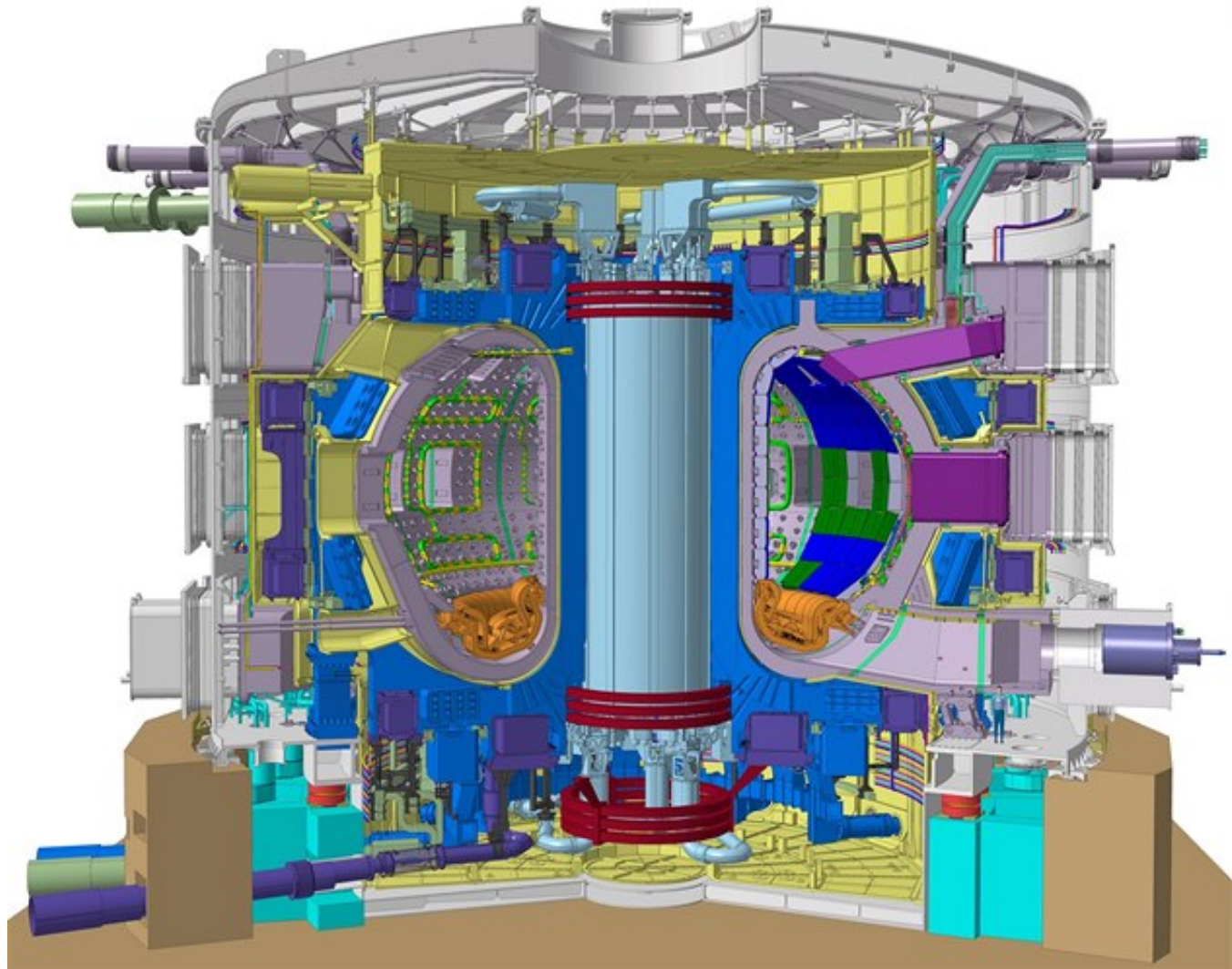


České fúzní čtvrtstoletí. Co děláme pro projekt „umělého slunce“

3. února 2015

Před 25 lety vstoupilo Československo do projektu mezinárodního termojaderného reaktoru ITER, který je jedním z největších vědeckých projektů v dějinách lidstva. Projekt ITER je součástí rozsáhlého výzkumu jaderné fúze, který má za cíl vyvinout nový zdroj energie.



Reaktor ITER – největší termojaderný reaktor na světě, který předvede možnost energetického využití jaderné fúze. Plazma je udržováno v komoře ve tvaru věnečku uprostřed. Vpravo dole lidská postava pro představu měřítka. | foto: ITER Organization

Od třicátých let minulého století je známo, že zdrojem energie Slunce je jaderná fúze lehkých atomových jader. V roce 1939 publikoval německý vědec Hans Bethe přelomový článek Energy Production in Stars, ve kterém vysvětlil principy jaderných reakcí ve hvězdách, a završil tak snahu o pochopení zdroje sluneční energie trvajícím od počátků lidské společnosti. Bethe za to v roce 1967

získal Nobelovu cenu.

Velmi horké vodíkové plazma tvořící Slunce poskytuje dostatek energie vodíkovým jádrům, aby se slučovala na jádra helia, a tím uvolňovala sluneční energii. Podmínky na Slunci jsou však zcela odlišné od podmínek na Zemi, a proto řada lidí pochybovala a pochybuje dodnes, že je možné fúzní energii uvolňovat i v pozemských podmínkách.

Druhá světová válka nasměrovala výzkum jaderné fúze do vojenské oblasti a 1. listopadu 1952 byla na atolu Enewetak v Pacifiku odpálena první termojaderná vodíková bomba [pod názvem Ivy Mike](#). Termojaderný výbuch ukázal velkou ničivou sílu fúzní energie, ale současně byl nezpochybnitelným důkazem, že termojaderná reakce probíhající na Slunci může probíhat i na Zemi.

V roce 1938 v Langley ve Spojených státech amerických (USA) A. Kantrowitz a E. Jacobs z NACA (předchůdce NASA) postavili fúzní reaktor ve tvaru prstencové komory omotané magnetickou cívkou. Pokus nebyl úspěšný, ale předběhl vývoj o mnoho let. V roce 1946 skupina vědců v Los Alamos v USA pod vedením Edwarda Tellera a Enrica Fermiho dospěla k závěru, že v pozemských podmínkách musí být vodíková jádra zahřáta na teplotu asi 100 milionů stupňů Celsia a takto horké plazma může být uzavřeno do magnetického pole (v originálním textu do „magnetic bottle“, magnetické láhve). Ve Velké Británii byl v roce 1946 podán patent na toroidální fúzní zařízení s magnetickým udržením plazmatu (které se však nikdy nepostavilo). V tehdejší Sovětské svazu (SSSR) podepsal v roce 1951 Stalin usnesení vlády o zahájení výzkumu jaderné fúze.

Od té doby ušel fúzní výzkum velký kus cesty, ale je naivní se domnívat, že získání neomezeného zdroje levné a čisté energie je snadné. Fúzní vědci musí spoutat fúzní plazma a přiblížit se podmínkám panujícím v jádru Slunce. V průběhu dlouholetého výzkumu bylo zkoušeno velké množství nejrozličnějších způsobů, jak plazma spoutat a spustit fúzní reakci. Nejlepší výsledky byly dosaženy na zařízeních postavených na základě ruské koncepce fúzního reaktoru Tokamak (toroidální komora s magnetickými cívkami). Tokamaky proto dnes tvoří páteř světového fúzního výzkumu.

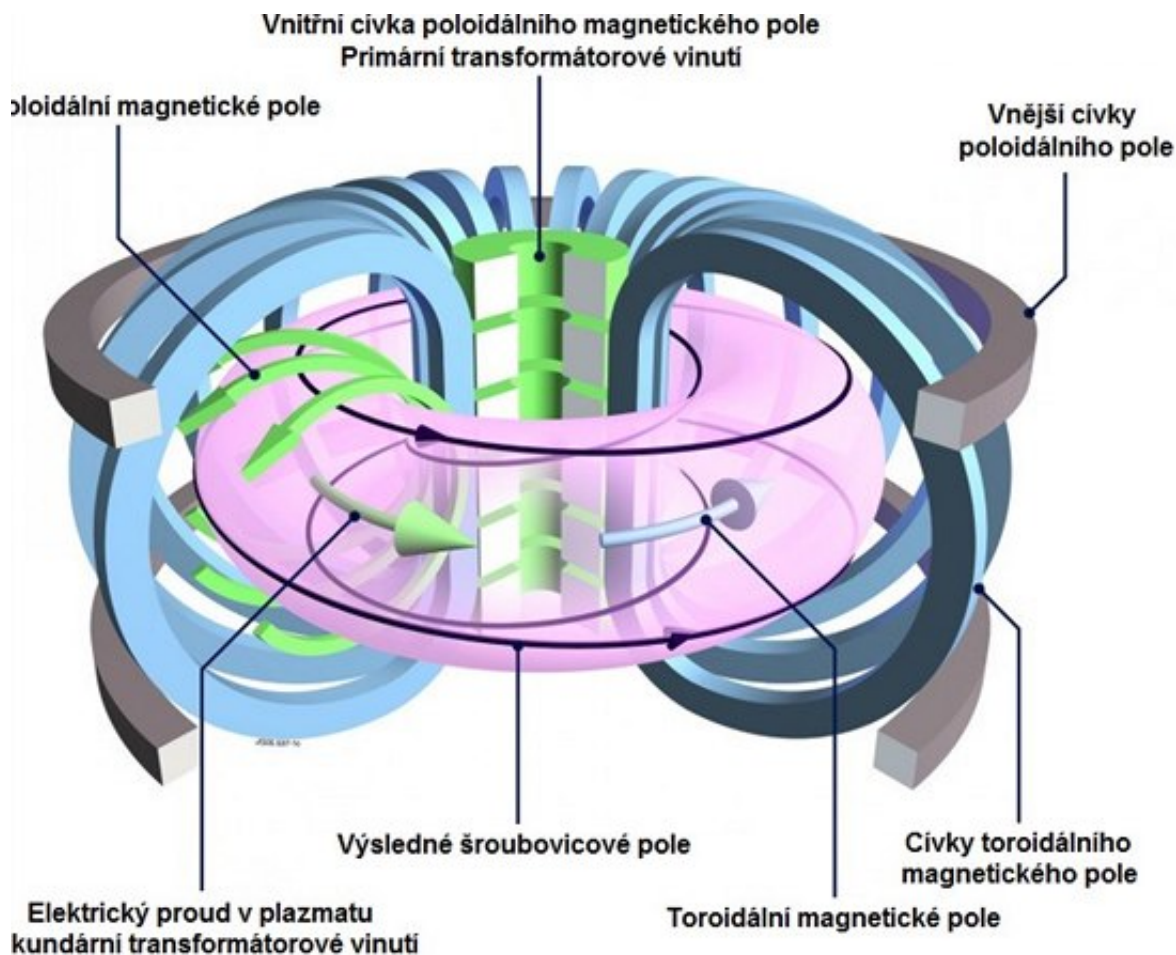
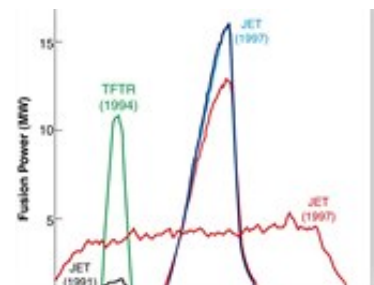


Schéma tokamaku. Hlavními částmi tokamaku je prstencová vakuová komora umístěná jako sekundární závit transformátoru a cívky magnetického pole. Transformátorem indukovaný elektrický proud v plazmatu vytváří spolu s magnetickými cívkami magnetické pole bránící kontaktu plazmatu se stěnou nádoby a současně plazma ohřívá.

První funkční tokamak s označením TMP byl spuštěn v roce 1955 v Laboratoři měřících přístrojů Akademie věd SSSR (LIPAN), dnešním Kurčatovově institutu, v Moskvě. Tam byl postaven také tokamak T-3, který jako první zařízení na světě dosáhl teploty plazmatu 10 milionů stupňů Celsia. Rekord byl oznámen v roce 1965 a po ověření teploty britskými fyziky v roce 1969 způsobil rozšíření tokamaků do celého světa. V roce 1994 dosáhl americký tokamak TFTR fúzního výkonu 10,7 MW a evropský tokamak JET v roce 1997 fúzního výkonu 16 MW. Příkon obou tokamaků na ohřev plazmatu ovšem byl vyšší než uvolňovaný fúzní výkon.

Při výzkumu fyziky termojaderného plazmatu se potvrdilo, že při zvětšení objemu plazmatu dochází nejen ke zvýšení fúzního výkonu, ale také ke snížení potřeby ohřevu plazmatu. Ve větším objemu se zkrátka lépe drží teplo. Proto bylo již od roku 1973 uvažováno o výstavbě velkého fúzního reaktoru, který měl být mezinárodní s cílem hlubší vědecké spolupráce a rozdělení nákladů na výstavbu reaktoru mezi více zemí. Tento projekt nazvaný INTOR (International Tokamak Reactor) se nakonec



Rekordního fúzního výkonu dosáhl zatím v roce 1997 tokamak JET (16 MW). ITER by

neuskutečnil, avšak prošlapal cestu pro následující podobný projekt ITER.

měl dosáhnout výkonu kolem 500 MW.

Zkratka ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor - Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor) označuje mezinárodní projekt výstavby termojaderného experimentálního reaktoru, který má prokázat možnost využití jaderné fúzní reakce pro energetiku. Uskutečnění projektu navrhl Michail Gorbačov na základě předchozího projednání s Francoisem Mitterrandem a Margaret Thatcherovou Ronaldu Reaganovi na summitu v Ženevě v roce 1985. Smlouvu podepsaly v roce 1987 USA, SSSR, Evropské společenství a Japonsko.



Loga projektu ITER. Než projekt opustili USA měl projekt v logu Slunce rozdělené na kvadranty čtyř partnerů projektu (po rozkliknutí vlevo). Současné logo je sluneční půlkruh s abecedním seznamem partnerů

Přistoupení dalších zemí bylo možné prostřednictvím jednotlivých signatářů smlouvy. Československo, v té době součást sovětského bloku, proto do projektu vstupovalo prostřednictvím SSSR. V návrhové zprávě pro rozhodnutí Rady organizace ITER (ITER Council) z konce roku 1989 bylo ke vstupu Československa do projektu uvedeno, že schopnosti československých odborníků budou významným přínosem k celkovému úsilí účastníků projektu.

Češi, Slováci a umělé slunce

V Československu byl výzkum termojaderné fúze zahájen na konci 50. let po zveřejnění výsledků probíhajícího fúzního výzkumu v USA, Velké Británii a SSSR na Druhé mezinárodní konferenci OSN o mírovém využití atomové energie v roce 1958 v Ženevě, známé také jako Druhá konference Atomy pro mír.

Následující rok po konferenci byl založen Ústav vakuové elektroniky Československé akademie věd, který byl pověřen fúzním výzkumem. V roce 1963 byl tento ústav přejmenován na Ústav fyziky plazmatu Československé akademie věd (ÚFP). Výzkum se soustředil především na ohřev plazmatu do termojaderných teplot a na vlastnosti horkého plazmatu. V polovině sedmdesátých let byl v ÚFP proveden světově první experimentální důkaz teorie vlečení elektrického proudu v plazmatu vysokofrekvenční vlnou.

V roce 1974 byl do Prahy na základě mezinárodní dohody se SSSR převezen tokamak TM-1-VČ, provozovaný od roku 1960 v moskevském Ústavu atomové energie I. V. Kurčatova. Tokamak byl slavnostně spuštěn v roce 1977 a umožnil významně rozšířit československý fúzní výzkum. V letech 1983-1984 byl zmodernizován a přejmenován na tokamak CASTOR (Czechoslovak Academy of Sciences Torus). Tokamak je v současnosti stále v provozu a pod názvem GOLEM slouží pro výuku



Spouštění tokamaku TM-1-VČ v ÚFP ČSAV v roce 1977

studentů na ČVUT v Praze (více informací naleznete [zde](#)).

Výzkum jaderné fúze zahrnuje kromě fyziky plazmatu řadu dalších vědeckých oborů, především jaderný výzkum. Zahájení jaderného výzkumu v českých zemích lze datovat do období těsně po druhé světové válce a svržení atomových bomb na Hirošimu a Nagasaki. V roce 1946 tehdejší Česká akademie věd a umění rozhodla o vypracování návrhu na zřízení Ústavu pro atomovou fyziku, který zahájil činnost v roce 1948. Na jeho základě byl v roce 1955 zřízen Ústav jaderné fyziky se sídlem v Řeži u Prahy.



Experimentální smyčka s tekutým sodíkem pro výzkum chlazení reaktoru tekutým kovem postavená v tribuně Strahovského stadionu v roce 1956 před dostavbou areálu v Řeži u Prahy.

V roce 1972 byla rozhodující část ústavu převedena do nového Ústavu jaderného výzkumu (ÚJV). Jedním z úkolů ÚJV byl vývoj tzv. rychlých jaderných reaktorů chlazených sodíkem. Tento program probíhal od roku 1972 až do roku 1985 a navazoval na předchozí dlouholetý výzkum tekutých kovů zahájený již v roce 1955 při založení původního Ústavu jaderné fyziky.

Vysoká odborná úroveň jaderných fyziků a inženýrů v ÚJV vybízela k jejich zapojení do fúzního výzkumu. Proto se někteří z nich již v průběhu 70. let podíleli na řešení úkolů fúzního výzkumu prováděného Ústavem fyziky plazmatu. V 80. letech se pro výzkum fúzních technologií ukázaly důležité rozsáhlé zkušenosti vědců ÚJV, získané při výzkumu tekutých kovů. ÚJV v té době hledal náhradu ukončeného programu rychlých reaktorů, a proto zorganizoval ve dnech 5.12. - 10.12.1988 v Moskvě jednání o možném zapojení Československa do projektu ITER. Jednání v Moskvě otevřelo dveře pro vstup Československa do projektu ITER.

O rok později, v prosinci 1989 účast Československa v projektu ITER odsouhlasila Rada organizace ITER. Za klíčové oblasti spolupráce označila studium interakce alfa částic s vlnou o dolní hybridní frekvenci používané pro ohřev plazmatu a neinduktivní buzení elektrického proudu a výzkum eutektické slitiny lithia a olova (LiPb) pro blanket reaktoru ITER. ÚFP a ÚJV tak roku 1989 společně vstoupily do projektu ITER, každý ve své oblasti výzkumu.

Restart

Politické změny v roce 1989 přinesly zmrazení a následně úplné přerušení spolupráce se SSSR. Protože financování československého výzkumu pro projekt ITER probíhalo prostřednictvím SSSR, došlo díky tomu k zastavení financování výzkumu. Přetrhání vazeb se SSSR



Výňatky ze zprávy ze zasedání Rady organizace ITER, konaného ve dnech 30.11.-1.12.1989. Rada odsouhlasila vstup Československa do projektu.

fúzní výzkum v Československu zcela paralyzovalo.

V Ústavu fyziky plazmatu musela být v letech 1990-1992 provedena celková restrukturalizace včetně radikálního snížení počtu pracovníků o cca 50%. Stěžejním úkolem ÚFP se stalo zapojení do evropského fúzního výzkumu. To se podařilo a 22.12.1999 byla mezi Evropským společenstvím pro atomovou energii (EURATOM) a ÚFP podepsána asociační smlouva EURATOM-IPP.CR, začleňující Českou republiku do evropského fúzního programu. V návaznosti na asociační smlouvu se Česká republika připojila k Evropské dohodě o fúzním výzkumu European Fusion Development Agreement (EFDA) a byly podepsány další související smlouvy. Následující desetiletí asociace EURATOM-IPP.CR v čele s ÚFP úspěšně rozvíjela a koordinovala tuzemský fúzní výzkum.



Vertikální řez plazmatem tokamaků fyzikálně podobných reaktoru ITER. Všechny čtyři zobrazené tokamaky mají shodný tvar plazmatu. To umožňuje předvídat vlastnosti tokamaku ITER na základě škálování vlastností tokamaků COMPASS, ASDEX-U a JET.

Asociační dohoda umožnila účast našich vědců na experimentech evropského tokamaku JET (Joint European Torus). Tento tokamak je největším fúzním reaktorem na světě a je svými parametry nejbližší k reaktoru ITER. V reaktoru JET jsou mimo jiné ověřovány technologie, které budou použity v reaktoru ITER, například experimenty ILW (ITER Like Wall) pro testování první stěny v konfiguraci podobné ITER.

V roce 2005 v rámci asociační dohody ÚFP přijal nabídku od britské výzkumné organizace UKAEA Culham na převzetí tokamaku COMPASS. Britové v roce 2002 zprovoznili nový tokamak MAST a z nedostatku finančních prostředků nemohli provozovat oba tokamaky. Důležitou a mimořádnou vlastností tokamaku COMPASS byla jeho fyzikální

podobnost k reaktoru ITER.

Princip fyzikální podobnosti umožňuje předvídat chování velkých systémů na základě výsledků získaných na malých (a levných) systémech, a proto je velice ceněný (nejznámější aplikací fyzikální podobnosti jsou testy modelů v aerodynamických tunelech). Podobnost tokamaků COMPASS a ITER spočívala v podobné geometrii plazmatu a ve schopnosti pracovat v režimu tzv. H-módu (High mode – režim s vysokým udržením energie v plazmatu). Českými vědci byla podobnost tokamaků ještě zvýšena doplněním nových injektorů svazků neutrálních atomů, umožňujících zahřát plazma v tokamaku na vyšší teplotu. První plazma bylo v tokamaku vytvořeno 9.12. 2008 a oficiální zahájení provozu tokamaku proběhlo 19.2. 2009.

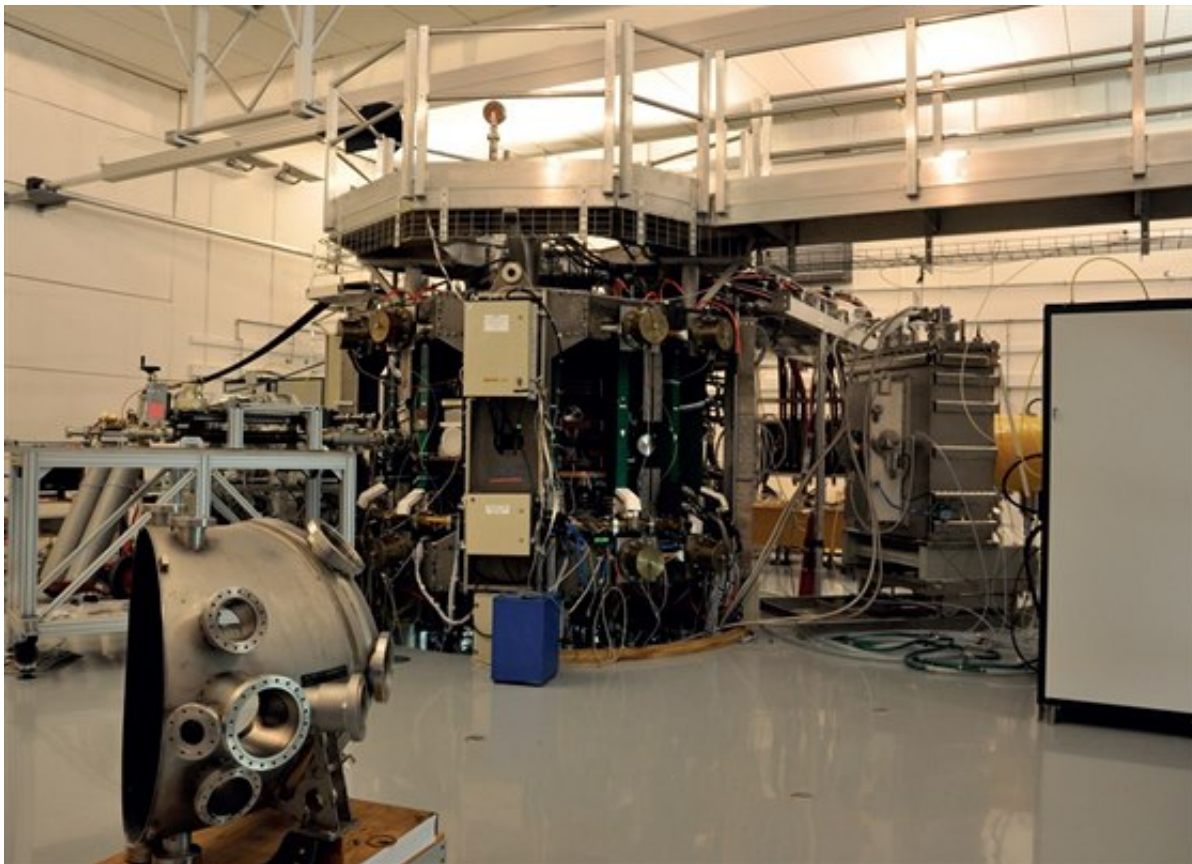
V listopadu 2012 COMPASS dosáhl zmíněného H-módu a stal se tokamakem, který má plazma a operační režimy podobné tokamaku ITER. Zprovoznění reaktoru COMPASS bylo velkým úspěchem českých

vědců a provozování reaktoru přineslo a přináší důležitá data pro vývoj a přípravu provozu reaktoru ITER v oblastech fyziky vnitřního a okrajového plazmatu, vývoje pokročilých diagnostických metod a interakce plazmatu s elektromagnetickými vlnami.

V souvislosti s rozvojem fúzního výzkumu byl v roce 2006 na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze založen inženýrský studijní obor [Fyzika a technika termojaderné fúze](#), který od ÚFP získal darem původní tokamak CASTOR. Tokamak byl přestavěn a pod názvem GOLEM poskytuje špičkovou možnost výuky tuzemských i zahraničních studentů na školním termojaderném reaktoru. Studijní obor se stal součástí evropské struktury FUSENET (Fusion Education Network), která v rámci Evropské unie koordinuje vzdělávání odborníků v oboru jaderné fúze.



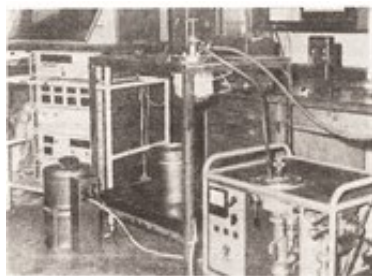
V červnu 2011 navštívil tokamak COMPASS britský premiér David Cameron společně s předsedou vlády ČR Petrem Nečasem. Na snímku jsou společně s vedoucím oddělení Tokamak Radomírem Pánkem (vpravo



Fúzní reaktor tokamak COMPASS Ústavu fyziky plazmatu AV ČR

Vědci z Ústavu jaderného výzkumu postavili pro výzkum chlazení reaktoru ITER v letech 1988-1990 experimentální zařízení na výrobu eutektické slitiny LiPb a experimentální smyčku pro výzkum termohydrauliky LiPb. Ale kvůli zastavení financování byla výzkumná skupina v roce 1991 zrušena. ÚJV se obrátilo s žádostí o financování výzkumu na Evropskou komisi, avšak bez úspěchu. Československo v té době již nepatřilo do sovětské zóny, ale zároveň ani nepatřilo do Evropské unie.

Po rozpuštění výzkumné skupiny byla experimentální zařízení odstavena a následně zlikvidována.



Aparatura ÚJV pro laboratorní výrobu eutektické slitiny LiPb v roce 1988

K oživení výzkumu fúzních technologií v ÚJV došlo až 10 let po jeho zastavení na základě výzvy ÚFP, který v roce 2001 přizval ÚJV do asociace EURATOM-IPP.CR. Pozvání mělo ryze praktický důvod: pro výzkum fúzních materiálů a technologií byly potřeba silné neutronové zdroje a ÚJV disponoval dvěma experimentálními reaktory a kvalifikovanými odborníky, kteří testování fúzních materiálů mohli zajistit. Klíčovými experimenty prováděnými v ÚJV byly zkoušky koroze konstrukčních materiálů ITER ve vodě a v tekuté eutektické slitině LiPb pod neutronovým tokem a zátěžové testy první stěny reaktoru ITER.

Jak vydržet pořádné horko

Jedním ze složitých úkolů při výstavbě velkých termojaderných reaktorů je zkonstruovat takovou reaktorovou nádobu, která vydrží působení plazmatu. I když je plazma spoutáno magnetickým polem, intenzivně sálá do svého okolí teplo. Tepelný tok z plazmatu na stěnu se bude v reaktoru ITER pohybovat od 0,5 do 5 MW/m² a to není málo. Například v kotlích uhelných elektráren je tepelný tok přibližně 0,001 MW/m², to znamená 500krát až 5000krát nižší než bude v ITER.

Navíc při poruchách udržení plazmatu musí stěna odolat i přímému kontaktu horkého plazmatu a to klade vysoké nároky na její konstrukci. Tato vnitřní stěna reaktoru, která je nejbližší k plazmatu, je označována jako „první stěna“ reaktoru.

Pro testování první stěny ITER byla v ÚJV vyvinuta dvě experimentální zařízení, unikátní reaktorová sonda TW3 a testovací zařízení BESTH. Obě zařízení překonala všechna ostatní podobná zařízení na světě. Sonda TW3 umožnila cyklicky ohřívat vzorky první stěny tepelným tokem 0,5 MW/m² v aktivní zóně režského jaderného reaktoru LVR-15 a při souběžném tepelném, radiačním a neutronovém ozařování vzorků dosáhla rekordních 17 tisíc teplotních cyklů. Podobná ruská sonda dosáhla pouze 3 700 cyklů a poté shořela.



Aktivní sonda TW3 na testování vzorků první stěny reaktoru ITER před vložením do jaderného reaktoru LVR-15 v Řeži u Prahy.



Na zařízení BESTH, které umožnilo zatížit vzorky první stěny až 30 tisíci tepelných cyklů, byly testovány vzorky vyrobené v Evropské unii, Číně, Ruské federaci, Jižní Koreji a v USA. V současnosti je budováno nové experimentální zařízení, které bude schopné testovat panely první stěny a další vnitroreaktorové komponenty ITER v plné velikosti velmi vysokým

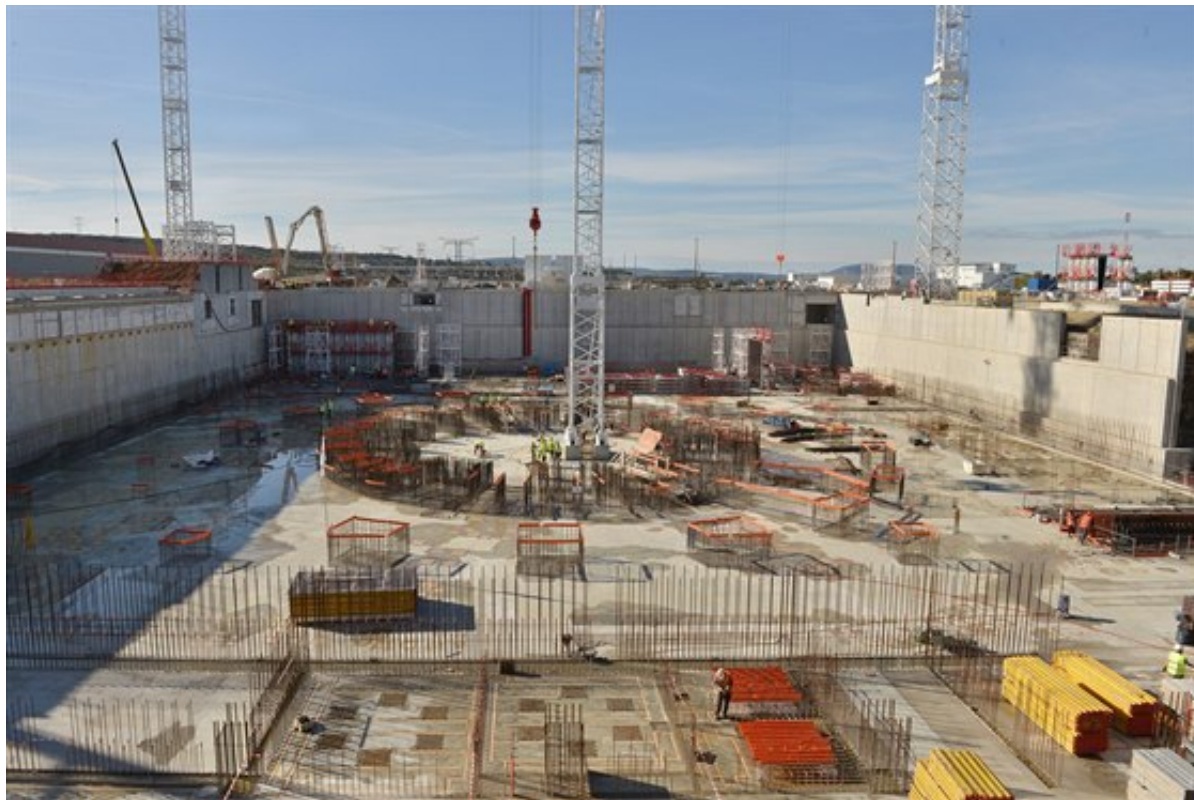
Vzorek první stěny reaktoru ITER v horké komoře po vyjmutí z jaderného reaktoru.

tepelným tokem až 40 MW/m². Výstavba experimentálního komplexu nazvaného HELCZA (High Energy Load Czech Assembly) byla minulý rok zahájena v Plzni a má být ukončena na konci tohoto roku.

Bouřlivá léta

Na konci minulého století nebyla situace jednoduchá ani v samotném projektu ITER. Počáteční politická podpora projektu ITER se postupem času vytratila a s ní i finanční zdroje. Hlavními důvody byly nejprve konec ropné krize a následně rozpad SSSR a konec studené války. V roce 1998 projekt opustily USA s tvrzením, že projektové náklady jsou příliš vysoké. Proto byl původní záměr v letech 1999-2001 přepracován a reaktor byl zmenšen. V roce 2003 se k projektu připojila Čína a Jižní Korea a USA se vrátily zpět. V roce 2005 se k projektu připojila Indie a projekt ITER se rozeběhl na plné obrátky.

Výstavba reaktoru ITER byla zahájena v roce 2007 ve výzkumném centru CEA Cadarache nedaleko města Aix-en-Provence na jihu Francie. Spuštění reaktoru bylo naplánováno na rok 2020. Extrémní komplikovanost řízení takto velkého mezinárodní projektu ovšem způsobila zpoždění výstavby reaktoru, které vyvrcholilo výměnou generálního ředitele projektu na konci loňského roku. Zpoždění se odhaduje na dva až tři roky, nový harmonogram projektu bude předložen v polovině tohoto roku.



Staveniště ITER v listopadu 2014

Účast českých vědců v projektu otevřela možnosti pro zapojení českého průmyslu do výstavby

reaktoru ITER. Průmyslovým podnikům je v rámci volného sdružení Czech Industry for ITER poskytována podpora pro vstup do tendrů na dodávky pro ITER.

V roce 2013 vypršela evropská dohoda EFDA spolu se všemi asociačními smlouvami. Evropská politická reprezentace dohodu neprodloužila a rozhodla o dalším směřování evropského fúzního výzkumu. V listopadu 2012 Evropská komise vydala dokument Fusion electricity, A roadmap to the realisation of fusion energy (Fúzní elektřina, Plán na realizaci fúzního zdroje energie), který popisuje postup, jak v nejbližší budoucnosti dosáhnout energetického využití jaderné fúze.

Plán, který se zkráceně nazývá Fusion Roadmap (Cestovní mapa k fúzi), předpokládá zahájení výroby elektřiny v prototypu fúzní elektrárny do roku 2050. Klíčovými projekty plánu jsou experimentální reaktor ITER a demonstrační fúzní elektrárna DEMO. Tento plán se stal výchozím referenčním dokumentem pro evropský fúzní výzkum. Na místo EFDA se novým koordinátorem výzkumu stalo konsorcium evropských výzkumných organizací EUROfusion.

Konsorcium EUROfusion v současnosti sdružuje 31 výzkumných organizací a národních asociací z celé Evropy a koordinuje vývoj demonstrační fúzní elektrárny DEMO. Česká republika nabídla konsorciu své rozsáhlé experimentální možnosti a kvalifikované odborníky v řadě oblastí základního a aplikovaného fúzního výzkumu. Díky zkušenostem získaným v projektu ITER uspěla v silné evropské konkurenci a podílí se na výzkumu a vývoji fúzní elektrárny v oblastech fyziky plazmatu, výzkumu a vývoje vnitroreaktorových komponent a jaderné bezpečnosti.



Montážní hala cívek toroidálního magnetického pole ITER - 2014

V roce 2016 bude Česká republika hostit v Praze jednu z největších vědeckých konferencí k výzkumu jaderné fúze Symposium of Fusion Technology [SOFT](#). Konference se zúčastní více než tisíc vědců z celého světa a předpokládá se široká prezentace našich vysokých škol a průmyslových podniků. Zapojení do projektu ITER vytvořilo podmínky, aby se Česká republika podílela bok po boku světových velmocí na vývoji fúzního energetického zdroje.

Autor: Slavomír Entler, CV Řež