Radioaktivní odpady vznikající během provozu fúzního zařízení

Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D.
Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadálová, Ph.D.

TVIP Odpadové fórum 2026, Hustopeče, 21.4. - 23.4.2026

CVŘ | Centrum výzkumu Řež

Skupina ÚJV
LIDÉ | INOVACE | TECHNOLOGIE

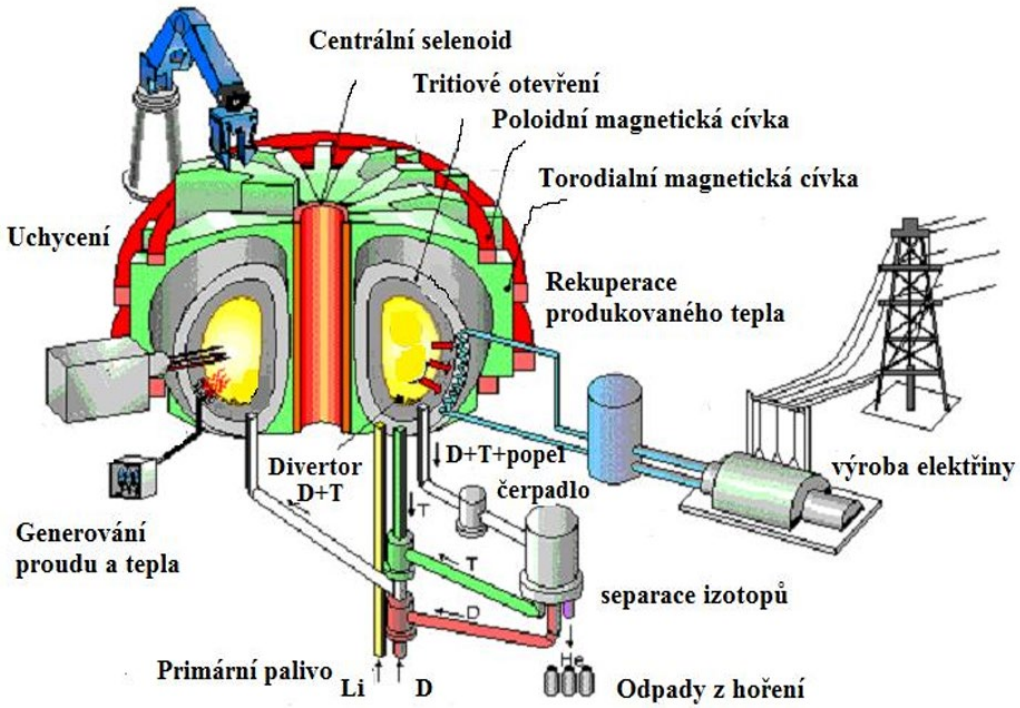
Základní druhy odpadů z fúze a jejich zdroje

Široká škála materiálů užitých v různých místech fúzního zařízení

Nejvýznamnější jsou konstrukční materiály obsahující wolfram (žáruvzdorné slitiny na bázi W, feritické slitiny na bázi Fe, Cr, W a Ti), a dále specifické oceli a různé slitiny (EUROFER, SiSiC).

Materiály mají rozmanité chemické složeni a rozměry. Jsou potenciálními zdroji tvorby prachu.

Radionuklidy relevantní pro fúzi jsou ^{3}H, ^{14}C, ^{94}Nb, ^{63}Ni, ^{59}Ni, ^{60}Co a ^{93}Mo.



Klasifikace odpadů

Klasifikace odpadů IAEA

- velmi krátkodobý odpad bude nebezpečný po dobu několika let,
- velmi nízkoaktivní odpad se rozloží na úroveň pro uvolňování během století,
- nízkoaktivní odpad vyžaduje kontejnment (ochranná konstrukce) po dobu přibližně 3–5 století,
- středněaktivní odpad by měl být pod kontrolou po dobu desítek tisíc let,
- vysoce aktivní odpad by měl být izolován od životního prostředí po dobu milionů let.

Problematika prevence, předpovídání poruch a sporných otázek

Predikce a předcházení narušením tokamaků (DECAF) plně automatizuje analýzu dat

Kritéria pro přijetí odpadu

Jde zejména o pravidla uložiště nízkoaktivního odpadu (LLWR)
celkového limitu beta, gama a alfa, celkových limitů zásob klíčových radionuklidů.
Vybrané radionuklidy relevantní pro fúzi omezují: ^{3}H ,^{14}C ,^{94}Nb,^{63}Ni,^{59}Ni,^{60}Co,^{93}Mo (jednotky $Bq \cdot g^{-1)}$

Akceptace odpadu LiPb

Mez přijatelnosti pro Pb^{210} je 6.105 Bq/g.

Vývoj kódu OSCAR-LiPb pro fúzi

Bezpečnostní kódy související s fúzním zařízením

Zkratka	Oblast užití kódu
Ansys CFX	Kód pro výpočetní dynamiku tekutin
CGYRO	Kolizní, elektromagnetický, víceškálový gyrokinetický kód
CQL3D	Kolizní/kvazilineární 3D kód
DECAF	Kód pro charakterizaci a předpověď narušovacích událostí
DEGAS-2	Kód pro kinetický neutrální transport
EFIT	Kód pro rekonstrukci rovnováhy
GENE	Kód pro gyrokinetický elektromagnetický numerický experiment
GENRAY	Obecný kód pro sledování paprsků
GSevolve	Kód pro rovnováhu volných hranic
GTS	Simulační kód pro gyrokinetický tokamak
HEAT	Soubor nástrojů pro inženýrskou analýzu tepelných toků
M3D-C1	Nelineární, 3D, resistentní MHD kód
MCGO	Kód pro Monte Carlo navádění vstupu na oběžnou dráhu

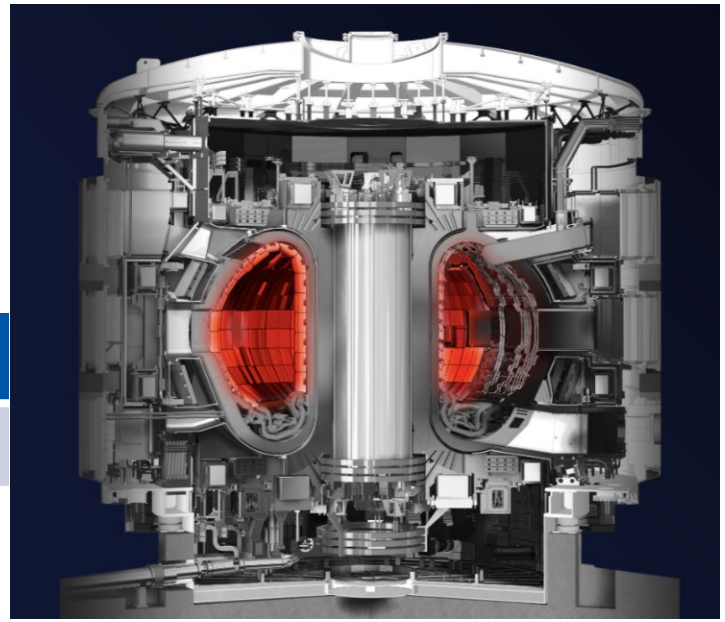
Zkratka	Oblast užití kódu
MCGO	Kód pro Monte Carlo navádění vstupu na oběžnou dráhu
MMM	Multi-mode model anomálního transportu
NEO	Řešitel driftové kinetiky pro více druhů
OMFIT	Jeden modelovací rámec pro integrované úlohy
ORBIT	Kód pro navádění centra
PETRA-M	3D kód pro plnou vlnu
RBQ	Kvazilineární kód s rezonančním rozšířením
SOLPS	Kód pro modelování hran pro více tekutin (ionty, elektrony, neutrální látky)
TGLF	Kód pro gyro-Landau-fluidní model
TGYRO	Paralelní manažer transportu, který kombinuje TGLF a NEO
TRANSP	Kód pro plazmový transport
UEDGE	Časově závislý 2D kód pro rovnici plazmové tekutiny
Vorpal	Řešitel elektromagnetické/plazmové vlny
XGC	Gyrokinetický kód se zahrnutými body X

Maximální povolené koncentrace nečistot ve finálním Pb-16Li breeding blanketu

Konečné složení a maximální úroveň nečistot (∑0,776 hm. %)

	Li	Sn	Cu	Zn	Bi	Ag	Ni	Al	Bi	Cr
hm. %	0.62	0.02	0.001	0.001	0.02	0.001	0.005	0.01	0.02	0.005

	Fe	Mn	Mo	Nb	Pd	Si	Sn	V	W	Zn	Pb
hm. %	0.005	0.005	0.005	0.001	0.001	0.01	0.02	0.005	0.02	0.001	Zůstatek



ITER Blanket

https://www.iter.org/

Očekávané odpady související s LiPb

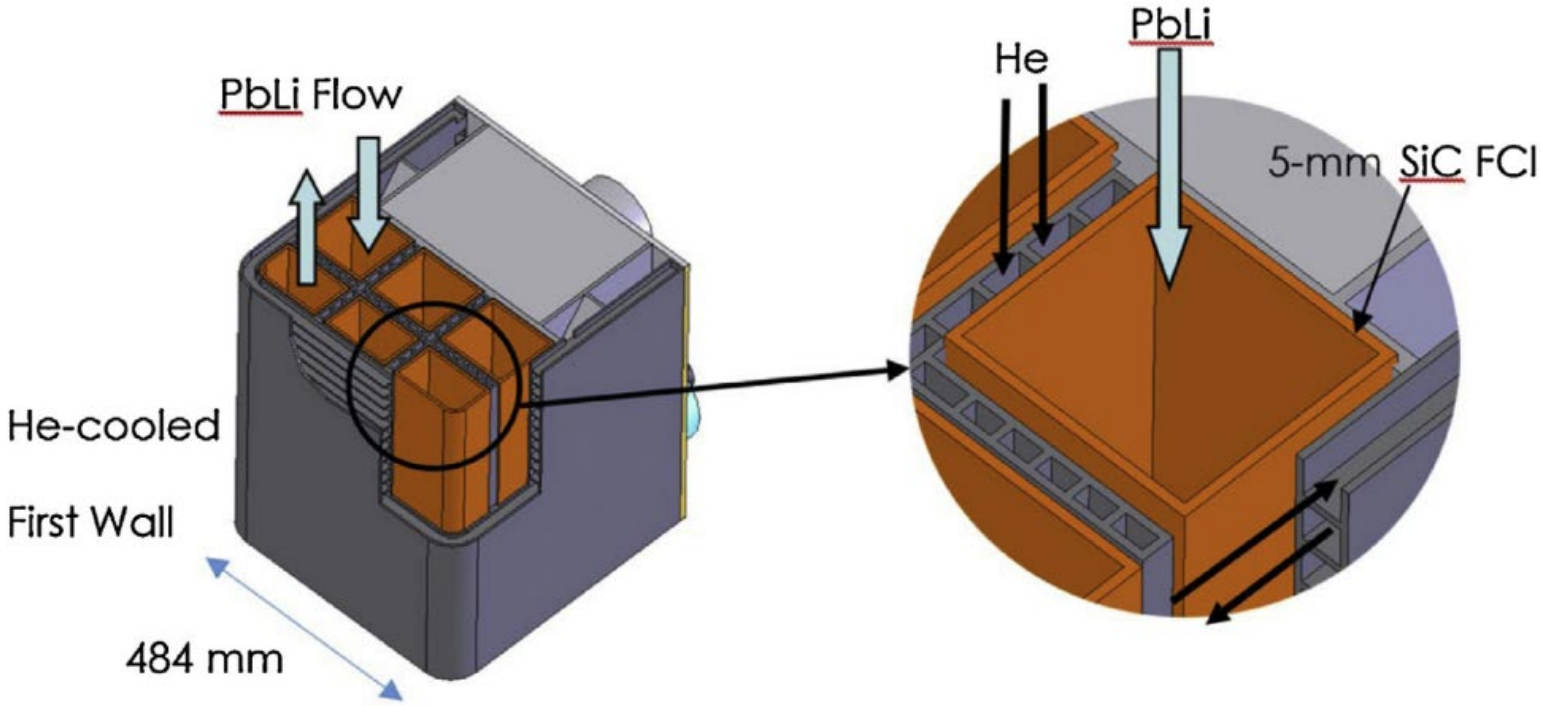
Koncept zařízení	Typ pevného odpadu	Kontaminace	Potenciální problémy
Koncept vodního chlazení olovo-lithiové směsi (WCLL) s množícím blanketem	Tekutá kovová slitina LiPb (Li jako množivý materiál a Pb jako neutronový multiplikátor)	Tritium Aktivace nečistot vede k tvorbě ^{60}Co, ^{193}Pt Aktivace Pb vede k tvorbě ^{203}Hg, ^{210}Po	Radiotoxicita ^{210}Po
	Korozní produkty z keramického povrchu trubek	Neaktivováno	Rozpuštěné nečistoty a nerozpuštěné shluky
	Aktivované korozní produkty z keramického 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

Poznámka: Dominantní zdroj velmi vysoké radioaktivity tritium je vhodné z materiálu uvolnit, zachytit a recyklovat.

Detail části kanálu blanketu pro tekuté LiPb (=PbLi) eutektikum

Náčrt návrhu DCLL blanketu, včetně poloidálního kanálu s toky keramickou barierou SiC a He a PbLi.

https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.021



Sledování opotřebení materiálu a vznik odpadu v tekutém LiPb eutektiku

Podmínky ovlivňující vznik odpadu v LiPb

Vznik He bublin

Působení neutronů na LiPb

Proudění tekutého LiPb

Opotřebení a korozní produkty

Vliv magnetických polí na rozpouštění oceli

Rozpouštění a rozptýlení korozních produktů v LiPb

Rozpustnost železa, chromu a molybdenu v Pb-16Li

Koroze nerezové oceli v proudícím LiPb

Korozní chování austenitických ocelí v LiPb

Korozní chování materiálu EUROFER97

Stabilizace a povlaky

Pevnost materiálů

Pevnost v ohybu

Tahové zkoušky

Ztráta tažnosti

CVŘ Centrum výzkumu Řež

Skupina ÚJV LIDÉ | INOVACE | TECHNOLOGIE

Nutné procesy po ukončení kampaně

Dekontaminace BB

Potrubí v pevném stavu (úprava a příprava k další činnosti nebo likvidaci)

Odstraňování korozních produktů

Nakládání s dekontaminačními produkty

Snížení množství radioaktivního odpadu

Likvidace nebo recyklace odpadu

Balení a skladování

přípravy k přechodnému nebo dlouhodobému uložení

Děkuji za pozornost

www.cvrez.cz

Jaroslav.Stoklasa@cvrez.cz
Lucie.Nenadalova@cvrez.cz