

Příprava k ukládání radioaktivních odpadů pocházejících z jaderné fúze

Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadálová, Ph.D., lucie.nenadalova@cvrez.cz; Ing. Lumír Nachmilner, CSc., lumir.nachmilner@cvrez.cz, Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., jaroslav.stoklasa@cvrez.cz, Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Souhrn

S ohledem na předpokládanou tvorbu radioaktivních odpadů z fúzních reaktorů jsou představeny používané obaly pro ukládání radioaktivních odpadů z fúze, jejich parametry a příklady aplikace v různých uložistích jaderných odpadů. Uvádí se důležitá kritéria pro výběr obalu a popsány obaly pro odpad s velmi nízkou, nízkou a střední radioaktivitou.

Klíčová slova: Radioaktivní odpad, fúze, kontejnery, obaly pro odpad, ukládání odpadu

1 Stručný úvod a cíle práce

Práce se zaměřila na přezkoumání dostupných kontejnerů na odpad z jaderné syntézy určených k konečnému uložení, se zaměřením na specifika jaderné syntézy: velké rozměry součástí a únik tritia. Byly shrnuty hlavní charakteristiky užívaných kontejnerů v různých zemích. Zejména šlo o vnitřní a vnější rozměry, maximální povolené množství odpadu, typický konstrukční materiál, dostupná tloušťka stínění a další užitečné informace.

Byly vybrány příklady obalů, které jsou rozděleny zejména podle aktivity uložených odpadů. Jsou vyjmenována důležitá kritéria pro výběr obalu.

Tato práce navazuje na úkol posouzení inventáře odpadů a technik pro snižování objemu odpadů v rámci projektu Safety and Environment – EUROfusion. V předchozích letech byly řešeny otázky týkající se posouzení množství pevných odpadů a metod zpracování pevných odpadů z aktuálního návrhu DEMO [1], načež následoval program nakládání s odpady LiPb [2].

2. Úloha obalů radioaktivního odpadu

Bezpečnostní glosář MAAE [3] přesně formuluje rozdíly mezi obalem, obalem RAO a přebalem.

Obal se chápe jako vhodný kontejner pro radioaktivní odpad (RAO), který umožňuje bezpečnou manipulaci, přepravu, skladování a/nebo likvidaci.

Obal RAO je kompletní produkt balicí operace, sestávající z obalu a jeho obsahu připraveného k přepravě. Typy obalů, jak jsou podrobně popsány v Přepravních předpisech [4], podléhají limitům aktivity a materiálovým omezením, aby splňovaly odpovídající bezpečnostní a technické požadavky. Přebal je uzavřený prostor používaný k uložení jednoho nebo více obalů a k vytvoření jedné jednotky pro snadnou manipulaci a skladování během přepravy, skladování a případného uložení. Obal radioaktivního odpadu je navržen tak, aby plnil několik funkcí, jak je popsáno níže:

a. Manipulační/přepravní/skladovací jednotka

Posledním krokem zpracování RAO je vložení konsolidovaného odpadu do obalu, který slouží jako přepravní, skladovací a v případě potřeby i úložná jednotka. Jeho úlohou je zajistit, aby s upraveným odpadem bylo možné bezpečně manipulovat od místa zpracování až po jeho konečné určení. Tato jednotka musí být kompatibilní s přepravními a manipulačními prostředky (jeřáby, vybavené háky nebo jinými spojovacími/upevňovacími přípravky).

b. Jedinečná identifikace obalu odpadu

Každý obal radioaktivního odpadu musí být vybaven jedinečnými značkami, které umožní jeho identifikaci v jakémkoli dalším kroku jeho nakládání. Pokud je obal vložen do přepravního obalu, musí

být označen i ten tak, aby jeho obsah byl sledovatelný. Jediněčná identifikace je základním požadavkem pro systém sledování radioaktivního odpadu, který uchovává informace o odpadu a jeho osudu.

c. Zadržování radionuklidů/chemických látek

Obal může být navržen tak, aby se stal bariérou zpomalující a omezující mobilitu kontaminantů z radioaktivního odpadu. Jeho životnost se může pohybovat od desítek do milionů let v závislosti na použitém materiálu a jeho tloušťce.

d. Stínění

Pokud je do obalu vložen odpad s vyšší radioaktivitou, může být jeho konstrukce upravena tak, aby se snížily externí dávkové příkony. Materiály zajišťující tuto funkci zahrnují beton vhodnou výplní nebo se používají různé kovové konstrukce.

Obal může plnit jakoukoli kombinaci uvedených funkcí, nicméně zatímco první dvě funkce jsou povinné, poslední dvě se implementují podle potřeby.

3 Kategorizace odpadů

3.1 Klasifikace odpadů IAEA

Schéma klasifikace odpadů vyvinuté IAEA [5] propojuje kategorie odpadů s vhodnými řešeními pro jejich likvidaci. Hodnoty aktivity pro každou kategorii nebyly stanoveny, protože kritéria pro přijetí odpadu silně závisí na návrhu úložiště a mohou se výrazně lišit. Pro zjednodušení tohoto problému lze uvést, že:

- 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.

V tomto dokumentu nebudeme popisovat nakládání s odpadem uvolněným z radiální kontroly (zachází se s ním jako s komunálním odpadem) a s krátkodobým odpadem, který po přechodném skladování rovněž uvolnit.

Vynecháváme také úvahy o balení vysoce aktivního odpadu, protože se nepředpokládá, že by tato kategorie byla generována fúzními reaktory.

Tabulka 1 Potenciální odpad z materiálů určených pro použití v technologii fúze a obsahujících wolfram [7]

DŮLEŽITÉ SPECIFICKÉ MATERIÁLY	OBLAST POUŽITÍ NEBO ZÓNA		POTENCIÁLNÍ ODPAD na konci životnosti	POTENCIÁLNÍ ODPAD kontinuální	
				kusy	prach
W monoblok; W díly	Plodící blanket BB		ANO	ANO	ANO
	Divertor	Armovací dlaždice			
	Interiér fúzního reaktoru	Armovací dlaždice			
Žáruvzdorné slitiny na bázi W	obecná konstrukce				NE
Feritické slitiny na bázi Fe, Cr, W a Ti	obecná konstrukce	specifické části zařízení		ANO	

3.2 Základní druhy odpadů z fúze, a jejich zdroje

Ve zprávě [6] je uvedena široká škála materiálů užitých v různých místech fúzního zařízení. Materiály mají rozmanité chemické složení a rozměry. Významnou skupinou jsou také specifické oceli a různé slitiny.

Uvažované stavební materiály obsahující wolfram, které jsou potenciálními zdroji tvorby wolframového prachu, jsou shrnuty v tabulce 1. Je uvedeno, zda materiál generuje odpad během provozu zařízení, nebo až na konci své životnosti.

3.3 Kritéria pro přijetí odpadu k uložení materiálů

Všechny země provozující úložiště mají stanovena národními právními předpisy specifická kritéria pro přijetí radioaktivního odpadu k uložení. Důležitá jsou zejména kritéria přijatelnosti zemí, kde budou provozovány velké experimentální fúzní reaktory (ITER, STEP, JT-60SA, CFETR atd.). Preferována budou bezpečnostní posouzení týkající se radioaktivního odpadu z EU DEMO.

Jde zejména o pravidla LLWR (platná pro UK) a CSA (platná pro Francii), která jsou zmíněna v [8]. Týkají se především: celkového limitu beta, gama a alfa, a klíčových radionuklidů. Zpráva [8] a článek [9] [10] uvádějí také limity (v Bq/g) pro vybrané radionuklidy relevantní pro fúzi, jako jsou ^3H , ^{14}C , ^{94}Nb , ^{63}Ni , ^{59}Ni , ^{60}Co a ^{93}Mo .

Podle zprávy GSSR [8] se neočekává, že by obsah olova pocházejícího z plodícího blanketu Pb-16Li byl podle současných metod recyklovatelný. Podle této zprávy to bude znamenat, že aktivované olovo bude nutné likvidovat a ukládat, viz také [2].

4 Druhy obalů

Byly vybrány příklady obalů, které jsou rozděleny zejména podle aktivity uložených odpadů. Jsou popsány obaly pro velmi nízké aktivity, přes nízké aktivity až do středních radioaktivit.

4.1 Obaly pro velmi nízkoaktivní odpad

Velmi nízkoaktivní odpad (VLLW) nesplňuje kritéria pro výjimku, ale nevyžaduje vysokou úroveň ochrany a izolace, a proto je vhodný k ukládání na povrchových zařízeních s omezenou regulační kontrolou. Taková úložiště mají tvrdá omezení pro přijetí i nebezpečného (chemotoxického) odpadu. Koncentrace radionuklidů s delším poločasem rozpadu v VLLW jsou obecně velmi omezené.

Hlavní úlohou balení tohoto odpadu je umožnit snadnou manipulaci, přepravu a meziskladování: nemá žádnou bezpečnostní funkci. Mezi typické manipulační jednotky proto patří plastové vaky, jednoduché ocelové bedny nebo sudy, plastové bedny: dřevěným bednám je třeba se raději vyhnout, aby se zabránilo mikrobiální aktivitě v úložišti. Úložiště přijímá i větší předměty, jako jsou části technologického zařízení nebo potrubí. Neexistují tedy žádná omezení velikosti/hmotnosti, pokud s předmětem lze manipulovat během nakládky, přepravy a ukládání.

4.2 Obaly pro nízkoaktivní odpad

Nízkoaktivní odpad (LLW nebo NAO) je nad uvolňovacími úrovněmi, ale s omezeným množstvím dlouhodobých radionuklidů. Takový odpad vyžaduje robustní izolaci a kontejnment po dobu až několika set let a je vhodný k ukládání v inženýrských zařízeních blízko povrchu. LLW může obsahovat krátkodobé radionuklidy s vyššími úrovněmi aktivity a také dlouhodobé radionuklidy, ale pouze s relativně nízkými úrovněmi aktivity (obvykle <400 Bq/g v průměru a až 4000 Bq/g pro jednotlivé obaly [5]).

Spektrum obalů na odpad je poměrně široké: zahrnuje jak jednoduché konstrukce, tak i jejich vylepšení různými typy dodatečných izolačních vrstev nebo přebalů. Jejich funkce se liší mezi

manipulačními jednotkami až po robustnější řešení s dodatečnými bariérami zajišťujícími požadovanou úroveň dlouhodobé bezpečnosti. Některé konstrukce jsou navrženy s krátkou životností: jejich izolační funkce je omezena kvalitou vybraného materiálu (pro odpady s nižší aktivitou, upravený odpad – viz obr. 1), jiné jsou dlouhodobě odolné (pro odpady s vyšší aktivitou, nekonsolidovaný odpad – viz obr. 2).



Obr. 1: Konstrukce obalů NAO s krátkou životností



Obr. 2: dlouhodobě funkční obaly NAO (beton) obaly (ocel) (ANDRA)

Úložný prostor je určen k přijímání radioaktivního odpadu baleného v úložných obalech, které se od sebe mohou velmi lišit. Tyto obaly mohou mít válcový, krychlový nebo rovnoběžnostěnný tvar, variabilní rozměry (společnost Andra specifikuje 16 typů obalů), různé složení kontejnerů a také různé druhy umístěného odpadu (heterogenní odpad, homogenní odpad, ocel, beton, plast, pryskyřice atd.). Příklady obalů s krátkou životností jsou následující: kovové sudy (100, 200, 450 a 870 l) a bedny (do 10 m³), mezi dlouhodobě odolné obaly patří betonové kontejnery o objemu 5 a 10 m³ a různé typy betonových sudů. Specifickou kategorií jsou kovové ingoty z tavení kovového odpadu.

Obal s odpadem obsahující homogenní nebo heterogenní odpad, je zpravidla vyplněn vhodným zpevňovacím materiálem.

Typickým jednoduchým obalem pro nízkoaktivní odpad je ocelový sud, který může být lakovaný, pozinkovaný nebo dokonce vyrobený z nerezové oceli. Jeho objem se pohybuje od 100 l do přibližně 400 l (obr. 3, tabulka 2). Tyto sudy jsou přijímány do úložiště, kde jsou obvykle zality betonem v úložných jímkách (obr. 4). V jiných konceptech jsou sudy vkládány do přepravních a úložných obalů vyrobených z oceli (ISO kontejnery) nebo prefabrikovaných betonových boxů. Tyto obaly umožňují i vkládání větších kusů odpadu (trubky, malá technologická zařízení, nekonsolidovaný odpad).

Sendvičová konstrukce sudu je další možností, která zlepšuje retenci odpadu, obvykle volně loženého. Tento typ obalu se používá v úložišti Richard.



Obr. 3: Lakovaný ocelový sud pro NAO



Obr. 4: Betonáž ocelových sudů v úložném prostoru (ANDRA) (SURAO)

Tabulka 2 Ocelový sud MEVA pro NAO (SURAO)

Rozměry	Objem	Hmotnost	Materiál	Tloušťka
Ø 595 x 885 mm	216 l	19 kg	pozinkovaná ocel	dno 1mm / stěna 0,8 mm

100 litrový sud s pevným odpadem je zalit cementem v sudu o objemu 216 l. Betonová vložka má tloušťku cca 5 cm (obr. 5).

V několika národních programech jsou ocelové sudy vloženy do betonových boxů a nakonec zality betonem (obr. 6). Tyto boxy se pak používají jako úložné jednotky. Společnost JAVYS (Slovensko) používá k výrobě betonové záměsi radioaktivní koncentrát pro efektivní využití kapacity kontejneru. Betonový box je vyroben z vláknobetonu s parametry uvedenými v tabulce 3.

Tabulka 3: Charakteristiky vláknem vyztuženého přepravního obalu (JAVYS) [18]

Těleso		Víko	
<ul style="list-style-type: none"> dutá krychle bez jedné (horní) stěny má čtyři manipulační rukojeti s polokulovou hlavou má zářez na horním okraji pro uchycení víka 		<ul style="list-style-type: none"> deskovitý tvar má dva kruhové otvory má čtyři manipulační rukojeti s polokulovou hlavou 	
délka strany	1700 mm	rozměry	1 514 mm × 1 514 mm × 142 mm
tloušťka stěny	≥105 mm	Zátky (2)	
tloušťka dna	125 mm	<ul style="list-style-type: none"> kruhový tvar Ø 300 x 145 mm se zářezem pro uchycení do víka s jednou manipulační rukojetí s polokulovou hlavou 	



Obr. 5: „Sendvičový“ typ



Obr. 6: Betonový přebal obsahující sudy s LLW (JAVYS) a obal LLW (SÚRAO)



Obr. 7: Hlavní typy kontejnerů na odpad používaných pro ukládání RW v SFR (Švédsko) [12]

Příkladem je sada kontejnerů používaných pro ukládání RW v úložišti SFR (Švédsko), znázorněná na Obr. 7 [12].

Odpad je balen do kontejnerů přizpůsobených druhu surového odpadu, způsobu zpracování a systému hospodaření. Lze rozlišit tyto hlavní typy:

- Kontejnery vyrobené z plechu, do kterých je umístěn nízkoaktivní pevný odpad. Odpad je balen do modulárních krabic, balíků nebo sudů, které tvoří vnitřní obal kontejneru. Odpad lze také balit přímo do kontejneru. Toto je dominantní kontejner na demoliční odpad.

- Železobetonové kontejnery obsahující odvodněnou práškovou iontoměničovou pryskyřici a filtrační pomocné látky.

- Betonové nebo plechové formy a 200litrové plechové sudy, do kterých se balí převážně zpevněný kapalný středněaktivní odpad nebo betonem zalitý pevný středněaktivní odpad.

- Kromě výše uvedeného se pro demoliční odpad používá také různé typy ISO kontejnerů.

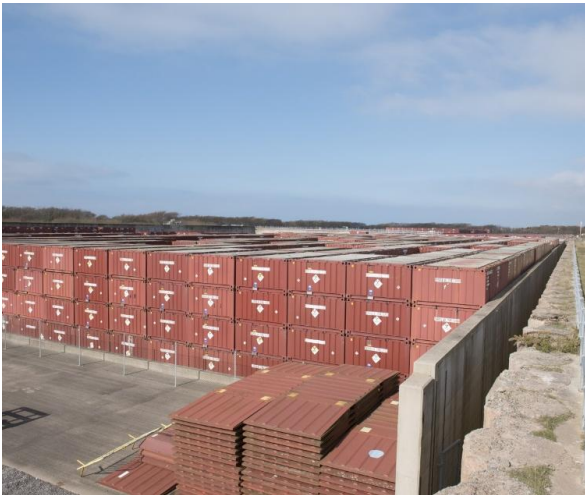
Odpad vložený do většího kontejneru tvoří tzv. úložný obalový soubor. Příkladem je kontejner používaný jako úložná jednotka v úložišti El Cabril (Španělsko), které je konstrukčně podobné úložišti L'Aube. Na rozdíl od francouzského zařízení se odpadní sudy nejprve umísťují do betonových kontejnerů o rozměrech 1,2 m x 1,2 m x 1,2 m (obvykle pojmu 4 sudy o objemu 200 l) nebo 2,25 m x 2,25 m x 2,20 m (obvykle pojmu 18 sudů o objemu 200 l) [13] - viz obr. 9.

Jihokorejské přípovrchové úložiště Wolsong přijímá odpad v sadě obalů [14], jak je popsáno v tabulce 2. Pro solidifikované koncentráty a vysycené pryskyřice se používají ISO kontejnery a válcové betonové kontejnery. Polyethylenové kontejnery se používají pro sušený vysycený pryskyřičný odpad, který může být také balen do feralových (nerezových) kontejnerů s vysokou integritou HIC (High Integrity Container) – zajišťujících zadržení až do rozpadu klíčových radionuklidů.

Ocelové sudy jsou poté vloženy do betonového kontejneru s kapacitou 16 ks (200 l), resp. 9 ks (320 l). Technické údaje obou kontejnerů jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Betonové kontejnery pro sudy o objemu 200 l a 320 l (Wolsong)

Specifikace	Kontejner na odpad	
	Kontejner na 16 kusů	Kontejner na 9 kusů
Materiál	Beton	Beton
Rozměry (Š x D x V) m	2,73 x 2,73 x 1,14	2,4 x 2,4 x 1,21
Hmotnost nádoby (odpadu) t	18,34 (5,4)	10,81 (4,6)



Obr. 8: Umístění odpadu do ISO kontejnerů v úložišti Drigg (NDA) [18]



Obr. 9: Vkládání ocelových sudů do betonového kontejneru (ENRESA) [13]

Britské úložiště Drigg ukládá odpad v kontejnerech ISO: zpravidla poloviční nebo třetinové výšky, které jsou naplněny odpadem zalitým cementem. Primárním obalem je ocelový sud, kontejnery jsou považovány za úložné jednotky. Charakteristiky kontejnerů přijímaných v DRIGG jsou v tabulce 5 [15].

Kontejnery jsou nakonec umístěny na betonovou plošinu a naskládány, jak je znázorněno na obr. 8.

Tabulka 5: Nákladní kontejnery ISO Drigg [15]

Délka (m)	3,05	6,06	9,12	12,19
Šířka (m)	2,44			
Standardní výška (m)	2,59			
Vysoký objem (m)	2,89			
Vnitřní délka (m)	2,80	5,87	8,93	2,33
Vnitřní šířka (m)	2,33			
Standardní vnitřní výška (m)	2,35			
Vnitřní výška vysokého objemu (m)	2,65			
Šířka otvoru koncových dveří (m) dle požadavku	2,26			
Standardní výška otvoru koncových dveří (m) dle požadavku	2,26			
Výška otvoru koncových dveří u vysokého kontejneru (m) dle požadavku	2,56			
Plocha podlahy (m ²)	6,69	13,93	21,09	28,03
Standardní objem (m ³)	15,89	32,85	49,84	66,83
Objem u vysokého kontejneru (m ³)	17,84	37,09	56,21	75,32
Hmotnost (t)	1,52	2,44	3,25	4,06

4.3 Balení středně aktivního odpadu (ILW)

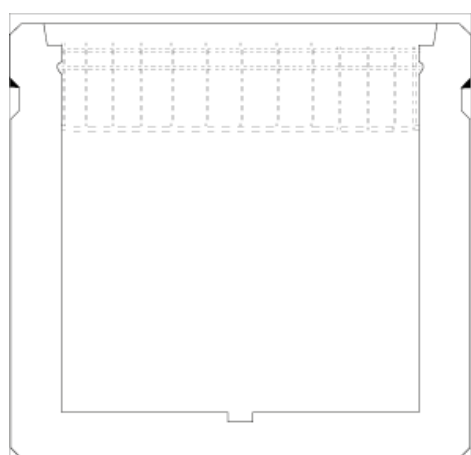
Středně aktivní odpad vzhledem ke svému obsahu, zejména dlouhodobých radionuklidů, vyžaduje vyšší stupeň ochrany a izolace než ukládání v blízkosti povrchu [17]. ILW však během skladování a likvidace nepotřebuje žádné nebo pouze omezené opatření pro odvod tepla. ILW může obsahovat dlouhodobé radionuklidy, zejména alfa emitující radionuklidy, které se nerozpadnou na úroveň aktivity

přijatelné pro ukládání v blízkosti povrchu během doby, po kterou se lze spolehnout na institucionální kontroly. Proto odpad této třídy vyžaduje ukládání ve větších hloubkách, řádově desítek metrů až několika set metrů [4].

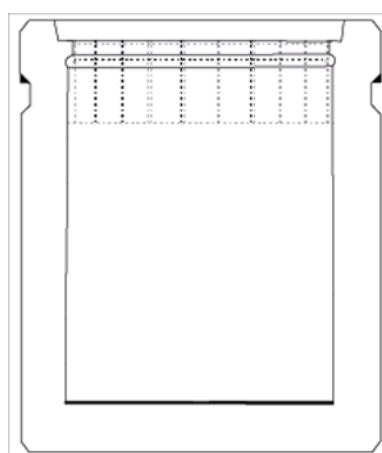
Příklady takových zařízení jsou – kromě švédských a finských úložišť schopných přijímat určité ILW – Bataapáti (Maďarsko) a WIPP (USA), které jsou v provozu, a Konrad (Německo), který je ve výstavbě.

Ve Francii se nízko a část ILW vkládá také do odolných železobetonových kontejnerů, i když jsou primárně navrženy pro povrchová úložiště [19]. Vzhledem k tomu, že tyto kontejnery mají prokazatelnou 300letou životnost, patří do kategorie HIC a – jako takové – zůstávají na hranici mezi balením nízko a ILW.

Technické údaje betonových kontejnerů CDB jsou viz [19] a jejich výkresy jsou na obr. 10 a 11 a průřezy na obr. 12.

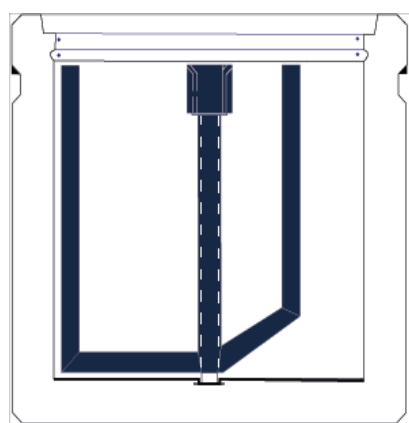


C1GP

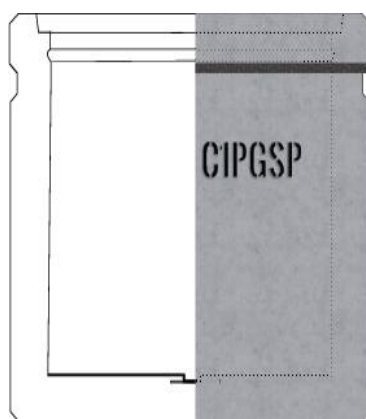


C4PG

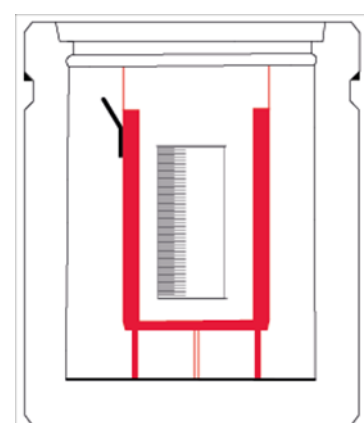
Obr. 10: Výkres standardních kontejnerů s vysokou integritou CDB [19]



C1GPA

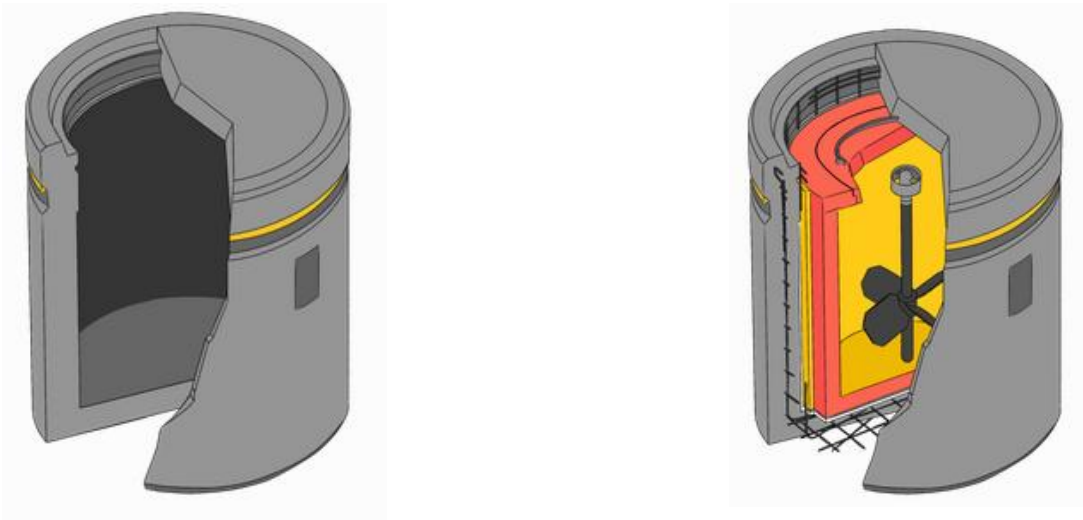


C1PGSP



C4PGPA

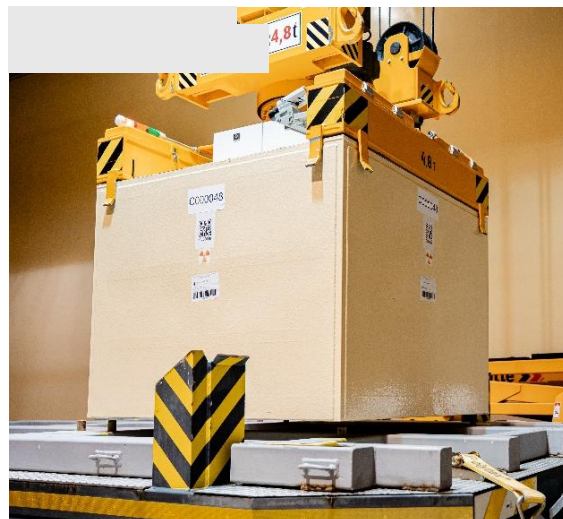
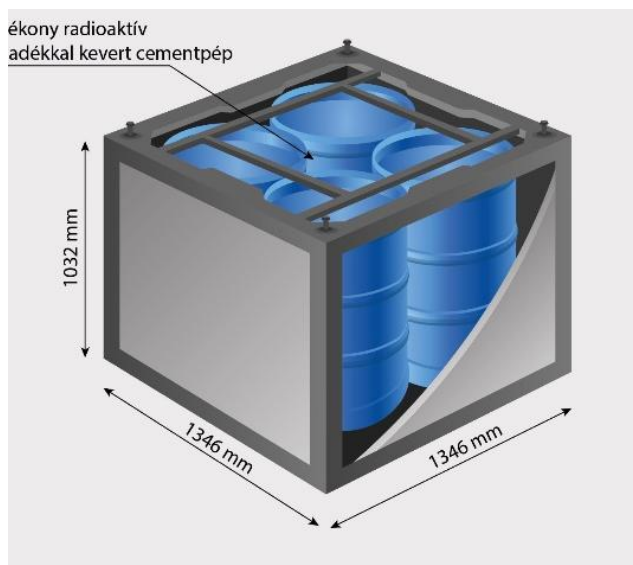
Obr. 11: Výkres variantních vysoce integritních kontejnerů CDB [19]



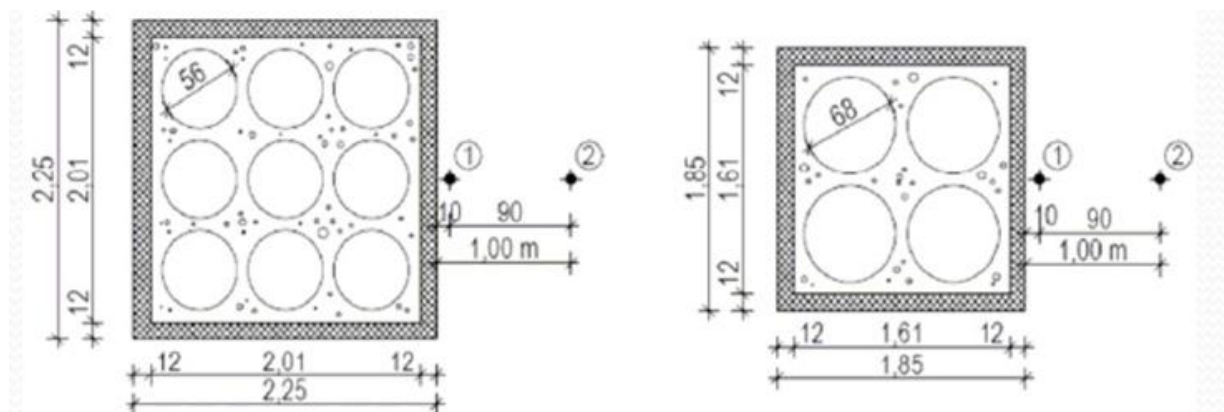
Obr. 12: Průřez vysoce integritními kontejnery CDB [19]

Maďarské úložiště Bábaapáti bylo vybudováno v žulové skále v hloubce cca 200 m a je určeno k ukládání nízko a středně aktivního odpadu vznikajícího v národních jaderných zařízeních [20]. Je přístupné šikmými chodbami dlouhými téměř 2 km. Odpad je do úložiště dodáván v ocelových sudech o objemu 200 l a zde je přebalen do železobetonových kontejnerů o rozměrech ~ 1,35×1,35×1,03 m. Jeho objem je cca 1,9 m³ a objem odpadu dosahuje 0,8 m³. Kontejnery jsou vyplněny cementovou záměsí s maximální hustotou 1,6-1,90 kg/dm³ a mají hmotnost 4,8 t. Ocelové víko kontejneru je odnímatelné (viz obr. 13).

V dřívějším konceptu se uvažovalo o větších kontejnerech s rozměry uvedenými na obr. 14. Byly navrženy pro devět 200l sudů (objem 7 m³) a čtyři 400l sudy (objem 4,8 m³). S těmito kontejnery se mělo manipulovat vysokozdvížným vozíkem. Kontejnery v úložišti jsou stohovány až do 5 úrovní (obr. 15).



Obr. 13: Betonový kontejner pro L-ILW a jeho manipulace (PURAM)



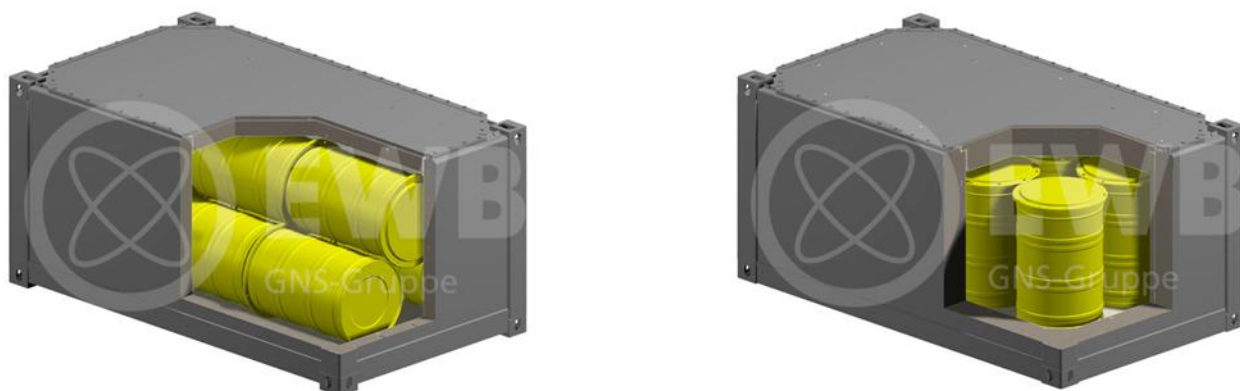
Obr. 14: Kontejnery pro 9x200l sudy a 4x400l sudy (PURAM)



Obr. 15: Stohování úložných kontejnerů v úložišti Bátaapáti (PURAM)

Úložiště Konrad (Německo) se staví v opuštěném dole v hloubce více než 1 km. Je určeno pro nízko a středně aktivní odpady [21], které jsou přijímány v různých typech standardizovaných kontejnerů vyrobených z oceli nebo betonu.

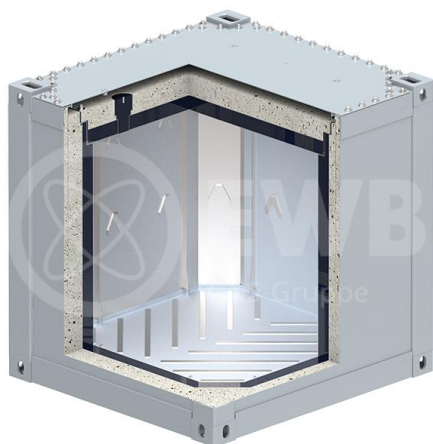
Ocelové plechové ISO kontejnery jsou případně vybaveny s dodatečným vnitřním ocelovým nebo betonovým stíněním [22]. Vyrábějí se v různých standardizovaných velikostech dle požadavků úložiště Konrad. Všechny kontejnery mají povlaky na ochranu proti vnější a vnitřní korozi a pro usnadnění dekontaminace. Jsou vhodné pro přijetí 200 nebo 400 sudů, a mohou být dle potřeby vyplněny výplňovým materiálem (obr. 16). Rozměry různých typů ocelových kontejnerů jsou uvedeny v tabulce 6. Modulární systém stínění lze instalovat do určitých typů kontejnerů s tloušťkou stínění od 200 mm těžkého betonu do 110 mm olova. Další možností je instalace betonového stínění o tloušťce 90, 100 nebo 200 mm (obr. 17). Plnění kontejneru sudy s RAO je znázorněno na obr. 18 a umístění na obr. 19.



Obr. 16: Průřez ocelovým kontejnerem naplněným sudy s odpadem [22]

Tabulka 6: Rozměry různých typů ocelových kontejnerů EWB [22]

Č.	Název	Vnější rozměry			
		Délka/průměr mm	Šířka mm	Výška mm	Hrubý objem m ³
1	Betonový kontejner typu I	1060	-	1370	1,2
2	Betonový kontejner typu II	1060	-	1370	1,3
3	Litinový kontejner typu I	900	-	1150	0,7
4	Litinový kontejner typu II	1060	-	1500	1,3
5	Litinový kontejner typu III	1000	-	1240	1,0
6	Kontejner typu I	1600	1700	1450	3,9
7	Kontejner typu II	1600	1700	1700	4,6
8	Kontejner typu III	3000	1700	1700	8,7
9	Kontejner typu IV	3000	1700	1450	7,4
10	Kontejner typu V	3200	2000	1700	10,9
11	Kontejner typu VI	1600	2000	1700	5,4



Obr. 17: Kontejnery vybavené vnitřním stíněním [22]



Obr. 18: Plnění kontejneru pro ukládání odpadu sudy s RAO (BGE)



Obr. 19: Plánované umístění kontejnerů v úložných koridorech (BGE)



Obr. 20: Možnosti uložení kontejnerů v WIPP [24]

Pilotní zařízení Waste Isolation Pilot Plant (WIPP, USA) je úložiště vybudované v solné formaci a určené pro likvidaci ILW z obranného programu USA. Technické charakteristiky některých kontejnerů schválených pro ukládání v WIPP jsou uvedeny v [23]. Kontejnery jsou umístěny ve vytěžených kavernách a zasypány práškovým MgO. Možnosti uložení jsou znázorněny na obr. 20.

Závěry

Ukázalo se, že existuje široká škála stávajících možností balení radioaktivního odpadu vhodných pro jeho uložení. V zásadě lze některý odpad ukládat tak, jak vzniká, nebo zpracovávat v místě jeho vzniku, ale musí být vložen do obalu, který umožňuje jeho další manipulaci, přepravu a skladování. Pro optimální provoz úložišť byly navrženy přebaly, které pojmuou sadu obalů a vytvoří úložné jednotky. Výkon těchto jednotek lze dále zlepšit dodatečnými vložkami nebo obložím, které zajistí požadovanou úroveň radiační bezpečnosti pro personál a pro dlouhodobý provoz úložiště.

Výběr obalu závisí na:

- Druhu odpadu (chemické a fyzikální vlastnosti konsolidovaného odpadu) => výběr vhodného materiálu nebo kombinace konstrukčních materiálů, jeho odolnost vůči chemickému napadení
- Aktivitě obsažených radionuklidů => životnost obalu, dostatečný stínící účinek, tloušťka jeho stěn
- Manipulačních/transportních prostředcích => omezení rozměrů a hmotnosti obalu
- Požadavcích na dlouhodobou bezpečnost úložiště (kritéria přijetí odpadu)

Při výběru vhodného obalu je třeba mít na paměti, že samotný obal nemusí splňovat všechny požadované aspekty: měl by být považován za součást celého procesu úpravy odpadu, včetně vytvoření úložné jednotky. Kumulativní funkce a účinek navrhovaného procesu balení a jeho prvků by měly být vždy důkladně zváženy.

V každém případě budou primární požadavky na výběr obalu a přebalů vycházet ze zařízení na úložiště odpadu: jeho kritéria přijatelnosti musí být bezvýhradně respektována. Proto je při výběru řešení pro balení nestandardního odpadu velmi vhodné konzultovat projektanta a provozovatele úložiště.

Lze shrnout, že volba obalu je určena aktivitou a typem kontaminantů. Klíčovými rozhodujícími faktory pro výběr obalu budou národní legislativní požadavky a kritéria přijatelnosti platné pro úložiště, jež má tyto odpady přijmout.

Konkrétní provedení obalů je dáno aktivitou a typem kontaminantů a fyzikálně-chemickými vlastnostmi zneškodňovaného 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] J. Stoklasa, L. Karásková – Nenadálová: Solid waste masses assessments and processing methods for solid waste from current DEMO design (2023), EUROfusion deliverable SAE.S-05.02-T001-D005, EFDA_D_2QNL6A (2024) <https://idm.euro-fusion.org/default.aspx?uid=2QNL6A>
- [2] L. Vála, J. Stoklasa, L. Karásková – Nenadálová: Management scheme for LiPb waste, EUROfusion deliverable SAE.S-05.02-T001-D007, EFDA_D_2QDEWE (2025) <https://idm.euro-fusion.org/default.aspx?uid=2QDEWE>
- [3] References: IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, IAEA Vienna. (2023)
- [4] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, SSR-6, IAEA Vienna (2026)
- [5] IAEA Classification of Radioactive Waste, GSG – 1, IAEA Vienna (2009)
- [6] J. Stoklasa and L. Karásková Nenadálová, Solid operational waste expected from current DEMO design (2022), EFDA_D_2PUZH9 Eurofusion (2023). <http://idm.euro-fusion.org/?uid=2PUZH9>
- [7] J. Stoklasa, L. Karásková – Nenadálová: Solid waste products of EU DEMO – Focus on tungsten dust reprocessing, Fusion Engineering and Design 200 (2024) 114224 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114224>

- [8] J. Bromley: GSSR Vol. 11 - Assessment and strategies for waste management, EUROfusion deliverable SAE-S.05.01-T001-D004, EFDA_D_2P2992 (2024) <https://idm.euro-fusion.org/?uid=2P2992>
- [9] M.R. Gilbert, T. Eade, C. Bachmann, U. Fischer, N.P. Taylor: Waste assessment of European DEMO fusion reactor designs, Fusion Engineering and Design 136, Part A (November 2018) 42-48 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.12.019>
- [10] S. Rosanvallon, P. Kanth, J. Elbez-Uzan: Waste management strategy for EU DEMO: Status, challenges and perspectives, Fusion Engineering and Design 202 (2024) 114307 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114307>
- [11] <https://www.javys.sk/en/activities-of-the-company/raw-management/manufacturing-of-fibre-reinforced-concrete-containers>
- [12] <https://skb.se/projekt-for-framtiden/utbyggnad-av-sfr/vara-ansokningar/ansokningshandlingarna/ansokan-enligt-karntekniklagen/>
- [13] <https://www.enresa.es/eng/index/activities-and-projects/el-cabril>
- [14] J. B. Park, et al.: Wolsong Low- and Intermediate-level Radioactive Waste Disposal Centre: Progress and Challenges, Nuclear Engineering and Technology, Vol 41, No 4 (May 2009) <https://koreascience.or.kr/article/JAKO200919463950470.pdf>
- [15] <https://www.gapcontainers.co.uk/shipping-containers/container-dimensions/>
- [16] <https://www.croftltd.com/pdf/PATRAM-2010-Oral-Paper-415-v13-low-res.pdf>
- [17] <https://international.andra.fr/operational-facilities/aube-waste-disposal-facility-csa/short-lived-low-and-intermediate-level-waste-lilw-sl>
- [18] <https://ukinventory.nda.gov.uk/information-hub/about-radioactive-waste/how-do-we-manage-radioactive-waste/>
- [19] <https://www.cdb-beton.fr/en/products/containers/>
- [20] <https://rhk.hu/nrht>
- [21] https://archiv.bge.de/archiv/www.endlager-konrad.de/Konrad/EN/themen/abfalle/konditionierung-behaelter/konditionierung-behaelter_node.html
- [22] <https://www.eisenwerk-bassum.de/stahlblechcontainer>
- [23] USDOE: Waste Isolation Pilot Plant: Hazardous Waste Facility Permit, Attachment A1 (June 2024)
- [24] <https://nukewatch.org/issues/wipp/page/8/>

Preparation for the disposal of radioactive waste from nuclear fusion

Lucie Karásková Nenádlová, Lumír Nachmilner, Jaroslav Stoklasa

Abstract

With regard to the anticipated generation of radioactive waste from fusion reactors, this paper presents an overview of containers used for the disposal of radioactive waste from current nuclear facilities, included their parameters, and examples of their application in various types of radioactive waste repositories. Important criteria for container selection are listed, and containers for very low, low, and medium-level radioactive waste are described.

Keywords: *Radioactive waste, fusion, container, waste packaging, waste deposition*