

Jaderná fúze a její odpadní materiály

Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadálová, Ph.D., Centrum výzkumu Řež; e-mail: Jaroslav.Stoklasa@cvrez.cz; Lucie.Nenadalova@cvrez.cz

Souhrn

Zdůrazněna specifická radioaktivních odpadů, které vznikají během provozu zařízení sloužících k výzkumu a uskutečnění jaderné fúze. Uvedeny základní části zařízení a druhy odpadů, které mohou přicházet v úvahu z hlediska časové osy. Naznačeny předpokládané úpravy materiálů pro recyklaci a ukládání.

Klíčová slova: detritiace, Tokamak, zařízení EU DEMO, recyklace, pevné odpady

Úvod

Podívali jsme se na problematiku recyklace materiálů a odpadů vznikajících v souvislosti s výzkumem a provozováním jaderné fúze. Jednotlivé komponenty konstrukce zařízení je nutné především poznat, proto jsme se pokusily nahlédnout do problematiky perspektivně použitých materiálů, o kterých se píše v dostupné literatuře. Je důležitá uvažovaná a skutečná životnost jednotlivých materiálů při běžném provozu zařízení. Z tohoto pohledu se všechny konstrukční materiály nestanou nebezpečným odpadem. Průběžné sledování odpadních produktů a jejich vhodné úpravy jsou důležité z hlediska životního prostředí.

Zařízení k vytvoření jaderné fúze

ТОКАМАК (тороидальная камера с магнитными катушками" = *toroidní komora v magnetických cívkách*) je experimentální stroj určený k využití energie fúze. **Tabulka 1** vyjmenovává důležitá velká zařízení. K dokončení směřuje ITER [3], který bude největším tokamakem na světě s poloměrem plazmy (R) 6,2 m a objemem plazmy 840 m³. Termonukleární fúzní reaktor ITER byl navržen tak, aby produkoval fúzní plazmu ekvivalentní 500 megawattů (MW) tepelného výkonu po dobu asi dvaceti minut, zatímco 50 megawattů tepelné energie je vstřikováno do tokamaku, což má za následek desetinásobný zisk plazmového ohřevu. Dalším krokem po ITERu bude demonstrační elektrárna – DEMO. Ta má prozkoumat nepřetržitý nebo téměř nepřetržitý provoz (v ustáleném stavu). Po dokončení prací okolo před koncepčního designu EU DEMO roku 2020 jsou zahájeny práce na koncepčním designu a vrcholí od 2029 zahájením prací na inženýrském designu celku EU DEMO [27]. Jde o celoevropský projekt. Cílem je konverze fúzního tepla na elektřinu (~ 500 MWe), hlavní poloměr plazmy 9 m.

Trochu historie

V roce 1968 SSSR publikoval data z tokamaku T-3, která představovala dramatický skok ve fúzním výkonu. Zpráva týmu z Velké Británie z roku 1969, kdy nezávisle vyzkoušeli svůj stroj, potvrdila sovětské výsledky, znamenala rozvoj Tokamaků po světě. Nyní jsou v různém stavu provozu, projektů a úvah o zařízení malé i velké tokamaky:

DTT (Divertor Tokamak Test facility – Itálie, ENEA Frascati) hlavní poloměr plazmy 2,11 m

STEP (Spherical Tokamak for Energy Production – Velká Británie), plán sférický tokamak, provoz rok 2040

JET (The Joint European Torus – Velká Británie), který se nachází v CCFE Culham středisku pro fúzní energii, je největším a nejvýkonnějším experimentálním tokamakem, který v současné době funguje, objem plazmy 100 m³. JET nastavil současný světový rekord pro fúzní výkon na 16 MW ze vstupu 24 MW vytápění a celkového příkonu 700-800 MW elektrické energie.

MAST Upgrade je také umístěný v Culhamu, je kompaktnější a účinnější typ zařízení známého jako „sférický tokamak“ (~0.9 m).

Tabulka 1 Velké Tokamaky

Název	Hlavní poloměr plazmy	Časové údaje	Fúzní energie	Stav čas (umístění)
TFTR	2,52 m	1982 start	10,7 MW rekord 1.	Provoz 1982–1997 (Princeton – USA)
DTT	2,11 m	2024 dokončení		2018 zahájena stavba (ENEA Frascati – Itálie)
JET	2,96 m	1983 start	16 MW rekord současný	Provozován trvale (Culham – UK)
ITER	6,2 m	2027 uvedení do provozu	500 MW tepelného výkonu	Poločas výstavby 2018 (Cadarach – Francie)
EU DEMO	9 m.	2020 – vypracována koncepce	Konverze na elektřinu ~ 500 MWe	Provoz 2050

Výzkum ve světě probíhá na dalších menších zařízeních například KSTAR (Jižní Korea), JT-60SA (Japonsko), TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor + NSTX (sférický tokamak 0,85 m, National Spherical Torus Experiment) v /USA – Princeton), ale i v České republice (GOLEM, COMPASS).

Jsou vybrány informace různých typech materiálů, které byly užity při vývoji konstrukce EU DEMO. Podklady jsou získány z faktů o testovacích tokamacích JET, MAST, KSTAR, GOLEM, COMPASS, ITER a dalších zařízeních užitých při testování procesů kolem jaderné fúze. Tabulka 1 informuje o sekcích nebo skupinách materiálů uvažovaných pro použití v EU DEMO.

Alternativou k tokamaku pro výzkum jaderné fúze je Stellarator (Wendelstein 7-X), který funguje od roku 2015 ve IPP Greifswald (Německo).

Materiály pro fúzní elektrárny

Počet materiálů, ze kterých bude postavena fúzní elektrárna lze jen odhadovat. Bude jich obrovské množství s ohledem na to, jak složitý a komplikovaný je celý systém základních zařízení reprezentovaný komplexem kolem samotného principu jaderné fúze a jeho centrem – tokamakem. Dále jde o systémy měřicí, sledovací a monitorovací jak z lokálního pohledu, tak i celku, aby byla zajištěná bezpečnost a funkčnost zařízení. Z hlediska objemu, velikosti a významu nelze opominout systémy umožňující manipulaci s vyrobenou energií a přenosy energie.

Odhad průměrného množství jednotlivého individua v hmotnostních jednotkách je velmi nejistý. Mohou se zde vyskytovat chemická individua, kompozity, vrstvy nebo jiné materiállové systémy, které budou použity jednou nebo v přesně definovaném konečném počtu míst. Základní sekce a skupiny zařízení pro jadernou fúzi včetně množství, životnost a obnovování některých materiálů určených pro použití v EU DEMO s užitím informací o ITER poznamenává v **Tabulka 2**.

Důležitý je pohled na poškození a opotřebením materiálů. Opotřebením může být sebekomplikovanější a vznikat různými způsoby. Z hlediska řešení problematiky WPSAE půjde zejména o procesy související s emisemi a vyzařováním. Prostě jde o neutrony, alfa, beta a gama záření. Stejně zjednodušeně můžeme prohlásit, že probíhající procesy souvisejí s tritiem a s produkty, které vznikají ozářením

materiálů zařízení, a vycházejí zejména z různých rozpadových řad konkrétních izotopů chemických prvků.

Jde o různé pravděpodobnosti zasažení konkrétního izotopu zářením nebo částicí. Problematika a šíře pohledu souvisí s významností izotopu, na který se zaměříme, v komplexu zařízení celého systému EU DEMO.

Tabulka 2 Množství, životnost a obnovování některých materiálů určených pro použití v EU DEMO s užitím informací o ITER.

Sekce nebo skupina	Odhad průměrného množství v jednotkách hmotnosti nebo kusech [literatura]	životnost
Modul Blanketu (BB)	176 kusů [5]	5-6 roků.
Divertor	Divertorové desky [5]	2 roků.
	540 tun shromážděných kazet [3]	vyměněna nejméně jednou během životnosti stroje
Kombinace pancéřování kompozitního W a uhlíkových vláken	[6][7]	3000 výbojů s plným výkonem po dobu 400 s
	[4]	1000 cyklů
Vakuová nádoba	každý z devíti sektorů ITER ve tvaru torusu bude mít hmotnost mezi 390 a 430 tunami. [3]	
	9 000 stínících bloků stěny, každý o hmotnosti až 500 kg	
	JT-60SA z nerezové oceli, která obklopuje tokamak zajišťující prostředí podtlaku. Objem 1410 m ³ a váží kolem 480 tun [13]	
	22,1 tun nerezové oceli (DEMO 2015) SS316, 4604 m ³	
Kryostat	3 800 tun nerezové oceli (ITER), 16000 m ³ [3]	
	(JT-60SA) sekce kryostatu váží asi 170 tun. [13]	
Magnety	10 000 tun magnetů, z toho 500 tun vláken (více než 100 000 km) [3]	

Sekce a skupiny zařízení

Důležité informace o materiálech pro Vakuovou nádobu, Magnety, Blanket, Kryostat, Podpůrné systémy, a Tokamak (Vacuum Vessel, Magnets, Blanket, Divertor, Cryostat, Supporting Systems and The TOKAMAK) jsou citovány ze zdroje [3]. Přibližně 55 procent prostoru mezi dvojitými stěnami vakuové nádoby bude obsazeno stíněním ve stěně ve formě modulárních bloků s hmotností do 500 kg, vyrobených z boritanové a feromagnetické nerezové oceli. Vakuová nádoba ITER bude mít vnější

průměr 19,4 m, výška 11,4 m a váží přibližně 5 200 tun. S instalací příkrývky (blanketu) a rozbočovače váží vakuová nádoba 8 500 tun.

Deset tisíc tun magnetů s kombinovanou skladovanou magnetickou energií 51 gigajoulů (GJ) vytvoří magnetické pole, které budou iniciovat, omezovat, tvarovat a řídit plazmu ITER. Jsou vyrobené z niobu-cínu (Nb₃Sn) nebo niobu-titanu (Nb-Ti). Magnety se stávají supravodivými při chlazení nadkritickým héliem v rozmezí 4 Kelvin (-269 ° C). 54 desetitunových kazetových sestav Divertoru ITER bude nainstalováno – a také bude vyměněno alespoň jednou během životnosti stroje – dálkovým ovládním. Kazetové sestavy jsou vybaveny nosnou konstrukcí z nerezové oceli a třemi složkami, které směřují k plazmatu: vnitřní a vnější svislé cíle a kopule [3]. Vývoj supravodičů ale dále pokračuje.

Z hlediska zacházení s odpady je velmi důležitá životnost komponent zařízení. V literatuře jsou popsány některé postupy a sledování vlivů na prodloužení nebo zkrácení životnosti komponent.

Pro částečně připojený režim je životnost Beryllia omezena převládající pomalými přechodovými stavy, životnost Wolframu je ovlivněna narušeními a životnost CFC je ovlivněna všemi výše uvedenými procesy. Dle literatury[4] má Be nedostatečnou životnost, zatímco W a CFC dosahují životnosti nad 1000 cyklů. Avšak životnost W silně závisí na předpokladu o zlomku ztracené vrstvy taveniny a životnosti CFC závisí na předpokladu chemického rozprašování.

Zajímavé konstrukční materiály pro užití ve fúzní technologii

V souvislosti s jadernou fúzí probíhá intenzivní výzkum materiálů. Literatura nabízí pestrou škálu potenciálních ale také i užitých materiálů. V článku [9] jsou uvedeny a hodnoceny zajímavé konstrukční materiály určené pro použití ve fúzních zařízeních.

Feritická / martenzitická ocel (kde vysoce aktivovaná rozpouštědla jako Mo a Nb v komerčních ocelích jsou nahrazena W a V) je nejvyspělejší možností.

Ocel zesílená oxidovou disperzí představuje potenciální vyšší výkonovou variantu. Bude nutné vyřešit klíčové otázky, jako je nerovnoměrnost vlastností, spojování a vysoké náklady

Žáruvzdorné slitiny na bázi slitin vanadia nebo wolframu představují vyšší výkonovou variantu s vyšším rizikem. Vanadové slitiny jsou obzvláště atraktivní pro samo chlazený lithiový Blanket, ale nejsou považovány za životaschopné pro jiné koncepty Blanketu.

Keramické kompozity SiC / SiC nabízejí potenciál pro nejvyšší termodynamickou účinnost a nejlepší rezervy pro bezpečnost a zneškodňování odpadu.

Degradace materiálů v jaderné elektrárně stejně jako ve fúzní elektrárně je složitá kvůli širokému spektru materiálů, podmínkám prostředí a stresovým stavům. Více než 25 různých kovových slitin lze nalézt v primárních a sekundárních systémech dnešních lehkých vodních reaktorů a v betonové kontejnmentové nádobě, přístrojové a řídicí systémy, kabeláž, potrubí a další podpůrná zařízení.

Vývoj strukturálních materiálů pro energetické aplikace ve velkém měřítku je historicky dlouhý a nákladný proces, vzhledem k prodlouženému období vývoje nové slitiny, po kterém následuje ještě delší testovací a zkušební perioda k ověření výkonu materiálu v prototypových prostředích pro příslušné licenční úřady.

Základní výběr materiálů pro několik prvků ITER je charakterizován v tabulce 1 v dokumentu [22]. Tento příspěvek pojednává o hlavních směrech projektově orientované materiálové činnosti a hlavních výzvách souvisejících s výběrem materiálů pro komponenty ITER.

Oceli a slitiny

Tvorba vysoce stabilních nanoskopických „klastřů obohacených o Y, Ti a O“ z počátečních práškových slitin Y₂O₃ a Fe-Ti je umožněna ve slitinové feritické oceli. Tato ferritická ocel vyztužená nanokluzními vrstvami vykazovala velmi vysokou pevnost a dobrou lomovou houževnatost až na 120 K a nevykazovala prudkou degradaci lomové houževnatosti po ozáření neutrony na mírné dávky blízké 300 °C, které způsobily křehnutí v konvenční feritické / martenzitické oceli [9].

Byly vyvinuty čtyři feritické slitiny na bázi kompozice Fe-14Cr-3W-0.4Ti (nominální hmotnostní%) s převládající disperzí buď částic oxidu nebo nano-velikosti Y-, Ti-, O – bohatých klastrů nebo nanoklávů (NC). Výsledky ukázaly [10], že vysokoteplotní pevnost NC zpevněných slitin byla výrazně lepší než pevnost zesílených slitin oxidů.

Vysoce pevné srážecí kalené oceli s dostatečnou houževnatostí při lomu byly nedávno vyvinuty pečlivým řízením tvorby jemných „(Mo, Cr) 2C precipitátů“. Kritická pevnost v tahu, nad kterou je lomová houževnatost snížena na nízké hodnoty, je však v konvenčních ocelích přibližně 700 MPa, zatímco v ocelích zpevněných nanoklastry a v jemně měkkých (Mo, Cr)₂C ocelích je téměř 2000 MPa.

Je možné vyvinout slitiny s podstatně zlepšenými mechanickými vlastnostmi ve srovnání s běžnými slitinami vhodným použitím buď evoluční hutní metalurgie na bázi ingotů oceli, nebo alternativními způsoby zpracování, jako je například výroba práškovou metalurgií zpevněných ocelových disperzních ocelí. Při obou přístupech rozvoj tepelně stabilních vysoce hutných nanorozměrových center vytváří dobré mechanické vlastnosti materiálu [9].

Zpevněná slitina s 14YWT vykazuje také velmi dobrou stálost při vysokých teplotách a pevnost v tečení za tepla a prokázala dobrou odolnost proti nízkoteplotnímu křehnutí ozáření neutronů při předběžných ozařovacích testů s nízkými dávkami.

Vyspělé nano-strukturované feritické slitiny (NFA) obsahující vysokou hustotu ultra-jemných (2–5 nm) nano-klastrů obohacených o Y, Ti a O jsou považovány za slibné kandidáty na strukturální komponenty budoucích jaderných systémů [11]. Tento dokument shrnuje předběžné údaje o tahu a lomové houževnatosti pro pokročilé NFA označené 14YWT. Vynikající pevnosti v tahu NFA ve srovnání s konvenčními feritickými slitinami zesílenými disperzí oxidů jsou připisovány vysoké hustotě čísel NC, které mohou poskytovat účinná centra zachycení bodových defektů a transmutačních produktů produkovaných během ozařování neutronů. Slitina označená 14WT byla vyrobena za použití stejných výrobních parametrů jako při výrobě 14YWT, ale bez přidání Y₂O₃ během frézování kuliček vyžadovaného pro tvorbu NC, aby se kvantifikoval vliv NC na mechanické vlastnosti. Bylo zjištěno, že pevnost v tahu pro 14YWT je asi dvakrát větší než 14WT pro ozářené i neozářené podmínky.

Aplikace u fúzního reaktoru vyžadují oceli odolné proti poškození záření indukované ozáření vysokou energií neutronů (14MeV), jakož i ocel, která si zachovává dostatečnou tuhost a pevnost při teplotě zvýšené během provozu. V důsledku těchto požadavků byly vyvinuty nové oceli označené jako "redukované aktivační oceli". V podstatě byla snížena aktivace feritických / martenzitických ocelí nahrazením Mo v konvenčních ocelích Cr-Mo W a / nebo V a nahrazením Nb Tantalem. Zvláštní úsilí bylo vynaloženo na snížení vyhrazených prvků, důraz byl kladen především na odstranění Nb, protože jeho koncentrace v ocelích musí být <1 ppm (hmotnostně), aby splnila kritéria pro uložení nebo recyklaci.

V důsledku šetření prováděných na redukované aktivaci feritických / martenzitických ocelí byla specifikována a vyrobena primární kandidátská slitina 9CrWVTa, označená jako EUROFER'97, pro evropské koncepty Breeding Blanketu DEMO. Byla provedena metalurgická charakterizace [12] feritické / martenzitické redukované aktivační oceli Eurofer'97, v obdržném stavu a po tepelném stárnutí v teplotním rozmezí od 400 do 600°C po dobu do 10 000 hodin.

Koncepční návrhy Blanketu a heliem chlazeného Divertoru reaktoru DEMO vyžadují spojení redukčně aktivační oceli (například RUSFER EK-181, EUROFER atd.) a wolframu. V této práci [17] bylo dosaženo difúzního pájení oceli RUSFER EK 181 s wolframem pomocí mezivrstvy V-4Ti-4Cr. Byly použity rychlé kalené páskové pájecí slitiny na bázi mědi různých kompozic. Publikace představuje použití mezivrstvy V-4Ti-4Cr (hm.%) se svařovací slitinou Cu-50Ti (hm.%) a dvě Cu-Ge slitiny pro tvrdé pájení, které se používají ke spojení feritové martenzitické oceli RUSFER EK- 181 s slitinou V-4Ti-4Cr (hm.%).

Článek [13] shrnuje postupy měření při rozměrové kontrole a postup předběžné montáže kryostatu JT-60SA. Jedná se o vakuovou nádobu z nerezové oceli, která obklopuje tokamak a zajišťuje v prostředí podtlak. Má objem 1410 m³ a váží kolem 480 tun, sekce kryostatu váží asi 170 tun. Z funkčních důvodů byl kryostat rozdělen na tři velké sestavy: Kryostatickou základnu, cylindrickou sekci Kryostatického tělesa a Horní víko. Jeho obálka z materiálu SS304 bude sestavena při mechanickém spojení mezi jednotlivými sektory.

Záhlaví vyhrazeno pro redakci • Záhlaví vyhrazeno pro redakci • Záhlaví vyhrazeno pro redakci • Záhlaví vyhrazeno pro redakci • Záhlaví vyhrazeno pro redakci • Záhlaví vyhrazeno pro redakci •

Seznam materiálů v **tabulkách 3 až 5** byl vybrán z publikovaných prací v různém typu literatury a může sloužit především k obecné orientaci v použitých materiálech.

Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci • Zápatí vyhrazeno pro redakci •
Zde může být upoutávka na vaši firmu, stane-li se PATRONEM ČÍSLA, a její jméno bude na každé stránce!

Tabulka 3 Materiály určené k použití v EU DEMO – důležité nebo specifické

Materiál	Oblast použití nebo zóna	Podrobnosti [Literatura]
Nb3Sn/NbTi	Supravodič	vodič silového proudu pro toroidální pole [3][14]
SiC/SiC keramické kompozity	Obecně konstrukce	specifické části zařízení [9]
Keramické membrány: Alumina (Al ₂ O ₃), zirconia (ZrO ₂), titania (TiO ₂), silica (ZiO ₂)	Oddělení plazmu zlepšujících plynů (PEG) od vyčerpané plazmy.	[15]
Monoblok wolframu	Divertor, plodící Blanket (BB)	(DEMO 2015) 344 tun
Wolfram	Divertor	[1] Pancéřové dlaždice [22]
Kompozit z uhlíkových vláken (CFC)	Divertor	[5]
CFC (NB31 nebo ekvivalent)		Pancéřové dlaždice [22]
Skleněná epoxidová pryskyřice G10	Tepelný štít	Izolace [22]
Ag povlak	Tepelný štít	Povlak 5 μm (emisivita) [22]
Al ₂ O ₃ povlak	Blanket s podpěrou Tepelný štít	Izolace nanášená plazmou [22]
Čistá Cu	Vakuová nádoba a brány	Povlak [22]
NiAl bronz	VV nosník	Tyče
	Divertor	Desky, tyče
	Blanket a podpora	Desky
PTFE	VV nosník	Desky [22]
Beryllium (S-65C nebo ekvivalent)	První stěna (FW)	Pancéřové dlaždice [22]
	Plodící Blanket (BB)	(DEMO 2015) 1480 tun
Li ₄ SiO ₄	Plodící Blanket (BB)	(DEMO 2015) 3400 tun
CuCrZr	První stěna (FW)	Desky / odlitek / prášek vnitřku kanálu
	Blanket s podpěrou	Tabule
	Divertor	Trubice, Desky
		Chladič
		[22] [5] (DEMO 2015) 28,1 tun
CuNiBe; DS Cu Glidcop Al25	Blanket s podpěrou	Límeč [22]

Pro udržovaný výkon DEMO 1,5 GW byla studována [20] jaderná fuze. Simulace ukazuje cílové tepelné zatížení menší než 8 MW / m², které může být zvládnuto cílovým Divertorem typu jako ITER, tj. monoblokovým wolframovým standardem a chlazení vodou pomocí chladicí trubice ze Cu slitiny. Přestože je cílem Divertoru a Blanketu (BB) wolframový pancéřový materiál, o jeho rozprašování se v této presentované analýze neuvažuje.

Tabulka 4 Materiály určené k použití v EU DEMO – Slitiny

Materiál	Oblast použití nebo zóna	Podrobnosti [literatura]	
Alloy 718 (slitina)	Divertor	Desky	[22]
	Blanket s podpěrrou	Šrouby	
	VV nosník		
	Vakuová nádoba a brány		
	Tepelný štít		
Cu-slitina	Divertor	Chladicí trubice [5][20]	
feritické slitiny na bázi Fe, Cr, W, Ti	Obecně konstrukce	Specifické zařízení [9]	části
zesílená slitina pomocí 14YWT nanoklastru -	Obecná konstrukce pod neutronové záření		[11]
9CrWVTa alloy / EUROFER'97	Plodící Blanket (BB)		[12]
EUROFER	Návrhy Blanketu		[17]
	Vakuová nádoba, plodící Blanket		[21]
	Divertor a Plodící Blanket	DEMO (2015) 10100 tun	
Cu-Ge pájecí slitiny	Spojování oceli a wolframu	Mezivrstva [17]	
V-Ti-Cr mezivrstva	Spojování redukované aktivační oceli a wolframu	Mezivrstva [17]	
Ti-6Al-4V	Blanket s podpěrrou	Flexibilní podpěry	[22]
	Tepelný štít	Desky	
Žáruvzdorné slitiny na bázi vanadia	Obecně konstrukce	Slitiny vanadu jsou zvláště atraktivní pro samočinně chlazení systému lithiového Blanketu [9]	
Žáruvzdorné slitiny na bázi wolframu	Obecně konstrukce		[9]
Více než 25 různých kovových slitin	Materiály v betonové kontejnmentové nádobě, přístrojové a kontrolní systémy, kabeláž, zakopané potrubí a další podpůrná zařízení		[9]

Tabulka 5 Materiály určené k použití v EU DEMO – Ocel

Materiál	Oblast použití nebo zóna	Podrobnosti [Literatura]	
Ocel grade 660	Divertor	Desky, tyče	[22]
	VV nosník	Spojovací materiál	
	Vakuová nádoba a brány	Spojovací materiál, výkovky	
	Tepelný štít	Spojovací materiál	
Ocel 316L(N)-IG	Divertor	Desky, výkovky, trubice	[22]
	První stěna (FW)	Desky, trubice	
	Blanket s podpěrou	Desky, výkovky, trubky licí, prášek HIP	
	Vakuová nádoba a brány	Desky, výkovky, trubky	
	Kryostat		[21]
Ocel 316 (B8M)	Vakuová nádoba a brány	Šrouby [22]	
Ocel 304	VV nosník	Desky, tyče	[22]
	Vakuová nádoba a brány	Desky	
	VV nosník	Desky, tyče	
Ocel 304L	Tepelný štít	Desky, trubky [22]	
Austenitická ocel XM-19 (B8R) zpevněná dusíkem nerezová ocel	Vakuová nádoba a brány	Šrouby [22]	
Ocel XM-19	Divertor	Desky, výkovky [22]	
Ferritická Ocel 430	Vakuová nádoba a brány	Desky [22]	
Boridové oceli 304B7 a 304B4	Vakuová nádoba a brány	Desky [22]	
Nerezová ocel SS304	Obálka vakuové nádoby z nerezové oceli	Základna kryostatu, válcová část těla kryostatu a horní víko [13]	
Feritická/ martenzitická ocel s W a V	Obecně konstrukce	[9]	
Martenzitická ocel RUSFER EK-181	Návrhy Blanketu	[17]	
Vyztužené oceli s jemným měřítkem (Mo,Cr)2C	Oceli velmi vysoce zpevněné a vytvrzené srážením	Specifické části zařízení [9]	
Y, Ti (nebo TiO ₂) obohacena feritickou ocelí	Obecně konstrukce až do 300 °C	Bez degradace lomové houževnatosti po ozáření neutrony [9] [17]	
Ocel zesílená oxidovou disperzí	Obecně konstrukce	[9]	

Konstrukční materiály, které byly původně zvažovány, jsou Eurofer (vakuová nádoba, plodící reaktor) a oceli 316LN-IG (kryostat). Významné diagramy [21], které ukazují, které produkty ovládají aktivitu pro danou časovou a neutronovou energii, se používají na to, aby se materiály DEMO pokusily omezit dlouhodobé důsledky vzniku odpadu (např. produkce ^{63}Ni a ^{94}Nb v Euroferu). Složení materiálů bylo převzato z podkladů ITER Material Handbook.

Zirkonium a jeho slitiny mají některé velmi zajímavé vlastnosti [23]. Zirkonium má extrémně nízký průřez neutronu, což vede k poměru tvorby tritia (TBR), který je ve skutečnosti vyšší, než kdyby nebyl přítomen v První stěně (ΔTBR je pozitivní). Nízký Elastický Modul (E) a tepelná roztažnost (CTE) - vedou k nízkému vnitřnímu mechanickému namáhání a vynikající mechanické kompatibilitě s plasmě čelícímu pancíři na bázi wolframu. Dlouhou historii má také jeho použití ve vysoce radiačním prostředí jako obložení paliva v štěpných reaktorech. Jeho reakce na radiační poškození, přinejmenším na neutrony štěpného spektra, byla zkoumána a do určité míry existuje náležitě obohacená materiálová databáze vlastností. Problém se současnými standardními typy "Zircaloy" spočívá v tom, že nejsou určeny pro vysokoteplotní použití a jejich pevnost a odolnost proti tečení mohou být nedostatečné v podmínkách fúzního reaktoru. Potenciální výhody Zr však mohou vyžadovat hlubší šetření speciálních slitin, které zjevné problémy překonávají.

Keramika a kompozity

Jsou vyvíjeny [14] dvě rozložení vodičů silového toku jako kandidátské cívky toroidního pole (TF) DEMO. Provozní podmínky zahrnují provozní proud 82 kA a pole špičky 13,5 T, přičemž vodič DEMO TF má podstatně vyšší výkon v porovnání s ITER TF (68 kA / 11,5 T). Inovativní uspořádání navíjení je klasifikováno jako vrstva navinutá hybridizací Nb₃Sn / NbTi pro oba vodiče s cílem minimalizovat velikost a náklady na supravodič: jeden z vodičů je zavíjen a reaguje s kabelem v kabelovém vedení s redukovanou dutinou a má obdélníkový tvar. Druhý vodič je zareagovaný a ovinutý plochý kabel oddělený mědí a tlustým trubkovým vedením kompletovaný podélným svarem.

Použití pórovité keramické membrány pro oddělení PEG od plazmového výfuku uvádí článek [15]. Výfukem odváděná fúzní plazma se obvykle skládá z nespáleného paliva (deuteria a tritia), hélia a nečistot. Může být použito určité množství plazmového zesilovacího plynu (dusík, Ar, Ne atd.). Obnova těchto plynů pro zlepšení plazmy (PEG) by mohla být přínosná z důvodu vysokých potřebných průtoků a omezování zatížení na detritiačním systému výfukových plynů. Keramické membrány jsou obvykle ve formě oxidů kovů a mohou být porézní nebo hutné. Pórovité keramické membrány oddělují PEG pomocí mechanismů Knudsen / Poiseuille. S výhodou používané oxidy jsou oxid hlinitý (Al₂O₃), oxid zirkoničitý (ZrO₂), oxid titaničitý (TiO₂) a oxid křemičitý (SiO₂). Směsi těchto oxidů kovů se také často používají.

Kompozit s uhlíkovými vlákny (CFC) je referenční pancíř pro oblasti úderných bodů cílů. Wolfram byl vybrán pro všechny povrchy Divertoru, obrácené k plasmě, pro přepážkové oblasti cíle a pro povrch kopule. Při použití této kombinace pancířů u ITERu [16] se předpokládá, že doba eroze PFC (Plazmě čelící komponenty) splní cíl udržet 3 000 plných výbojů o délce 400 s, přičemž jeden z deseti výbojů končí narušením, kdy se odstraněné vrstvy (SOL) stanou plně připojenými cíli.

Několik úplných výměn divertorových PFC se předpokládá [18] po celou dobu životnosti ITERu, protože dochází k erozi pancířů a možná i kvůli změnám konfigurace Divertoru. Divertor je rozdělen na 54 kazet, 3 na jeden port. Každá kazeta je dlouhá 3,5 m, vysoká 2 metry a šířka 0,4 - 0,9 m a váží ~ 10,6 t. Každá kazeta je dlouhá 3,5 m, vysoká 2 metry a šířka 0,4 - 0,9 m a váží ~ 10,6 t. Výměna PFC se provádí mimo nádobu v horké komoře, kde bude renovace 54 kazet trvat asi půl roku.

Návrhy designu DEMO z pohledu materiálů

Je mnoho dokumentů, které se pokoušejí popsat vzhled, funkci a materiály budoucí fúzní elektrárny. Mnohé dokumenty jsou zpracovány z určitého úzce vymezeného pohledu, jiné jsou komplexní ale málo podrobné v oblasti, která nás zajímá. Některé plány a názory jsou jasně vymezené, ale většina návrhů ještě nemá definitivní podobu. Zatím ani nemůže být definitivní. Z hlediska recyklace a zpracování odpadů jsou nejdůležitější informace o použitých materiálech a technologiích, kterými jsou užité

materiály namáhány, poškozovány, přeměňovány apod. A to není definitivně ujasněno ani pro návrh EU DEMO. Stále probíhající celosvětový výzkum přináší nové a významné poznatky.

Postupně se vyvíjela koncepce Design DEMO [24]. V rámci koncepční studie evropské elektrárny (PPCS) byly vyvinuty čtyři "modely" elektráren na jadernou elektrárnu založené na koncepci tokamak. Dva z těchto modelů, A a B, byly vyvinuty s ohledem na omezené extrapolace jak ve fyzice, tak v technologii. PPCS model A je založen na pokrývce WCLL a na koncepci Divertoru chlazeného vodou. PPCS model B je založen na příkryvce HCPB a na koncepci potápěče chlazeného heliem. Pro každý z pokročilejších konceptů, modelů C a D, byl rozpracován pokročilý scénář fyziky a kombinován s pokročilými pojmy, které umožňují vyšší termodynamickou účinnost systémů pro přeměnu energie. Studie PPCS zdůraznila potřebu konkrétních projektů v oblasti designu a výzkumu a vývoje.

Dokument [25] popisuje návrh designu DEMO a přístup výzkumu a vývoje, který je v Evropě přijat, a předkládá některé z předběžných návrhů, které jsou předmětem hodnocení, stejně jako nejnaléhavější práce na výzkumu a vývoji, která by měla být zahájena v blízké budoucnosti. DEMO by mělo být schopno vyrobit více než 100 MW čisté elektřiny a pracovat se zavřeným palivovým cyklem do roku 2050. Výzkum a vývoj materiálů pro blízkou budoucnost DEMO je podrobněji diskutován jinde.

Jsou zde však naznačeny „Klíčové ovladače návrhu“

- Technologie pro plodící Blanket (množivou zónu) a chladivo
- Konfigurace a technologie návrhu rozbočovače (Divertoru)
- První stěna (FW) a integrace do Blanketu
- Cesta tepla a proudu (H & CD) pro DEMO
- Údržba na dálku
- Vyváženost elektrárny

V novějším článku [26] jsou dále diskutovány tzv „Klíčové ovladače“ a jsou zde uvedeny předběžné konstrukční parametry (EU DEMO 2015). Jde zejména o:

- $2000 \text{ MW}_{\text{th}} \sim 500 \text{ MW}_{\text{e}}$
- Impulzy > 2 h
- Jeden nulový vodou chlazený Divertor; PFC pancíř: Wolfram
- LTSC magnety Nb3Sn (třídění)
- B_{max} vodič $\sim 12 \text{ T}$
- EUROFER pro (B. Blanket) a AISI 316 pro VV
- Údržba: vertikální RH / rozdělovací kazety
- Životnost: startovací deka: 20 dpa (200 apm He); 2. Blanket 50 dpa; Divertor: 5 dpa (Cu)

Energetické neutrony produkované štěpením a fúzními reakcemi mají dostatečnou kinetickou energii, aby uvolnily z konstrukčních materiálů z jejich mřížových míst podstatnou část atomů v průběhu předpokládané životnosti reaktorů, čímž vznikly závady spojené s chybějícími atomy mřížky (uvolněnými místy) a uvolněnými atomy, které se nacházejí v meziprostorových mřížích (samo-intersticiální atomy, SIAs). Množství radičního poškození z těchto balistických kolizí je kvantifikováno v různých literaturách, z hlediska posunutí na atom, dpa. Úroveň škody 1 dpa odpovídá "stabilnímu" posunutí každého atomu z jeho mřížového místa [9]. Pro provozní teploty reaktoru je dostatečná tepelně aktivovaná difúze defektů indukovaných záření, aby se umožnila rekombinace mnoha volných míst a SIA, takže udržované poškození posunu je zlomek hodnoty dpa. Budoucí konstrukce reaktorů vyžadují strukturální materiály, které budou vystaveny škodlivým hodnotám nad 100 dpa. Výzvou je navrhnout procesy rekombinačních defektů "samo léčení" na strukturální materiály, které jsou efektivní $\sim 99,99 \%$.

Materiálový cyklus DEMO od návrhu k recyklaci

Popis cyklu je podán ve velmi zjednodušené podobě. Materiálový cyklus začíná návrhem materiálu pro DEMO zařízení. Mezistupněm jsou dílčí ověřování materiálů a jeho specifikací. Dalším stupněm cyklu je postavení zařízení a jeho uvedení do provozu s následným dlouhodobým provozováním. Následuje větší množství fází a stupňů materiálového cyklu, které souvisejí s provozem zařízení. Poslední stupeň cyklu je velmi časově vzdálený a souvisí s životností technologie. Jeho podstatou je kompletní likvidace a odstranění materiálů v daném prostoru a uvedení území provozování do žádaného stavu (hlediska environmentální a další).

Z hlediska odpadového hospodářství je prvním stupněm údržba zařízení. Ta zahrnuje nutné opravy a úpravy zařízení ještě před uvedením do trvalého provozu. V této chvíli vznikají první odpady. Jiné odpady vznikají v souvislosti s provozem zařízení a jsou už jeho přirozenou součástí. Tyto odpady ale také latentní odpady jsou obecně vytvářeny v systému lokálních technologií. Materiály jsou buď přímo vráceny zpět nebo jsou zachycovány například v různých typech filtrů. Analogicky, podobné odpady mohou být získány například při údržbě materiálů v různých kampaních. Zde jde zejména o prachy, které vznikly opotřebením konstrukčních materiálů.

U komplikovaných technologií jako je DEMO zařízení mohou být i různá opotřebení velmi rozmanitá. Jsou získávány důležité informace z provozu menších předchůdců (tokamaky, JET, ITER, Stellarátor). Podrobné návrhy dílčích a specializovaných částí zařízení s nimi ani nepočítaly jako s významnými. Určité zhoršení nebo opotřebení se projeví až po dlouhodobém provozování celku DEMO. Z tohoto pohledu škála odpadů bude velmi pestrá. Různé pohledy mohou být na likvidaci, uložení a recyklaci materiálů.

Z hlediska recyklace odpadů je velmi důležité vyhnout se nežádoucímu zlehčování problematiky. Z prostého nadhledu se problematika týká jen několika chemických prvků (W, Be, Fe, C) a izotopů (tritium, deuterium). Z hlediska objemu materiálu je to správné zjednodušení a přiblížení k problematice. Na druhé straně, z hlediska odpadového hospodářství a zejména recyklace, bude nutné uvažovat o většině chemických prvků použitých při konstrukci zařízení. To znamená, že půjde téměř o celou periodickou tabulku chemických prvků. Oba presentované přístupy mají své místo, ale nejsou ani dobré ani špatné.

Celé to komplikuje i to, že v některých případech si obecně nevystačíme jen chemickým prvkem, ale bude velmi důležitý spíše jeho určitý izotop [28]. Žádoucí izotop se získá frakcionací, což je specifická technologie, proces nebo metoda oddělování izotopů stejného prvku od sebe. Obecnými parametry pro hodnocení významu recyklace se mohou stát vzácnost materiálu, náklady procesů a postupů, životnost a periodičita obměny částí zařízení, ale i mnohé další nesourodé parametry [2]. Bude nutný určitý kompromisní přístup blízký systému ALARA, jehož parametry bude nutné vylepšovat, ale systém musí být jiný. Řešením může být specifická „**Databáze relevantních informací pro recyklaci**“.

Tato databáze by měla souviset i s bezpečnostními kódy, s tvorbou systému nejefektivnějších technologií (Best Effective Technic), s národními a mezinárodními předpisy o zacházení s odpady atd.

Množství prachu s tritiem

Původ limitů inventury prachu v ITER vychází z kontrolní strategie DST (období zdroje prachu) [32]. Limity na prach a inventář tritia jsou nedílnou součástí bezpečnostní skříně ITER a jsou stanoveny na 1 kg pro tritium, 1 000 kg pro mobilizovatelný prach, 11 kg (beryllium) a 76 kg (wolfram) pro prach na horkých površích. Očekává se, že výpal odstraní významnou část tritia společně uloženého na cílech Divertoru.

V základní strategii pro kontrolu a regeneraci prachu a tritia v ITER bylo množství vytvořeného prachu kvantifikováno na základě teoretických studií o interakcích plazmatické stěny při normálních i abnormálních událostech. Jako referenční experiment byla použita typická experimentální kampaň ITER, která trvá přibližně 2 roky, během nichž se plánuje 5000–7000 vypouštění.

Očekávaná zásoba prachu v takových podmínkách je 1 tuna / rok plného provozu DEMO. Jiné neobvyklé přechodné stavy (narušení, vertikální posuny elektronu neověřené vertikální posuny (VDE) a

(ELM) nepoznané lokalizované okrajové režimy) by měly mít velmi malou pravděpodobnost v DEMO a měly by jen nepatrně přispívat k celkovému inventáři W prachu [33]. Použitím aktualizované metodiky byla odhadnuta nová zdrojová doba ve vakuové nádobě (VV): 689–1389 kg pro DST a 671–4676 g pro TST. Tyto hodnoty se doporučuje použít pro posouzení bezpečnosti fúzního reaktoru.

Ukládání a uvolňování tritia

Ukládání a uvolňování tritia ve vrstvě wolframu je popisováno v článku [1]. Chování tritiového desorpce se liší teplotou expozice tritia. Chování desorpce tritia z vrstvy nanášení wolframu se lišilo teplotou vrstvy během procesu expozice tritia. Zahříváním při teplotě 500 ° C po dobu 1 hodiny se z vrstvy vystavené tritiu při 300 ° C desorbují 97,5% tritia. Na druhé straně zahříváním při 500 ° C po dobu 2 hodin se z vrstvy vystavené tritiu při 500 ° C desorbují pouze 44,6% tritia. Pro získání většiny tritia z vrstvy W a W substrátu je zapotřebí ohřev nad 700 ° C. Wolfram je kandidátským materiálem pro plazmovou složku, protože má nízký rozprašovací výtěžek, vysoký bod tání a nízkou rozpustnost pro izotop vodíku. Autoři citovali limitní teploty z v částech zařízení, jako je 95 °C na LHD, 118°C na KSTAR, 300 °C na TJ-60U, 240 °C na ITER první stěně a 350 °C na ITER Divertoru, kde přichází v úvahu kontaminace wolframu tritiem.

Výpočty a odhady množství odpadu

Velmi hrubý odhad množství vznikajícího wolframového prachu pro EU DEMO byl naznačen při jednání WP SAE [29]. Eroze wolframu během normální plazmatické operace byla odhadnuta s ohledem na konzervativní průměrnou míru eroze (0,1 mm / FPY) z povrchu Blanketu (BB) První stěny (1556 m²) a z hustoty wolframu (19,25 g / m³) na 3000 kg/FPY. Erodivané částice vytvoří depozitní, co-depoziční vrstvy a prach. Pro Divertor, na základě operace JET s wolframem jako plazmě čelícímu materiálu, se pozorovaný faktor převodu prachu pohybuje mezi 20 % a 4 %. To vede k míře tvorby prachu 600 resp. 120 kg / FPY.

Výpočet míry koroze ocelových slitin WCLL (vodou chlazené lithiové olovo) u DEMO je založen na informaci o velikosti smáčivého povrchu 588,6 m² a změřené korozní rychlosti 11,31 μm/ rok Vygenerované korozní produkty pro samostatný díl zařízení jsou 2240 kg za rok [30]. Účinkem čištění produktů ze slitin po několika cyklech jsou zaznamenány hlavní korozní produkty (Fe, Ni, Cr). Navíc čištění znamená i nutnost odstranění přítomných prvků produkujících relevantní radionuklidy (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Co, Mo). Tyto prvky rozšiřují škálu produktů směřujících mezi odpady.

Změny koncepce zařízení DEMO

V této době ještě není přesně známo budoucí a konečné řešení návrhu celé sestavy zařízení EU DEMO, dle kterého se bude EU DEMO stavět. Jsou známa pouze některá dílčí řešení, ověřené části zařízení a celek, ke kterému směřuje projekt. Z našeho pohledu je patrný zejména o odklon od uhlíku k berylliu [35] [34]. Dále jsou to změny tvarů a chemického složení v různých dílčích částech zařízení EU DEMO. Klíčovými konstrukčními materiály jsou nadále wolfram a různé specifické oceli. Konstrukční a výzkumné práce jsou cíleny na výhodnější supravodivé materiály pro odvod energie a výkonu.

Vliv změn koncepce DEMO na odpady

Nové úpravy designu znamenají změny materiálů, ze kterých má být zařízení EU DEMO postaveno, a ovlivňují množství, druhy a typy odpadů. V **tabulce 6** jsou odpady z provozu fúzního reaktoru specifikovány a jsou shrnuty aktuální informace o uvažovaných odpadech dle skupenství.

Desky z uhlíku, jak bylo užito u JET, budou nahrazeny bloky z beryllia a wolframu u EU DEMO. Měl by být sledován povrch materiálu. Napadený povrch by měl být ošetřován například otěrem nebo očištěním za vzniku prachů. K čištění se předpokládá užití organických rozpouštědel.

Jako příklad lze uvést zpracování oplachových a čistících proudů, koncentraci zachyceného prachu a odstranění organických filtrů a iontoměničů. Některé typy fúzních radioaktivních odpadů jsou podobné těm, které vznikají ve štěpných zařízeních, a spalování tohoto odpadu může být velmi účinné [19] [2].

Pevný produkt, radioaktivní a těžké kovy před procesem MSO (oxidační spalování v roztavené soli) se zachytí v roztavené soli. Proces je kontinuální.

Odpady způsobené provozem fúzního reaktoru

Způsoby zacházení s odpadními materiály z fúzních procesů jsou komplexní [31]. Dochází k jeho hodnocení podle toho, zda jde o krátkodobé nebo dlouhodobé opakované použití. Následně se hodnotí, zda je materiál vhodný k recyklaci nebo je ho nutné likvidovat tak, aby došlo ke snížení aktivity, nebezpečnosti odpadu a snížení množství. Může dojít i ke změně kategorizace odpadu.

Tabulka 6 Odpady z provozu fúzního reaktoru

Skupenství	Odpady	
Kapalné látky	Chladicí voda (v závislosti na modelu DEMO), voda používaná v plynných systémech snižování emisí, drenážní systém v kontaminovaných oblastech	
	Tritiová voda	Produkt přepracovávání
	Olejové kapaliny	
	Kapalné scintilační látky	Indikátory
	Čistící rozpouštědla a oplachové prostředky	
Plynné látky	Tritium vypouštěné zásobníkem,	
	Částice z vypouštění zásobníku	
	Potenciálně ¹⁴ C v závislosti na způsobech tavení	
Pevné látky	Aktivní produkty koroze (v závislosti na chladivu)	
	Kovy kontaminované ³ H	
	Materiál na výměnných pryskyřicích	
	Materiál na filtrech	
	Měkké odpady kontaminované ³ H – hadry, utěrky, oděvy	
	Meziprodukty úprav odpadů Soli, látky s nevhodným izotopy	Produkt přepracovávání

Shrnutí

V této době ještě není přesně známo budoucí a konečné řešení návrhu celé sestavy zařízení EU DEMO, dle kterého se bude EU DEMO stavět. Jsou známa pouze některá dílčí řešení, ověřené části zařízení a celek, ke kterému směřuje projekt. Došlo k velmi významným změnám materiálové koncepce zařízení. Z našeho pohledu je patrný zejména o odklon od uhlíku k beryliu.

Byl proveden přehled důležitých materiálů testovaných pro fúzní technologii zejména jako potenciálních odpadů. U mnohých vyjmenovaných konstrukčních materiálů se musí vyladit jejich vlastnosti. Ještě sice nemají své konkrétní místo v uvažovaném EU DEMO nebo jeho jiném upravovaném předchůdci, ale na základě prováděných testů se dostávají do užšího výběru.

Z prostého nadhledu se problematika odpadů z jaderné fúze týká jen několika chemických prvků (W, Be, Fe, C) a izotopů (tritium, deuterium), neboť z hlediska objemu (m^3) nebo hmotnosti (kg) představují většinu. Reálné zařízení si ke svému provozu vyžádá ještě další specifické materiály a komplexní přístup, jak je výše naznačeno. Optimální vyřešení problému může zahrnout téměř celou periodickou tabulky prvků.

Některé typy fúzních radioaktivních odpadů jsou podobné těm, které vznikají ve štěpných zařízeních. Spalování tohoto odpadu může být velmi účinné, když se využije všech možností technologie MSO.

Z hlediska recyklace odpadů je velmi důležité vyhnout se bezhlavému zjednodušení. Bude nutný určitý kompromisní přístup blízký systému ALARA, jehož parametry bude nutné vylepšovat, ale systém musí být jiný. Výsledkem by měla být specifická „Databáze relevantních informací pro recyklaci“.

Literatura

- [1] Noguchi M., Katayama K., Torikai Y., Ashikawa N., Taguchi A., Fukada S.: Measurement of tritium in tungsten deposition layer by imaging plate technique after exposure to gaseous tritium, Fusion Engineering and Design 124 (2017) 257-261
- [2] Stoklasa Jaroslav, Karásková Nenadálová Lucie: Způsobilost různých technik k detritiaci a recyklaci opotřebených částí fúzního reaktoru, Konference Odpadové fórum 2015, Hustopeče u Brna (CD) 038 (2015)
- [3] ITER (<https://www.iter.org/>) (cit. March 2018)
- [4] Barabash V., Federici G., Matera R., Raffray A.R., and ITER Home Team: Armour Materials for the IITER Plasma Facing Component, Physica Scripta Vo. T81 (1999) 74-83
- [5] Prachai Norajitra: Divertor Development for a Future Fusion Power Plant, KIT Scientific Publishing (2014)
- [6] ITER Plant Description Document, ITER Documents G A0 FDR 1 01-07-13 R1.0 (2001)
- [7] ITER Technical Basis, IAEA EDA Documentation No. 24, (2002)
- [8] Barabash V., Federici G., Matera R., Raffray A.R., and ITER Home Team: Armour Materials for the IITER Plasma Facing Component, Physica Scripta Vo. T81 (1999) 74-83
- [9] Zinkle, S.J., Busby, J.T.: Structural materials for fission & fusion energy, Materials Today (12) 11 (2009) 12-19
- [10] Hoelzer D.T., J. Bentley, Sokolov M.A., M.K. Miller, Odette G. R, Aligner M.J.: Influence of particle dispersions on the high-temperature strength of ferritic alloys, Journal of Nuclear Materials 367–370, Part A (2007) 166-172
- [11] McClintock D.A., Hoelzer D.T., Sokolov M.A., Nanstad R.K: Mechanical properties of neutron irradiated nanostructured ferritic alloy 14YWT, Journal of Nuclear Materials 386–388 (2009) 307-311
- [12] Fernández, P.; Lancha, A.M.; Lapeña, J.; Serrano, M.; Hernández-Mayoral, M.: Reduced Antivation Ferritic/Martensitic Steel Eurofer´97 as Possible Stuctural Material for Fusión Devices. Metallurgical Characterization on As Received. Condition and after Simulated Service Conditions. Informes Técnicos Ciemat 1048 (2004) 73 pp
- [13] Cabrera S., Medrano M., Alonso J., Botija J., Fernández P., Ramos F., Rincon E., Soletto A., Cardella A., Lo Bue A., Poncet L., Álvarez L., García Á., Masaki K., Shibama Y., Sakasai A.: Pre-

- assembly and dimensional inspection at factory of JT-60SA Cryostat Vessel Body Cylindrical Section, Fusion Engineering and Design 124 (2017) 537-541
- [14] Bruzzone P., Sedlak K., Stepanov B., Muzzi L., Turtu S., Anemona A., Harman J.: Design of Large Size, Force Flow Superconductors for DEMO TF Coils, IEEE Transactions on Applied Superconductivity (24) 3 (2014)
- [15] Silvano Tosti, Giacomo Bruni, Marco Incelli, Alessia Santucci: Ceramic membranes for processing plasma enhancement gases, Fusion Engineering and Design 124 (2017) 928-933
- [16] ITER Technical Basis, IAEA EDA Documentation No. 24, (2002)
- [17] Bachurina D., Suchkov A., Kalin B., Sevriukov O., Fedotov I., Dzharmaev P., Ivannikov A., Leont'eva-Smirnova E., Mozhanov M.: Joining of tungsten with low-activation ferritic–martensitic steel and vanadium alloys for demo reactor, In Press, Nuclear Materials and Energy (2018)
- [18] ITER Plant Description Document, ITER Documents G A0 FDR 1 01-07-13 R1.0 (2001)
- [19] Karásková Nenadálová Lucie, Stoklasa Jaroslav: Možnosti metod odstraňování tritia pro pevné odpady ve spojitosti s fúzí, Konference Odpadové fórum 2014, Hustopeče u Brna (CD) 249 (2014)
- [20] Hoshino K., Asakura N., Tokunaga S., Homma Y., Shimizu K., Sakamoto Y.: Physics design study of the divertor power handling in 8m class DEMO reactor, Fusion Engineering and Design 124 (2017) 352-355
- [21] Fernando Mota, José M. Gomez-Ros, Dave A. Coombs, Steven Lilley, Lee Packer: Establish materials composition limits for structural and functional materials for DEMO, EFDA_D_2L3B6A (December 2014)
- [22] Barabash V., The ITER International Team, Peacock A., Fabritsiev S., Kalinin G., Zinkle S., Rowcliffe A., Rensman J.-W., Tavassoli A.A., Marmy P., Karditsas P.J., Gillemot F., Akiba M.: Materials challenges for ITER – Current status and future activities, Journal of Nuclear Materials 367–370 (2007) 21–32
- [23] Thomas R. Barrett, G. Ellwood, G. Pérez, M. Kovari, M. Fursdon, F. Domptail, S. Kirk, S.C. McIntosh, S. Roberts, S. Zheng, L.V. Boccaccini, J.-H. You, C. Bachmann, J. Reiser, M. Rieth, E. Visca, G. Mazzone, F. Arbeiter and P.K. Domalapally: Progress in the Engineering Design and Assessment of the European DEMO First Wall and Divertor Plasma Facing Components, CCFE-PR (16)03 (2016)
- [24] Maisonnier, D., Cook, I. et al: The European power plant conceptual study, Fusion Engineering and Design 75-79 (2005) 1173-1179
- [25] Federici G., Kemp R., Ward D., Bachmann C., Franke T., Gonzalez S., Lowry C., Gadomska M., Harman J., Meszaros B., Morlock C., Romanelli F., Wenninger R.: Overview of EU DEMO design and R&D activities, Fusion Engineering and Design (89) 7–8 (2014) 882-889
- [26] Federici G., Bachmann C., Biel W., Boccaccini L., Cismonti F., Ciattaglia S., Coleman M., Day C., Diegele E., Franke T., Grattarola M., Hurlmeier H., Ibarra A., Loving A., Maviglia F., Meszaros B., Morlock C., Rieth M., Shannon M., Taylor N., Tran M.Q., You J.H., Wenninger R., Zani L.: Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO, Fusion Engineering and Design (109)111 (2016) 1464–1474
- [27] Federici G., Bachmann C., Barucca L., Biel W., Boccaccini L., R. Brown, Bustreo C., Ciattaglia S., Cismonti F., Coleman M., Corato V., Day C., Diegele E., Fischer U., Franke T., Gliss C., Ibarra A., Kembleton R., You J.H.: DEMO design activity in Europe: Progress and updates, Fusion Engineering and Design (136) Part A (November 2018) 729-741
- [28] Stoklasa Jaroslav, Karásková Nenadálová Lucie: Problematika recyklace odpadních materiálů ve spojitosti se zařízením pro jadernou fúzí, Konference Odpadové fórum 2017, Hustopeče u Brna (CD) 130 ISBN 978-80-85990-30-0 (2017) (9 s.)
- [29] Dario Carloni: Quantification of Source Terms for accidental Scenarios, WPSAE meeting Garching (January 2020)
- [30] Mauricio García, Juan Pablo Catalán: Assessment of the residual doses produced by activation of PbLi in DEMO reactor: implications for maintenance of systems, WPSAE meeting Garching (January 2020)
- [31] Stoklasa J., Galek V., Hadrava J.: Směry výzkumu odpadů v oblasti štěpné a fúzní energetiky, jejich charakteristiky a srovnání, Konference Odpadové fórum 2019, Hustopeče u Brna (FD) ISBN 978-80-85990-34-8 (2019) 122

- [32] Shimada M., Pitts R.A., Ciattaglia S., Carpentier S., Cho C.H., Dell Orco G., Hirai T., Kukushkin A., Lisgo S., Palmer J., Shu W., Veshchev E.: In-vessel dust and tritium control strategy in ITER, Journal of Nuclear Materials (438) Supplement (July 2013) S996-S1000
- [33] Guido Mazzini, Tadas Kaliatka, Maria Teresa Porfiri: Tritium and dust source term inventory evaluation issues in the European DEMO reactor concepts, Fusion Engineering and Design (146) Part A (2019) 510-513
- [34] Vizvary Z., Bourdel B., Garcia-Carrasco A., Lam N., Leipold F., Pitts R.A, Reichle R., Riccardo V., Rubel M., De Temmerman G., Thompso V., Widdowson A.: Engineering design and analysis of an ITER-like first mirror test assembly on JET, Fusion Engineering and Design.123 (2017) 1054-1057
- [35] Maisonnier, D., Cook, I. et al: The European power plant conceptual study, Fusion Engineering and Design 75-79 (2005) 1173-1179

Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108. C a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

The presented work was financially supported by the Ministry of Education, Youth and Sport Czech Republic - project LQ1603 Research for SUSEN. This work has been realized within the SUSEN Project (established in the framework of the European Regional Development Fund (ERDF) in project CZ.1.05/2.1.00/03.0108 and of the European Structural and Investment Funds (ESIF) in the project CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293).

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 under grant agreement No. 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.”

This work has been also supported by a grant no. MSMT-41274/2014-2 from the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic.

Nuclear Fusion and its Waste Materials

Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadállová, Ph.D., Centrum výzkumu Řež; e-mail: Jaroslav.Stoklasa@cvrez.cz; Lucie.Nenadalova@cvrez.cz

Summary

Emphasis is placed on the specificity of the radioactive waste generated during the operation of nuclear fusion research and development facilities. The basic parts of the plant and the types of waste that may be considered in terms of timeline are listed. Expected modifications of materials for recycling and disposal are indicated.

Keywords: *detritiation, Tokamak, EU DEMO, recycling, solid waste*