

# Směry výzkumu odpadů v oblasti štěpné a fúzní energetiky, jejich charakteristiky a srovnání

Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., Ing. Vojtěch Galek, Ing. Jan Hadrava, Centrum výzkumu Řež;  
e-mail: jaroslav.stoklasa@cvrez.cz; vojtech.galek@cvrez.cz; jan.hadrava@cvrez.cz

## Souhrn

Jaderné odpady jsou specifickým druhem odpadu, který je nutno z hlediska délky poločasu rozpadu některých radionuklidů, před jejich uložením vhodně zpracovat. Jsou popsány postupy kategorizace a ukládání odpadů.

**Klíčová slova:** pevné odpady, radioaktivní odpady, úpravnické technologie, detritiace, recyklace

## 1 Úvodní informace

V důsledku lidské činnosti a rostou požadavky společnosti na větší množství dodávané stabilní energie. Při současném ubývání některých intenzivních zdrojů energie, zejména fosilních paliv, a u alternativních zdrojů většinou nízkého výkonu, účinnosti a nestability zejména časové (slunce, vítr), jsou hledány cesty k získání a využití jaderné energie. Z principu jde o dvě cesty získání energie buď štěpením jádra izotopů těžkých prvků, nebo jadernou fúzí izotopů lehkých prvků.

### Genealogie odpadů

Stejně jako u většiny postupů při získávání energie se tato činnost neobejde v určitých fázích bez tvorby odpadů. Obecně platí, že rozmanité odpady vznikají při těžbě surovin, při zpracování na polovýrobky a produkty, v čistících a úklidových procesech souvisejících se všemi fázemi přípravy a zacházení s produktem, při samotném využití produktu a po jeho životnosti. Odpady vznikají i při recyklaci odpadů.

Jaderné odpady jsou specifickým druhem odpadu, který je nutno z hlediska délky poločasu rozpadu některých radionuklidů před jejich uložením vhodně zpracovat.

Existují pestré informace o radioaktivních odpadech (RAO) z jaderných elektráren (JE) ale i z dalších energetických oblastí, které jsou často zkresleně interpretované. Proto zde bylo provedeno jejich zobecnění [1] a rozčlenění. Hlavní rozřídění radioaktivních zdrojů a odpadů podle různých hledisek [9][10] zachycuje **Tabulka 1**.

### Dělení radioaktivních odpadů

Podle české legislativy se radioaktivní odpady dělí na kapalné, plynné a pevné [9]. Kapalné a plynné odpady nespádají do působnosti Správy úložišť radioaktivních odpadů, ukládat tyto typy odpadů není povoleno. Pro uložení je nutné je přepracovat do vhodné formy. Pevné odpady jsou dále děleny podle aktivity.

- Přechnodně aktivní odpad je odpad, který po skladování po dobu nejvýše pěti let vykazuje aktivitu nižší, než jsou tzv. uvolňovací úrovně stanovené vyhláškou.
- Velmi nízkoaktivní odpad je odpad, jehož aktivita je vyšší než aktivita přechnodného radioaktivního odpadu, ale nevyžaduje speciální opatření při uložení.
- Nízkoaktivní odpad je definován jako odpad, jehož aktivita je vyšší, než jsou uvolňovací úrovně, ale který současně obsahuje omezené množství dlouhodobých radionuklidů.
- Středněaktivní odpad je odpad, který obsahuje významné množství dlouhodobých radionuklidů, a proto vyžaduje vyšší stupeň izolace od okolního prostředí než nízkoaktivní odpad.

- Vysokoaktivní odpad, u něhož musí být při skladování a ukládání zohledněno uvolňování tepla z přeměny v něm obsažených radionuklidů.

Radionuklidy v nich obsažené mohou být krátkodobé, s poločasem přeměny menším než 30 let (např. izotop vodíku  $^3\text{H}$  s poločasem 12 let) nebo dlouhodobé (např. uran  $^{238}\text{U}$  s poločasem 4,5 miliard let). Záleží především na množství a aktivitě.

## 2 Vznik odpadů ve štěpných procesech

V jaderné elektrárně probíhají dva procesy, které vedou ke tvorbě radionuklidů, a to štěpný proces a proces aktivace. Během normálního provozu reaktoru vznikají v jaderném palivu, které obsahuje  $^{235}\text{U}$ , štěpné produkty a transurany. Většina těchto štěpných produktů a transuranů zůstává v palivu a je z reaktoru odstraňována společně s vyhořelým jaderným palivem. Část štěpných produktů prochází mikroskopickými netěsnostmi vnějšího obalu jaderného paliva až do chladiva aktivní zóny. Další znečištění vzniká aktivací (neutronovým záchytem) korozních produktů konstrukčních materiálů primárního okruhu a materiálů reaktorového chladiva z nečistot a chemických přísad v chladivu.

### **Výstupní produkty specifické pro štěpné procesy**

Konkrétně izotopicky jde o štěpné produkty, tj. vzácné plyny  $^{85}\text{Kr}$  a  $^{133}\text{Xe}$ , izotopy jódu  $^{131}\text{I}$  a  $^{129}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ , aktivované korozní produkty, tj.  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , aktivované produkty chladiva, tj.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ , a transurany zastoupené zejména  $^{239}\text{Pu}$  [7].

## 3 Všeobecné nakládání s RAO

V zemích, kde není žádné centrální zařízení pro zpracování odpadů jsou provozní odpady zpracovávány a skladovány přímo v elektrárnách a úložiště těchto odpadů bývají vybudována také přímo v areálu JE.

### **Pevné RAO**

Pro vyřazení jaderných zařízení z JE a jejich části z provozu je prvořadé monitorování aktivity materiálů [8]. Velké objemy, zejména rozměrné části zařízení, mohou být odmořeny a dále se s nimi nakládá jako s normálními průmyslovými odpady. Zbývající odpady mají podobný charakter jako nízkoaktivní provozní odpady a pouze malá část odpadů tvořená některými vnitřními díly reaktoru má vyšší aktivitu.

Nízkoaktivní provozní odpady mohou být po zpracování uloženy v úložištích odpovídajících parametrů. Odpady s vyšší aktivitou mohou být uloženy v úložištích pro středně aktivní odpady s vhodnými konstrukčními bariérami nebo jsou uloženy jako vysoce aktivní odpady. Některé odpady jsou umístěny do pouzder a uloženy stejným způsobem jako nepřepracované vyhořelé palivo.

Posupně byly vypracovány postupy zpracování pevného RAO. Mají obvykle tyto fáze:

- Sběr a třídění v místě vzniku
- Svoz na centrální pracoviště
- Třídění dle aktivity a druhu
- Úprava RAO do formy vhodné pro uložení
- Skladování a transport

Přitom je sledováno radionuklidové složení odpadu. Například pokud je pevný RAO kontaminován přímo vodou primárního okruhu, tak převažuje  $^{40}\text{K}$  a po jeho vymření  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$ . U odpadů, které jsou kontaminovány zprostředkovaně přes depozit v zařízeních (při údržbě) převažuje  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  a  $^{54}\text{Mn}$ .

**Tabulka 1: Třídění Radioaktivních odpadů (RAO)**

Třídění RAO lze provádět z hlediska		Příklad zastoupení a hodnocení	
Radio nuklidového složení	Přírodní původ	Kosmogenní radionuklidy interakcí kosmického záření na stabilní prvky	$^{14}\text{C}$ ; $^3\text{H}$ ; $^{40}\text{K}$ ; $^7\text{Be}$ , $^{22}\text{Na}$
		Primordiální radionuklidy, které vznikly v raných stádiích vesmíru	$^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{87}\text{Rb}$
		Sekundární radionuklidy třech rozpadových řad	uran-radiové (výchozí $^{238}\text{U}$ ), thoriové ( $^{232}\text{Th}$ ), aktiniové ( $^{235}\text{U}$ )
	Umělý původ	$^3\text{H}$ ; neptuniová řada (výchozí $^{237}\text{Np}$ )	$^{239}\text{Pu}$
Poločasu rozpadu $t/2$	Krátkodobé ( $t/2 < 30$ let)	$^3\text{H}$ 12,3 roku	JE, fúzní zařízení
	Dlouhodobé ( $t/2 > 30$ let)	$^{239}\text{Pu}$ 24 100 let	JE,
Skupenství	Pevné	Nahodilé: Vznik převážně při odstávce reaktoru	nepoužitelné součásti zařízení, kontaminované náradí, odpad vzniklý při opravách a údržbě
		Pravidelné: Vznik provozem	vzduchotechnické filtry, měřicí čidla a kazety vzorků
	Kapalné	prádelenské vody, chladivo primárního a sekundárního okruhu a technologické a odpadní vody z kontrolovaného pásma	
	Plynné	krátkodobé zářiče	často řízeně vypouštějí do atmosféry dle povolených limitů
		přírodní a umělý původ – Radon	$^{222}\text{Rn}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{220}\text{Rn}$ , $^{228}\text{Ra}$
		odvod do systému speciální vzduchotechniky	filtrování a zadržování v absorpčních kolonách
Aktivita	Přechodné RAO	poločas rozpadu $< 5$ let	zdravotnická zařízení
	Nízkoaktivní odpady	objemová aktivita $< 109 \text{ Bq/m}^3$ a poločas rozpadu cca 30 let	90 % v JE
	Středně aktivní odpady	objemová aktivita $109\text{--}1014 \text{ Bq/m}^3$ ; poločas rozpadu řádově stovky let	7 % v JE
	Vysoceaktivní odpady	objemová aktivita $> 10^{14} \text{ Bq/m}^3$ ; poločas rozpadu sto tisíc i více let	1 %, ale obsahují 99 % veškeré aktivity; vyhořelé palivové články JE
Původce, vznik	Průmysl	těžba a zpracování suroviny	Uran a uranová ruda
	Jaderná energetika	typ VVER – oxid uraničitý s mírně obohaceným uranem o štěpitelný izotop $\text{U}^{235}$	méně než 1 % objemu RAO světa, ale aktivita přes 90 % veškeré radioaktivity
	Institucionální nejrizikovější z hlediska nakládání	nemocnice, oddělení radiologie a nukleární medicíny, výroba umělých radioizotopů, vysokoškolské a výzkumné laboratoře, uživatelský průmysl a zemědělství	papír, pryž, použité injekční stříkačky, použité zářiče, léky obsahující radionuklidy, sklo, textil, plasty, filtry, rukavice, ochranné oděvy

Nakládání s vysoceaktivním RAO je velice problematické. Operace s nimi na JE (např. Temelín) se provádí dálkově. Obvykle jde o incore a excore měřící čidla reaktoru a kazety svědečných vzorků. Protože není možné uložení v ÚRAO (úložiště radioaktivních odpadů), díky zvýšené aktivitě, musí být skladován v hermetických pouzdrech ve skladu vysoceaktivního RAO. Likvidace těchto prostor bude řešena až v rámci vyřazování elektrárny po ukončení jejího provozu.

Pro ukládání vysoce aktivních odpadů (VAO) jsou uvažovány různé horniny, jako např. sůl, anhydrid, žula, bentonity a jíly, a zejména jejich kombinace. Výběr lokality pro trvalé a dlouhodobé ukládání je komplikovaný z mnoha hledisek zejména technických, politických a legislativních. Některá další hlediska jsou vyjmenována v literatuře vztahující se k jaderné fúzi [2] a mnoha dalších pracích. Průzkum lokality i výzkumné práce musejí být specificky zaměřeny na zabezpečení, aby průtok spodní vody úložištěm byl co nejnižší a aby chemické prostředí bylo vhodné. Nejdůležitějším mechanismem degradace úložiště je koroze bariér a přenos radionuklidů spodními vodami. Vzhledem k době, po kterou je třeba VAO izolovat, jsou geologické procesy a změny u většiny geologických útvarů velmi pomalé [8]. Důležitá je vhodná kombinace geologicky stabilního místa a výběru materiálů pro izolaci od okolního prostředí s vhodnou technologií ukládání. Dosud provedené výzkumné práce ukázaly, že geologické ukládání RAO je proveditelné a může být provedeno s mimořádnou bezpečností. Potřebná izolace od okolního prostředí může být zaručena po dobu stovek a tisíců let, a i po tomto období zůstává uvolňování radionuklidů ve srovnání s přirozeným pozadím zanedbatelné.

### ***Nakládání s kapalnými RAO***

U JE zdrojem aktivity kapalných médií je voda primárního okruhu, kde se radionuklidy vyskytují jak v rozpustné, tak i nerozpustné formě. Zdrojem neorganizovaných úniků je průnik do sekundárního okruhu a neorganizované vypouštění do speciální kanalizace. Do stejné kanalizace přitékají také vody z dekontaminace, laboratoří a z úklidu místností kontrolovaného pásma. Odpadní vody zpracovány v čistící stanici odpadních vod, která obvykle zahrnuje odstředování, odpařování odpadních vod, filtrační stanici dočištění kondenzátu, zpracování prádelenských vod.

Pro veškerou manipulaci s RAO bývá vybudován Systém skladování kapalných RAO. Ke shromažďování koncentrovaných RAO slouží mezisklad kapalných RAO. Obvyklou jeho částí je skladování vysycených ionexů z čistících stanic aktivních vod. Pevné částice v nádrži sedimentují a odsazená voda je přepadem dopravována zpět do systému čištění RAO. Další součástí meziskladu jsou nádrže pro radioaktivní koncentrát. Tento technologický uzel slouží ke skladování zahuštěného zbytku z odparek. Systém obvykle obsahuje i další vhodně řešené nádrže. Odděleně se shromažďují kaly tvořené suspenzí korozních produktů, nečistot ze speciální kanalizace a mechanickými částicemi z proplachu filtrů primárního okruhu, a vysycené náplně filtrů aktivních vod.

### ***Systém finální úpravy kapalných RAO***

Pro finální úpravu koncentrátů a kalů vzniklých úpravou kapalných odpadů je možné využít některých technologických linek. Na JE Temelín instalována bitumenační linka. S využitím zejména specifického dávkování a odparky je kapalný koncentrát společně s bitumenem upravován za tepla a vpraven do sudu. Před fixací odpadu a v jejím průběhu jsou prováděny série analýz k deklaraci zpracovávaného odpadu (aktivita, izotopové složení, chemické složení atd.). Sudy mohou být skladovány v kontejnerech nebo v rezervních skladovacích kobkách pro hořlavé RAO.

## **4 Specifické pohledy na fúzní procesy**

V zařízení EU DEMO uvažované pro jadernou fúzi (také výzkumná zařízení tokamak ITER, tokamak JET, Stellarator Wendelstein 7-X) dochází k působení zejména neutronů a beta záření na materiály, z kterých jsou sestaveny. Druhotně a spíše ojediněle se může prosadit alfa rozpad. Zdroj alfa částic obdobně jako jednotlivý neutron se může projevit přechodným zabudováním do jádra atomu a

následnou přeměnou ke stabilnímu izotopu. Tímto způsobem dochází k napadení konstrukčních částí a k jejich opotřebování až potřebné výměně. Vhodně působící neutron s další přeměnou izotopu je také základem pro jadernou fúzi [2].

### **Základní užitečná jaderná reakce pro fúzní technologií [4]**



Není to jediná uvažovaná reakce, ale tato reakce (rovnice 1), umožňuje nejsnadněji splnit Lawsonova kritéria a dosáhnout energetického zisku. Proto byla zvolena pro první generaci fúzních energetických reaktorů.

Odpady v souvislosti s fúzní energetikou a při současném směru jejího vývoje, mohou vzniknout při zpracování a výrobě důležitých surovin, ze kterých se připravuje palivo. Jde zejména o zdroje izotopů lithia a deuteria.

### **Specifické výstupní produkty pro fúzní procesy**

Základní odpadní materiály při fúzních procesech vznikají působením neutronů nebo tritia na části zařízení. Druhotné radioaktivní materiály jsou potom produkty rozpadu takto vzniklých izotopů nebo vznikají působením druhotných aktivních izotopů. Na rozdíl od jaderného štěpení je výstupní produkt helium neradioaktivní.

Cílem práce [6] bylo zhodnocení vyvinuté metodiky pro vyhodnocení inventarizace zdrojových položek s provozními limity JET pro tritium (T) a proti strategii kontroly prachu versus metodika přijatá pro zařízení ITER. Aktualizace metodiky pro inventarizaci prachu a T byla provedena v souladu se současným návrhem EU DEMO. Na základě studia chování tokamaků JET a ITER byly provedeny odborné odhady pro budoucí fúzní zařízení EU DEMO. Některé sumarizované výsledky udává **Tabulka 2**.

Průběžně odcházející produkty jsou tritované prachy wolframu a beryllia. Provozní limit T pro JET je stanoven mezi 728 g a 1458 g pro beryllium a 540 g pro W. Například ve vakuové nádobě ITER se odhaduje zachycení mezi 1,2 a 2 kg T diferenciováno na 0,8 až 1 kg tritia ve W + Be prachu a na 0,5 až 0,9 kg T v tritované Be v první stěně (FW).

**Tabulka 2 Předpokládaná produkce wolframového prachu pro jeden rok plného provozu EU DEMO**

Událost	Počet událostí za rok	Množství W prachu v událost (kg)	Množství W prachu za rok (kg)	Hloubka roztavené vrstvy (mm)
Ustálený stav	4040		1000	
Lokalizované hraniční režimy	0,025	4	0,1	0,4
Absolutní závažné narušení	0,025	≤20	≤3	0,6
Nezkrocený průběh děje elektronů	0,025	4	0,1 až 0,2	2,5 až 7,5
Nezkrocení vertikálních posunů	0,025	462	12	0,6
Celkem			1015	

Během normálního provozu se v celém DEMO VV (vakuové nádoba) vygeneruje 689 kg prachu za rok podle erodované vrstvy. Celková hmotnost W obsahující T je vypočtena vynásobením plochy FW pro

penetrační vrstvu a hustotou W (přibližně 210 kg). To znamená, že všechno T (mezi 671 g a 4676 g) se považují za zachycené v prachu.

### **Způsoby zacházení s odpadními materiály**

Pohled na odpady z fúzních procesů je odlišný, zejména protože se od počátku připravuje komplexní zacházení s opotřebovanými materiály a odpady. Z principu vznikne jen velmi malé množství vysoceaktivních odpadů, se kterými se bude muset zacházet podobně jako s nepřepracovaným vyhořelým palivem z JE, a které budou muset být uloženy stejným způsobem.

Procesy a postupy mezi použitím nových materiálů přes recyklaci až k ukládání by měly proběhnout v samotném areálu, kde se bude produkovat energie. Pořadí postupů zacházení s odpady je důležité zejména z hlediska přijatelnosti technické a také z pohledu veřejnosti. Strukturu a hierarchie postupů při detritiaci řadíme podle závažnosti:

#### 1. Krátkodobé opakované použití

Jsou použitelné pro výrobky a komponenty vyžadující údržbu, modernizaci nebo opravu. Nedestruktivní detritiace bude nezbytná pro udržení systému v režimu ALARA (As Low As Reasonably Achievable), tj. co nejnižší rozumně dosažitelné dávky během činnosti. Z nich je možné vyjmenovat potřebu sledování opotřebení materiálu, seřizování a optimalizování sestavení komponent, výměna sousedních dílů poškozených jiným způsobem s návratem nepoškozených dílů atd.

#### 2. Dlouhodobé opakované použití

Nedestruktivní detritiace může změnit požadavky na větrání v místě skladování připravených komponent, tím že se z principu zmenší objemy zachyceného tritia v materiálu. Výhodná je i z hlediska požadavků na skladování nebo přepravu a pro případné opakované použití.

#### 3. Recyklace

Detritiační techniky mohou být mnohem agresivnější, pokud můžeme materiál recyklovat. Přitom se nehledí na zachování původní funkce materiálu. Může dojít ke značné redukci velikosti a objemu ve srovnání s rozměry před demontáží z opotřebovaného zařízení nebo před zpracováním v recyklační technologii.

#### 4. Likvidace

Po aplikaci tohoto postupu dojde ke snížení aktivity odpadu, patrně i ke změně kategorizace odpadu. Můžeme dojít až do stavu, kdy bude možné obdržet povolení pro neomezenou likvidaci.

### **Základní metody úpravy opotřebovaných materiálů ve fúzi detritiací**

Metod detritiace lze užít k dosažení stavu, kdy se po aplikaci sníží množství odpadních plynů během dočasného skladování ale i až do likvidace. V principu jsou testované metody detritiace založeny na tepelném a tlakovém namáhání, na kombinaci chemických a fyzikálně chemických procesů, je využit LASER. Po aplikaci vybraného postupu dojde ke snížení aktivity odpadu, patrně i ke změně kategorizace odpadu [11]. V současnosti jsou například testovány a detritiovány dlouhodobě uložené tritiované oceli a jiné materiály od doby první řízené uvolňování deuterium-tritiového fúzního výkonu na světě r.1991 v JET. Jde o materiály používané v posledních dvaceti letech provozu u zařízení výzkumného reaktoru JET (Culham Centre for Fusion Energy – UK) s ohledem na možnost jejich vyřazení ze skladování a k dalšímu použití.

Problematikou možných odpadů z fúze a analýzou některých existujících procesů v průmyslovém měřítku pro recyklaci konstrukčních ocelí z Breeder modulů DEMO (Eurofer, AISI 316L) a lithiového orthosilikátu  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  Breederu, se zabývá článek [3]. Zmíněn je  $^{14}\text{C}$  (například v ozářených ocelích), což je omezující radionuklid pro přijetí odpadu v evropských úložištích, a je popisována metoda oduhlíčení. Dále se píše o využití vysoce nákladně obohacených  $^6\text{Li}$  materiálů a o snížení množství radioaktivních odpadů.

Uvažuje se o použití technologie MSO pro tritiovaný wolframový prach nebo pro aktivované iontoměniče z čištění vod (dekontaminace vodou chlazených reaktorů) zkoncentrování pevných složek nebo jen zmenšení jejich objemu.

**Tabulka 3 Technologie použité k snížení objemů RAO**

<b>Technologie</b>		<b>Druh odpadu</b>	<b>Příklad</b>	<b>Zdroj odpadu</b>
Molten Salt Oxidation		organické odpady kontaminovaných radionuklidy	Vysycené iontoměniče	JE, Fúzní zařízení; těžba surovin
		Kontaminované prachy v oplachových a čistících suspenzích	Tritiovaný W prach	Fúzní zařízení
			Radioaktivní prach	JE, výzkumné reaktory
Vysokotlaké lisování odpadů		nespalitelné odpady	kovové odpady; oděvy	JE, těžba surovin
Membránové technologie pro kapalné RAO	Reverzní osmóza	odstranění veškerých radionuklidů z nízkoaktivního RAO (kromě tritia)	Odpadní vody s transurany; z vyčerpaných filtrů; drenáže podlah	JE, výzkumné reaktory
	Nanofiltrace	čištění a recyklaci roztoku kyseliny borité v chladivu reaktoru	Chladiovo reaktoru; Odpadní vody z mlýna U rudy; rozpuštěný uran;	JE, výzkumné reaktory
	Ultrafiltrace	odstranění koloidních částic z roztoků; předstupeň reverzní osmózy	Čištění chladiwa; Odpadní vody z přepracování paliva; Odstraňování aktinidů	JE, výzkumné reaktory
	Mikrofiltrace	keramické filtry pro zachycení hrubých nečistot odpadních vod	Separace vysrážených částic regenerace paliva; Kontaminovaná podzemní voda	JE, výzkumné reaktory
	Membránová destilace	tepelně řízený proces pro páry přecházející přes mikroporézní hydrofobní membránu	Oddělení těkavé složky směsi	výzkum
Indukční tavení ve studeném kelímku		Tavení materiálů s vysokou teplotou tání	Koncentrování pevných odpadů	výzkum

### **Specifická rizika pro fúzní procesy**

Na rozdíl od štěpných procesů je brán větší zřetel na některé rizikové oblasti a činnosti přímo souvisejícím s opotřebovanými a odpadním materiály [5][13][12]. Důležitým odlišovacím faktorem je tritium.

Několik radiačních rizik (a ne rizik) během RM (Remote Maintenance – systém dálkové údržby):

- Tritium a aktivované produkty difundují k provozním oblastem,
- Kontaminace pracovních ploch,
- Radiologické nadměrné vystavení pracovníků,
- Chemické a toxické materiály, difuze k provozním oblastem,

- Požár se souvisejícím poškozením radiologických a toxických materiálů

Pro kvantifikaci rizik z výše uvedených rizik musíme znát a specifikovat:

- Inventář tritia a aktivovaných produktů, o kterých se očekává, že budou uvnitř VV během RM na součástech v nádobě
- Ruční činnosti nebo inspekce, které mají být prováděny za účelem asistence nebo přípravy RM
- Zóny údržby vyžadující přítomnost pracovníků pro praktické činnosti nebo inspekce
- Požadavky na ventilaci, úpravu, detritiaci a inertizaci atmosféry k ochraně před možnými chemickými reakcemi a vystavením toxikologickému zdroji (např. Beryllium)
- Typ ochrany proti požáru během RM

## 5 Technologie pro snížení objemů RAO

Technologie zpracování RAO je součástí každé technologie, kde RAO vznikají. Čím větší jsou objemy nebo významnější intenzita radiace, tím se technologie užívají více sofistikované.

**Tabulka 3** naznačuje užití moderních membránových technologie, které umožní lepší zpracování kapalných odpadů, a také další technologie umožňující snížení objemu RAO [1] [11].

Technologie bezplamenné oxidace v tavenině soli (Molten Salt Oxidation - MSO) je vhodná k likvidaci organických odpadů kontaminovaných radionuklidy. Technologie MSO je považována za alternativu běžného spalování s určitými výhodami. Její nepopíratelnou výhodou je nízký obsah toxických látek a kyselých plynů v plynných zplodinách (odplynech). Tyto látky jsou zachyceny v roztavené soli a mohou se zde hromadit až do úplného nasycení této soli.

Následné technologie zpracovávají koncentrované odpady do solidifikované formy k uložení. Solidifikace je obvykle umožněna použitím různých matric. Jde o matrice z bitumenů, z geopolymérů, z cementu, z polysiloxanů a podobných kombinovaných matric např. cement – geopolymérová.

## 6 Shrnutí

V příspěvku byly specifikovány zdroje odpadů ze štěpných a fúzních procesů užívaných nebo vyvíjených pro potřebu energetiky. Byl zdůrazněn rozdílný pohled na odpady z jaderných elektráren a z fúzních zařízení.

Uvedeny nové možnosti a metody snížení objemu ukládaného RAO a naznačeny některé moderní technologie, které jsou vyvíjeny, testovány nebo se předpokládá jejich využití v budoucnosti.

## Literatura

- [1] Galek, V.; Hadrava, J.; Netřebská, M.; Skala, M.; Kunešová, K.; Kůs, P.: Projektové podklady pro nakládání s RAO na nových blocích JE s plánovanou produkcí RAO v konečné formě pro ukládání max. 50 m<sup>3</sup> /1000 MWe/rok, Husinec-Řež (2017)
- [2] Stoklasa J., Karásková Nenadálová L.: Problematika recyklace odpadních materiálů ve spojitosti se zařízením pro jadernou fúzi, Konference Odpadové fórum 2017, Hustopeče u Brna, ISBN 978-80-85990-30-0 (CD) 130 (2017)
- [3] Di Pace L, Beone T, Di Donato A, Miceli P, Macci F, Piancaldini R, Zanin E: Feasibility studies of DEMO potential waste recycling by proven existing industrial-scale processes, Fusion Engineering and Design (2019)
- [4] Stoklasa J., Karásková – Nenadálová L.: Podklady pro experimentální ověřování vhodných detritiačních technik, zpráva za rok 2016, Zpráva pro R4S k problematice detritiace, dílčí část 3.3., Centrum výzkumu Řež, s. r. o. (2017)
- [5] A. Loving et al: Pre-conceptual design assessment of DEMO remote maintenance, Fusion Engineering and Design (89) 9–10 (2014) 2246-2250



- [6] 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 (2019) In Press
- [7] <http://fbmi.sirdik.org/4-kapitola/42/422.html#terestralnizareni> (cit. 10.1.2019)
- [8] Maláček, E. Současný stav zacházení s radioaktivními odpady, 1st ed.; Československá komise pro atomovou energii: Praha – Zbraslav (1992)
- [9] <https://www.surao.cz/rao/deleni-radioaktivnich-odpadu>) (cit. 10.1.2019)
- [10] <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz> (cit. 13.2.2019)
- [11] Stoklasa Jaroslav, Karásková Nenadálová Lucie: Způsobilost různých technik k detritiaci a recyklaci opotřebovaných částí fúzního reaktoru, Konference Odpadové fórum 2015, Hustopeče u Brna (CD) 038 (2015)
- [12] Takeishi T, Furuichi K, Katayama K, Kawabata Y, Fukada S: Disposal procedure for contaminated surface of tritium handling facility in the decommissioning operation, Fusion Engineering and Design (2018)
- [13] Andrew Wilde et al: Concept Design Description for The DEMO Upper Port Maintenance System, 2MMR6P (2018)

## 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 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293, která je finančně podporována Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LM2015093 Infrastruktura SUSEN.

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 Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) in the project CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293, which is financially supported by the Ministry of Education, Youth and Sports - project LM2015093 Infrastructure SUSEN.

"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 the grant no. MSMT-41274/2014-2 from the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic."

## Directions of waste research in the field of fission and fusion energy, their characteristics and comparison

**Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., Ing. Vojtěch Galek, Ing. Jan Hadrava, Centrum výzkumu Řež;  
e-mail: jaroslav.stoklasa@cvrez.cz; vojtech.galek@cvrez.cz; jan.hadrava@cvrez.cz**

### Summary

*Waste types, different methods, ways and causes of waste management are compared with conventional nuclear power plants and nuclear fusion devices. Some procedures for transferring the results of laboratory research to operational conditions are indicated. Categorization and waste disposal procedures are described.*

**Keywords:** solid waste, radioactive waste, processing technology, detritiation, recycling