

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Energetické využití jaderné fúze

Ing. Slavomír Entler

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Energetické stroje a zařízení

Školitel: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Duben 2018

Název anglicky: Energy utilization of nuclear fusion

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Slavomír Entler
Ústav energetiky, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6

Školitel: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
Ústav energetiky, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Ivan Ďuran, Ph.D.
Ústav fyziky plazmatu AV ČR
Za Slovankou 1782/3, 182 00 Praha 8

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.
v zasedací místnosti č. Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4,
Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Energetické stroje a zařízení.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. František Hrdlička, CSc.
předseda oborové rady oboru Energetické stroje a zařízení.
Fakulta strojní ČVUT v Praze

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V roce 1997 dosáhl termojaderný reaktor JET (Joint European Torus) fúzního výkonu 16 MW. Tím byl podán důkaz o uskutečnitelnosti uvolňování energie řízenou jadernou fúzí. Prokázat technickou realizovatelnost energetického využití jaderné fúze má za cíl projekt mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru ITER. Reaktor ITER o fúzním výkonu 500 MW, který se staví ve francouzské Provence, bude testovat zařízení a technologie pro první fúzní elektrárny. Uvedení reaktoru do provozu je naplánováno na rok 2025.

Na projekt ITER přímo navazují projekty DEMO (Demonstrational Fusion Power Plant). Projekty DEMO mají za cíl vyvinout a postavit demonstrační elektrárnu s fúzním reaktorem. Projekty DEMO byly v letech 2012-2014 zahájeny v Evropské unii, Jižní Koreji, Japonsku a Číně. V současnosti probíhá výběr jednotlivých fúzních technologií, které budou v elektrárnách použity. Podle plánu Evropské unie by měla být první elektřina z jaderné fúze vyrobena do roku 2050 [1].

V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader izotopů vodíku deuteria a tritia. Optimální teplota pro průběh reakce je přibližně 160 milionů °C. Reaktanty budou ve skupenství plně ionizovaného plazmatu.

Nejpokročilejšími fúzními reaktory jsou tzv. tokamaky na bázi magnetického udržení plazmatu. Jejich hlavními součástmi jsou toroidální vakuová komora a elektromagnetický systém vytvářející silné magnetické pole bránící kontaktu horkého plazmatu s konstrukcí reaktoru.

Termojaderné plazma je obklopeno jadernou zónou reaktoru. Komponenty jaderné zóny energetických reaktorů, první stěna, blanket a divertor, budou vystaveny vysokému neutronovému a tepelnému toku z plazmatu způsobujícímu intenzivní opotřebení komponent [2].

Pro dosažení teplot potřebných pro průběh termojaderné reakce je plazma ohříváno fyzikálně a technicky sofistikovaným a energeticky náročným systémem ohřevu – vysokým elektrickým proudem, svazky neutrálních atomů a elektromagnetickými vlnami. Energetické rovnováhy související s ohřevem plazmatu popisují tzv. Lawsonova kritéria [3].

Jedním z hlavních diagnostických systémů fúzních reaktorů s magnetickým udržením plazmatu je magnetická diagnostika. Poskytuje informace o celkovém proudu v plazmatu, energii obsažené v plazmatu, lokálních proudových hustotách a magnetohydrodynamických nestabilitách. Experimentální fúzní reaktory s krátkými pulzy využívají pro měření magnetického pole magnetické cívky. Fúzní elektrárny ale budou vyžadovat měření ustáleného magnetického pole v prostředí vysokých tepelných a

neutronových toků, pro které nejsou v současnosti dostupné vhodné senzory s dostatečnou teplotní a radiační odolností [4].

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Předložená disertační práce má tři průřezové cíle:

Prvním cílem je identifikace charakteristických rysů budoucí fúzní energetiky. Z fyzikální podstaty jaderné fúze vyplývají tři klíčové fyzikální rysy energetického využití jaderné fúze: fúzní palivo z lehkých chemických prvků, vysoká pracovní teplota paliva a vysoký energetický tok v reaktoru. Tyto fyzikální rysy predeterminují charakteristické rysy fúzní energetiky.

Druhým cílem je analýza energetické bilance budoucích fúzních elektráren z hlediska recirkulace vysokého elektrického výkonu při ohřevu paliva na vysoké teploty. Ztráty při recirkulaci výkonu ohřevu významně sníží čistou účinnost výroby elektrické energie.

Třetím, mezioborovým, cílem na úrovni reaktorové technologie je vyvinutí prototypu teplotně a radiačně odolných senzorů ustáleného magnetického pole pro mezinárodní reaktor ITER. Senzory budou v reaktoru ITER testovány pro použití v budoucích fúzních elektrárnách.

3. METODA ZPRACOVÁNÍ

Identifikace charakteristických rysů fúzních zdrojů energie byla provedena formou kombinace fyzikální, kauzální a technicko-ekonomické analýzy. Jednotlivé analýzy vycházejí z údajů podložených externími odkazy na příslušné zdroje.

Dopad ohřevu paliva byl hodnocen na základě jeho vlivu na čistou účinnost elektrárny. Analytické vztahy pro čistou účinnost byly odvozeny z bilance hlavních výkonových toků fúzní elektrárny.

Vývoj prototypu teplotně a radiačně odolných senzorů ustáleného magnetického pole probíhal experimentálně a zahrnoval množství různých činností, např. návrh senzorů, výběr vhodných postupů výroby senzorů, měření jejich vlastností, návrh metod zpracování signálů, testování senzorů apod. Autor této práce se podílel na všech popsaných činnostech. Vzhledem k velkému rozsahu provedené práce je vývoj prototypu popsán formou prezentace jednotlivých dílčích výsledků práce.

Dosažené výsledky práce autor již ve větší či menší míře publikoval v recenzovaných časopisech. Proto jsou v textu často uváděny odkazy na autorské publikace označené písmenem [A]. Referenční seznam autorských publikací je uveden samostatně.

4. VÝSLEDKY

Teoretická analýza identifikovala charakteristické rysy budoucích fúzních zdrojů energie a popsala jejich vzájemné souvislosti. Z fyzikální podstaty jaderné fúze vyplývají tři klíčové rysy, které budou determinovat vlastnosti fúzní energetiky:

- Palivo z lehkých chemických prvků.
- Vysoká pracovní teplota paliva.
- Vysoký energetický tok v reaktoru.

Bylo ukázáno, že tyto klíčové rysy implikují:

- prakticky nevyčerpatelné a dostupné zásoby paliva,
- bezemisní výrobu,
- inherentní jadernou bezpečnost,
- minimální vliv na životní prostředí,
- recirkulaci výkonu ohřevu paliva,
- nízkou životnost jaderných komponent,
- vznik sekundárně aktivovaných radioaktivních odpadů,
- specifickou strukturu výrobní ceny elektrické energie.

Na základě rozboru jednotlivých faktorů byla sestavena environmentální charakteristika fúzních zdrojů. Bylo zjištěno, že vliv fúzní energetiky na životní prostředí bude plně srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie.

Za hlavní současnou překážku konkurenceschopného energetického využití jaderné fúze byla identifikována nedostupnost materiálů a konstrukcí komponent jaderné zóny schopných dlouhodobě odolávat neutronové a tepelné zátěži. Vysoká technologická náročnost a krátká životnost jaderných komponent se negativně promítnou do výrobních nákladů a do objemu sekundárně aktivovaného radioaktivního odpadu. Nová materiálová a konstrukční řešení musí být testována, zda splňují požadavky na neutronovou a tepelnou odolnost. Zatímco testování vysokým tepelným tokem je dostupné, relevantní testování neutronovým tokem není a ani v blízké budoucnosti nebude možné.

Technicko-ekonomická ex-ante analýza modelu fúzní elektrárny ukázala ekonomická specifika budoucí fúzní energetiky, kterými jsou:

- vysoké investiční náklady,
- nízké palivové náklady,
- vysoké provozní náklady na průběžnou výměnu komponent jaderné zóny,
- minimální externí náklady.

Analyzovaný model fúzní elektrárny byl shledán při současných cenách elektriny jako nerentabilní a jeho realizace by si vyžádala dotaci výkupní ceny

elektriny, která by ale byla nižší, než je poskytovaná podpora fotovoltaických elektráren. V případě internalizace externích nákladů výroby elektriny by fúzní elektrárny byly jedním z ekonomicky nejvýhodnějších energetických zdrojů.

Analýza dopadu ohřevu paliva na vysoké teploty se soustředila na Lawsonovo kritérium inženýrské rovnováhy. Bylo ukázáno, že toto kritérium úzce souvisí s čistou účinností výroby elektrické energie a s recirkulací výkonu ohřevu paliva. Energie ohřevu vložená do plazmatu bude vyzařována zpět spolu s uvolněnou fúzní energií a opakovaně použita k výrobě elektriny. Ztráty v zařízení elektrárny ale neumožní, aby recirkulující výkon plně pokryl spotřebu systému ohřevu. Kompenzace ztrát způsobí pokles čisté účinnosti elektrárny, který bude v prvních fúzních elektrárnách velmi výrazný. Analýza recirkulace výkonu ohřevu ukázala, že přínos recirkulace ke kompenzaci spotřeby systému ohřevu bude přímo úměrný reciproké hodnotě faktoru zesílení reaktoru Q . Ztráty i pokles čisté účinnosti byly analyticky popsány a odvozené rovnice byly úspěšně verifikovány podle evropských referenčních modelů fúzní elektrárny DEMO.

Bylo ukázáno, že vedlejším důsledkem recirkulace výkonu ohřevu je narušení konzistence čisté účinnosti fúzních elektráren vztahované k tepelnému výkonu reaktoru. Čistá účinnost fúzních elektráren musí být vztahována k výkonu uvolňovanému v reaktoru tvořícím pouze část celkového tepelného výkonu reaktoru.

Hlavním motivem integrace jaderné fúze do energetiky jsou nevyčerpatelné zásoby paliva a minimální vliv na životní prostředí. Provedená analýza tyto vlastnosti potvrdila a současně neodhalila žádný fundamentální problém, který by integraci bránil. K dosažení konkurenceschopnosti fúzních elektráren je ale nutný další rozsáhlý fyzikální a technologický výzkum.

Klíčovým výsledkem experimentální části práce je funkční prototyp radiačně a teplotně odolných Hallovyých senzorů pro měření ustáleného magnetického pole reaktoru ITER. Vyvinutý prototyp úspěšně prošel testováním a byl následně schválen mezinárodní odbornou komisí ITER pro použití v reaktoru ITER.

Mezi dílčí výsledky práce patří:

- Bismutové Hallovy senzory a technologie jejich výroby.
- Charakterizace senzorů.
- Kompletace sensorové jednotky.
- Metody zpracování signálu senzorů.
- Kontroler senzorů.
- Charakterizace prototypu sensorové sestavy.

Vývoj prototypu byl zahájen na základě smlouvy ÚFP AV ČR a ITER Organization v roce 2015 a ukončen v roce 2018. Jeho cílem byl prototyp

senzorové sestavy pro měření ustáleného magnetického pole aplikovatelné v prostředí reaktoru ITER. Autor se na vývoji podílel jako člen dvoučlenné tuzemské vývojové skupiny v rámci čtyřčlenného mezinárodního týmu a soustředil se především na laboratorní a elektrotechnické aktivity. Mezi jeho hlavní přínosy patří v souladu s prezentovanými dílčími výsledky geometrický návrh miniaturizovaných Hallových senzorů, charakterizace a testování senzorů, testování metod zpracování signálu senzorů, testování kontroleru, kompletace senzorové jednotky a charakterizace celé senzorové sestavy. Za finální výsledek práce lze považovat zahájení výroby senzorů na základě vyvinutého prototypu. Pod vedením vývojového týmu se na výrobě podílí řada českých a zahraničních firem.

5. ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů vývoje jaderné energetiky jsou vysoce bezpečné jaderné reaktory. Dalšími cíli jsou zvýšení energetického potenciálu omezených zásob paliva a snížení množství produkovaného radioaktivního odpadu. Fúzní reaktory budou využívat stejný zdroj energie jako štěpné reaktory – vazebnou energii atomových jader. Přitom ale nabídnou plnou vnitřní jadernou bezpečnost bránící nekontrolované jaderné reakci. Nabídnou také prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva a omezí jaderný odpad pouze na sekundárně aktivovanou konstrukci reaktoru z nízkoaktivovatelných materiálů. Z porovnání uvedených cílů vývoje jaderné energetiky a vlastností fúzních reaktorů je patrné, že se shodují. Fúzní reaktory v tomto smyslu představují další vývojový stupeň jaderných reaktorů, generaci V. Jejich odlišná technická konstrukce umožňuje vyřešit fundamentální omezení štěpných reaktorů a dosáhnout stanovených cílů vývoje jaderné energetiky.

Začlenění fúzních reaktorů do jaderné energetiky bude všeobecně prospěšné. Jaderná energetika vychovala za dobu své existence velké množství odborníků, kteří jsou potřeba pro současný vývoj fúzních reaktorů. V Německu po politickém omezení jaderné energetiky velká část jaderných odborníků přešla do výzkumu fúzních technologií a Německo se poté dostalo na špičku světového fúzního výzkumu. Mladé a tajuplné odvětví jaderné fúze má také vysoký potenciál přilákat k jaderné energetice mladé lidi a úspěšně vyřešení otázek jaderné bezpečnosti a vysokoaktivního odpadu využitím fúzních reaktorů výrazně zlepši obraz jaderné energetiky před veřejností. Výhody, které s sebou jaderná fúze přinese, jsou zásadní a představují budoucnost jaderné energetiky.

PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TĚMATEM DISERTACE

Impaktované články (první nebo korespondenční autor)

S. Entler, M. Kocan, I. Duran, G. Vayakis, F. Lucca, F. Vigano, R. Cantu, Recent improvement of the design of the ITER steady-state magnetic sensors, IEEE Transactions on Plasma Science 5 (2018) 1276 - 1280.

S. Entler, J. Horacek, T. Dlouhy, V. Dostal, Approximation of the Economy of Fusion Energy, Energy 152 (2018) 489-497.

S. Entler, I. Duran, M. Kocan, G. Vayakis, "Investigation of linearity of the ITER outer vessel steady-state magnetic field sensors at high temperature", Journal of Instrumentation 12 (2017) C07007.

S. Entler, I. Duran, P. Sládek, G. Vayakis, M. Kocan, Signal conditioning and processing for metallic Hall sensors, Fusion Engineering and Design 123 (2017) 783-786.

S. Entler, J. Kysela, Overview on Fusion Nuclear Technology Experimental Testing, J of Nuclear Radiation Science 2 (2016) 021018-021025.

S. Entler, Engineering Breakeven, Journal of Fusion Energy, 34 (2015) 513-518.

J. Kysela, S. Entler (korespondenční autor), R. Vsolak, T. Klabik, O. Zlamal, B. Bellin, F. Zaccchia, In-pile testing of ITER first wall mock-ups at relevant thermal loading conditions in the LVR-15 nuclear research reactor, Fusion Engineering and Design, Fusion Engineering and Design 98-99 (2015) 1271-1275.

Impaktované články (spoluautor)

J. Horacek, S. Entler, P. Vondracek, J. Adamek, D. Sestak, M. Hron, R. Panek, R. Dejarnac, V. Weinzettl, K. Kovarik, G. Van Oost, Plans for Liquid Metal Divertor in Tokamak Compass, Plasma Physics Reports 7 (2018), 1-7.

J. Horacek, S. Entler, P. Vondracek, J. Adamek, D. Sestak, M. Hron, R. Panek, R. Dejarnac, V. Weinzettl, K. Kovarik, G. Van Oost, Планируемый жидкометаллический дивертор для токамака COMPASS, Физика Плазмы 7 (2018), 1-7.

I. Duran, S. Entler, M. Kocan, M. Kohout, L. Viererbl, R. Musalek, T. Chraska, G. Vayakis, Development of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostics, Fusion Engineering and Design 123 (2017) 690-694.

M. Kocan, I. Duran, S. Entler, G. Vayakis, J.M. Carmona, P. Gitton, J. Guirao, M. Gonzalez, S. Iglesias, Q. Pascual, G. Sandford, S. Tylnski, C. Vacas, M. Walsh, R. Walton, Final design of the ITER outer vessel steady-state magnetic sensors, Fusion Engineering and Design 123 (2017) 936-939.

- J. Prokupek, K. Samec, R. Jilek, P. Gavila, S. Neufuss, S. Entler, HELCZA High Heat Flux Test Facility for Testing ITER EU First Wall Components, *Fusion Engineering and Design* 124 (2017) 187-190.
- J. Stepanek, V. Dostal, S. Entler, Effective water cooling of very hot surfaces during the LOCA accident, *Fusion Engineering and Design* 124 (2017) 1211-1214.
- L. Vesely, V. Dostal, S. Entler, Study of the cooling systems with S-CO₂ for the DEMO fusion power reactor, *Fusion Engineering and Design*, 124 (2017) 244-247.
- M. Jirsa, M. Rames, I. Duran, S. Entler, T. Melisek, P. Kovac, L. Viererbl, Electromagnetic properties of REBaCuO superconducting tapes considered for magnets of fusion reactor, *Fusion Engineering and Design* 124 (2017) 73-76.
- J. Horacek, P. Dobias, G. Cunningham, R. Duban, M. Imrisek, T. Markovic, J. Havlicek, J. Vlcek, S. Entler, Feasibility study of fast swept divertor strike point suppressing transient heat fluxes in tokamaks DEMO and COMPASS-Upgrade, *Fusion Engineering and Design* 123 (2017) 646-649.
- Duran, S. Entler, M. Kohout, M. Kocan, G. Vayakis, High magnetic field test of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostic, *Review of Scientific Instruments* 87 (2016) 11D446.
- J.H. You, G. Mazzone, E. Visca, Ch. Bachmann, T. Barrett, G. Brolatti, V. Cocolovo, F. Crescenzi, P. K. Domalapally, D. Dongiovanni, S. Entler, G. Federici, P. Frosi, M. Fursdon, H. Greuner, D. Hancock, S. McIntosh, A. v. Müller, M. T. Porfiri, G. Ramogida, J. Reiser, M. Richou, M. Rieth, S. Rocella, A. Rydzy, R. Villari, V. Widak, Conceptual design studies for the European DEMO divertor: Rationale and first results, *Fusion Engineering and Design*, 109–111 (2016) 1598–1603.
- P. K. Domalapally, S. Entler, Comparison of cooling schemes for high heat flux components cooling in fusion reactors, *Acta Polytechnica* 55 (2015) 86–95.

Recenzované články

- S. Entler, V. Dostál, Jaderná bezpečnost fúzních elektráren a jejich vliv na životní prostředí, *Bezpečnost jaderné energie* 9/10 (2017) 262-268.
- S. Entler, T. Dlouhý, V. Dostál, J. Horáček, *Ekonomika fúzní energetiky*, *Energetika* 5 (2017) 318-323.
- S. Entler, J. Málek, J. Brokešová, Moderní trendy seismického zabezpečení jaderných elektráren, *Bezpečnost jaderné energie* 7/8 (2017) 218-224.
- S. Entler, M. Kolovratník, V. Dostál, Recirkulace výkonu ve fúzních elektrárnách, *Energetika* 4 (2017) 247-250.

- S. Entler, J. Málek, J. Brokešová, Moderní trendy seismického zabezpečení jaderných elektráren, *Energetika* 3 (2017) 179-184.
- S. Entler, I. Ďuran, Kovové Hallovovy sensory, *Čes. časopis pro fyziku* 67 (2017) 91-101.
- S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky V. – Výroba elektřiny, *TZB-info* 38 (2016).
- S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky IV. – Jaderné komponenty, *TZB-info* 37 (2016), <<http://energetika.tzb-info.cz/eлектроenergetika/14669-zaklady-fuzni-energetiky-iv-jaderne-komponenty>>.
- S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky III. – Reaktorové technologie, *TZB-info* 34 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/eлектроenergetika/14587-zaklady-fuzni-energetiky-iii-reaktorove-technologie>>.
- S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů, *TZB-info* 32 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/eлектроenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>>.
- S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky I. – Historie, *TZB-info* 30 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/eлектроenergetika/14482-zaklady-fuzni-energetiky-i-historie>>.
- S. Entler, Jaderná fúze – budoucnost energetiky, *Energetika* 3 (2015) 136.
- S. Entler, Fúzní palivo a obnovitelné zdroje, *Energetika* 5 (2015) 249-252.
- S. Entler, Je jaderná fúze obnovitelný zdroj?, *TZB-info* 5 (2014).
- S. Entler, Lawsonovo kritérium – kritérium fúzní energetiky, *Čes. časopis pro fyziku* 64 (2014) 161
- S. Entler, Elektřina z fúze (I), *TZB-info* 24 (2013).
- S. Entler, Elektřina z fúze (II) - fyzikální základy, *TZB-info* 25 (2013).
- S. Entler, Elektřina z fúze (III) - reaktory ITER, HiPER a DEMO, *TZB-info* 26 (2013).
- Monografie**
- S. Entler, J. Mlynář, Spoutání slunce, Středisko společných činností AV ČR, Věda kolem nás 50, 2016.
- S. Entler, Historie aplikovaného výzkumu jaderné fúze v Řeži, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Řež, 2014.
- Výzkumné zprávy**
- S. Entler, V. Dostál, Estimation of the DEMO Net Efficiency, Eurofusion IDM WPPMI-PR(15)07, Eurofusion Preprint, 2015.

S. Entler et al., Experimental Complex HELCZA Initial Report, Fusion For Energy IDM 3A2FHF/3.0, Fusion For Energy, 2015.

S. Entler et al., Experimental Complex HELCZA Preliminary Design, CVR 271, Řež, 2014.

S. Entler, Vsolak R., Reungoat M., PFW User Requirements for Technology, CVR 044R8, Řež, 2013.

S. Entler a kol., Experimentální zařízení HELCZA Conceptual Design, CVR 153, Řež, 2013.

S. Entler, B. Wolf, Experimental Device HELCZA Technical Description, CVR 154, Řež, 2013.

S. Entler a kol., Experimentální zařízení HELCZA Enhanced design, CVR 168, Řež, 2013.

S. Entler, B. Wolf, Electron Beam Collimation, CVR 192, Řež, 2013.

S. Entler, M. Reungoat, B. Wolf, Experimental Device HELCZA Technical description, F4E OPE-319 Proposal, Centrum výzkumu Řež, květen, 2013.

Konference – vystoupení

M. Kocan, I. Duran, S. Entler, G. Vayakis, P. Agostinetti, M. Brombin, J. M. Carmona, G. Gambetta, N. Marconato, P. Moreau, S. Peruzzo, P. Spuig, M. Walsh, A steady state magnetic sensor for ITER and beyond: development and final design, High Temperature Plasma Diagnostics 2018 conference, San Diego, USA 2018.

W Biel, R. Albanese, R. Ambrosino, M. Ariola, M. v. Berkel, T. Bolzonella, M. Cecconello, S. Cimerman, S. Conroy, A. Dinklage, I. Duran, R. Dux, S. Entler, E. Fable, D. Farina, C. Finotti, Th. Franke, L. Giacomelli, L. Giannone, W. Gonzalez, A. Hjalmarsson, M. Hron, F. Janky, A. Kallenbach, B. Koncar, R. König, R. Luis, A. Malaquias, O. Marchuk, G. Marchiori, G. De Masi, D. Mazon, H. Meister, K. Meyer, R. Moutinho, A. Mlynek, S. Nowak, Ch. Piron, A. Pironti, H. Policarpo, P. B. Quental, N. Rispoli, V. Rohde, G. Sergienko, S. El Shawish, A. Silva, F. da Silva, A. Smole, C. Sozzi, M. Tardocchi, M. Tokar, W. Treutterer, A. Vale, R. Wenninger, K. Zagar, H. Zohm, Initial concept for the plasma control for the European DEMO tokamak reactor, Symposium on Fusion Engineering SOFE 2017, Shanghai, Čína, 2017.

S. Entler, Test Blanket System, Konference Cenelín, ČVUT, 2017.

S. Entler, Charakteristické rysy fúzní energetiky, Konference Cenelín, ČVUT, 2017.

I. Duran, P. Bilkova, S. Entler, P. Bohm, J. Horacek, ITER & DEMO activities, 9th Compass Programmatic Conference & 20th Meeting of IBA,

ÚFP AV ČR, Praha, 2017.

J. Horacek, S. Entler, K. Kovarik, P. Vondracek, J. Adamek, M. Hron, R. Panek, V. Weinzettl, Plans for liquid metal divertor in tokamaks COMPASS (Upgrade), vystoupení na konferenci 5th International symposium on liquid metals applications for fusion (ISLA-5), Moskva, Rusko, 2017.

I. Duran, P. Bilkova, S. Entler, P. Bohm, IPP work for ITER, 8th Compass Programmatic Conference & 19th Meeting of IBA, ÚFP AV ČR, Praha, 2016.

J. Prokúpek, K. Samec, R. Jílek, P. Gavila, S. Neufuss, S. Entler, HELCZA - High Heat Flux Facility for Testing ITER First Wall Components, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

S. Entler, Cesta k fúzní elektřině, Konference Cenelin, ČVUT, 2016.

J. H. You, G. Mazzone, E. Visca, Ch. Bachmann, T. Barrett, G. Brolatti, V. Cocilovo, F. Crescenzi, P. K. Domalapally, D. Dongiovanni, S. Entler, G. Federici, P. Frosi, M. Fursdon, H. Greuner, D. Hancock, S. McIntosh, A. v. Müller, M. T. Porfiri, G. Ramogida, J. Reiser, M. Richou, M. Rieth, S. Roccella, A. Rydzy, R. Villari, V. Widak, Conceptual design studies for the European DEMO divertor: Rationale and first results, International Symposium on Fusion Nuclear Technology ISFNT 12, Jeju Island, Republic of Korea, 2015.

S. Entler, Lawson Criterion of DEMO Fusion Power Plant, Symposium on Fusion Technology SOFT 28, San Sebastian, Španělsko, 2014.

S. Entler, Fusion Technology Research in Řež, Czech Republic, Symposium of Plasma Physics and Technology SPPT 26, Praha, 2014.

S. Entler, Fusion technology research in Řež: Past and Future, 6th Compass Programmatic Conference & 17th Meeting of IBA, ÚFP AV ČR, Praha, 2014.

S. Entler, Experimental Experience for Fusion, 5th Compass Programmatic Conference & 16th Meeting of IBA, ÚFP AV ČR, Praha 2013.

Konference – poster

S. Entler, J. Sebek, I. Duran, K. Vyborny, M. Kocan, G. Vayakis, High magnetic field and temperature test of the ITER outer vessel steady-state magnetic field Hall sensors at ITER relevant temperatures, High-temperature plasma diagnostics HTPD, San Diego, USA, 2018.

J. Horacek, R. Duban, G. Cunningham, S. Entler, V. Sedmidubsky, J. Havlicek, M. Imrisek, J. Seidl, P. Dobias, T. Markovic, J. Vlcek, P. Vondracek, R. Enikeev, Suppressing ELM heat in big tokamaks by fast swept divertor strike point, European Physical Society Conference on Plasma Physics EPS, Belfast, Ireland, 2017.

S. Entler, M. Kocan, I. Duran, G. Vayakis, F. Lucca, F. Vigano, R. Cantu,

Recent improvement of the design of the ITER steady-state magnetic sensors, Symposium on Fusion Engineering SOFE 2017, Shanghai, Čína, 2017.

S. Entler, I. Duran, M. Kocan, G. Vayakis, Development of the ITER steady-state magnetic sensors, International School of Fusion Reactors Technology - 16th Course: Diagnostics and Technology Developments in view of ITER and DEMO, Erice, Itálie, 2017.

S. Entler, I. Duran, M. Kocan, G. Vayakis, Investigation of linearity of the ITER outer vessel steady-state magnetic field sensors at high temperature, 2nd European Conference on Plasma Diagnostics ECPD-2, Bordeaux, Francie, 2017

S. Entler, I. Duran, P. Sladek, M. Kocan, G. Vayakis, Signal processing for the extreme environment Hall sensors, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

M. Kocan, I. Duran, S. Entler, G. Vayakis, J.M. Carmona, P. Gitton, J. Guirao, M. Gonzalez, S. Iglesias, Q. Pascual, G. Sandford, S. Tylinski, C. Vacas, M. Walsh, R. Walton, Final design of the ITER outer-vessel steady-state magnetic sensors, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

Duran, S. Entler, R. Musalek, T. Chrastka, M. Kohout, L. Vierebl, M. Kocan, G. Vayakis, Development of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostics, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

J. Horacek, P. Dobias, G. Cunningham, R. Duban, M. Imrisek, T. Markovic, J. Havlicek, J. Vlcek, S. Entler, Feasibility study of fast swept divertor strike point suppressing transient heat fluxes in tokamaks DEMO and COMPASS-Upgrade, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

J. Stepanek, V. Dostal, S. Entler, Effective water cooling of very hot surfaces during the LOCA accident, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

V. Dostal, L. Vesely, S. Entler, Study of the cooling systems with S-CO₂ for the DEMO fusion power reactor, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

P. Zacha, S. Malec, S. Entler, Heat transfer enhancement of the DEMO first wall water cooling, Symposium on Fusion technology SOFT-29, Praha, ČR, 2016.

I. Duran, S. Entler, M. Kohout, M. Kocan, G. Vayakis, High magnetic field test of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostic, High-temperature plasma diagnostics, Madison, USA, 2016.

L. Vesely, V. Dostal, S. Entler, Comparison of S-CO₂ power cycles for

nuclear energy, Symposium of Plasma Physics and Technology SPPT 27, Praha, ČR, 2016.

J. Horacek, P. Dobias, G. Cunningham, R. Duban, M. Imrisek, T. Markovic, J. Havlicek, J. Vlcek, S. Entler, Conceptual study of fast swept divertor strike point suppressing transient heat fluxes in DEMO tokamak, Symposium of Plasma Physics and Technology SPPT 27, Praha, ČR, 2016.

S. Entler, Estimation of the DEMO Net Efficiency, International Symposium on Fusion Nuclear Technology ISFNT 12, Jeju Island, Republic of Korea, 2015

J. Prokupek J., S. Entler, P. Gavila, B. Bellin, F. Zacchia, R. Mitteau, ITER EU First Hall Panels Full Size High Heat Flux Testing, International Conference on Plasma-Facing Materials and Components PFMC-15, France, 2015

J. Kysela, S. Entler, R. Vsolak, T. Klabik, O. Zlamal, B. Bellin, F. Zacchia, In-pile testing of ITER first wall mock-ups at relevant thermal loading conditions in the LVR-15 nuclear research reactor, Symposium on Nuclear Technology SOFT-28, San Sebastian, Španělsko, 2014.

P. K. Domalapally, S. Entler, Comparison of cooling schemes for high heat flux components cooling in fusion reactors, Symposium of Plasma Physics and Technology SPPT 26, Praha, ČR 2014.

S. Entler, R. Vsolak, Testing of FW mock-ups under representative operating conditions, International Symposium of Fusion Nuclear Technology, International Symposium on Fusion Nuclear Technology ISFNT-11, Barcelona, Španělsko 2013.

R. Vsolak, S. Entler, High heat flux test facility HELCZA for PFC testing, Plasma Facing Materials and Components PFMC-14, Juelich, Německo 2013.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZÍCH

- [1] F. Romanelli, Fusion Electricity, A roadmap to the realization of fusion energy, EFDA, EU, 2012.
- [2] G. Federici, W. Biel, M.R. Gilbert, R. Kemp, N. Taylor, R. Wenninger, European DEMO design strategy and consequences for materials, Nucl. Fusion 57 (2017) 092002.
- [3] S. Entler, Lawsonovo kritérium – kritérium fúzní energetiky, Čes. časopis pro fyziku 64 (2014) 161
- [4] S. Entler, I. Ďuran, Kovové Hallovy sensory, Čes. časopis pro fyziku 67 (2017) 91-101.

ANOTACE

Podle plánu Evropské unie a dalších světových velmocí má být první fúzní elektrárna uvedena do provozu do roku 2050. Klíčovými rysy budoucí fúzní energetiky jsou palivo z lehkých chemických prvků, vysoká pracovní teplota paliva a vysoký energetický tok. Tyto rysy implikují nevyčerpatelné a globálně dostupné zásoby paliva, vysoce ekologickou bezemisní výrobu elektřiny, inherentní jadernou bezpečnost, recirkulaci výkonu ohřevu paliva, nízkou životnost jaderných komponent a vznik sekundárně aktivovaných radioaktivních odpadů. Vliv fúzních elektráren na životní prostředí bude srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie a při započtení externích nákladů se fúzní elektrárny mohou stát jedním z ekonomicky nejvýhodnějších zdrojů energie. Specifickým rysem fúzní energetiky bude ohřev paliva na vysoké teploty a související recirkulace výkonu ohřevu snižující dopad ohřevu paliva na výstupní výkon elektráren. V práci jsou odvozeny analytické rovnice popisující vliv ohřevu paliva na čistou účinnost výroby elektrické energie. Experimentální část práce popisuje vývoj prototypu radiačně a teplotně odolných Hallových senzorů pro fúzní energetické reaktory. Prototyp byl testován a následně schválen pro měření ustáleného magnetického pole mezinárodního fúzního reaktoru ITER.

SUMMARY

According to the plan of the European Union and other world powers, the first fusion power plant should be put into operation by 2050. The key features of future fusion energy, the light chemical elements fuelling, high fuel temperature, and high heat and neutron loading of the fusion reactors, imply inexhaustible and globally available fuel reserves, high ecological emission-free electricity generation, inherent nuclear safety, heating power recirculation, low lifetime of nuclear components, and the generation of a secondary activated radioactive waste. The environmental impact of fusion power plants will be comparable to the impact of renewable resources and, with the inclusion of external costs, fusion power plants can become one of the most economically advantageous energy sources. A specific feature of fusion power plants will be a fuel heating to high temperatures. The power recirculation will reduce the impact of the fuel heating on the output power of fusion power plants, and analytical equations describing the influence of the fuel heating including the recirculation on the net efficiency of power generation are derived. The experimental part describes the development of the prototype of radiation and temperature resistant Hall sensors for fusion power reactors. The prototype has been tested and subsequently approved for measuring a steady-state magnetic field of the ITER international fusion reactor.

