

Radioaktivní odpady vznikající během provozu fúzního zařízení

Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., jaroslav.stoklasa@cvrez.cz, Centrum výzkumu Řež s.r.o.,
Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadállová, Ph.D., lucie.nenadalova@cvrez.cz, Centrum
výzkumu Řež s.r.o.

Souhrn

Je sledován původ a tvorba odpadu z fúzních zařízení, včetně bezpečnostních předpisů a vývoje bezpečnostních kódů. Jsou specifikovány podmínky ovlivňující vznik odpadu v systémech Pb-16Li breeding blanketu, korozní chování materiálu a stabilizace povrchu vytvářením povlaku. Příkladem problematiky dekontaminace a nakládání s dekontaminačními jsou produkty ze systému Pb-16Li, jejich likvidace nebo recyklace a možnosti k snížení objemu radioaktivního odpadu.

Klíčová slova: lithium-olověný odpad, odpady z fúze, bezpečnostní kódy

1 Úvod

Práce navazuje a doplňuje informace o směrech výzkumu odpadů v oblasti štěpné a fúzní energetiky, jejich charakteristiky a srovnání již v minulosti prezentované [1] [2] [3]. Inventura pevných odpadů z fúzních zařízení ve zprávě [4] je doplněna o novou a specifickou oblast odpadů, která si vyžaduje řešení. Na základě literární rešerše a zkušeností ze zařízení používajících LiPb bylo analyzováno možné schéma nakládání s potrubím naplněným LiPb. Zaměřili jsme se na i na některé širší souvislosti s touto problematikou. Pokusili jsme se navázat na údaje popsané v GSSR sv. 11 - Hodnocení a strategie pro nakládání s odpady [9].

V úvodu připomínáme základní parametry pro práci s odpady souvisejí s řešením problematiky jednak predikce a předcházení narušením tokamaků, jednak s tvorbou bezpečnostních kódů, jednak s kritérii pro přijetí odpadu.

1.1 Predikce a předcházení narušením tokamaků

Výzkum v oblasti charakterizace a předpovídání narušení (DECAF) plně automatizuje analýzu dat z tokamaku za účelem určení řetězců událostí, které vedou k narušením, a pro předpověď jejich vývoje, což poskytuje dostatek času na zmírnění nebo úplné zamezení narušení [17]. Řetězce narušení související s nestabilitou jsou zkoumány s varováními vydávanými pro mnoho neobvyklých fyzikálních událostí, včetně limitů hustoty, dynamiky plazmatu, přechodů omezení a variací profilu. Příklady analýzy řetězce rušivých událostí ilustrují dynamiku včetně H-L zpětných přechodů pro rotující MHD a globální RWM (odporové stěnové módy) spouštějící události. Varování před narušením jsou vydávána s dostatečným předstihem před narušením, aby bylo možné potenciálně aktivně kontrolovat profil pro zamezení narušení, aktivně kontrolovat režim nebo zmírňovat následky.

Vytvoření depozičních lithiových povlaků na površích obrácených k plazmatu prokazuje, že tyto povlaky zvyšují omezení, snižují recyklaci a potlačují aktivitu ELM [14]. Obdobný výzkum je veden u tvorby povlaků v kontaktu s eutektickým LiPb. Takové povlaky se v současné době v návrhu DEMO nepředpokládají. Další testy související s Li se týkají základních vlastností keramického množivého materiálu na bázi oktalitního olovnatého oxidu v [7].

1.2 Kritéria pro přijetí odpadu

Většina zemí má specifická kritéria pro přijetí odpadu, obvykle daná zákonem. V současné době jsou důležitá pravidla zemí, kde budou provozovány velké tokamaky. Jde zejména o pravidla uložení nízkoaktivního odpadu (LLWR), platná pro UK a (CSA) platná pro Francii, která jsou zmíněna v [9]. Týkají se především: celkového limitu beta, gama a alfa, celkových limitů zásob klíčových radionuklidů. Vybrané radionuklidy relevantní pro fúzi omezují: ^3H , ^{14}C , ^{94}Nb , ^{63}Ni , ^{59}Ni , ^{60}Co , ^{93}Mo (in unit $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$).

1.3 Vývoj bezpečnostních kódů

List kódů v publikaci [13] obsahuje 26 položek v tabulce 1. Jsou stále vyvíjeny, neboť jejich parametry jsou důležité pro celý bezpečný provoz zařízení. Z těchto zde uvedených kódů jsou pro vznik odpadu relevantní a citované například kódy CQL3D (Kolizní/kvazilineární 3D kód) [25] a HEAT (Soubor nástrojů pro inženýrskou analýzu tepelných toků) [26].

Tabulka 1 Seznam bezpečnostních kódů související s fúzním zařízením

Ansyes CFX	A computational fluid dynamics code	Kód pro výpočetní dynamiku tekutin
CGYRO	A collisional, electromagnetic, multiscale gyrokinetic code	Kolizní, elektromagnetický, víceškálový gyrokinetický kód
CQL3D	Collisional/quasilinear 3D code	Kolizní/kvazilineární 3D kód
DECAF	Disruption event characterization and forecasting code	Kód pro charakterizaci a předpověď narušovacích událostí
DEGAS-2	A kinetic neutral transport code	Kód pro kinetický neutrální transport
EFIT	An equilibrium reconstruction code	Kód pro rekonstrukci rovnováhy
GENE	Gyrokinetic electromagnetic numerical experiment code	Kód pro gyrokinetický elektromagnetický numerický experiment
GENRAY	General ray-tracing code	Obecný kód pro sledování paprsků
GSevolve	A free boundary equilibrium code	Kód pro rovnováhu volných hranic
GTS	Gyrokinetic tokamak simulation code	Simulační kód pro gyrokinetický tokamak
HEAT	Heat flux engineering analysis toolkit	Soubor nástrojů pro inženýrskou analýzu tepelných toků
M3D-C1	Non-linear, 3D, resistive MHD code	Nelineární, 3D, resistivní MHD kód
MCGO	Monte Carlo guiding center orbit code	Kód pro Monte Carlo navádění vstupu na oběžnou dráhu
MMM	Multi-Mode-Model of anomalous transport	Multi-mode model anomálního transportu
NEO	A multi-species drift-kinetic solver	Řešitel driftové kinetiky pro více druhů
OMFIT	One modelling framework for integrated tasks	Jeden modelovací rámec pro integrované úlohy
ORBIT	A guiding center code	Kód pro navádění centra
PETRA-M	A 3D full-wave code	3D kód pro plnou vlnu
RBQ	Resonance-broadened quasilinear code	Kvazilineární kód s rezonančním rozšířením
SOLPS	A multi-fluid (ions, electrons, neutrals) edge modelling code	Kód pro modelování hran pro více tekutin (ionty, elektrony, neutrální látky)
TGLF	A gyro-Landau-fluid model code	Kód pro gyro-Landau-fluidní model
TGYRO	A parallel transport manager that combines TGLF and NEO	Paralelní manažer transportu, který kombinuje TGLF a NEO
TRANSP	A plasma transport code	Kód pro plazmový transport
UEDGE	A time-dependent 2D plasma fluid equation code	Časově závislý 2D kód pro rovnici plazmové tekutiny
Vorpal	An electromagnetic/plasma wave solver	Řešitel elektromagnetické/plazmové vlny
XGC	X-point included gyrokinetic code	Gyrokinetický kód se zahrnutými body X

1.3.1 Bezpečnostní předpisy pro podmínky s LiPb

V souvislosti se sledováním provozních podmínek u LiPb taveniny, včetně změn jejich parametrů, se musí brát v úvahu mnohé bezpečnostní kódy. Vývoj mnoha redukovaných modelů je popsán v článku [13].

Gyrokinetická teorie, ačkoli je vynikajícím přístupem k popisu mikroturbulentního transportu, je výpočetně náročná, takže redukované modely jsou klíčové pro dosažení predikcí profilů v reálném čase.

Například turbulentní a neoklasický transport tepla byl vypočítán pro NSTX pomocí řešiče s porovnáváním toku a predikuje experimentální profily teploty iontů a elektronů. Kromě transportu hlavních iontových druhů a elektronů je důležité porozumět také transportu nečistot a energetických iontů. Sledovaná stabilita chování systémů je podstatná.

1.3.2 Vývoj kódu OSCAR-LiPb pro fúzi

Kód OSCAR je simulační nástroj, jehož cílem je predikce transportu korozních produktů v jaderných okruzích. Lze jej použít pro různá chladiva. Příklad chlazení reaktorů vodou užívá aplikaci PWR a aplikaci OSCAR-Fusion, ale u sodíkem chlazených reaktorů je to aplikace OSCAR-Na. Cílem je nakonec vyvinout verzi kódu Oscar věnovanou chladivu LiPb pro fúzní reaktory [19]. Tato verze kódu Oscar by se mohla nazývat OSCAR-LiPb a odvozovala by se od OSCAR-Na. Jsou popsány hlavní modelovací aspekty kódu OSCAR-Na, zejména korozní model, a úpravy potřebné k vývoji korozního modelu Eurofer v LiPb pro OSCAR-LiPb.

2 Popis výsledků

2.1 Akceptace odpadu LiPb

LiPb představuje také náročný materiál z radiologického a toxikologického hlediska. Podle britského klasifikačního systému aktivita eutektika LiPb nedosáhne limitu pro nízkoaktivní odpad (LLW) až 300 let po provozu [9]. V kritériích přijatelnosti CSA je deklarovaný limit pro Pb^{205} , ale neexistuje odpovídající limit přijatelnosti. V tabulkách je poločas rozpadu pro Pb^{205T} uváděn 1.4×10^{17} roku [18]. Mez přijatelnosti pro Pb^{210} je 6.105 Bq/g. To může znamenat, že bude dále zváženo, zda CSA přijme radioaktivní odpad obsahující aktivitu izotopů olova.

Seznam dominantních nuklidů nad rámec kritérií pro odpady ve Spojeném království a Francii je uveden v tabulce 6 ve zprávě [38]. V kontextu LiPb (statika) má vnitřní plášť pro Spojené království limit H^3 , Nb^{93m} , Sn^{121} , Sn^{121m} , Tl^{204} ; a pro Francii je limit H^3 , Nb^{94} . Vnější plášť pro Spojené království má limit H^3 , Tl^{204} , Nb^{93m} , Sn^{121} , Sn^{121m} a pro Francii je limit H^3 , Nb^{94} , Ag^{108m} .

Eutektická slitina olova a lithia (LLE) je kandidátem na množivý materiál ve třech ze čtyř koncepcí plodícího blanketu (Breeding Blanket BB), které jsou v současné době v Evropě zkoumány pro DEMO [24].

2.2 Původ a tvorba odpadu

Původ odpadu lze rozdělit do několika základních typů. Zdrojem bývá vznikající provoz zařízení. Jindy jsou potenciální odpady přivedeny do systému se spotřebami nebo provozními surovinami hlavně (Pb, Li,). Původ příměsí lze dohledat zejména při těžbě, úpravě a dalším zušlechťování surovin. Zdrojem jsou také konstrukční a pomocné materiály. Protože se procuje v reálných podmínkách nejsou k dispozici ve velkém množství látky s absolutně nulovou koncentrací příměsí. Například průmyslově dodávané olovo může mít různé koncentraci příměsí ale i stopové množství většiny prvků, Produkt „čisté Pb“ podle výrobce může mít v příměsí vysokou variabilitou chemického i izotopového složení ale také i koncentrace. Proto jsou definovány limity kvality olova pro vstup do zařízení.

Zdrojem odpadů mohou být ochranné povlaky velmi namáhaných míst. Sice prodlužují odolnost materiálů, ale obvykle mají jen několikanásobnou životnost než například chráněná část trubky, ale ta životnost není nekonečná.

2.3 Potrubí naplněné LiPb a parametry testů

Návrh a integrace vodou chlazeného olovo-lithiového breeding blanketu EU-DEMO je v článku [21]. Na povrch FW směřující k plazmatu byla aplikována hodnota tepelného toku $0,32 \text{ MW/m}^2$, zatímco jaderný ohřev byl uvažován pro vodu, EUROFER a LiPb. Vstupní teplota vody byla uvažována $295 \text{ }^\circ\text{C}$. množivý LiPb byl konzervativně považován za pevnou látku, přičemž se zanedbával vztlak a jevy míchání, které by mohly zlepšit chladicí schopnost BZ. Navzdory vysokému tepelnému zatížení je spirálovitě tvarované uspořádání DWT zaručeno, že udrží teplotu EUROFER pod limitem $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Maximální teplota ($545,1 \text{ }^\circ\text{C}$) dosažena na radiálně-toroidní výztužné desce. Na vnější plochu wolframové vrstvy (tloušťka 2 mm) bylo aplikováno povrchové tepelné zatížení rovnající se $0,32 \text{ MW/m}^2$.

Odvod tepla v FW byl simulován s ohledem na vloženou konvekční okrajovou podmínku na povrchu čtyř čtvercových chladicích kanálů, nikoli na celém povrchu FW, což nepřiměřeně zvětšuje dostupný chladič.

Experimentální část aktivity může začít až po odplynění zařízení střídavým proplachováním argonem a vakuem, aby se odstranil kyslík rozpuštěný v potrubí a zabránilo se oxidaci LLE [23].

2.4. Podmínky ovlivňující vznik odpadu v LiPb

Informace ovlivňující vznik odpadu z EUROFER97 nebo jiných martenzitických ocelí působením tekutého olovo-lithiového eutektika jsou velmi roztržštěné a omezené. Největší část se zabývá rozpouštěním způsobeným kapalným kovem, zatímco údajů o vlivu na charakteristické mechanické vlastnosti oceli je málo, a ještě méně jich je pro současný vliv neutronového záření [30]. To je nezbytné pro aplikaci na termonukleární fúzi, stejně jako v případě magnetického udržení fúzního paliva, urychlení rozpouštění EUROFERu v přítomnosti magnetického pole.

Prokázalo se, že je vhodné znát eutektické složení LiPb slitiny. Měření byla provedena v dusíkové atmosféře od pokojové teploty do 700 °C, přičemž vrchol byl zaznamenán při přibližně 235 °C, což představuje endotermický přechod pro bod tání eutektické složky PbLi. Chemická analýza poté stanovila, že procento lithia je 14,7 at.% ± 1,99 %, což odpovídá rozmezí uvedenému pro eutektické složení [40] [41].

V literatuře v souvislosti s fúzí se obvykle píše o testovaném materiálu o složení Pb-16Li [39] [5] [6] [22]; nebo Pb-15.7Li [39]; nebo Pb-17Li [32] [27] [31] [32] [35]; nebo LLE (Eutektické) [28] [24] [23] [40] [41]. Byl hledán optimální poměr pro EU DEMO. Složení LiPb bylo aktualizováno na 15,7 %. viz zpráva [39].

Nejsou známy zprávy o tom, jak změna poměru Li a Pb ovlivňuje vlastnosti související s odpady.

2.4.1 Vznik He bublin

V článku [22] je prezentována podrobná analýza s využitím geometrií a podmínek HCLL, WCLL a DCLL. Helium je vedlejším produktem reakce tvorby tritia neutronovým bombardováním lithia. Byly odhadnuty lokální rychlosti produkce plynného helia. Je ukázán vliv průtoku Pb-16Li a celkového tlaku na nukleaci bublin. Množství plynu může být omezeno pouze kvůli bariéře nukleace bublin a v takovém případě bude roztok opouštět blanket v přesyceném stavu. Významné přesycení LiPb lze očekávat při průtocích až do 1000 kg/s.

Tok bublin může erodovat poškozený povrch kontaktní plochy trubice s tekutým LiPb. Projevuje se to a transportem produktů koroze do taveniny.

2.4.2 Působení neutronů na LiPb

Integrace nebezpečného potrubí DEMO do budovy tokamaku je popsána v článku [33]. V LiPb pocházejí zdroje gama záření z radionuklidů generovaných z olova a nečistot neutronovou aktivací uvnitř vakuové nádoby (VV) a ACP. Dávka záření v tomto systému je také funkcí doby provozu stroje. Některé z kapalinových systémů uvnitř budovy tokamaku jsou aktivovány, např. okruhy vodního chladiwa komponent uvnitř nádoby obsahujících aktivované produkty koroze (ACP), radioaktivní izotopy N16 a N17 generované neutronovým ozařováním kyslíku, jakož i lithium-olověný (LiPb) systém obsahující ACP a radioaktivní izotopy generované neutronovou aktivací slitiny LiPb.

Transport tritia byl modelován s využitím vstupních dat o rychlosti generování tritia a objemové depozici energie v práci [34]. Transportní analýza zahrnovala advekci-difuzi tritia do LiPb, přenos tritia z kapalného rozhraní směrem k oceli, difuzi tritia uvnitř oceli, přenos tritia z oceli směrem k chladiwu a advekci-difuzi dvouatomového tritia do chladiwa.

2.4.3 Proudění tekutého LiPb

Korozní chování martenzitické oceli DIN 1.4914 v proudící kapalině Pb-17Li bylo testováno v sérii testů o délce 3700 hodin [27]. Vzorky byly vystaveny tavenině o teplotě 550 °C proudící rychlostí 0,3 m/s ($R_c \sim 21 \times 10^3$). Z těchto údajů lze odhadnout roční úbytek materiálu asi 0,37 (mm/rok).

2.4.4 Opotřebení a korozní produkty

Větší množství prací píše o testech s proudící LiPb ve smyčkách, kde vznikají korozní produkty. Většina informací to jen konstatuje bez chemického, mineralogického a jiného rozboru nebo kvantifikace změn obalového materiálu.

2.4.5 Vliv magnetických polí na rozpouštění oceli

Cílem této práce [31] bylo teoretické a experimentální zkoumání vlivu magnetického pole na korozi oceli P91 vystavené proudícímu Pb-17Li při teplotě až 550 °C ve speciálně navržené smyčce. Působení proudícího Pb-17Li po dobu 1000 h při teplotě 550 °C v magnetickém poli 1,7 T ponechává tahové vlastnosti při pokojové teplotě pro 9 Cr martenzitickou ocel T91 z velké části nezměněné.

Je však třeba poznamenat, že nejen úbytek materiálu, ale také související přenos ocelových prvků do kapalného kovu, korozní přenos hmoty, nesmí překročit mezní hodnotu předem stanovenou pro danou aplikaci. Silná magnetická pole, která jsou typická pro magnetickou fúzi, obecně urychlují rozpouštění oceli [30].

Výsledky studie vlivu magnetického pole na korozi oceli EUROFER v tavenině Pb17Li při teplotě 550 °C byly publikovány v [32]. EUROFER je klasifikována jako ocel RAFM. Magnetické pole nejen obecně zvyšuje rychlost koroze, ale také vede k výskytu pravidelných vlnovitých vzorů (drážek) na korodujících površích kolmých k magnetickému poli, které jsou orientovány ve směru toku taveniny. Z experimentálních výsledků vyplývá, že procesy koroze, probíhající na površích vzorků EUROFER omývaných taveninou Pb17Li v magnetickém poli, jsou významně určeny orientací povrchů vzorků kolem směru magnetického pole. Rozpouštění EUROFERu je zřetelně rychlejší než vně magnetického pole.

2.5 Pevnost materiálů

Pevnost materiálů a její proměny významně ovlivňuje odolnost materiálů proti opotřebení. Při narušení kompaktnosti materiálu dochází snadněji ke korozi. Například se zvětší reakční povrch a dojde z tvorby dutin a pórů.

2.5.1 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu keramických materiálů vystavených Pb-16Li za zvýšených teplot je sledována v práci [6]. Vložky průtokových kanálů (FCI) jsou funkční komponenty navržené tak, aby minimalizovaly magnetohydrodynamický pokles tlaku a zároveň sloužily jako tepelná a tritiová bariéra. Ve zjednodušené konstrukci komponenty FCI je keramika přímo vystavena kontaktu s Pb-16Li při zvýšené teplotě. Nezpracovaný Al_2O_3 a SiSiC (křemík infiltrovaný karbid křemíku) byly podrobeny tříbodovému ohybu při pokojové teplotě a při 650 °C v argonu. Zatímco SiSiC nevykazoval žádnou změnu pevnosti v ohybu při obou teplotách, pevnost v ohybu Al_2O_3 se snižovala se zvýšením zkušební teploty. Některé vzorky jsou před mechanickým testováním v Pb-16Li předem vystaveny Pb-16Li po dobu 500 hodin při teplotě 450 °C. Testování předem exponovaných vzorků Al_2O_3 ukázalo podobné pevnosti v ohybu jako u neexponovaných vzorků. Analýza předem exponovaných testovaných vzorků odhalila poškození povrchu vlivem Pb-16Li pouze v případě SiSiC.

2.5.2 Tahové zkoušky

Vliv Pb-16Li na mechanické vlastnosti pro EUROFER97 je zmíněn v [30]. Tahové zkoušky při 250 nebo 400 °C v Pb-16Li nenaznačují ztrátu tažnosti u F82H-mod. nebo OPTIFER IVb, s výjimkou tepelně ovlivněné zóny u svařovaného materiálu při 250 °C.

2.5.3 Ztráta tažnosti

Vliv aplikovaného napětí na tažnost feriticko-martenzitické oceli s redukovanou aktivací (RAFM) během dlouhodobého vystavení proudícímu Pb-17Li v teplotním rozmezí 300–400 °C byl zkoumán pomocí tahových zkoušek. [35]. Je nalezena částečná ztráta tažnosti 9 Cr RAFM oceli CLF-1 zejména po 1500 h expozici proudícímu Pb-17Li při 400 °C, kdy bylo současně aplikováno statické mechanické napětí (250 MPa). Stárnutí pod napětím vede pouze k občasnému snížení pevnosti (500 h). V přítomnosti tekutého kovu při teplotách 300 a 350 °C je zachována tažnost. Při dostatečném pronikání kapalného Pb-17Li do trhlin dochází k poklesu povrchového napětí nově vzniklé lomové plochy vlivem

kapalného kovu v špičce trhliny. Režim lomu se změnil z rovnoměrného na nestabilní šíření trhlin, což vedlo ke snížení tažnosti.

3 Rozpouštění a rozptýlení korozních produktů v LiPb

Plodící blanket a smyčky LiPb budou vystaveny korozi vyvolané prouděním Pb-16Li rychlostí mezi 0,001 a 0,050 m/s v modulech rozmnožovací membrány a až 0,5 m/s uvnitř smyček LiPb. Rychlosti koroze za těchto podmínek jsou důkladně studovány [27], [28] [29] v dostupné literatuře.

3.1 Rozpustnost železa, chromu a molybdenu v Pb-16Li

Koncentrace nasycených prvků železa, chromu a molybdenu v Pb-16Li byla měřena [5] v teplotním rozsahu 300–550 °C. Rozpustnost těchto tří kovů byla pod 10 wppm. Koncentrace železa a molybdenu vykazují pouze slabou změnu s teplotou.

3.2 Koroze nerezové oceli v proudícím LiPb

Koroze oceli AISI 304 v proudícím lithno-olovnatém prostředí byla studována ve smyčce [28]. Prefabrikovaná slitina Pb-se 17 % Li, dodávaná v pevných tyčích, byla roztavena a užitá v trubkách smyčky z austenitické oceli AISI 316 Ti. Vnitřní topná tyč o výkonu 3 kW ohřívá tekutý kov na zkušební teplotu 420 °C, rychlost proudění je v rozmezí 10-20 cm/s. Vyhodnocují se korozní účinky po expozici až 5750 h. V eutektiku se nerozpouští měřitelné množství ocelových prvků. Předpokládá se, že úbytek hmotnosti ocelových vzorků narušuje tvorba povrchového krytu obsahujícího olovo.

3.3 Korozní chování austenitických ocelí v LiPb

Je velmi málo informací o korozi austenitických ocelí v LiPb. Lze předpokládat některé analogické chování v jiném olovnatém eutektiku za podobných fyzikálních podmínek.

Korozní chování austenitických ocelí 1.4571, 1.4970 a 316L bylo zkoumáno [29] v proudící kyslíkové řdicí LBE (eutektikum olova a vizmutu, 2 m/s, 10–7 hmot.% O) při 450 °C a 550 °C. Oceli prošly jak oxidací doprovázenou tvorbou tenkého ($\leq 0,5 \mu\text{m}$) oxidového filmu na bázi Cr, tak selektivním vyluhováním Ni a Cr, které vedlo k tvorbě vrstevnaté feritové zóny a hlubším lokálním poškozením s důlkovým vzhledem, obojím proniknutým Bi a Pb. Při 450 °C se úbytek kovu ocelí pohyboval od 4 do 27 μm po 8766 hodinách. Při 550 °C se recese kovu po 2011 hodinách pohybovala od 23 do 60 μm , což dobře koreluje s tloušťkou vytvořené feritové vrstvy. Úbytek materiálu koroze se zvyšuje s časem a teplotou za předpokladu, že obsah kyslíku je konstantní (10–7 hmot.%). Oxidový film na bázi Cr nemůže chránit austenitické oceli před selektivním vyluhováním.

Korozní chování austenitické oceli 316L v tekuté slitině lithia a olova za podmínek namáhání je popsáno v článku [42]. Koroze austenitické oceli 316L byla v kapalném LiPb při 573 K zanedbatelně malá bez ohledu na namáhání tahem. Koroze ale byla způsobena rozpouštěním legujících prvků (tj. Fe, Cr a Ni) na povrchu vzorků vystavených kapalnému LiPb při 773 K i bez namáhání tahem.

Byla provedena materiálově-vědecká studie plátování z austenitické CrNi oceli (oceli 0,04C16Cr11Ni3MoTi) po statických reaktorových zkouškách v kontaktu s eutektickou taveninou LiPb při teplotách 550 a 670 K [43]. Bylo zjištěno, že plasticita plátování se udržela na úrovni 15,6–25,8 % a koroze nepřekročila 0,16 mm/rok za standardních zkušebních režimů.

3.4 Korozní chování materiálu EUROFER97

Článek [30] hodnotí informace týkající se oceli EUROFER97 ale i jiných martenzitických ocelí ve vztahu k tekutému olovo-lithiovému eutektiku. Největší část se zabývá rozpouštěním způsobeným tekutým kovem, zatímco údaje o vlivu na charakteristické mechanické vlastnosti oceli jsou vzácné a ještě vzácnější pro současný vliv neutronového ozáření. To je třeba vzít v úvahu při aplikaci na termonukleární fúzi, stejně jako v případě magnetického omezení fúzního paliva urychlení rozpouštění EUROFER v přítomnosti magnetického pole. Degradace mechanických vlastností oceli způsobená tekutým kovem se projevuje ztrátou tažnosti, která vyžaduje inkubační dobu stejně jako proces rozpouštění bez mechanického zatížení materiálu.

3.5 Stabilizace a povlaky

Během koroze obalového materiálu se na jeho povrchu vytvářejí povlaky, jejichž vlastností lze výhodně využít. Některé povlaky jsou záměrně vytvořeny. Povlaky na bázi oxidu hlinitého jsou považovány za referenční bariéry díky své dobré chemické kompatibilitě se slitinou LiPb a své schopnosti snižovat pronikání [20]. Vzhledem k tomu, že extrakce tritia z vodního chladicího systému je náročnější a dražší než extrakce z eutektické slitiny LiPb, je nutné použít ochranný povlak na stěně pláště, aby se minimalizovala rychlost pronikání. Ochranný povlak navíc může zabránit korozi oceli EUROFER působením LiPb.

4 Dekontaminace

4.1 Potrubí v pevném stavu

Postupy pro zacházení s tímto materiálem jsou součástí výzkumů. Je třeba odděleně získat jak potrubí, protože jde o hodnotný a cenný materiál vhodný k recyklaci, tak LiPb, pro které platí totéž. Problémem je především kontaktní vrstva a korozní produkty u obou materiálů. Problematika je naznačena v předchozích kapitolách této zprávy.

Problémem, který se testuje je dekontaminace potrubí za účelem odstranění zbývající vrstvy

4.2 Odstraňování korozních produktů

Ve zprávě [16] byl proveden předběžný návrh systému určeného k odstraňování korozních produktů spolu se systémem odběru vzorků používaným k analýze chemického složení LiPb a ke kontrole koncentrace nečistot v tekutém kovu.

Referenční strategie pro čištění LiPb je založena na studených lapačích [16]. Princip studených lapačů spočívá v ochlazení LiPb a tím ve snížení rozpustnosti rozpuštěných prvků. Když koncentrace daného prvku překročí jeho rozpustnost, vysráží se a může být oddělen od proudu pomocí gravitační síly, odstředivé síly nebo může být odfiltrován. Studené lapače budou instalovány v obtoku každé smyčky LiPb. Vstupující LiPb poté prochází regenerativním výměníkem tepla a přídavným chladičem, aby dosáhl teploty 250 °C. Ochlazený LiPb je poté veden do sady dvou filtračních jednotek. Redundance je nezbytná pro zajištění nepřetržitého provozu systému i v případě ucpání jednotky. Stav každé jednotky je monitorován diferenciálním tlakovým převodníkem: když naměřené poklesy tlaku překročí prahovou hodnotu, je třeba filtrační jednotku vyčistit od zachycených nečistot. Po průchodu studenými pastí se LiPb znovu ohřívá v regenerativním výměníku tepla a ve vyhrazeném ohříváči, než se znovu dostane do hlavního okruhu.

První odhad doby vypouštění byl proveden s cílem lépe pochopit, zda gravitační vypouštění smyček a rozmnožovací vrstvy může být možností pro zmírnění následků některých náhodných přechodových jevů. Výpočet zohledňoval celý objem rozmnožovací vrstvy a smyček LiPb, zatímco pomocné systémy, jejichž návrh je zatím pouze koncepční, byly zvažovány pokusem o odhad velikosti na základě aktuálně dostupných dat. Veškerý LiPb je v současné době vypouštěn stejným potrubím, které nakonec dosáhne skladovací nádrže. Současný vnitřní průměr vypouštěcího potrubí je 133 mm, což znamená průtokovou plochu přibližně 0,014 m².

Doba potřebná k vypuštění veškerého LiPb do skladovací nádrže gravitací byla s tímto přístupem odhadnuta na přibližně 45 hodin. Stojí za zmínku, že mezi průtokovými plochami potrubí a ventilů a dobou potřebnou k vypuštění existuje v podstatě kvadratický vztah. Zvětšení průměru vypouštěcího potrubí na DN250 by proto zkrátilo celkovou dobu na přibližně 12 hodin.

Pro některé z hlavních komponent LiPb smyček byl proveden předběžný odhad četnosti údržby [16] jako první krok k vyhodnocení provozní radiační expozice (ORE). Pokud jde o čerpací systém, první údržba je nutná po 24 měsících provozu. V závislosti na opotřebením čerpadla by druhá údržba mohla být plánována po 30 nebo 36 měsících namísto 24 měsíců.

4.3 Nakládání s dekontaminačními produkty

4.3.1 Snížení množství radioaktivního odpadu

Uvolnění a třídění jsou způsoby, jak snížit množství radioaktivních materiálů, které bude nutné považovat za jaderný odpad. Kromě toho se recyklace a opětovné použití stanou nezbytnými i pro DEMO a budoucí fúzní elektrárny [36]. Bude nutné vyvinout realistické a ekonomické strategie, zejména pro vzácné a drahé materiály, jako je W nebo LiPb. Další problém k řešení připravit a odzkoušet všechno pro materiály představující velké zásoby (bioštit, magnet, ocel...), aby se nestaly ekologickou hrozbou.

Abychom motivovali integrální přístup k nakládání s radioaktivním odpadem, je nutné provádět předpisy pro recyklaci/uvolňování specifických pro fúzi a řízené programy výzkumu a vývoje [37]. Ve skutečnosti se mnoho identifikovaných problémů/potřeb překrývá s průmyslem štěpení, ale adaptace na fúzi je nezbytná z hlediska profilu radionuklidů, úrovně radiace, velikosti součástí, hmotnosti, tritiových materiálů atd. Je nutné zodpovědět mnoho otázek týkajících se segregace směsných aktivovaných materiálů, chemických procesů pro odstraňování škodlivých izotopů, nakládání s druhotným odpadem, očekávaných vlastností recyklovaných materiálů, výroby součástí s použitím radioaktivních materiálů jako surovin, radioaktivního hromadění v materiálech...

4.3.2 Očekávané odpady související s LiPb

Očekávané odpady, které souvisí s LiPb jsou znázorněny v Tabulce 2.

Tabulka 2 Předpokládané odpady související s LiPb

Koncept zařízení	Typ pevného odpadu	Kontaminace	Potenciální problémy
Koncept vodního chlazení olovo-lithiové směsi (WCLL) s množicím pláštěm	Tekutá kovová slitina LiPb (Li jako množivý materiál a Pb jako neutronový multiplikátor)	Tritium Aktivace nečistot vede k tvorbě ^{60}Co , ^{193}Pt Aktivace Pb vede k tvorbě ^{203}Hg , ^{210}Po	Radiotoxicita ^{210}Po
	Korozní produkty z povrchu trubek	Neaktivováno	Rozpuštěné nečistoty a nerozpuštěné shluky
	Aktivované korozní produkty z povrchu trubek	Aktivované izotopy neutrony, zářením	Rozpuštěné nečistoty a nerozpuštěné shluky
	Aktivované korozní produkty z povrchu trubek	Aktivováno tritiem	Tritium nepředstavuje problém pro konečné uložení (relativně krátký poločas rozpadu). Poznámka 1

Poznámka 1: Pokud je dominantním zdrojem velmi vysoké radioaktivity tritium, je vhodné ho z materiálu uvolnit, zachytit a recyklovat.

5 Likvidace nebo recyklace odpadu

Po období přechodného skladování je preferovaným scénářem pro materiál buď jeho recyklace, nebo jeho uložení do zařízení blízko povrchu.

Možnost odstranění některých dalších přítomných materiálů pomocí chemických separačních procesů z olova a LiPb bude záviset na účinnosti navrhovaných procesů zpracování, jako je chlorace, která dosud nebyla prokázána v průmyslovém měřítku.

Doporučuje se, aby byl jako úložiště použit mezisklad (pokud bude zvolena tato možnost), aby se ušetřily další náklady na výstavbu samostatného zařízení. V tomto případě by se k uložení a konečné likvidaci odpadu mohlo použít plně vybavené zařízení s výkopy vyloženými betonem a vyztuženými ocelí. Z výkopů by se mohly pomocí technik dálkové manipulace odstraňovat některé cennější materiály (W, LiPb) k recyklaci.

Jak bylo uvedeno ve zprávě [9], neočekává se, že obsah olova pocházejícího z olovnatého lithia bude recyklovatelný podle současných metod. To bude znamenat, že ozářené olovo bude muset být likvidováno buď v blízkosti povrchových nebo hlubinných geologických ložisech. Odhaduje se, že za 5 let plného výkonu EU DEMO bude potřeba zlikvidovat celkem asi 15 000 tun olova z konceptů plodícího blanketu.

6 Závěry

V této fázi se zvažují následující aspekty s cílem předvídat a usnadnit nakládání s odpady, zejména s ohledem na odpady, které by vyžadovaly hlubinné konečné ukládání. Jsou vyvíjeny nové materiály, nové technologie a postupy, které často jen laboratorně odzkoušeny. Ve větší objemu nebo dlouhodobě nejsou plně odzkoušeny. Proto lze námi prezentované výsledky brát jen jako pokus o orientaci v problematice.

Perspektivní postupy směřují k omezení u zdroje výběrem materiálů a nečistot omezujících množství a toxicitu odpadů, charakterizace toků, vývoj procesů ke snížení radiotoxicity a množství odpadů, definice způsobů nakládání a dočasné skladování odpadů.

Nové postupy budou zahrnovat analýzu možného třídění a recyklace, které mohou výrazně snížit celkový objem odpadu.

Acknowledgement

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

Implementation of activities described in the Roadmap to Fusion during Horizon Europe through a joint programme of the members of the EUROfusion consortium has been also supported by the Ministry of Education, Youth and Sports (MEYS) of the Czech Republic project number 9D22001.

Reference

- [1] Stoklasa J., Galek V., Hadrava J.: Směry výzkumu odpadů v oblasti štěpné a fúzní energetiky, jejich charakteristiky a srovnání, Konference Odpadové fórum 21.3.2019, Hustopeče u Brna 19.-21.3.2019 ISBN 978-80-85990-34-8 (FD) 122 (2019)
- [2] Stoklasa J., Karásková – Nenadálová L.: Jaderná fúze a její odpadní materiály, Konference Odpadové fórum 2020/2021, Hustopeče u Brna ISBN 978-80-85990-36-2, Sborník 140 (2020)
- [3] Stoklasa J., Karásková – Nenadálová L.: Dust generation in fusion facilities and recycling of these valuable wastes/Tvorba prachů v zařízení pro jadernou fúzi a recyklace těchto cenných odpadů 49th International Conference of SSCHE, May 15–18, 2023, Tatranské Matliare, Slovakia, Sborník (FD) 582 (2023)

- [4] Stoklasa J., Karásková – Nenadálová L: Solid waste masses assessments and processing methods for solid waste from current DEMO design (2023), SAE.S-05.02-T001-D005, EFDA_D_2QNL6A, Eurofusion (2024). <https://idm.euro-fusion.org/default.aspx?uid=2QNL6A>
- [5] Adéla Gottfriedová, Michal Kordač, Jaroslav Kekrt, Alena Michalcová, Marek Martinec, Ladislav Vála: Solubility of Iron, Chromium and Molybdenum in Pb-16Li, Fusion Engineering and Design 202 (2024) 114366. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114366>
- [6] Roman Petráš, Michal Chocholoušek, Jana Zavitkovská, Ester Duchková, Jaroslav Kekrt, María González Viada, Michal Kordač, Ladislav Vála: Flexural strength of ceramic materials exposed to Pb-16Li at elevated temperatures, Fusion Engineering and Design 204 (2024) 114513. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114513>
- [7] Andrew W. Davies, Samuel T. Murphy: Fundamental properties of octalithium plumbate ceramic breeder material, Journal of Nuclear Materials 552 (2021) 152982. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152982>
- [8] M. Malo, I. Peñalva, M. Roldán, M. Urrestizala, J. Azkurreta, B. Garcinuño, D. Rapisarda: Hydrogen isotope transport parameters in materials for tritium extraction systems. Focus on the low pressure, Journal of Nuclear Materials 598 (September 2024) 155142. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155142>
- [9] James Bromley: GSSR Vol. 11 - Assessment and strategies for waste management, EFDA_D_2P2992, Eurofusion (2024). <https://idm.euro-fusion.org/default.aspx?uid=2P2992>
- [10] F.A. Hernández, P. Pereslavlsev: First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors, Fusion Engineering and Design 137 (December 2018) 243-256. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.09.014>
- [11] G. Federici, et al.: Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO, Fusion Eng. Des., 109-111 (2016) 1464-1474
- [12] P. Arena, A. Del Nevo, M. Eboli, B. Gonfiotti, P. Maccari, R. Marinari, A. Tincani, N. Badodi, G. Bongiovi, I. Catanzaro: W-HYDRA: a new experimental platform for the Water-Cooled Lead Lithium Breeding Blanket, International Atomic Energy Agency, Nuclear Fusion64 (2024) 076043; <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad50e9>
- [13] J.W. Berkery, P.O. Adebayo-Ige, H. Al Khawaldeh, G. Avdeeva, S-G. Baek, S. Banerjee, K. Barada, D.J. Battaglia, R.E. Bell, E. Bell: NSTX-U research advancing the physics of spherical tokamaks, International Atomic Energy Agency, Nuclear Fusion 64 (2024) 112004; <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad3092>
- [14] R. Maingi, D.P. Boyle, J.M. Canik, S.M. Kaye, C.H. Skinner, J.P. Allain, M.G. Bell, R.E. Bell, S.P. Gerhardt, T.K. Gray: The effect of progressively increasing lithium coatings on plasma discharge characteristics, transport, edge profiles and ELM stability in the National Spherical Torus Experiment, International Atomic Energy Agency, Nuclear Fusion 52 (2012) 083001; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/52/8/083001>
- [15] G. Caruso, S. Ciattaglia, B. Colling, L. Di Pace, D.N. Dongiovanni, M. D'Onorio, M. Garcia, X.Z. Jin, J. Johnston, D. Leichtle, T. Pinna, M.T. Porfiri, W. Raskob, N. Taylor, N. Terranova, R. Vale, all contributors to the WPSAE: DEMO – The main achievements of the Pre – Concept phase of the safety and environmental work package and the development of the GSSR, Fusion Engineering and Design 176 (2022) 113025; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113025>
- [16] Marco Utili, Matti Oron-Carl, Tamara Mitrovic: Progress report related to the development of TER WCLL architecture 2021, BB-S.02.04-T001-D001, EUROfusion (2022) [EFDA D 2QAU6R](https://www.euro-fusion.org/EFDA_D_2QAU6R)
- [17] S. A. Sabbagh, J. W. Berkery , Y. S. Park , J. Butt , J. D. Riquezes , J. G. Bak , R. E. Bell , L.

Delgado-Aparicio, S. P. Gerhardt, C. J. Ham; J. Hollocombe, J. W. Lee, J. Kim, A. Kirk, J. Ko, W. H. Ko, L. Kogan, B. P. LeBlanc, J. H. Lee, A. Thornton, S. W. Yoon: Disruption event characterization and forecasting in tokamaks, *Physics of Plasmas* (30) 3 (2023) 032506, <https://doi.org/10.1063/5.0133825>

- [18] Lead Isotopes - List and Properties. <https://chemlin.org/chemical-elements/lead-isotopes.php>
- [19] Cherpin Chloé, Terranova Nicholas: Definition of a corrosion model in PbLi for OSCAR, *SAE-T.03.02-T002 (2024)* EFDA_D_2RKZ75
- [20] Marco Utili, Serena Bassini, Sebastiano Cataldo, Fabio Di Fonzo, Michal Kordac, Teresa Hernandez, Klara Kunzova, Julia Lorenz, Daniele Martelli, Boris Padino, Alejandro Moroño, Mariano Tarantino, Carsten Schroer, Gandolfo Alessandro Spagnuolo, Ladislav Vala, Matteo anazzi, Alessandro Venturini: Development of anti-permeation and corrosion barrier coatings for the WCLL breeding blanket of the European DEMO, *Fusion Engineering and Design* 170 (September 2021) 112453. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112453>
- [21] P. Arena, G. Bongiovè, I. Catanzaro, C. Ciurluini, A. Collaku, A.D. Nevo, P.A.D.Maio, M. D'Onorio, F. Giannetti, V. Imbriani, P. Maccari, L. Melchiorri, F. Moro, R. Mozzillo, S. Noce, L. Savoldi, S. Siriano, A. Tassone, M. Utili, Design and integration of the EU-DEMO water-cooled lead lithium breeding blanket, *Energies* 16 (2023) 2069. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/2069>
- [22] Kordač, M.; Košek, L.: Helium bubble formation in Pb-16Li within the Breeding Blanket, *Fusion Engineering and Design* 124 (November 2017) 700-704, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.100>
- [23] Alessandro Venturini, Francesca Papa, Marco Utili, Nicola Forgione: Experimental Qualification of New Instrumentation for Lead-Lithium Eutectic in IELLLO Facility, *Fusion Engineering and Design* 156 (July 2020) 111683, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111683>
- [24] G. Federici, L. Boccaccini, F. Cismondi, M. Gasparotto, Y. Poitevin, I. Ricapito: An overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of the DEMO design effort, *Fusion Engineering and Design*, 141 (2019), pp. 30-42, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.141>
- [25] Harvey R. and McCoy M.: The CQL3D Fokker–Planck code, *IAEA TCM, Montreal* (1992), <https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=24031480>
- [26] Looby T., Reinke M., Wingen A., Menard J., Gerhardt S., Gray T., Donovan D., Unterberg E., Klabacha J. and Messineo M. 2022 *Fusion Sci. Technol.* 78 10–27
- [27] H.U. Borgstedt, G. Drechsler, G. Frees, Z. Perić: Corrosion testing of steel X 18 CrMoVNb 12 1 (1.4914) in a Pb-17Li pumped loop, *Journal of Nuclear Materials* (155–157) 2 (1988) 728-731, [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90404-7](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90404-7)
- [28] H.U. Borgstedt, G. Frees, G. Drechsler: Corrosion of stainless steel in flowing PbLi eutectic, *Journal of Nuclear Materials* (141–143) 2 (1986) 561-565, [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(86\)90054-1](https://doi.org/10.1016/0022-3115(86)90054-1)
- [29] V. Tsisar, C. Schroer, O. Wedemeyer, A. Skrypnik, J. Konys: Corrosion behavior of austenitic steels 1.4970, 316L and 1.4571 in flowing LBE at 450 and 550 °C with 10⁻⁷ mass% dissolved oxygen, *Journal of Nuclear Materials* (454) 1-3 (2014) 332-342, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.08.024>
- [30] K. Khanchych, C. Schroer: Compatibility of EUROFER97 and lead–lithium eutectic, *Nuclear Materials and Energy* 37 (2023) 101527, <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101527>
- [31] E. Platacis, et al. Investigation of the Li-Pb flow corrosion attack on the surface of P91 steel in the presence of magnetic field, *Magnetohydrodynamics*, 48 (2012), pp. 343-350, <https://mhd.sal.lv/contents/2012/2/MG.48.2.12.R.html>

- [32] R. Krishbergs, et al.: Experimental studies of the strong magnetic field action of the corrosion of RAFM steels in Pb17Li melt flows, *Magnetohydrodynamics* (45) 2 (2009) 289-296, <https://mhd.sal.lv/contents/2009/2/MG.45.2.20.R.html>
- [33] C. Gliss, C. Bachmann, S. Ciattaglia, M. García, G. Federici, M. Koerber, I. Moscato, F. Riedl, I. Palermo, M. Utili: Integration of DEMO hazard piping into the tokamak building, *Fusion Engineering and Design* 168 (July 2021) 112415, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112415>
- [34] Luigi Candido, Ciro Alberghi, Fabio Moro, Simone Noce, Raffaella Testoni, Marco Utili, Massimo Zucchetti: A novel approach to the study of magnetohydrodynamic effect on tritium transport in WCLL breeding blanket of DEMO, *Fusion Engineering and Design* 167 (June 2021) 112334, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112334>
- [35] Zhenchao Sun, Xiujie Zhang, Yao Zhao, Hongbin Liao, Lei Wang, Haiying Fu, Jianbao Wang, Xiaoyu Wang, Xinting Lv, Pengyuan Li: Effect of applied stress on the ductility of RAFM steel during long-term exposure in flowing Pb-17Li, *Fusion Engineering and Design* 192 (2023) 113640, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113640>
- [36] S. Rosanvallon, P. Kanth, J. Elbez-Uzan: Waste management strategy for EU DEMO: Status, challenges and perspectives, *Fusion Engineering and Design* 202 (May 2024) 114307, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114307>
- [37] L. El-Guebaly: Integral management strategy for fusion radwaste: recycling and clearance, avoiding land-based disposal, *J. Fusion Energy* 42 (2023) 11, <https://doi.org/10.1007/s10894-023-00351-1>
- [38] Kanth Priti: DEMO waste assessments – Dominant nuclide and mitigation techniques study (2024) <https://idm.euro-fusion.org/default.aspx?uid=2RCM3B>
- [39] Jordi Abella, Matti Oron-Carl, Tamara Mitrovic: BB-TBM - T.02.01-T001-D005, Production and characterization of Pb-16Li alloy (production trial) in TBM (2023) <https://idm.euro-fusion.org/default.aspx?uid=2QL6FH>
- [40] Igor Peñalva, María Urrestizala, Jon Azkurreta, Natalia Alegría, Marta Malo, Belit Garcinuño, Julián Patiño, David Rapisarda: Experimental determination of the solubility of hydrogen in a quality certified eutectic PbLi alloy, *Fusion Engineering and Design* 199 (February 2024) 114136, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114136>
- [41] E. Mas de les Valls, L.A. Sedano, L. Batet, I. Ricipito, A. Aiello, O. Gastaldi, F. Gabriel: Lead-lithium eutectic material database for nuclear fusion technology, *Journal of Nuclear Materials* (376) 3 (2008), 353-357, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.016>
- [42] Masatoshi Kondo, Yota Koike, Kenshi Ohno, Kaoru Omiya, Minho Oh, Naoko Oono-Hori: Corrosion behavior of 316L austenitic steel in liquid lithium lead alloy under stress loading conditions, *Fusion Engineering and Design* 216 (July 2025) 115115 (in press) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.115115>
- [43] V.E. Kalachikov, A.V. Kozlov, L.P. Sinelnikov, A.P. Zyrianov, V.Ya. Abramov, G.M. Kalinin, A.V. Sidorenkov: An interaction of austenitic CrNi steel cladding with LiPb eutectic after In-reactor tests at temperatures 550 and 670 K, *Journal of Nuclear Materials Volumes* (233–237) Part 2 (1996) 1364-1366, [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00308-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00308-X)

Radioactive waste generated during the operation of fusion facilities

Jaroslav Stoklasa, Lucie Karásková Nenadálová

Abstract

The origin and formation of waste from fusion facilities is monitored, including safety regulations and the development of safety codes. Conditions affecting waste generation in Pb-16Li breeding blanket systems, material corrosion behaviour and surface stabilization through coating formation are specified. An example of the issue of decontamination and decontamination waste management are products from the Pb-16Li system, their disposal or recycling, and possibilities for reducing the volume of radioactive waste.

Keywords: *Lithium-Lead waste, fusion waste, security codes*