

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T041 Stavba jaderně energetických zařízení

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem

Autor: **Bc. Kateřina VAŠÍČKOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Jan ZDEBOR, CSc.**

Akademický rok 2020/2021

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina VAŠÍČKOVÁ**  
Osobní číslo: **S19N0155P**  
Studijní program: **N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení**  
Studijní obor: **Stavba jaderně energetických zařízení**  
Téma práce: **Zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Zásady pro vypracování

Cílem práce je zpracovat projekční návrh zařízení pro manipulaci s vyhořelým jaderným palivem, které bylo před tím skladováno v obalovém souboru (kontejneru) a následně má být přeloženo do jiného zařízení nebo úložného obalového souboru pro zavezení do hlubinného úložiště. Nejprve je nutné provést teoretickou přípravu, následně zpracovat projekt zařízení a provést nezbytné výpočty související s vlastní manipulací. Ve finální fázi provést porovnání navrženého řešení s konstrukčními řešeními obdobných zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem v jiných zemích a provést jejich závěrečné kritické vyhodnocení.

1. Popište problematiku manipulace s vyhořelým jaderným palivem na reaktorech typu PWR se zaměřením na reaktory typu VVER-440 a VVER-1000.
2. Provedte rešerši konstrukcí obalových souborů pro použité jaderné palivo z reaktorů PWR se zaměřením na reaktory typu VVER-440 a VVER-1000.
3. Provedte rešerši konstrukcí a technických parametrů úložných obalových souborů pro palivo z reaktorů typu VVER-440 a VVER-1000 .
4. Navrhněte koncepční řešení zařízení pro manipulaci s použitým palivem pro projekt hlubinného úložiště v ČR.
5. Provedte výpočet potřebného stínění vybraných konstrukčních částí navrženého zařízení (optimální materiál a tloušťku jednotlivých dílů).
6. Provedte porovnání navrženého řešení s konstrukčními řešeními obdobných zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem v jiných zemích.
7. Provedte závěrečné kritické vyhodnocení zvoleného řešení.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **1 – 3 výkresy A2**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

- Jeřábek Karel: Metodika navrhování strojů, Vyd. 1. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02012-6
- Design of fuel handling and storage systems for nuclear power plants : safetyguide. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2003. ISBN 92-0-107803-X
- Remote Technology Related to the Handling, Storage and Disposal of Spent Fuel,
- IAEA-TECDOC-842
- Yucca Mountain Science and Engineering Report, U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management February 2002, DOE/RW-0539-1
- Interní zdroje ŠKODA JS z výstavby elektráren a výzkumných reaktorů

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultanti diplomové práce: **Ing. Jan Jílek**  
ŠKODA JS a.s.  
**Ing. Jiří Závorka**  
ŠKODA JS a.s.

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Dr. Ing. Jaroslav Synáč**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: 28. 5. 2021

---

podpis autora



## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Janu Zdeborovi, CSc. za cenné rady, ochotu a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Poděkování patří dále i Ing. Janu Jílkovi za praktické postřehy a panu Ing. Jiří Závorkovi za velkou podporu v oblasti využití výpočtového kódu Serpent. Kromě zmíněných zástupců společnosti ŠKODA JS a.s. patří mé díky i panu Ing. Jaromíru Augustovi, Ph.D. za ochotu a poskytnutí interních materiálů společnosti SÚRAO.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Bc. Vašíčková	<b>Jméno</b> Kateřina	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba jaderně energetických zařízení		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Zdebor, CSc.	<b>Jméno</b> Jan	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	53	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	36	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	17
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na manipulaci s použitým jaderným palivem na reaktorech typu PWR. Předává poznatky o využívaných obalových souborech a úložných obalových souborech. Cílem této práce je provedení návrhu zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem včetně výpočtu potřebného stínění a jeho porovnání s obdobnými zařízeními v jiných zemích.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>použité jaderné palivo, obalový soubor, horká komora, úložný obalový soubor, hlubinné úložiště, Serpent</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Vašíčková	Name Kateřina	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Nuclear Power Equipment Design		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zdebor, CSc.	Name Jan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Handling machine for spent nuclear fuel		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	53	<b>TEXT PART</b>	36	<b>GRAPHICAL PART</b>	17
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis is focused on the handling of spent nuclear fuel in PWR type reactors. It transfers knowledge of the used storage containers and disposal containers. The aim of this thesis is to design a handling machine for spent nuclear fuel including the calculation of required shielding and its comparison with similar handling machine in other countries.
<b>KEY WORDS</b>	spent nuclear fuel, storage container, hot cell, disposal container, deep disposal of spent nuclear fuel, Serpent

## SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Název
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
NEA	Agentura pro jadernou energii
SÚJB	Správa úložišť pro jadernou bezpečnost
PWR	Tlakovodní reaktory
PJP	Použité jaderné palivo
PK	Palivová kazeta
AZ	Aktivní zóna
PS	Palivový soubor
HB	Horní blok
BOT	Blok ochranných trub
ŠTK	Šachta transportního kontejneru
JE	Jaderná elektrárna
ÚOS	Úložný obalový soubor
SK	Superkontejner

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Použité jaderné palivo</b> .....	<b>14</b>
2.1	<b>VVER-440</b> .....	<b>14</b>
2.2	<b>VVER-1000</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Manipulace s PJP</b> .....	<b>16</b>
3.1	<b>Reaktor</b> .....	<b>17</b>
3.1.1	Zavážecí stroj.....	18
3.2	<b>Bazén skladování PJP</b> .....	<b>18</b>
3.3	<b>Šachta transportního kontejneru</b> .....	<b>19</b>
3.4	<b>Mezisklad PJP</b> .....	<b>20</b>
3.4.1	Mokrý .....	20
3.4.2	Suchý .....	20
3.5	<b>Hlubinné úložiště PJP</b> .....	<b>21</b>
3.5.1	Příjem OS .....	21
3.5.2	Skladování a přeprava OS .....	21
3.5.3	Překládání PJP z OS do ÚOS .....	22
3.5.4	Přeprava ÚOS do ukládacího vrtu .....	23
3.6	<b>Přepřacovací závod PJP</b> .....	<b>24</b>
3.6.1	Metoda PUREX .....	24
<b>4</b>	<b>Obalový soubor PJP</b> .....	<b>25</b>
4.1	<b>ŠKODA 440/84</b> .....	<b>26</b>
4.1.1	Válcové těleso .....	26
4.1.2	Nosný koš .....	26
4.1.3	Uzavírací systém .....	26
4.1.4	Nosné čepy .....	26
4.2	<b>ŠKODA 1000/19</b> .....	<b>27</b>
4.2.1	Válcové těleso .....	27
4.2.2	Nosný koš .....	28
4.2.3	Uzavírací systém .....	28
4.2.4	Nosné čepy .....	28
4.3	<b>Castor 440/84</b> .....	<b>29</b>
4.4	<b>Castor 1000/19</b> .....	<b>30</b>
4.5	<b>TN</b> .....	<b>31</b>
4.6	<b>CONSTOR 440/84</b> .....	<b>31</b>
4.7	<b>HI-STORM</b> .....	<b>32</b>
4.8	<b>NUHOMS</b> .....	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Úložný obalový soubor PJP</b> .....	<b>33</b>
5.1	<b>ŠKODA VVER 440/7</b> .....	<b>34</b>

5.2	ŠKODA VVER 1000/3 .....	34
5.3	7PK VVER440 .....	35
5.4	3PK VVER1000.....	35
5.5	KBS-3 .....	36
5.6	CU1 a CU2.....	36
6	Zařízení pro manipulaci PJP.....	37
6.1	Konstrukce .....	37
6.1.1	Nástěnné koleje .....	37
6.1.2	Most.....	38
6.1.3	Mostové vozíky.....	38
6.1.4	Pracovní teleskop .....	39
6.1.5	Kamera .....	39
6.1.6	Manipulátor.....	39
7	Výpočet stínění navrženého zařízení.....	39
7.1	Stínění ionizujícího záření PJP.....	40
7.1.1	$\alpha$ -záření .....	40
7.1.2	$\beta$ -záření .....	40
7.1.3	$\gamma$ -záření.....	40
7.1.4	Neutronové záření .....	40
7.2	Serpent.....	41
7.2.1	Příprava použitého jaderného paliva.....	41
7.2.2	Geometrie stínění .....	44
7.2.3	Výpočet stínění .....	45
8	Porovnání navrženého řešení .....	46
8.1	Finsko .....	46
8.2	Švédsko.....	47
8.3	USA.....	48
9	Kritické vyhodnocení navrženého řešení.....	49
10	Závěr .....	50
	Seznam použité literatury .....	51

## Seznam obrázků

Obrázek č. 1	PK reaktoru VVER-440 [5] .....	14
Obrázek č. 2	Palivová a absorpční část regulační kazety VVER-440 [7].....	15
Obrázek č. 3	PS VVANTAGE-6 a TVSA-T pro VVER-1000 [8] [5] .....	16
Obrázek č. 4	Kontejnment VVER-1000 z pohledu manipulace PJP [10].....	17
Obrázek č. 5	Bazén skladování PJP VVER-1000 [10] .....	18
Obrázek č. 6	Vyložení OS ze speciálního vagónu na JE Dukovany [14] .....	19
Obrázek č. 7	Suchý mezisklad PJP na JE Dukovany [14] .....	20
Obrázek č. 8	Schéma haly příjmu a překládky [16].....	21
Obrázek č. 9	Schéma místnosti příjmu a horké komory [16].....	22
Obrázek č. 10	Schéma manipulace PJP z OS do ÚOS [16].....	22
Obrázek č. 11	Schéma manipulace ÚOS [16] .....	23
Obrázek č. 12	Schéma centra přípravy superkontejneru [16] .....	24
Obrázek č. 13	Schéma uzavřeného palivového cyklu [17] .....	25
Obrázek č. 14	Přehled OS pro PJP [19].....	25
Obrázek č. 15	OS ŠKODA 440/84 [18].....	27
Obrázek č. 16	OS ŠKODA 1000/19 [18].....	28
Obrázek č. 17	OS Castor 440/84 [20].....	29
Obrázek č. 18	OS Castor 1000/19 [21].....	30
Obrázek č. 19	OS TN-32 [24] .....	31
Obrázek č. 20	OS CONSTOR 440/84 [26] .....	32
Obrázek č. 21	OS HI-STORM 100 [28] .....	32
Obrázek č. 22	OS NUHOMS HSM [29].....	33
Obrázek č. 23	ÚOS ŠKODA VVER 440/7 [31] .....	34
Obrázek č. 24	ÚOS ŠKODA VVER 1000/3 [31].....	34
Obrázek č. 25	ÚOS 7PK VVER440 [32].....	35
Obrázek č. 26	ÚOS 3PK VVER1000 [32].....	35
Obrázek č. 27	Příčný řez ÚOS KBS-3 [34] .....	36
Obrázek č. 28	Příčný řez ÚOS CU1 a CU2 [33].....	36
Obrázek č. 29	Nástěnná kolej pro manipulátor horké komory.....	38
Obrázek č. 30	Most manipulátoru horké komory .....	38
Obrázek č. 31	Mostové vozíky manipulátoru horké komory .....	38
Obrázek č. 32	Pracovní teleskop manipulátoru horké komory .....	39
Obrázek č. 33	Zdvihací zařízení .....	39
Obrázek č. 34	Stínění ionizujícího záření [38].....	41
Obrázek č. 35	Geometrie palivového souboru TVSA-T.....	42
Obrázek č. 36	Geometrie palivového souboru a stínění .....	45
Obrázek č. 37	Rozložení neutronového toku palivového souboru se stíněním.....	45
Obrázek č. 38	Manipulační zařízení pro HÚ ve Finsku [42] .....	47
Obrázek č. 39	Manipulační zařízení pro HÚ ve Švédsku [43].....	47
Obrázek č. 40	Mokrý část manipulace s PJP pro HÚ v USA [44] .....	48
Obrázek č. 41	Suchá část manipulace s PJP pro HÚ v USA [44].....	48

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1	Parametry OS ŠKODA 440/84 [18].....	27
Tabulka č. 2	Parametry OS ŠKODA 1000/19 [18].....	29
Tabulka č. 3	Parametry OS Castor 440/84 [20] .....	30
Tabulka č. 4	Parametry OS Castor 1000/19 [21] .....	30
Tabulka č. 5	Parametry ÚOS ŠKODA VVER 440/7 [31].....	34
Tabulka č. 6	Parametry ÚOS ŠKODA VVER 1000/3 [31].....	34

Tabulka č. 7	Parametry ÚOS 7PK VVER440 [32].....	35
Tabulka č. 8	Parametry ÚOS 3PK VVER1000 [32].....	36
Tabulka č. 9	Omezení konstrukčního provedení vlivem interakcí s okolím [16].....	37
Tabulka č. 10	Parametry palivového souboru TVSA-T [40].....	41

## Seznam grafů

Graf č. 1	Závislost vyhoření na krocích vyhoření.....	43
Graf č. 2	Závislost koncentrace nuklidu Pu239 na krocích vyhořívání.....	43
Graf č. 3	Závislost koncentrace nuklidu U235 na krocích vyhořívání.....	43
Graf č. 4	Závislost koncentrace nuklidu Cs137 na krocích vyhořívání.....	44
Graf č. 5	Závislost koncentrace nuklidu Sr90 na krocích vyhořívání.....	44
Graf č. 6	Závislost neutronové dávky na vzdálenosti od zdroje.....	46



# 1 Úvod

Základním zdrojem použitého jaderného paliva, které se v případě otevřeného palivového cyklu neuvažující jeho další využití považuje za vysokoaktivní odpad, je v ČR stejně jako v jiných zemích jednoznačně provoz energetických jaderných reaktorů. Z pohledu jeho manipulace a nakládání s ním existuje řada legislativních opatření, která cílí na zamezení šíření radioaktivity do životního prostředí. Za tímto účelem byl pro ČR vypracován závazný dokument „Koncepte nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR“, jenž stanovuje zásady, postupy a cíle pro manipulaci a nakládání s použitým jaderným palivem a navazuje tak na legislativu a doporučení od MAAE a OECD/NEA. Základní požadavky pro nakládání s použitým jaderným palivem jsou však jasně definovány atomovým zákonem č. 263/2016 a ve vyhlášce SÚJB. [1], [2], [3]

V současnosti se použité jaderné palivo, jež nebude na konci svého palivového cyklu přepracováno, skladuje v meziskladech, čímž tak z pohledu délky energetického využívání jaderných elektráren dochází k postupnému zaplňování jejich kapacity, jelikož ještě nikde na světě není v provozu hlubinné úložiště, které je na rozdíl od meziskladů pro dlouhodobé skladování použitého jaderného paliva primárně projektováno. Zmíněná „Koncepte nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR“ proto ukládá povinnost připravovat hlubinné úložiště i na území ČR, jehož zprovoznění je podle současného harmonogramu naplánováno na rok 2065. [1]

První část práce se zabývá problematikou manipulace s použitým jaderným palivem na reaktorech typu PWR. Ta popisuje nakládání s použitým jaderným palivem od jeho vyvezení z reaktoru až po hlubinné uložení v případě otevřeného palivového cyklu či přepracování v případě uzavřeného palivového cyklu. Práce pokračuje popisem konstrukcí obalových souborů pro použité jaderné palivo. Zde je zmíněno hned několik konstrukčních provedení od kovových přes železobetonové až po betonové obalové soubory. Poslední kapitola teoretické části pak popisuje konstrukční a technické parametry úložných obalových souborů, pro něž je zpracováno již několik koncepcí.

Druhá část práce je věnována návrhu koncepčního řešení zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem pro projekt hlubinného úložiště v ČR, jenž zajišťuje v horké komoře překládku použitého jaderného paliva z obalových souborů do úložných obalových souborů. Pro tento návrh je následně proveden výpočet potřebného stínění za pomoci softwaru Serpent. Vytvořený koncepční návrh je v závěru práce porovnán s konstrukčními řešeními obdobných zařízení využívajících pro manipulaci s použitým jaderným palivem v jiných zemích a kriticky vyhodnocen.

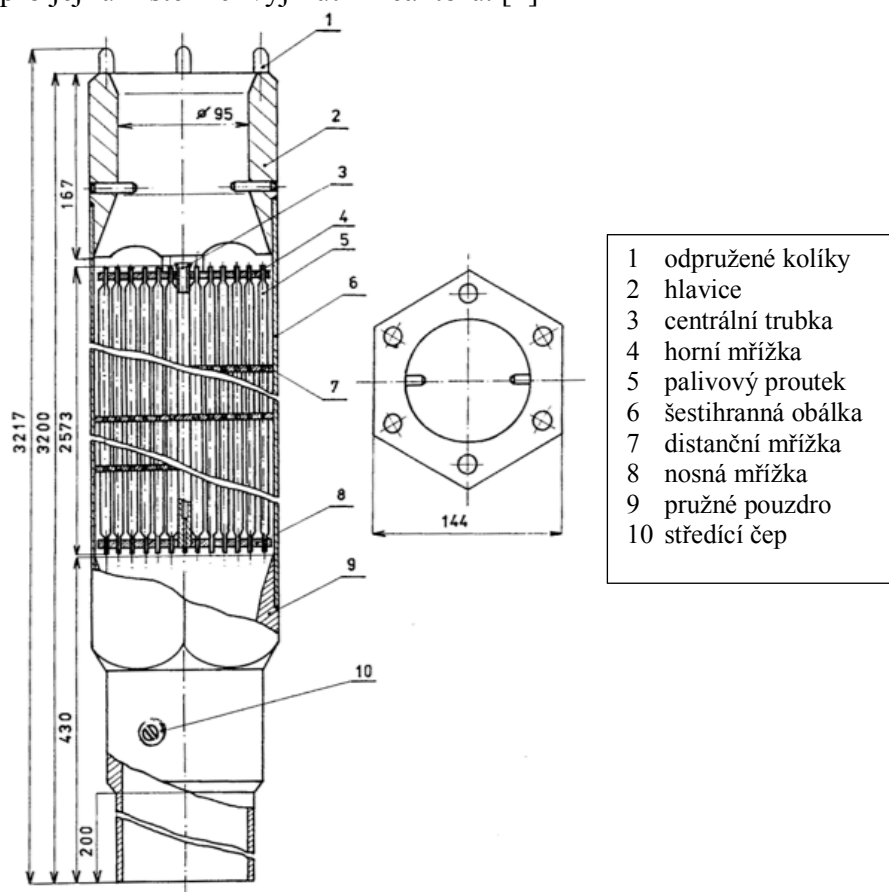
Po přečtení této práce by měl čtenář získat přehled o zadní části palivového cyklu, konstrukčních typech obalových souborů, úložných obalových souborů a možných koncepčních řešeních zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem.

## 2 Použité jaderné palivo

Stejně jako na všech PWR je jaderným palivem na reaktorech typu VVER-440 a VVER-1000 izotopicky obohacený uran. Ten má oproti přírodnímu uranu vyšší podíl štěpitelného izotopu  $U_{92}^{235}$ , který však v případě energetických reaktorů nesmí překročit horní hranici 5 % zastoupení. Po ozáření jaderného paliva a jeho následném trvalém vyjmutí z aktivní zóny reaktoru je dále jaderné palivo označováno jako použité jaderné palivo či podle atomového zákona č. 263/2016 jako vyhořelé jaderné palivo. Jeho konstrukce je však u reaktorů typu VVER-440 a VVER-1000 odlišná. [4]

### 2.1 VVER-440

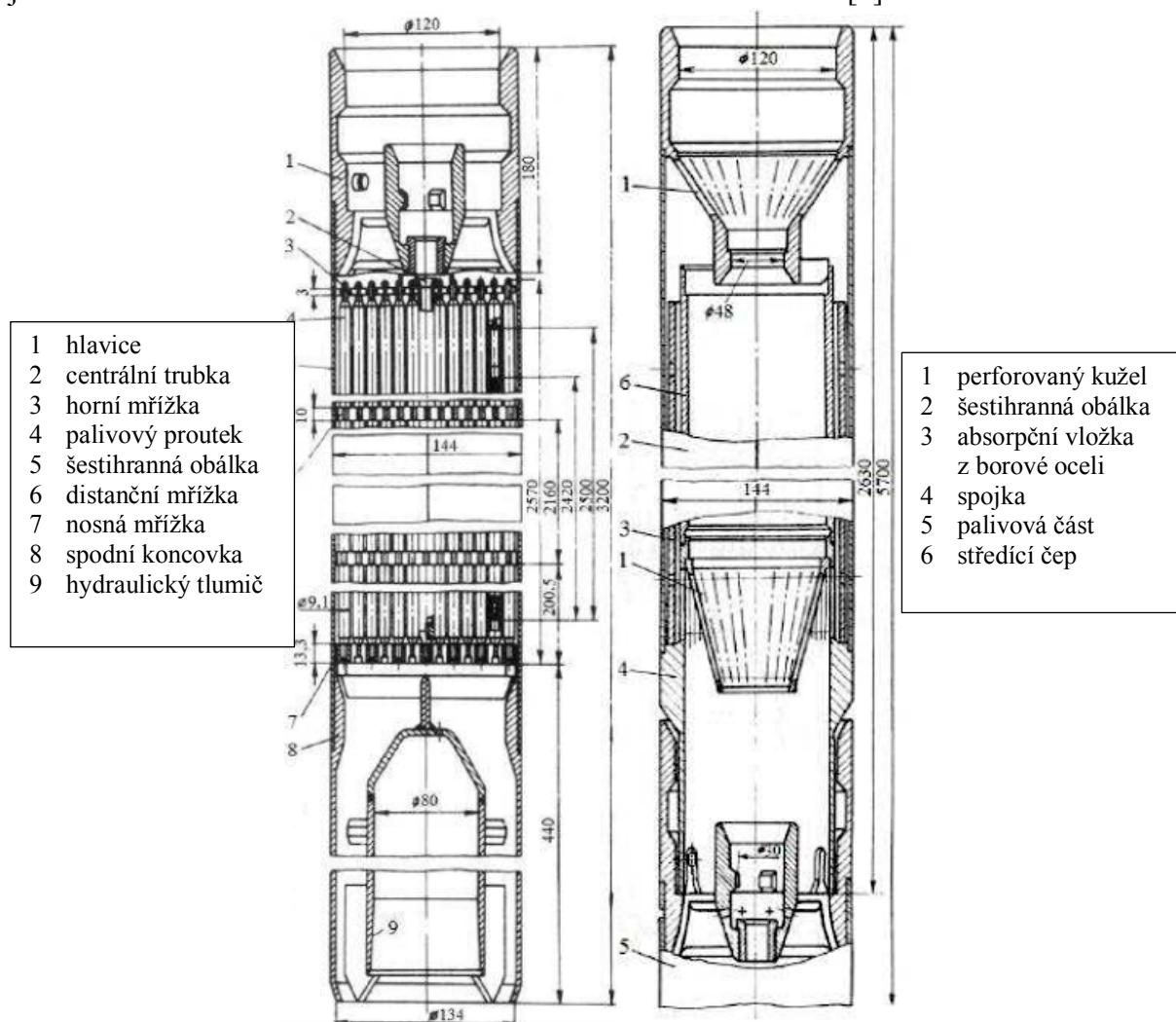
V reaktoru typu VVER-440 je rozmístěno přesně 312 palivových kazet, kdy jednotlivá palivová kazeta, jež je obklopená šestihrannou obálkou, obsahuje 126 palivových proutků sestávajících se z palivových pelet ve formě  $UO_2$  umístěných v trubce ze slitiny zirkona a niobu (Zr1Nb). Palivová kazeta se dále skládá z odpružených kolíků, hlavice, centrální trubky, horní mřížky, distančních mřížek, nosné mřížky, pružného pouzdra, středícího čepu a dolní válcové části. Uvedené konstrukční prvky palivové kazety, které jsou vyznačeny na **Obrázek č. 1**, pak slouží k požadovaným funkcím. V případě hlavice se jedná o možnost uchopení palivové kazety zavážecím strojem pro její umístění či vyjmutí z reaktoru. [4]



Obrázek č. 1 PK reaktoru VVER-440 [5]

Kromě palivových kazet se v reaktoru typu VVER-440 nachází i 37 regulačních kazet rozčleněných do 6 skupin. Prvních pět skupin po šesti regulačních kazetách je v průběhu provozu trvale vytaženo nad AZ a slouží jako havarijní ochrana. Poslední šestá skupina, která je jako jediná za provozu částečně zasunuta, pak slouží pro regulaci výkonu a tvoří ji sedm regulačních kazet. Ty se sestávají z horní absorpční části a dolní palivové části, která je téměř

shodná s palivovými kazetami, znázorněnými na **Obrázek č. 2**. Jedinými rozdíly jsou odlišné koncové části a zkrácení výšky sloupce palivových pelet umístěných v palivovém proutku regulační kazety o 100 mm. Pro zachování shodné délky proutku palivové kazety a regulační tyče je však tento rozdíl odstraněn umístěním válečku z nerezové oceli. [6]



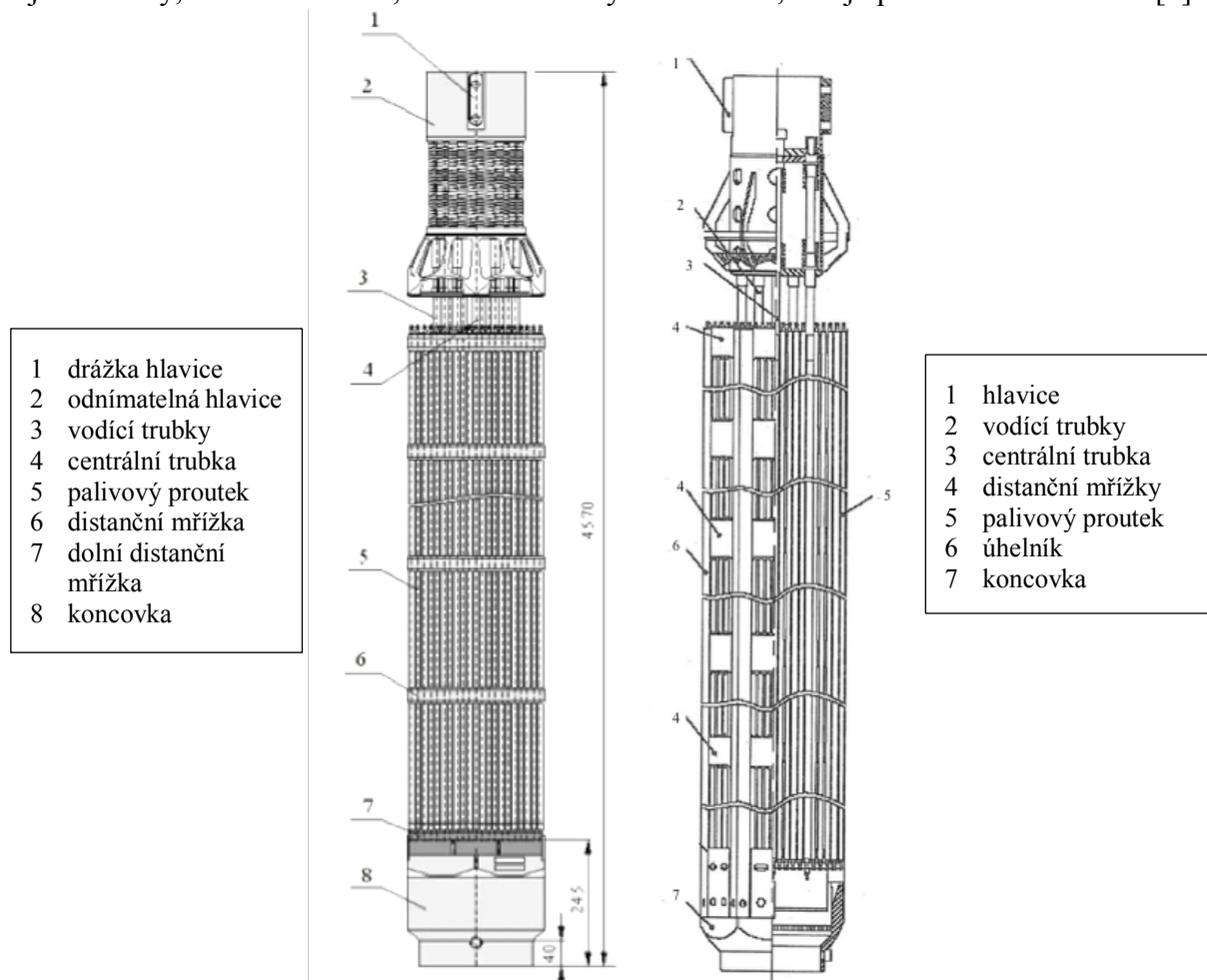
**Obrázek č. 2** Palivová a absorpční část regulační kazety VVER-440 [7]

Reaktor typu VVER-440 byl původně projektován na tříletý palivový cyklus. Postupné zlepšování parametrů paliva však umožnilo přechod na současný pětiletý palivový cyklus. Jednalo se především o použití vyhořívajícího absorbátoru v podobě gadolinia, prodloužení palivového proutku o 60 mm a také ztenčení pokrytí palivového proutku a tím zmenšení průměru palivového proutku, což ve výsledku zvýšilo průtok vody mezi jednotlivými palivovými proutky. Během plánované odstávky pro výměnu jaderného paliva, která se provádí převážně jednou do roka, tak proběhne vyjmutí průměrně 72 palivových kazet s použitým jaderným palivem a zavezení stejného počtu palivových kazet s čerstvým jaderným palivem. [5]

## 2.2 VVER-1000

V reaktoru typu VVER-1000 je rozmístěno přesně 163 palivových souborů, kdy jednotlivý palivový soubor obsahuje 312 palivových proutků sestávajících z palivových pelet ve formě  $\text{UO}_2$ . V případě palivového souboru VVANTAGE-6 od společnosti Westinghouse se pelety nacházejí v trubce ze zirkoniové slitiny (Zircalloy-4). V případě palivového souboru TVSA-T od společnosti TVEL se pelety nacházejí v trubce ze slitiny zirkonu a niobu ( $\text{Zr1Nb}$ ) a celý palivový soubor se skládá ze dvou typů palivových proutků, kdy jeden obsahuje navíc

vyhořívající absorbátor v podobě gadolinia. Palivový soubor TVSA-T je navíc opatřen i úhelníky, které se nacházejí na každé ze šesti hran palivového souboru. Ostatní základní konstrukční prvky obou palivových souborů jsou však téměř shodné a patří mezi ně hlavice, 18 vodících trubek pro možnost zajištění absorpčních tyčí (klastřů) v případě běžné regulace či zásahu havarijní ochrany, centrální trubka, distanční mřížky a koncovka, což je patrné z **Obrázek č. 3**. [5]



**Obrázek č. 3** PS VVANTAGE-6 a TVSA-T pro VVER-1000 [8] [5]

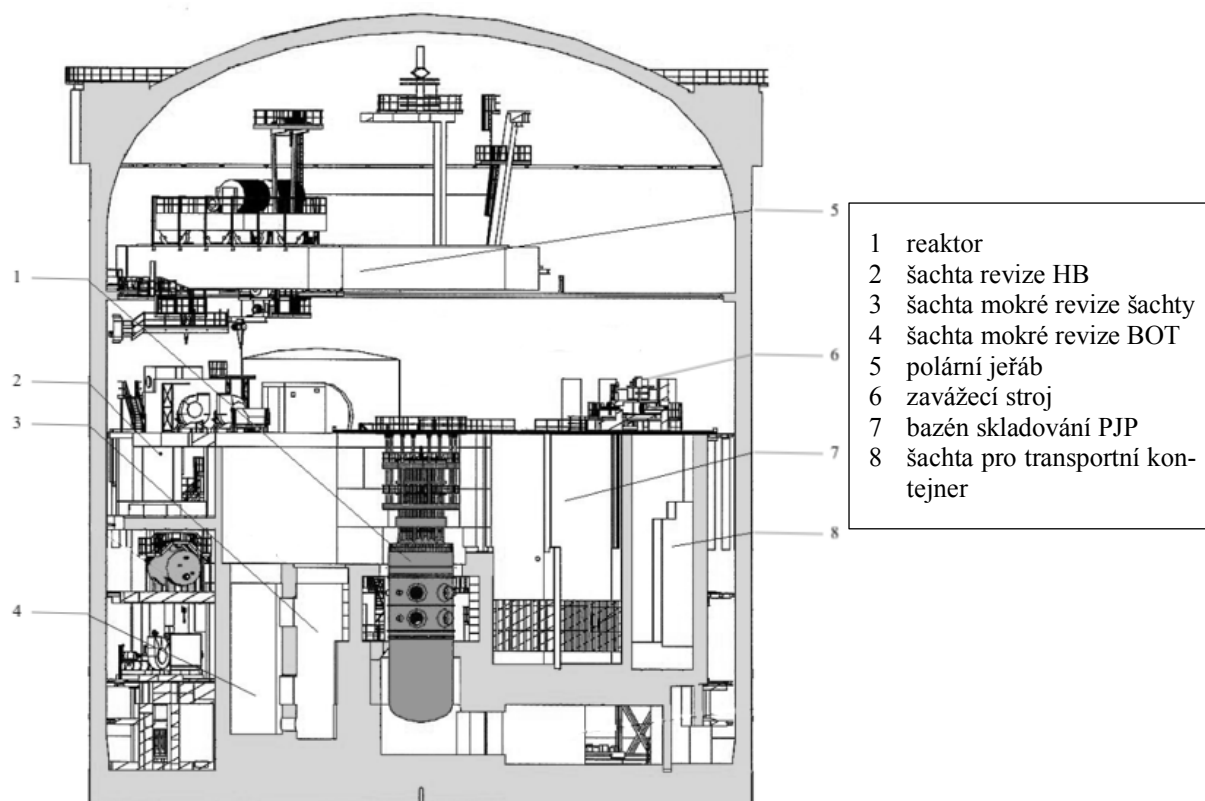
Reaktor typu VVER-1000 využívá čtyřletý palivový cyklus. Během plánované odstávky pro výměnu jaderného paliva, která se provádí převážně jednou do roka, tak proběhne vyjmutí průměrně 40 palivových souborů s použitým jaderným palivem a zavezení stejného počtu palivových souborů s čerstvým jaderným palivem. [5]

### 3 Manipulace s PJP

Manipulace s použitým jaderným palivem představují veškeré manipulace zadní části palivového cyklu. Jedná se tak o veškeré činnosti související s jeho nakládáním od okamžiku vyvezení použitého jaderného paliva z reaktoru až po okamžik uložení do hlubinného úložiště či přepracování v přepracovacím závodě pro možnost jeho opětovného využití v závislosti na tom, zda se jedná o otevřený či uzavřený palivový cyklus. Jelikož se však jedná o manipulace právě s použitým jaderným palivem, je nutné při veškerých činnostech dbát na dostatečné stínění a chlazení v závislosti na úrovni jeho záření a produkci tepla. [9]

### 3.1 Reaktor

Před zahájením samotné manipulace s použitým jaderným palivem je na odstaveném reaktoru zapotřebí provést několik nezbytných kroků. V první řadě se jedná o demontování horního bloku reaktoru a jeho umístění do šachty revize horního bloku. Následuje sejmutí stavědel, které se skládají z vyjímatelného hradítka a základového rámu, představující ocelové desky jednotlivých sekcí bazénu skladování pro použité jaderné palivo, a naopak stavědla mezi horní částí betonové šachty reaktoru a bazénem skladování a mezi bazénem skladování a šachtou transportního kontejneru jsou utěsněny. V případě běžné odstávky pro vyvezení použitého jaderného paliva, kdy dochází u reaktoru typu VVER-440 k vyvezení průměrně 72 palivových kazet a u reaktoru typu VVER-1000 k vyvezení průměrně 40 palivových souborů, bude stavědlo mezi sekcí bazénu skladování pro použité jaderné palivo a sekcí bazénu skladování pro použité jaderné palivo sloužící pouze pro případ vyvezení celé AZ rovněž utěsněno. Příslušné sekce bazénu skladování použitého jaderného paliva a také bazén mokré přepravy a šachty revize se zaplní lehkou vodou s příměsí kyseliny borité o odstavné koncentraci. Po dosažení požadované hladiny se nakonec provede demontáž a přeprava bloku ochranných trub do jeho šachty revize znázorněné na **Obrázek č. 4** a vyjmutí hradítka ze stavědla mezi horní částí betonové šachty reaktoru a bazénem skladování za pomoci polárního jeřábu. [10]



Obrázek č. 4 Kontejnment VVER-1000 z pohledu manipulace PJP [10]

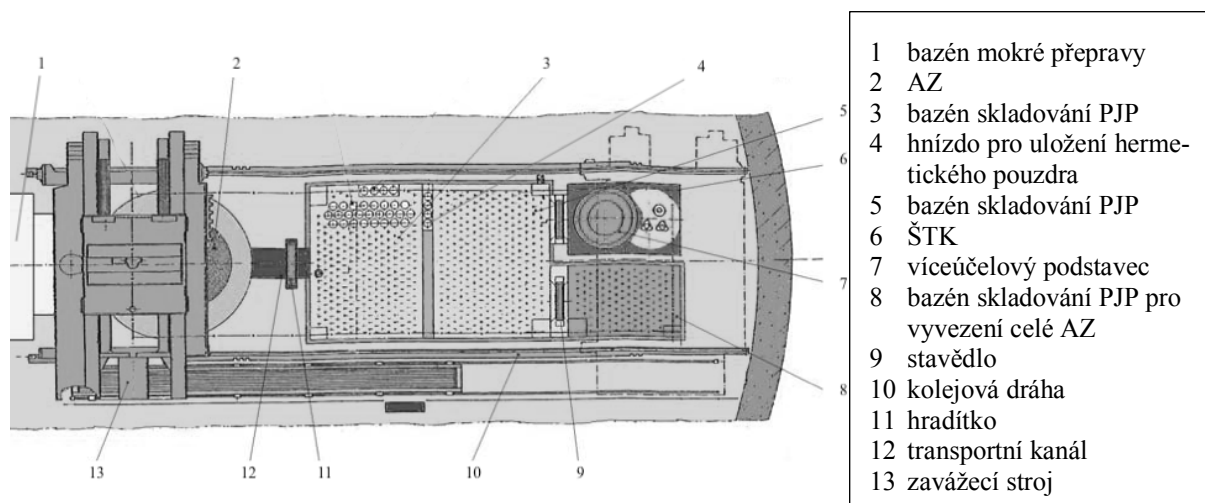
Prvním krokem manipulace s použitým jaderným palivem je jeho vyvezení z reaktoru, ke kterému u reaktorů typu VVER-440 a VVER-1000 dochází převážně jednou do roka v rámci odstávky pro výměnu paliva. Je tedy zřejmé, že výměna paliva na uvedených reaktorech probíhá kampaňovým způsobem, jehož nevýhodou je sice poměrně dlouhá doba odstavení reaktoru z provozu, avšak na druhé straně je tato doba efektivně využita pro revizi a pravidelnou údržbu. Pro zmíněné vyvezení použitého jaderného paliva z reaktoru, které bude následně uloženo do bazénu skladování, slouží manipulační zařízení v podobě zavážecího stroje. [4]

### 3.1.1 Zavážecí stroj

Zavážecí stroj je elektromechanické zařízení určené k manipulaci s jaderným palivem v době odstávky reaktoru pro výměnu paliva. Skládá se z mostu s pojezdovým zařízením a samotného manipulátoru, který je vybaven pracovním teleskopem zajišťujícím samotnou manipulaci s jaderným palivem a televizním teleskopem pro možnost monitorování prováděné činnosti. Zvedání a spouštění obou teleskopů pak umožňují umístěné pohony zdvihu a pro možnost pohybu teleskopů kolem osy se zde nacházejí i pohony otáčení. V případě reaktorů typu VVER-440 a VVER-1000 manipuluje zavážecí stroj jak s čerstvým, tak s použitým jaderným palivem vždy pod dostatečnou vrstvou vody s příměsí kyseliny borité o odstavné koncentraci, která tak zajišťuje dostatečné stínění a chlazení. Proto zavážecí stroj není mohutné konstrukce a ani není vybaven chladičím systémem. [4]

### 3.2 Bazén skladování PJP

Před uložením použitého jaderného paliva do kompaktních mříží bazénu skladování je provedena kontrola hermetičnosti pokrytí palivových článků. Jestliže se zjistí jeho porušení, jehož vlivem by mohlo docházet k úniku štěpných produktů do prostoru kontejnmentu, umístí se palivová kazeta/soubor do hermetického pouzdra a až společně s ním do pro tyto účely určených hnízd v bazénu skladování znázorněných na **Obrázek č. 5**. V opačném případě, kdy není pokrytí palivových článků poškozeno, je palivová kazeta/soubor uložena rovnou do kompaktní mříže, jenž je tvořena hexagonální konstrukcí ze speciální oceli legované bórem. [11]



Obrázek č. 5 Bazén skladování PJP VVER-1000 [10]

Účelem skladování použitého jaderného paliva v bazénu skladování je snížení vývinu zbytkového tepla na takovou úroveň, kterou zvládne odvést obalový soubor, do něhož bude použité jaderné palivo v rámci následující manipulace uloženo. Bazén skladování použitého jaderného paliva musí také zajišťovat podkritičnost skladovaného použitého jaderného paliva a ochranu před radioaktivním zářením. [12]

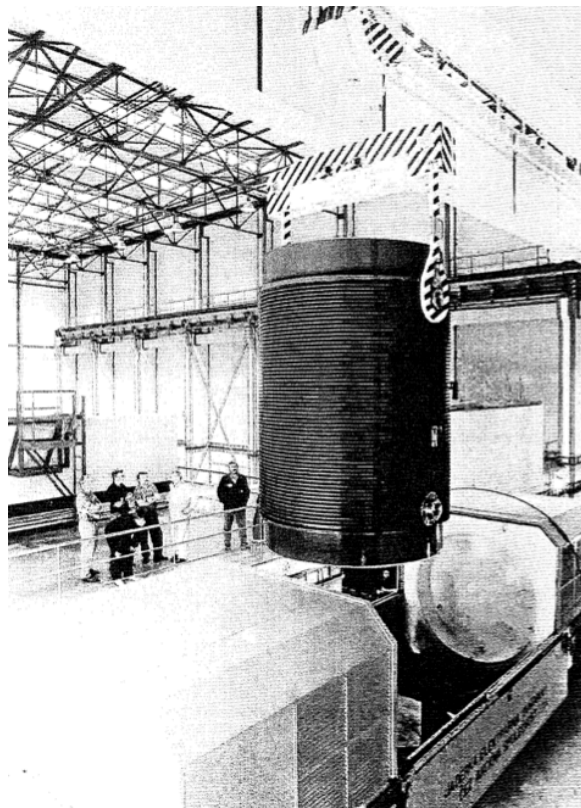
Bazén skladování pojme u reaktoru typu VVER-440 682 palivových kazet a 17 kazet umístěných v hermetických pouzdrech. Skládá se z jedné sekce a v případě potřeby vyvezení celé AZ se do bazénu skladování umístí rezervní mříž. Palivové kazety se zde skladují minimálně 7 let. U reaktoru typu VVER-1000 lze do bazénu skladování umístit přesně 678 palivových souborů a 10 kazet uložených v hermetických pouzdrech. Je tvořen třemi sekcemi, z nichž dvě obsahují po dvou kompaktních mřížích a třetí jen po jedné kompaktní mříži. Palivové soubory se zde skladují 12 let. [12]

### 3.3 Šachta transportního kontejneru

Před přemístěním použitého jaderného paliva z bazénu skladování do obalového souboru, jehož popis lze nalézt v kapitole pod názvem **Obalový soubor PJP**, je zapotřebí zaplnit šachtu transportního kontejneru lehkou vodou s příměsí kyseliny borité o odstavné koncentraci. V dalším kroku se provede odstranění hradítka oddělující prostor šachty transportního kontejneru od bazénu skladování a umístění otevřeného obalového souboru pod vodní hladinu šachty transportního kontejneru pomocí polárního jeřábu, což umožňuje následné zavezení použitého jaderného paliva do obalového souboru zavážecím strojem. [13]

Po zaplnění obalového souboru palivovými kazetami/soubory s použitým jaderným palivem o přípustných hodnotách zbytkového tepelného výkonu, přichází na řadu opatření kontejneru primárním víkem, po kterém se šachta transportního kontejneru vypustí a provede se dekontaminace obalového souboru oplachem vysokotlakou demineralizovanou vodou a umístěné primární víko se zajistí svorníky s maticemi. Dále přichází na řadu drenážování včetně vysoušení vnitřního prostoru obalového souboru, vakuování a zaplnění vnitřního prostoru obalového souboru inertním plynem nejčastěji v podobě helia, po čemž se zpravidla provádí těsnostní héliová zkouška obalového souboru, prokazující jeho hermetičnost. V tomto okamžiku se obalový soubor opatří sekundárním víkem, jež se stejně jako primární víko zajistí svorníky s maticemi, a před samotným vyvezením obalového souboru z kontejnmentu zbývá provést už jen řada kontrol. K těm patří měření radiace na povrchu obalového souboru, zda přes stínící stěnu neuniká ionizačního záření, či měření teploty na jeho povrchu, pro ujištění, že nedochází k nadměrné produkci tepla z uložených palivových kazet/souborů s použitým jaderným palivem. [13]

Ze šachty transportního kontejneru se obalový soubor spustí za pomoci polárního jeřábu a nosných čepů obalového souboru transportním koridorem na speciální vagón. Ten slouží k vyvezení obalového souboru převážně ve vertikální poloze z budovy kontejnmentu a k jeho následnému převezení do meziskladu použitého jaderného paliva, jenž se nachází v areálu jaderné elektrárny. [12]



Obrázek č. 6 Vyložení OS ze speciálního vagónu na JE Dukovany [14]



### 3.4 Mezisklad PJP

Použité jaderné palivo umístěné v obalovém souboru míří z budovy kontejnmentu do meziskladu použitého jaderného paliva nacházejícího se v areálu jaderné elektrárny, kde bude uloženo po danou dobu. Účelem skladování použitého jaderného paliva v meziskladu je především docílit dalšího poklesu aktivity a teploty paliva za nepřetržitého monitorování, čímž se zjednoduší a zlevní následující manipulace. Ta je však otázkou pokročilosti současné technologie, a proto slouží mezisklad i jako časová rezerva pro rozhodnutí a provedení případných kroků v rámci následující manipulace s použitým jaderným palivem. [15]

Mezisklady použitého jaderného paliva lze rozdělit v závislosti na tom, zda je použité jaderné palivo umístěné v obalových souborech či jen samotné použité jaderné palivo chlazeno vodou či vzduchem, na mokré a suché mezisklady. [15]

#### 3.4.1 Mokrý

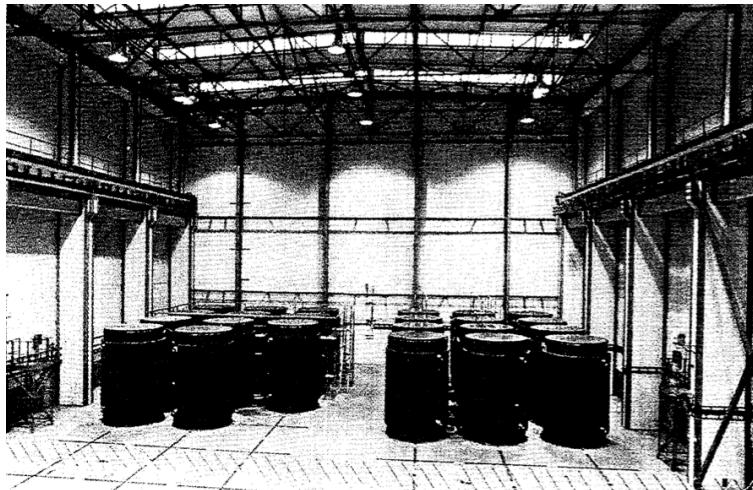
Při mokrému způsobu skladování je použité jaderné palivo uskladněno ve vodních bazénech umístěných přímo u reaktoru či mimo reaktorový sál v centrálním mokrému meziskladu, kde voda zajišťuje jak odvod tepla, tak i ochranu před ionizujícím zářením. Výhodou mokrého skladování je tak relativně snadná vizuální kontrola použitého jaderného paliva. Nevýhodou mokrých meziskladů je však potřeba kontinuálního chlazení a čištění vody za vzniku radioaktivních odpadů, což způsobuje vyšší provozní náklady v porovnání se suchými mezisklady. [15]

S mokrým skladováním přímo u reaktorů se lze setkat poměrně často, ale i centrální mokré mezisklady nejsou výjimkou. Jejich využití je však rozšířeno převážně jen v přímořských státech, kde mají dostatečné vodní zdroje pro potřebu kontinuálního chlazení. [15]

#### 3.4.2 Suchý

Při suchém způsobu skladování je použité jaderné palivo v obalových souborech uskladněno v betonových stavbách v rámci modulového skladování či v suchých halách v rámci skupinového skladování, kde je odvod tepla zajištěn prostřednictvím prouděním vzduchu. Výhodou suchého skladování jsou jednak již zmíněné nižší provozní náklady, ale i snazší manipulace s použitým jaderným palivem, které je pro potřebu suchého meziskladu uloženo v obalových souborech zajišťujících dostatečné stínění. [15]

Se suchým skladováním v betonových stavbách se lze v rámci jaderných elektráren s reaktory typu PWR setkat jen výjimečně, avšak opakem jsou suché haly, které jsou velmi rozšířeným typem meziskladů a jsou opatřeny ventilačním systémem založeným na principu přirozeného proudění vzduchu a celou řadou monitorovacích systémů, jenž slouží mimo jiné i pro radiační kontrolu prostoru meziskladu použitého jaderného paliva. [15]



Obrázek č. 7 Suchý mezisklad PJP na JE Dukovany [14]

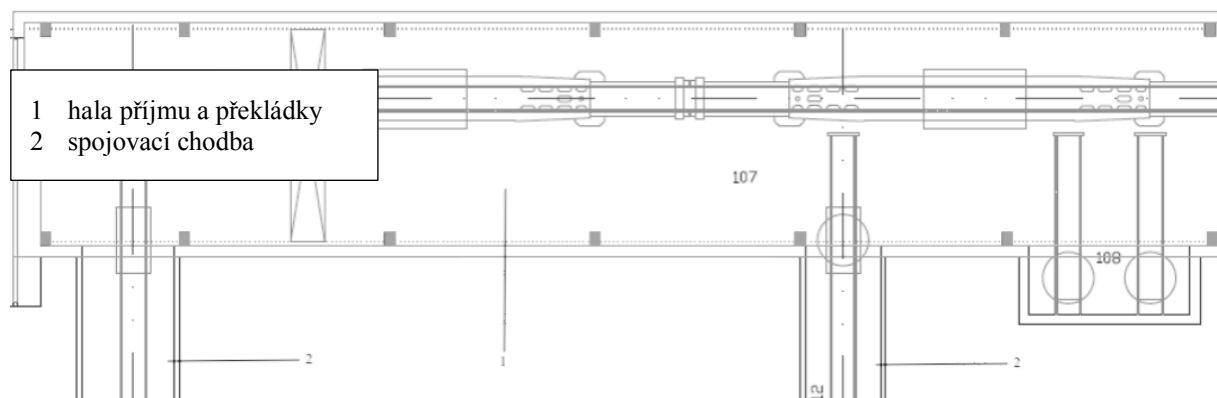


### 3.5 Hlubinné úložiště PJP

V případě otevřeného palivového cyklu, jenž je realizován v ČR, je posledním krokem manipulace s použitým jaderným palivem jeho převezení a uložení do hlubinného úložiště. Tento krok v sobě zahrnuje několik dílčích manipulací v podobě příjmu a skladování obalových souborů s použitým jaderným palivem v areálu hlubinného úložiště, překládání použitého jaderného paliva z obalových souborů do úložných obalových souborů, jejichž popis je uveden v kapitole pod názvem **Úložný obalový soubor PJP**, a následné konečné uložení úložných obalových souborů. [16]

#### 3.5.1 Příjem OS

Do areálu hlubinného úložiště se obalový soubor dopraví z meziskladu po železnici na speciálním vagónu. V tomto případě je obalový soubor převážen v horizontální poloze a je opatřen tlumiči nárazu. Navíc je z bezpečnostních důvodů zakryt, aby nebylo na první pohled patrné, co je obsahem prováděného transportu. Pomocí lokomotivy se vagón s obalovým souborem dopraví až do haly příjmu a překládky, která je znázorněna na **Obrázek č. 8** a umožňuje obsloužit až tři vagóny v rámci jedné dopravy. Zde dochází k demontáži tlumičů nárazu, vizuální kontrole a kontrole povrchové aktivity. [16]

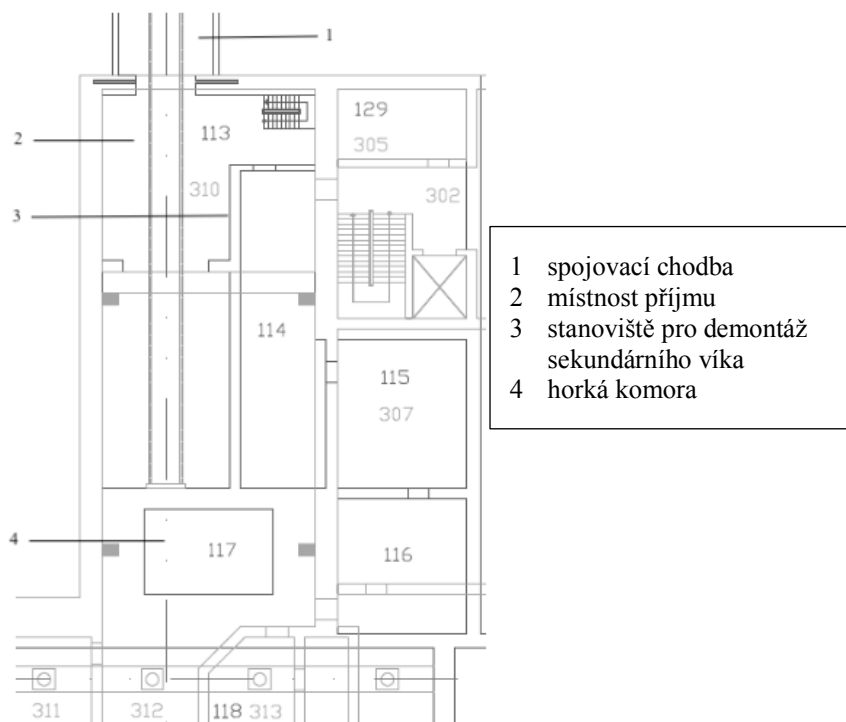


Obrázek č. 8 Schéma haly příjmu a překládky [16]

#### 3.5.2 Skladování a přeprava OS

Po provedení kontrol a vyhovujících výsledcích předešlých kroků příjmu se obalový soubor převede z horizontální do vertikální polohy pomocí jeřábu a přenesení na speciální přepravní vůz, jenž obalový soubor převezde do dočasného skladu obalových souborů s použitým jaderným palivem, kde je připojen na monitorovací systém pro měření teploty a tlaku vypovídajícím o jeho těsnosti. Dočasný sklad obalových souborů s použitým jaderným palivem je dimenzován na dva kusy obalových souborů. [16]

Po uvolnění potřebného prostoru v horké komoře pro uložení celého obsahu obalového souboru se obalový soubor odpojí od monitorovacího zařízení a přemístí se na samohybný elektrický vůz pro transport, který převezde obalový soubor po spojovací chodbě do místnosti příjmu znázorněné na **Obrázek č. 9**, konkrétně na stanoviště pro demontáž sekundárního víka. Zde se demontuje sekundární víko obalového souboru, které se odloží na určený podstavec, a na primární víko se připevní pomocný záchyt, jenž bude dále využíván pro manipulace s primárním víkem v horké komoře. [16]

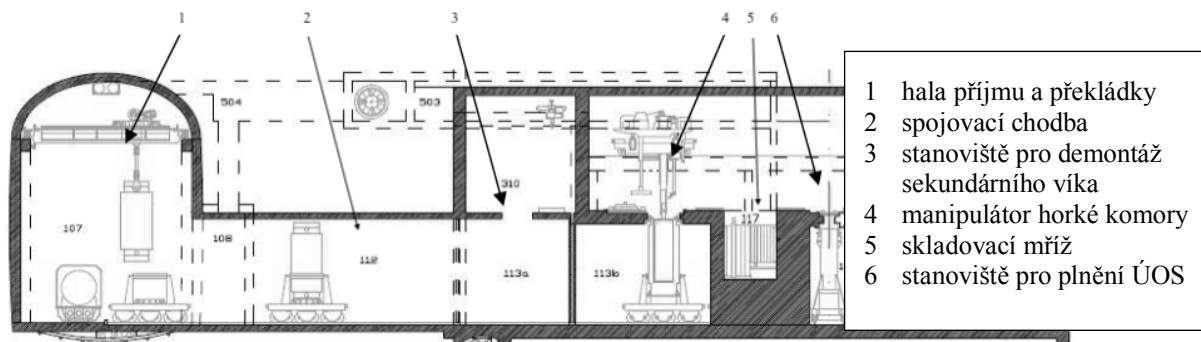


Obrázek č. 9 Schéma místnosti příjmu a horké komory [16]

Obalový soubor opatřený z pohledu uzavíracího systému již jen primárním víkem je pomocí samohybného elektrického vozu přemístěn přes koridor vytvořený posunem sklopných sekcí pod přepravní otvor do horké komory, jenž je opatřena překrytím s pohonem, které zároveň plní i funkci stínění. Po zajištění přesné polohy vozu a obalového souboru dojde ke zvednutí obalového souboru hydraulickým zařízením vozu, čímž se tak docílí opření horní plochy obalového souboru o vlnovec s těsněním umístěným na rámu překrytí. [16]

### 3.5.3 Překládání PJP z OS do ÚOS

Již zajištěná těsnost mezi přepravním otvorem a obalovým souborem umožňuje otevření překrytí otvoru a demontáž primárního víka za pomoci příslušného stendu. Manipulátor horké komory následně sejme primární víko z obalového souboru a odloží na určený podstavec v horké komoře, čímž tak lze opět pomocí manipulátoru horké komory zahájit překládání palivových kazet/souborů z obalového souboru do mříže umístěné ve skladu použitého jaderného paliva, znázorněné na Obrázek č. 10. Po dokončení této překládky dojde k uzavření skladu překrytím zajišťujícím oddělení prostoru skladu od horké komory a tím i stínění použitého jaderného paliva umístěného již v příslušné mříži. [16]

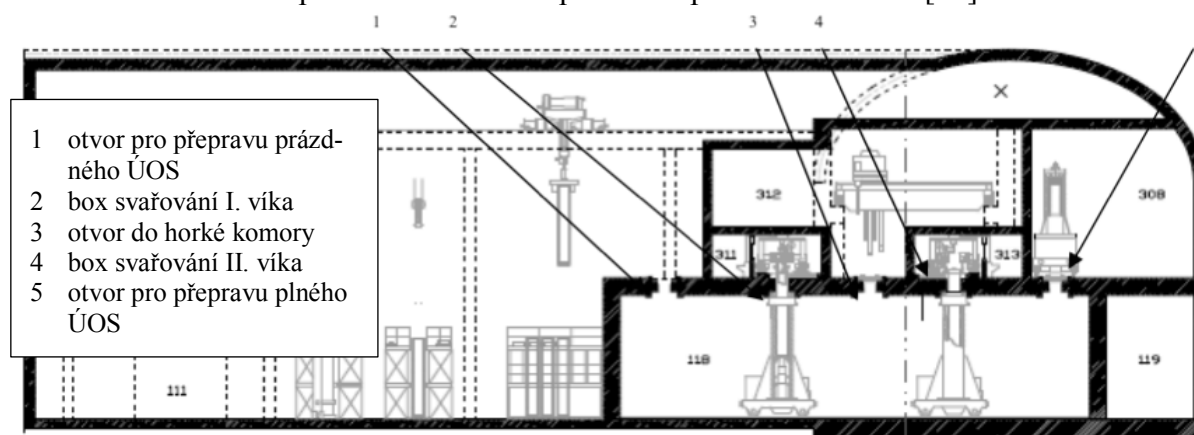


Obrázek č. 10 Schéma manipulace PJP z OS do ÚOS [16]

Použité jaderné palivo v podobě klastřů/souborů se z mříží následně umísťuje do předem připravených úložných obalových souborů, které se nacházejí pod úrovní podlahy horké komory na samohybných vozících. Před zavezením použitého jaderného paliva do úložných obalových souborů se však musí nejdříve otevřít překrytí skladu. Po naplnění úložného obalového souboru manipulátor umístí primární víko úložného obalového souboru, jenž je poté spuštěn do transportní polohy a otvor do horké komory je překryt. [16]

### 3.5.4 Přeprava ÚOS do ukládacího vrtu

Samohybný vozík s plným úložným obalovým souborem a opatřený primárním víkem se přesune pod otvor boxu svařování, znázorněného na **Obrázek č. 11**. Po zajištění jeho polohy se zdvihne přídatné stínění, jímž je samohybný vozík opatřen, a tím dojde k jeho těsnému spojení s vlnovcem rámu překrytí, které je tak již možné otevřít. Úložný obalový soubor je zvednut do pracovní polohy a stend v podobě otočného rámu s příslušným zařízením provede přivaření primárního víka k vnitřnímu pouzdra. Prostor vnitřního pouzdra je vyvakuován a následně zaplněn inertním médiem v podobě helia. Po zkoušce těsnosti se plnicí ventil překryje víčkem, které se také přivaří. Nakonec je úložný obalový soubor spuštěn do přepravní polohy a otvor boxu svařování se překryje. Samohybný vozík s úložným obalovým souborem se přesune zpět pod přepravní otvor horké komory a obdobným způsobem je úložný obalový soubor opatřen i sekundárním víkem, jehož svařování však probíhá v odlišném boxu. Na závěr svařování se provede těsnostní zkouška, vyvakuování vnitřního prostoru vnějšího přebalu a jeho následné zaplnění dusíkem. Prostor plnicího ventilu se opět utěsní přivařením víčka. [16]

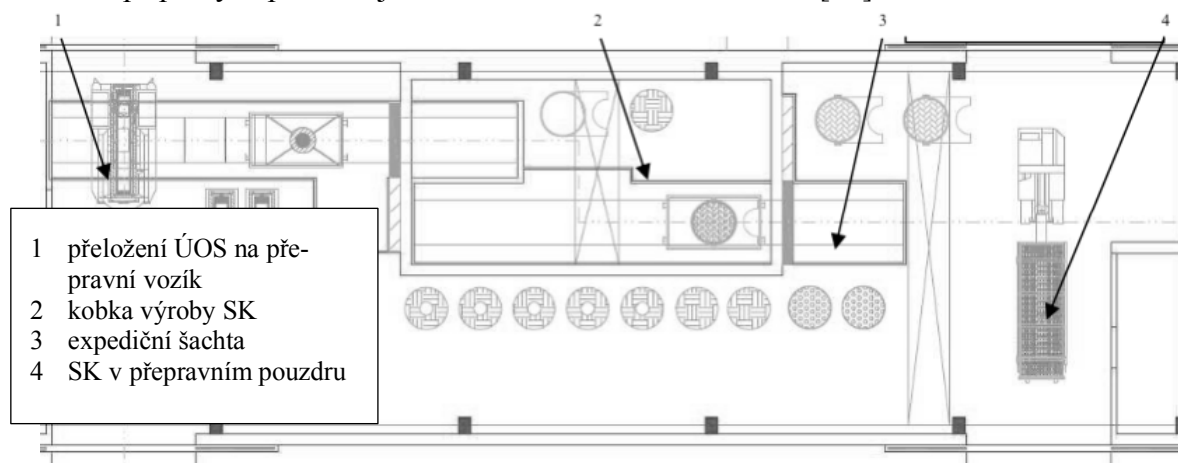


Obrázek č. 11 Schéma manipulace ÚOS [16]

Úložný obalový soubor je v této části, kdy je již opatřen primárním a sekundárním víkem, zkontrolován na těsnost a naplněn heliem a dusíkem, možné přemístit do meziskladu plných úložných obalových souborů. Za tím účelem se samohybný vozík s úložným obalovým souborem spustí do přepravní polohy a přesune se pod otvor pro přepravu plného úložného obalového souboru. Nad otvor najede překládací zařízení, které uchopí plný úložný obalový soubor, vtáhne ho do svého stínícího válce a následně ho převezve nad otvor do meziskladu plných úložných obalových souborů, jímž ho spustí do skladovací mříže, kde bude skladován do doby, než se uvolní kapacita na pracovišti pro provedení povrchové úpravy. [16]

Pro provedení povrchové úpravy se plný úložný obalový soubor přesune z meziskladu překládacím zařízením na samohybný vozík, který jej převezve na otočný stůl do boxu pro otryskání povrchu. Po provedení samotného otryskání se zkontroluje kvality povrchu televizní kamerou a úložný obalový soubor se na samohybném vozíku přemístí opět na otočný stůl do boxu ochranného nástřiku. Po kontrole se povrchově upravený plný úložný obalový soubor přepraví na samohybném vozíku zpět do meziskladu plných úložných obalových souborů nebo se přeloží přímo do vozíku pro přepravu do podzemí. [16]

Transport úložných obalových souborů do podzemí je prováděn pomocí mobilní kolové soupravy, do které je úložný obalový soubor spuštěn zvedacím ústrojím samohybného vozíku přes stínící válec. Mobilní kolová souprava pak dopraví úložný obalový soubor zavážecím tunelem až na ukládací horizont v úrovni 500 metrů pod zemským povrchem, kde se nachází centrum přípravy superkontejneru znázorněné na **Obrázek č. 12**. [16]



**Obrázek č. 12** Schéma centra přípravy superkontejneru [16]

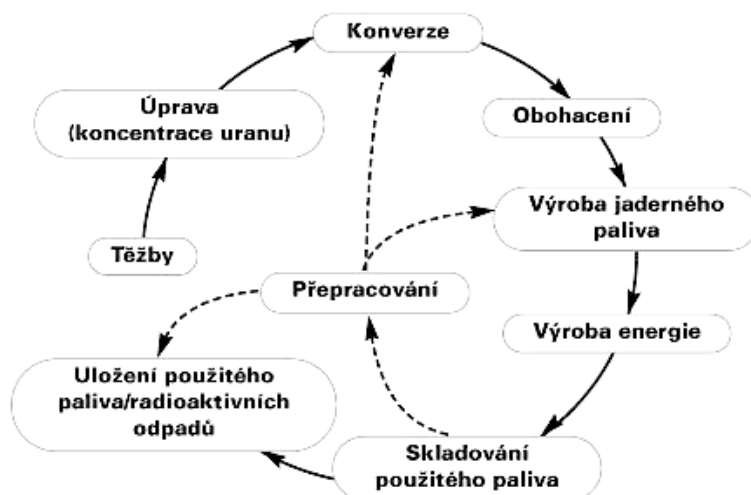
Z mobilní kolové soupravy se úložný obalový soubor přemístí na samohybný vozík pomocí jeřábu umístěného v hale příjmu a expedice. Vozík s úložným obalovým souborem posléze míří do kobky výroby superkontejneru, kam se expediční šachtou dopraví horní bentonitové dno, vnější koš superkontejneru, víko, přepravní pouzdro superkontejneru a jeho stínící víko. Proběhne sestavení superkontejneru. Ten je následně v přepravním pouzdru přemístěn do kolového přepravního prostředku, jenž je určen pro jeho převoz do místa uložení, kde se superkontejner přesune na servisní stojan a pomocí ukládacího zařízení se umístí na danou pozici ukládacího vrtu. Po zaplnění veškerých pozic prokládaných bentonitovými distančními bloky se nakonec ukládací vrt uzavře betonovou zátkou. [16]

### 3.6 Přepracovací závod PJP

V případě uzavřeného palivového cyklu míří použité jaderné palivo do přepracovacího závodu, jehož účelem je z použitého paliva oddělit štěpitelné materiály v podobě uranu a plutonia od neštěpitelných produktů v podobě produktů štěpení a minoritních aktinoidů. Použité palivové kazety/soubory se proto rozeberou na konstrukční materiály, které jsou dále zpracovány a přemístěny do úložiště radioaktivních odpadů, a palivové proutky, jež se dále zpracovávají metodou PUREX. [9]

#### 3.6.1 Metoda PUREX

Při metodě PUREX (Plutonium-Uranium Redox Extraction) se použité jaderné palivo v podobě palivových proutků naseká na malé kousky, rozmělní a poté rozpustí v kyselině dusičné o dané koncentraci, jež umožní oddělit zirkoniové pokrytí proutků. Přidáním tributylfosfátu se následně docílí požadovaného oddělení uranu a plutonia, které se v dalším kroku využijí pro výrobu MOX paliva. To obsahuje právě směs oxidů těchto prvků a jeho shodné konstrukční provedení umožňuje využití tohoto paliva i v tlakovodních reaktorech, avšak při zohlednění jeho odlišných neutronově-fyzikálních vlastností a obdržení povolení k provozu s tímto typem paliva od příslušného státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Oddělený uran je však možné využít i pro výrobu nového uranového paliva, čímž se tak docílí uzavření palivového cyklu, znázorněného na **Obrázek č. 13**. [9]



Obrázek č. 13 Schéma uzavřeného palivového cyklu [17]

## 4 Obalový soubor PJP

Obalový soubor použitého jaderného paliva slouží pro přepravu a skladování palivových kazet/souborů, které byly ozářeny a následně trvale vyjmuty z aktivní zóny reaktoru. Samotné navrhování a schvalování obalových souborů se podrobuje přísným pravidlům a doporučením MAAE. [13]

Pro reaktory typu VVER-440 a VVER-1000 se v ČR používají obalové soubory typu ŠKODA a Castor, kde v závislosti na dané funkci obalového souboru rozeznáváme dvě základní konfigurace v podobě přepravní a skladovací konfigurace, které lze dosáhnout pomocí specifických konstrukčních částí. V případě přepravní konfigurace se jedná především o tlumiče nárazu, které jsou umístěny na obou koncích obalového souboru a při případné nehodě během přepravy by způsobily výrazné snížení vzniklého rázové zatížení. Jedná-li se o skladovací konfiguraci, je obalový soubor opatřen ochrannou deskou z uhlíkové oceli, která pak během skladování chrání sekundární víko před mechanickými a povětrnostními vlivy. [18]

Mezi další obalové soubory pro skladování použitého jaderného paliva z tlakovodních reaktorů, patří obalové soubory typu TN, CONSTOR, HI-STORM, NUHOMS a další uvedené na Obrázek č. 14. [19]

Typy kontejnerů	Odvod tepla	Konstrukce obalu (Médium)	stínění	funkce	Příklady kontejnerů
Kovové kontejnery	Konvekci (vzduchem) Žebry (stěnou) kontejneru	Dvojitá víka masivní stěny (inertní plyn)	Stěny kontejnerů	Transportní a skladovací (dvoúčelové)	Castor, TN, NAC-ST/STC, BGN řešení
Betonové/železobetonové	Konvekci (vzduchem) Okolo kontejneru (kanistru)	klasická/svařovaná těsnící víka (inertní plyn)	betonové/železobetonové stěny OS	Vertikální skladovací	CONSTOR, HI-STORM/ HI-STAR
Modulové (betonové)	Konvekci (vzduchem) - okolo kanistru	Tenkostěnný základní obal (Inertní plyn)	betonové stěny modulů	Horizontální, skladovací	NUHOMS, NAC-MPC/UMS, MAGNASTOR
Trubkové (Vault)	Konvekci (vzduchem) -okolo trubic	jednotlivé trubice Inertní plyn (v trubicích)	betonové stěny modulů/boxů	Různá provedení (funkce)	MVDS MACTOR

Obrázek č. 14 Přehled OS pro PJP [19]

## 4.1 ŠKODA 440/84

Obalový soubor typu ŠKODA 440/84, jehož konstrukce je znázorněna na **Obrázek č. 15** je vyráběn společností ŠKODA JS a.s., je určen pro použité jaderné palivo v podobě palivových kazet vyvezených z reaktoru typu VVER-440. Skládá se ze silnostěnného válcového tělesa, nosného koše, uzavíracího systému dvou vík a nosných čepů. [18]

### 4.1.1 Válcové těleso

Válcové těleso o tloušťce 410 mm je navrženo tak, aby zajistilo dostatečné stínění gama záření a neutronů. Pro zlepšení moderace neutronů je ve dvou roztečných kružnicích ze strany dna tělesa obalového souboru vyrobeno 60 rovnoměrně rozmístěných vývrtů, které slouží pro zasunutí polyetylenových moderátorových tyčí. Na vnitřní roztečné kružnici se nacházejí vývrty o průměru 77 mm a na vnější roztečné kružnici dosahují vývrty průměru 86 mm. Pro uzavření těchto vývrtů je těleso opatřeno uzavírací deskou dna o tloušťce 30 mm, mezi níž a dnem tělesa je vložena polyetylenová moderační deska o tloušťce 40 mm. Válcové těleso obalového souboru je dále opatřeno 213 radiálními žebry pro zlepšení přestupu tepla produkovaného z palivových kazet umístěných uvnitř obalového souboru do okolí. [18]

### 4.1.2 Nosný koš

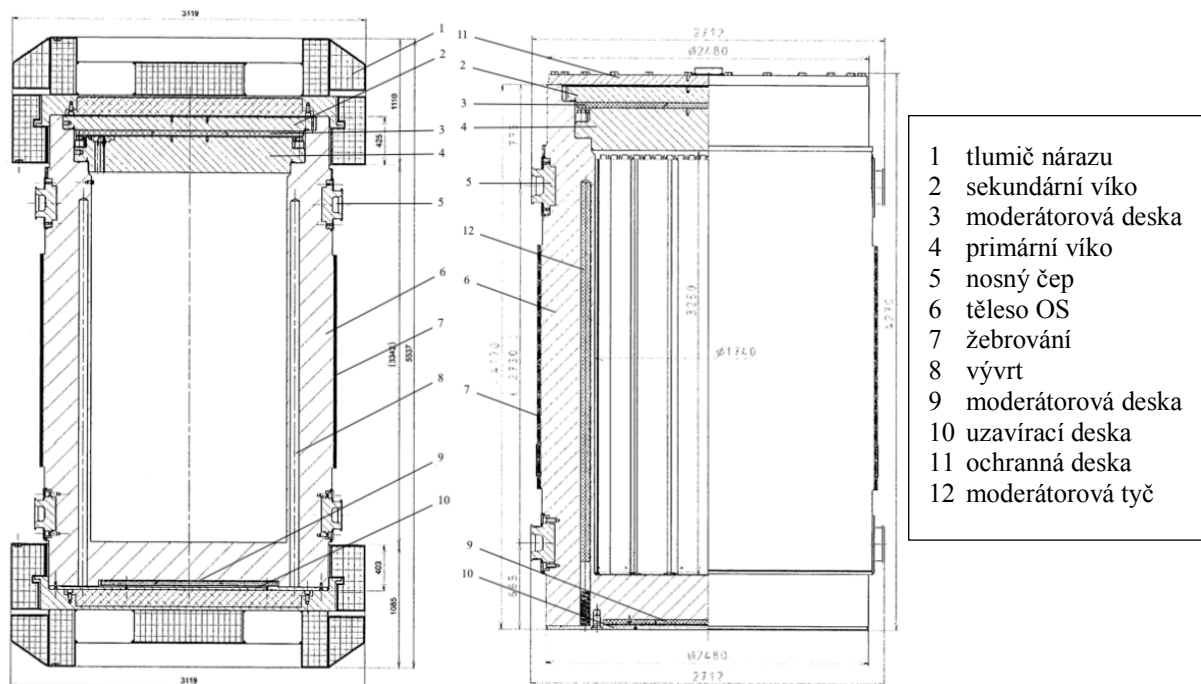
Nosný koš sestávající z 85 šestihranných trubek vyrobených z hliníkové slitiny slouží k uložení 84 kusů palivových kazet, kdy centrální šestihranná trubka je zaslepena a zůstává tak neobsazena. Tyto trubky jsou na obou svých koncích vzájemně sešroubovány a po jejich délce rozepřeny plechy z korozivzdorné oceli legované bórem, čímž je zajištěna podkritičnost uloženého paliva. Součástí nosného koše obalového souboru jsou však i okrajové profily vyrobené opět z hliníkové slitiny, které zajišťující válcovitost koše, jež je důležitá pro jeho následné uložení do válcovitého tělesa obalového souboru. [18]

### 4.1.3 Uzavírací systém

Uzavírací systém splňuje požadavek dvojí bariéry, jelikož je tvořen primárním a sekundárním víkem s těsníci komponenty v podobě kovového a elastomerového těsnění a monitorovacím systémem tlaku umístěným v prostoru mezi víky. V případě poklesu tlaku v prostoru mezi primárním a sekundárním víkem z hodnoty 0,6 MPa na hodnotu 0,45 MPa vyvolá monitorovací systém výstražnou signalizaci a při poklesu až na hodnotu 0,35 MPa se tato signalizace změní na zásahovou, a je tak zapotřebí provést potřebná nápravná opatření k docílení opět dvou plně funkčních těsnostních bariér. [12], [18]

### 4.1.4 Nosné čepy

Nosné čepy jsou na obalovém souboru umístěny po dvou kusech ze strany víka i dna a slouží pro manipulaci s obalovým souborem. Konkrétně čepy na straně víka jsou využívány pro uchycení v případě manipulace jeřábem a čepy na straně dna slouží v případě transportu pro uložení obalového souboru do pevné podpěry či v případě manipulace jeřábem pro uchycení za účelem otočení obalového souboru z vodorovné polohy do vertikální či obrácené. Aby však bylo možné obalový soubor otáčet, jsou nosné čepy ze strany dna vychýleny o 30 mm od osy symetrie. [18]



Obrázek č. 15 OS ŠKODA 440/84 [18]

Parametr	Hodnota
Vnější průměr tělesa	2 480 mm
Výška bez tlumičů nárazu	4 170 mm
Výška s tlumiči nárazu (přepravní konfigurace)	5 537 mm
Výška s ochrannou deskou (skladovací konfigurace)	4 270 mm
Tloušťka válcové stěny (bez žeber)	410 mm
Hmotnost zavezeného OS bez tlumičů nárazu	117 700 kg
Hmotnost zavezeného OS s tlumiči nárazu	137 300 kg
Hmotnost zavezeného OS s ochrannou deskou	120 650 kg
Maximální hmotnost zavezených PK	18 900 kg

Tabulka č. 1 Parametry OS ŠKODA 440/84 [18]

Při možnosti zavezení 84 palivových kazet s použitým jaderným palivem do obalového souboru typu ŠKODA 440/84 a současném vyvezení průměrně 72 palivových kazet s použitým jaderným palivem z aktivní zóny během odstávky pro výměnu paliva, která se provádí převážně jednou do roka, je do suchého meziskladu uskladněn průměrně jeden obalový soubor ročně.

## 4.2 ŠKODA 1000/19

Obalový soubor typu ŠKODA 1000/19, jehož konstrukce je znázorněna na Obrázek č. 16, který je vyráběn společností ŠKODA JS a.s., je určen pro použité jaderné palivo v podobě palivových souborů vyvezených z reaktoru typu VVER-1000. Skládá se ze silnostěnného válcového tělesa, nosného koše, uzavíracího systému dvou vík a nosných čepů.

### 4.2.1 Válcové těleso

Válcové těleso o tloušťce 410 mm je pro zlepšení neutronového stínění opatřeno ze strany dna obalového souboru 42 vývrtů o průměru 97 mm, které slouží pro umístění moderátorových tyčí z vysokohustotního polyetylénu. Vývrtky vyplněné moderátorovými tyčemi jsou dále opatřeny uzavírací deskou, která společně s pružinami zajišťuje dotlačování moderátorových tyčí do konců vývrtů a je opatřena i dvěma uzavíracími ventily pro vyrovnání tlaku



v prostoru moderátorových tyčí a polyetylenové moderátorové desky umístěné mezi uzavírací deskou a dnem tělesa. Vnější povrch válcového tělesa je tvořen radiálními žebry, které tak zvětšují plochu pro přestup tepla do okolí pro zlepšení chlazení uložených palivových souborů. [18]

#### 4.2.2 Nosný koš

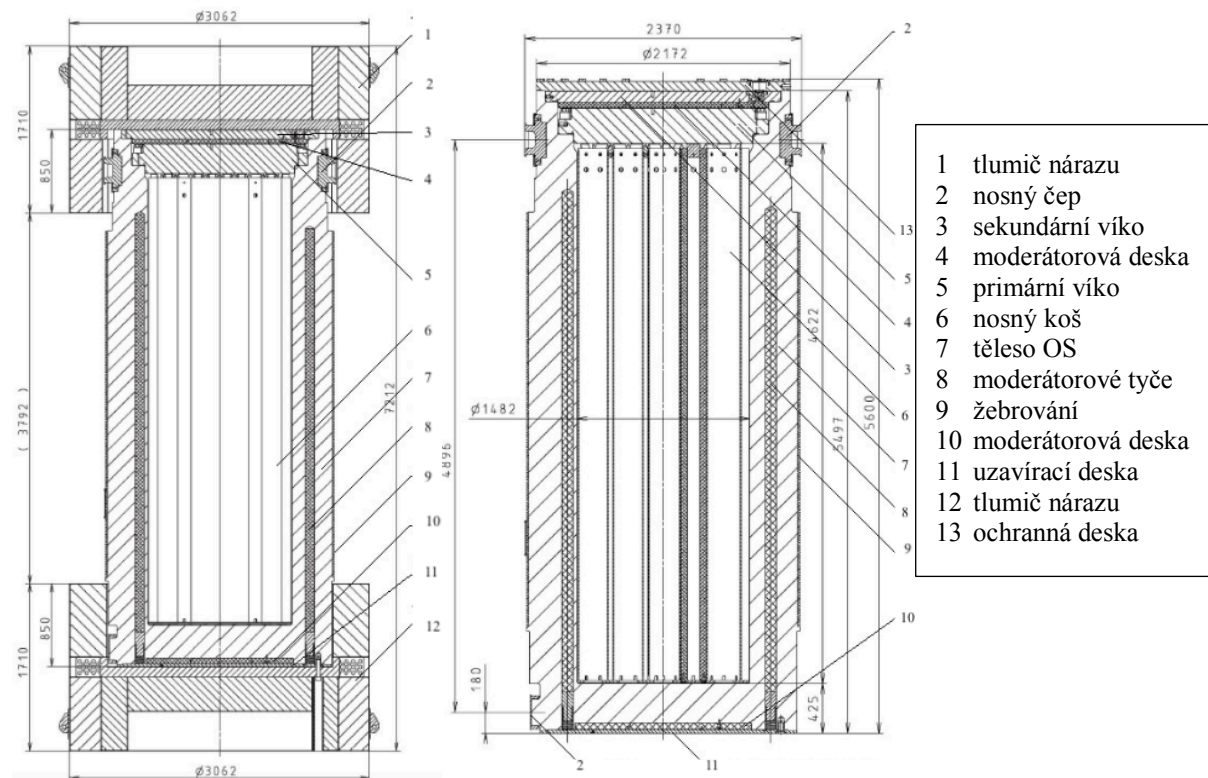
Nosný koš se sestává z 19 šestihhranných trubek z hliníkové slitiny obohacené karbidem bóru sloužící k umístění shodného počtu palivových souborů. Dále je složen z nosného dna z korozivzdorné oceli, distančních profilů vyrobených z hliníkové slitiny a profilů vyrobených také z hliníkové slitiny, které doplňují válcový tvar nosného koše. [18]

#### 4.2.3 Uzavírací systém

Uzavírací systém se skládá především z primárního a sekundárního víka včetně těsnících komponent v podobě těsnění. Obě víka tvoří nezávislé těsnostní bariéry vyrobené z kované nerezavějící oceli a zajištěné svorníky s maticemi, vytvářejí uzavřený prostor s přetlakem oproti vnitřnímu prostoru obalového souboru, ve kterém je umístěno zařízení pro monitorování tlaku umožňující kontrolu těsnosti během skladování. [18]

#### 4.2.4 Nosné čepy

Nosné čepy jsou v počtu čtyř kusů symetricky přišroubovány na plášť obalového souboru ze strany víka a slouží pro manipulaci s obalovým souborem. Při manipulaci se aktivně zapojují pouze dva protilehlé nosné čepy a zbylé dva jsou zapojeny pouze jako jištění a během manipulace tak plní bezpečnostní funkci. Obalový soubor je dále opatřen dalšími dvěma nosnými čepy ze strany dna, které jsou vyrobeny přímo z materiálu tělesa obalového souboru a plní obdobnou funkci, jako v případě spodních nosných čepů předchozího typu obalového souboru. [18]



Obrázek č. 16 OS ŠKODA 1000/19 [18]



Parametr	Hodnota
Vnější průměr tělesa	2 341 mm
Výška bez tlumičů nárazu	5 497 mm
Výška s tlumiči nárazu (přepravní konfigurace)	7 212 mm
Výška s ochrannou deskou (skladovací konfigurace)	5 600 mm
Tloušťka válcové stěny (bez žeber)	410 mm
Hmotnost zavezeného OS bez tlumičů nárazu	116 488 kg
Hmotnost zavezeného OS s tlumiči nárazu	136 158 kg
Hmotnost zavezeného OS s ochrannou deskou	118 988 kg
Maximální hmotnost zavezených PS	14 580 kg

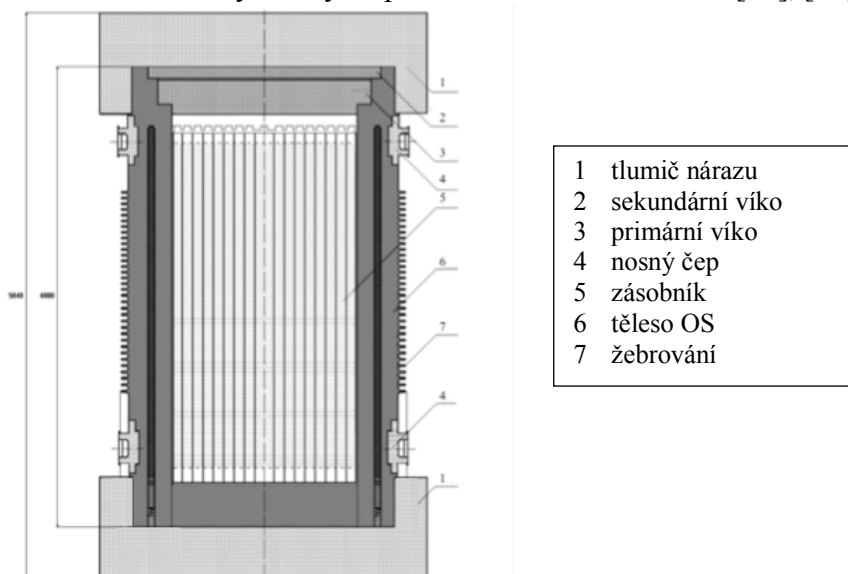
Tabulka č. 2 Parametry OS ŠKODA 1000/19 [18]

Při možnosti zavezení 19 palivových souborů s použitým jaderným palivem do obalového souboru typu ŠKODA 1000/19 a současném vyvezení průměrně 40 palivových souborů s použitým jaderným palivem z aktivní zóny během odstávky pro výměnu paliva, která se provádí převážně jednou do roka, jsou do suchého meziskladu uskladněny dva až tři obalové soubory ročně.

### 4.3 Castor 440/84

Obalový soubor typu Castor 440/84, jehož konstrukce je znázorněna na **Obrázek č. 17**, je navržen a licencován německou společností GNB mbH. Je určen pro použité jaderné palivo v podobě palivových souborů vyvezených z reaktoru typu VVER-440, kdy téměř všechny obalové soubory tohoto typu určené pro mezisklad JE Dukovany byly vyrobeny společností ŠKODA JS a.s.. Na JE Dukovany se jedná o předchůdce zmíněného obalového souboru typu ŠKODA 440/84, z čehož vyplývá i obdoba jeho tvaru a provedení, jelikož oba byly určeny pro stejnou jadernou elektrárnu, kde se cílilo na zachování stávajících manipulačních zařízení a technologií pro jejich plnění a sušení.

Castor 440/84 se skládá ze silnostěnného válcového tělesa o tloušťce 370 mm vyrobeného z litiny s kuličkovým grafitem, zásobníku sestávajícího se z 84 šestihřanných trubek z borové oceli oddělené hliníkovými plechy, uzavíracího systému dvou vík v podobě primárního a sekundárního víka, kdy je každý z nich připevněno k tělesu obalového souboru 48 šrouby, a nosných čepů umožňující manipulaci obalového souboru. V meziskladu jaderné elektrárny Dukovany je jen několik obalových souborů s popsáním provedením vnitřního koše. Ostatní obalové soubory jsou vybaveny vnitřním košem vyrobeným společností ŠKODA JS a.s.. [19], [20]



Obrázek č. 17 OS Castor 440/84 [20]

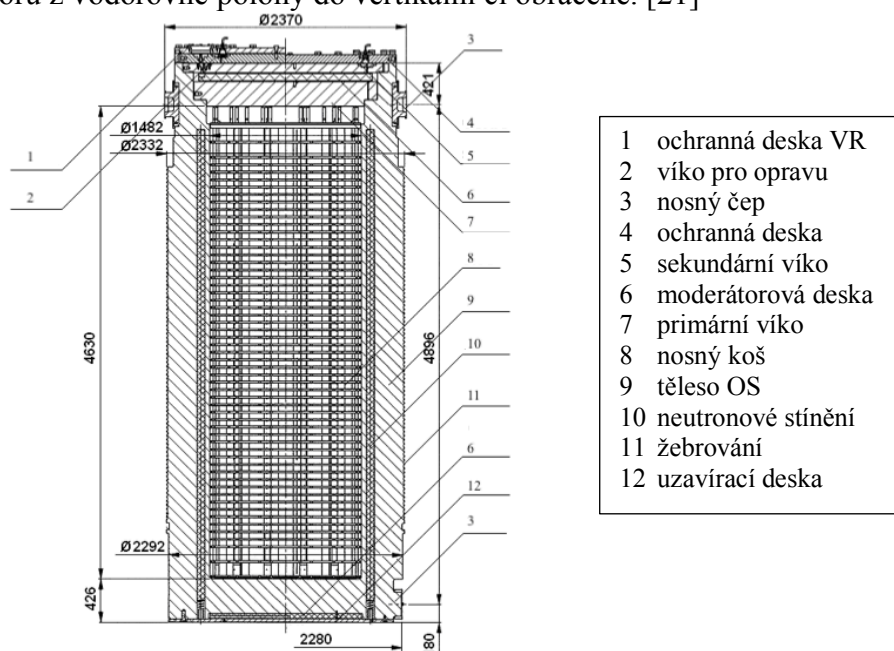
Parametr	Hodnota
Vnější průměr tělesa	2 660 mm
Výška bez tlumičů nárazu	4 080 mm
Výška s tlumiči nárazu (přepravní konfigurace)	5 040 mm
Tloušťka válcové stěny (bez žeber)	370 mm
Hmotnost zavezeného OS bez tlumičů nárazu	113 180 kg
Hmotnost zavezeného OS s tlumiči nárazu	131 380 kg
Maximální hmotnost zavezených PS	18 480 kg

Tabulka č. 3 Parametry OS Castor 440/84 [20]

#### 4.4 Castor 1000/19

Obalový soubor typu Castor 1000/19, jehož konstrukce je znázorněna na **Obrázek č. 18** a vyráběna německou společností GNB mbH, je určen pro použité jaderné palivo v podobě palivových souborů vyvezených z reaktoru typu VVER-1000. Na JE Temelín se jedná se o předchůdce zmíněného obalového souboru typu ŠKODA 1000/19. Obdobný tvar a provedení jako u obalového souboru typu ŠKODA 1000/19 je stejně jako u ŠKODA 440/84, dáno tím, že jsou oba určeny pro stejnou jadernou elektrárnu kde se cílilo na zachování stávajících manipulačních zařízení a technologií pro jejich plnění a sušení. V současné době jsou na JE Temelín dodávány výhradně obalové soubory typu ŠKODA 1000/19.

Castor 1000/19 se skládá ze silnostěnného válcového tělesa o tloušťce 415 mm vyrobeného z litiny s kuličkovým grafitem, nosného koše v podobě deskové konstrukce vyrobené z oceli, borové oceli a hliníku umožňující umístění 19 palivových souborů, uzavíracího systému dvou vík a nosných čepů po dvou kusech ze strany víka i dna, kdy spodní pár slouží pro možnost otočení obalového souboru z vodorovné polohy do vertikální či obráceně. [21]



Obrázek č. 18 OS Castor 1000/19 [21]

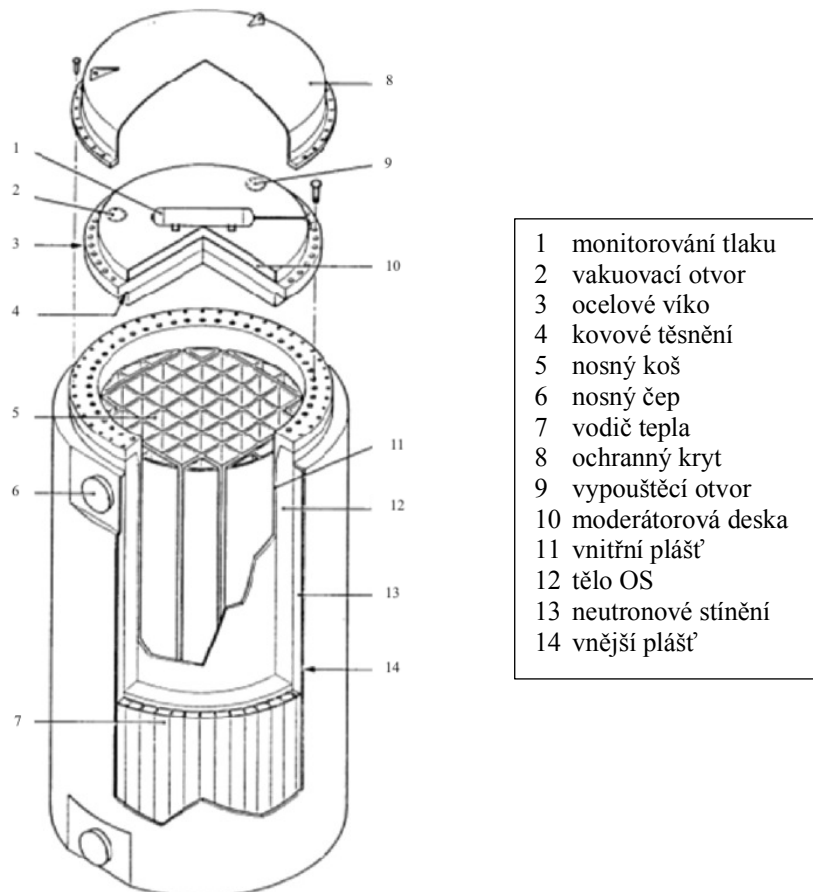
Parametr	Hodnota
Vnější průměr tělesa	2 370 mm
Výška s ochrannou deskou (skladovací konfigurace)	5 577 mm
Tloušťka válcové stěny (bez žeber)	415 mm
Hmotnost zavezeného OS bez tlumičů nárazu	112 900 kg
Hmotnost zavezeného OS s ochrannou deskou	115 500 kg

Tabulka č. 4 Parametry OS Castor 1000/19 [21]

## 4.5 TN

Obalový soubor typu TN je vyráběn francouzskou nadnárodní společností ORANO, následnicí společnosti AREVA TN. Podle kapacity nosného koše lze dělit tento typ obalového souboru do několika základních řad na TN-24, TN-32 a TN-40, které jsou vhodné pro transport a skladování použitého jaderného paliva z tlakovodních reaktorů. [22]

TN-32, jenž je zobrazen na **Obrázek č. 19**, se skládá z válcového ocelového tělesa obklopeného stínicí vrstvou s umístěnými hliníkovými plechy určenými pro zlepšení odvodu tepla, palivového koše, víka se systémem monitorování tlaku mezi dvěma kovovými těsněními pro možnost včasné detekce jejich netěsnosti, ochranného krytu a nosných čepů pro možnost bezpečné manipulace s obalovým souborem. [23]



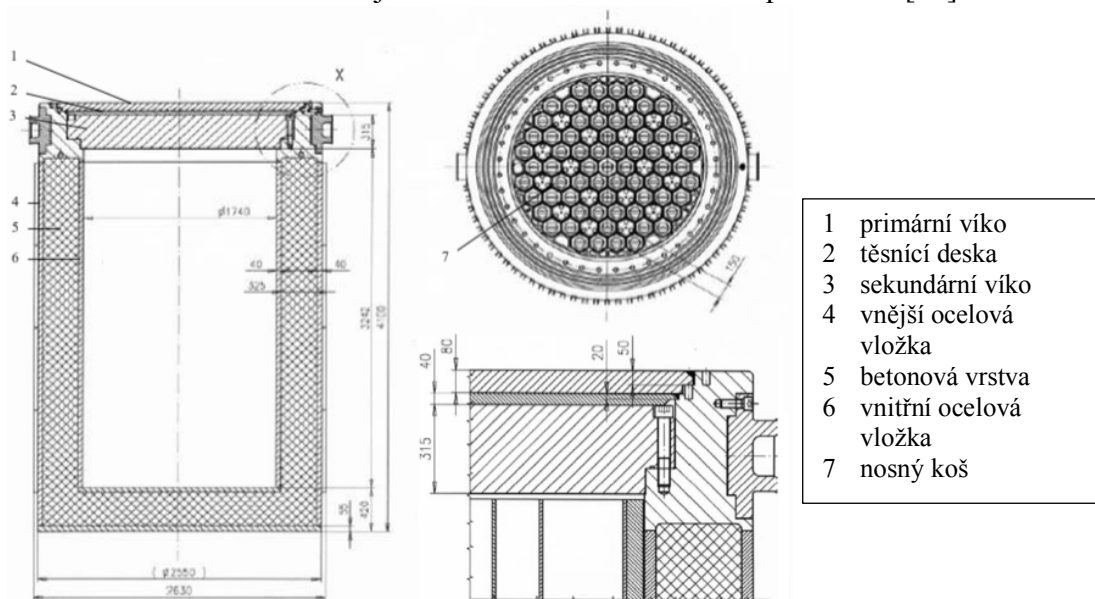
Obrázek č. 19 OS TN-32 [24]

## 4.6 CONSTOR 440/84

Obalový soubor typu CONSTOR 440/84 je vyvinut německou společností GNB mbH a je určen pro použité jaderné palivo v podobě palivových souborů vyvezených z reaktoru typu VVER-440. Řada obalových souborů CONSTOR 440/84 určených pro JE Kozloduj v Bulharsku byla vyrobena ve společnosti ŠKODA JS a.s.. Ostatní řady typu obalového souboru CONSTOR nejsou určeny pro skladování paliva z tlakovodních reaktorů, ale reaktory RBMK na Ignalinské JE v Litvě, kdy také jejich výroba byla provedena ve společnosti ŠKODA JS a.s.. [19], [25]

CONSTOR 440/84, který je zobrazen na **Obrázek č. 20**, se skládá z válcového tělesa tvořeného dvěma ocelovými vložkami vyplněnými vrstvou pevnostního betonu s příměsí v podobě kovového granulátu, nosného koše sestávajícího se z 84 šestihřanných hliníkových trubek a plechů z borové oceli umístěných mezi profily trubek, uzavíracího systému a nosných čepů.

Samotný uzavírací systém se skládá z primárního víka z nerezavějící oceli s elastomerovým těsněním, ocelové těsnicí desky a sekundárního víka. Primární víko je připevněno šrouby, naopak těsnicí deska a sekundární víko je k tělesu obalového souboru přivařeno. [26]

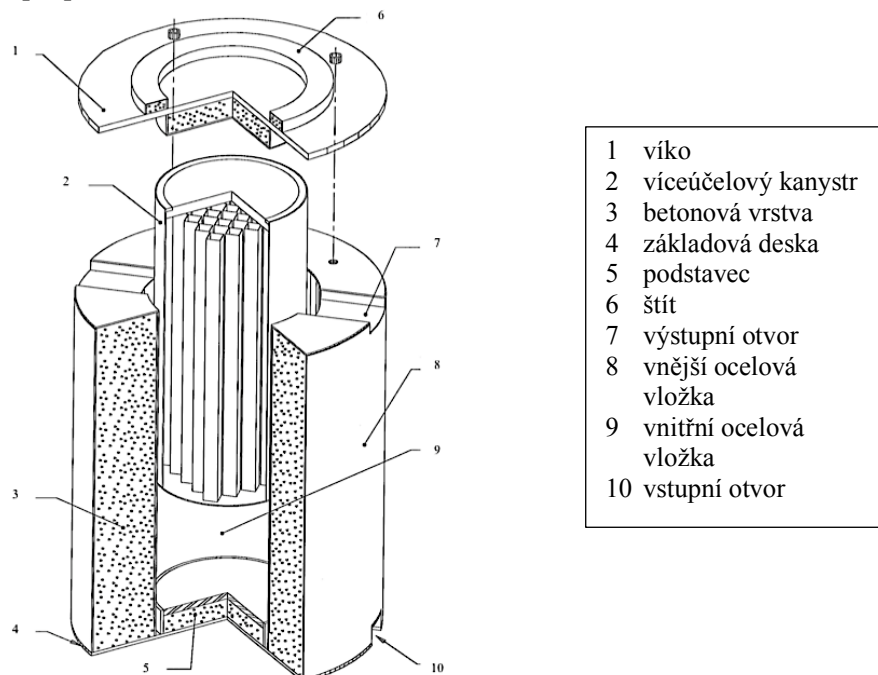


Obrázek č. 20 OS CONSTOR 440/84 [26]

#### 4.7 HI-STORM

Obalový soubor typu HI-STORM je vyráběn americkou společností Holtec International. Podle své specifikace lze dělit tento typ obalového souboru do několika základních řad na HI-STORM 100, HI-STORM FW, HI-STORM 100U a HI-STORM UMAX. [27]

HI-STORM 100, který je znázorněn na **Obrázek č. 21**, se skládá z válcového tělesa tvořeného dvěma ocelovými vložkami vyplněnými vrstvou betonu, vnitřního víceúčelového kanystru s nosným košem pro uložení 24 či 32 palivových kazet/souborů v závislosti na přesném typu víceúčelového kanystru, ocelového víka, čtyř vstupních a čtyř výstupních otvorů pro přirozené proudění vzduchu. [28]

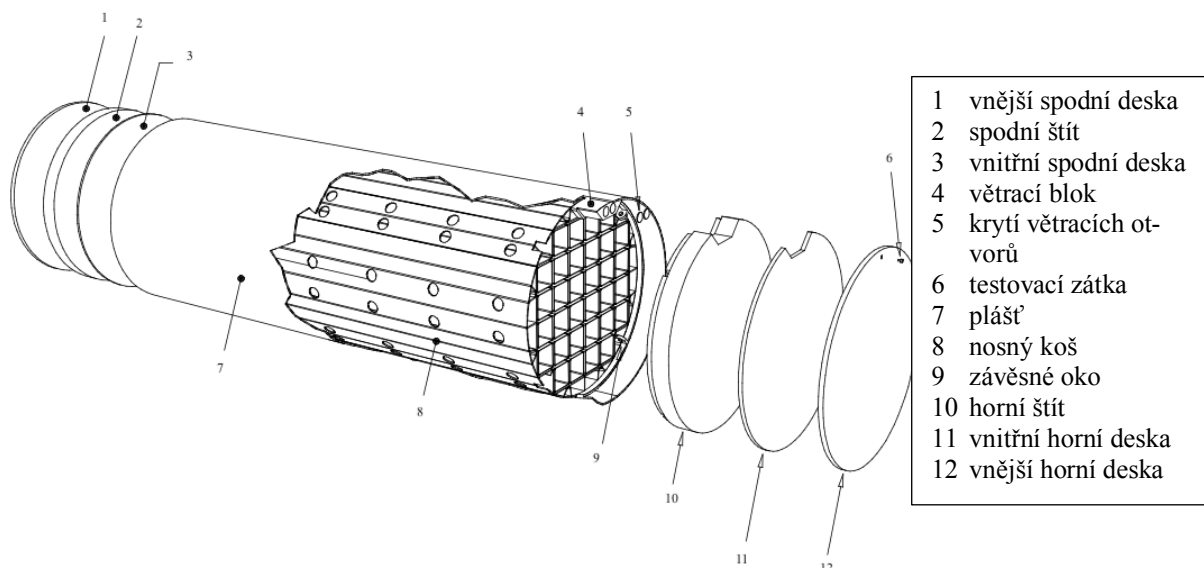


Obrázek č. 21 OS HI-STORM 100 [28]

## 4.8 NUHOMS

Obalový soubor typu NUHOMS je vyráběn francouzskou nadnárodní společností ORANO, následnicí společnosti AREVA TN. Podle své polohy lze dělit tento typ obalového souboru na horizontální a vertikální, kdy každý z nich má pak několik řad také v závislosti na kapacitě nosného koše. [29]

NUHOMS HSM, který je znázorněn na **Obrázek č. 22**, se skládá z válcového pláště vyrobeného z nerezové oceli, horních a dolních štítů, vnitřních a vnějších desek a nosného koše. Celý tento obalový soubor je pro skladování obsaženého použitého jaderného paliva uložen do betonového modulu. [29]



Obrázek č. 22 OS NUHOMS HSM [29]

## 5 Úložný obalový soubor PJP

Úložný obalový soubor použitého jaderného paliva slouží jako inženýrská bariéra zajišťující zadržení radionuklidů do doby, než se štěpné produkty z většiny přemění na stabilní nuklidy. Proto čím delší bude tato doba, tím nižší bude nebezpečnost odpadů. Značný důraz je tak kladen na životnost úložného obalového souboru, která je ovlivňována těsností, korozní odolností a mechanickou odolností úložného obalového souboru jak vůči vnějším vlivům v podobě tlakového a seismického působení tak i vůči vnitřním vlivům v podobě tlakové, tepelné a radiační zátěže. [30]

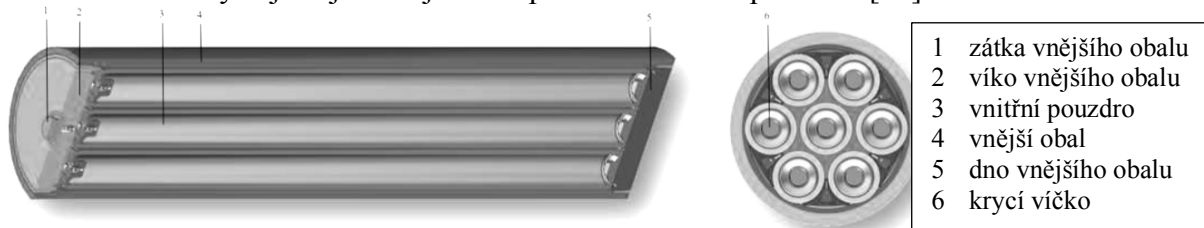
Pro hlubinné uložení použitého jaderného paliva z tlakovodních reaktorů bylo v ČR ale i jinde na světě doposud vytvořeno několik koncepcí úložného obalového souboru. Z pohledu české koncepce se jedná o úložný obalový soubor typu ŠKODA zpracovaný hned v několika variantách. Po jejich vyhodnocení a přihlédnutí k výhodnosti shodného vnějšího průměru úložného obalového souboru, která představuje optimalizaci všech manipulačních zařízení, shodný rozměr bentonitových vložek, shodný průměr ukládacích vývrtů a řádové vyrovnání minimální životnosti, byla pro použité jaderné palivo z reaktoru typu VVER-440 zvolena celkově 12. varianta úložného obalového souboru ŠKODA VVER 440/7 a pro použité jaderné palivo z reaktoru typu VVER-1000 byla zvolena celkově 11. varianta úložného obalového souboru typu ŠKODA VVER 1000/3. Podobná koncepce úložného obalového souboru byla provedena i dříve a výsledkem je úložný obalový soubor typu PK7 VVER440 a PK3 VVER1000. [31], [32]

Mezi další koncepce úložných obalových souborů dále patří úložný obalový soubor typu CU1 a CU2 a úložný obalový soubor navržený pro projekt KBS-3. [33]

## 5.1 ŠKODA VVER 440/7

Úložný obalový soubor typu ŠKODA VVER 440/7, jehož konstrukce varianty 12 je znázorněna na **Obrázek č. 23** a navržena společností ŠKODA JS a.s., je určen pro uložení použitého jaderného paliva v podobě sedmi palivových kazet vyvezených z reaktoru typu VVER-440. [31]

Skládá se z vnějšího obalu z uhlíkové oceli o tloušťce 65 mm s přivařeným víkem, sedmi nerezových vnitřních pouzder o tloušťce 36 mm, jejichž polotovarem je normalizovaná trubka, a vnitřní vestavby zajišťující vzájemnou polohu vnitřních pouzder. [31]



**Obrázek č. 23** ÚOS ŠKODA VVER 440/7 [31]

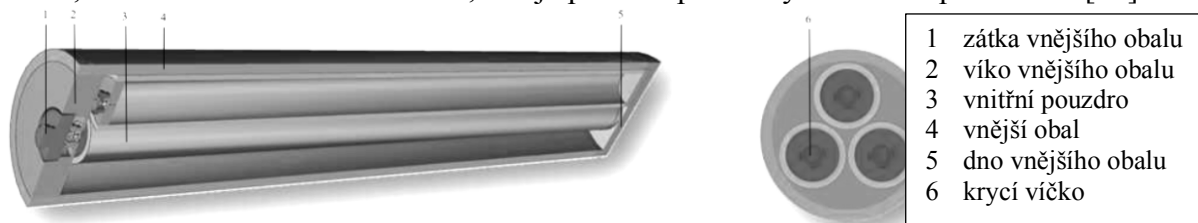
Parametr	Hodnota
Vnější průměr vnějšího obalu	914 mm
Délka vnějšího obalu	3 810 mm
Vnější průměr vnitřního pouzdra	245 mm
Délka vnitřního pouzdra	3 380 mm
Hmotnost ÚOS	13 563 kg
Celková životnost	180 000 let

**Tabulka č. 5** Parametry ÚOS ŠKODA VVER 440/7 [31]

## 5.2 ŠKODA VVER 1000/3

Úložný obalový soubor typu ŠKODA VVER 1000/3, jehož konstrukce varianty 11 je znázorněna na **Obrázek č. 24** a navržena společností ŠKODA JS a.s., je určen pro uložení použitého jaderného paliva v podobě pouze tří palivových souborů vyvezených z reaktoru typu VVER-1000. [31]

Skládá se z vnějšího obalu z uhlíkové oceli o tloušťce 65 mm s přivařeným víkem, tři nerezových vnitřních pouzder o tloušťce 36 mm a vnitřní vestavby zajišťující vzájemnou polohu vnitřních pouzder. Tento úložný obalový soubor je tak obdobou typu ŠKODA VVER 440/7, má však větší celkovou délku, což je patrné z přiložených tabulek parametrů. [31]



**Obrázek č. 24** ÚOS ŠKODA VVER 1000/3 [31]

Parametr	Hodnota
Vnější průměr vnějšího obalu	914 mm
Délka vnějšího obalu	5 295 mm
Vnější průměr vnitřního pouzdra	356 mm
Délka vnitřního pouzdra	4 700 mm
Hmotnost ÚOS	13 563 kg
Celková životnost	90 000 let

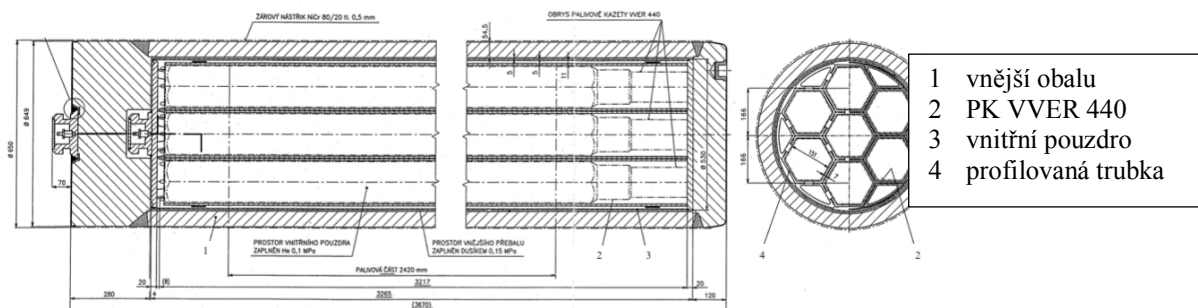
**Tabulka č. 6** Parametry ÚOS ŠKODA VVER 1000/3 [31]



### 5.3 7PK VVER440

Úložný obalový soubor typu 7PK VVER440, jehož konstrukce je znázorněna na **Obrázek č. 25**, je určen pro uložení použitého jaderného paliva v podobě sedmi palivových kazet vyvezených z reaktoru typu VVER-440. [32]

Skládá se z vnějšího obalu vyrobeného z trubky o tloušťce 55 mm opatřené ochrannou antikorozií vrstvou v podobě žárového nástřiku, vnitřního pouzdra z nerezové oceli s pláštěm vyrobeným skružením plechu o tloušťce 5 mm a vestavby představující sedm trubek ze slitin hliníku, které zajišťují vzájemnou polohu zavezených palivových souborů a usnadňují tak vkládání palivových kazet do pouzdra. [32]



Obrázek č. 25 ÚOS 7PK VVER440 [32]

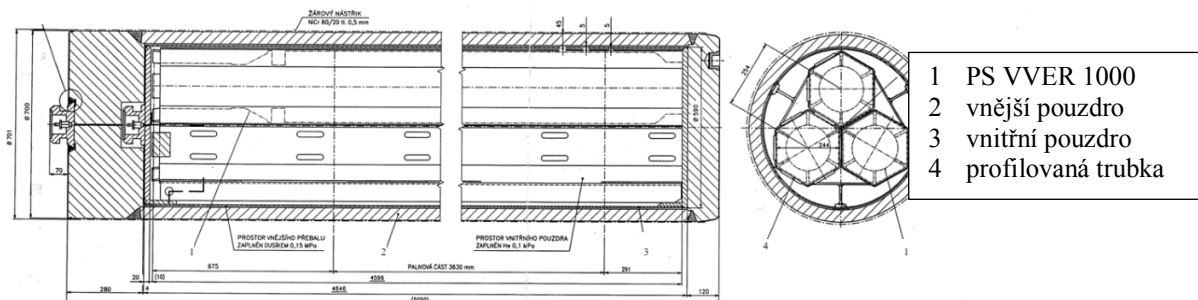
Parametr	Hodnota
Vnější průměr vnějšího obalu	649 mm
Délka vnějšího obalu	3 670 mm
Vnější průměr vnitřního pouzdra	530 mm
Délka vnitřního pouzdra	3 265 mm
Šířka profilované trubky	151 mm
Tloušťka žárového nástřiku	0,5 mm

Tabulka č. 7 Parametry ÚOS 7PK VVER440 [32]

### 5.4 3PK VVER1000

Úložný obalový soubor typu 3PK VVER1000, jehož konstrukce je znázorněna na **Obrázek č. 26**, je určen pro uložení použitého jaderného paliva v podobě pouze tří palivových souborů vyvezených z reaktoru typu VVER-1000. [32]

Skládá se z vnějšího obalu vyrobeného z trubky o tloušťce 45 mm opatřené ochrannou antikorozií vrstvou v podobě žárového nástřiku, vnitřního pouzdra z nerezové oceli s pláštěm vyrobeným skružením plechu o tloušťce 5 mm a vestavby představující tři trubky ze slitin hliníku. Tento úložný obalový soubor je tak obdobou typu 7PK VVER440, má však větší celkovou délku a průměr, což je patrné z přiložených tabulek parametrů. [32]



Obrázek č. 26 ÚOS 3PK VVER1000 [32]

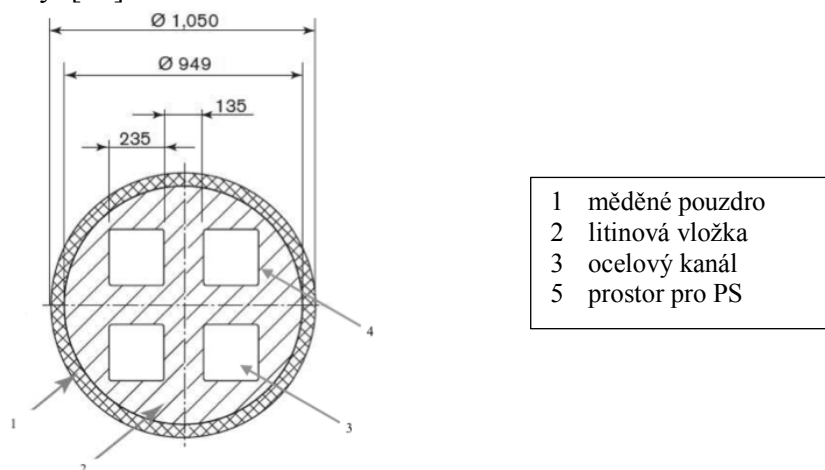
Parametr	Hodnota
Vnější průměr vnějšího obalu	700 mm
Délka vnějšího obalu	5 050 mm
Vnější průměr vnitřního pouzdra	590 mm
Délka vnitřního pouzdra	4 646 mm
Šířka profilované trubky	244 mm
Tloušťka žárového nástřiku	0,5 mm

**Tabulka č. 8 Parametry ÚOS 3PK VVER1000 [32]**

## 5.5 KBS-3

Úložný obalový soubor KBS-3, jehož příčný řez je znázorněn na **Obrázek č. 27**, je švédské koncepce určené pro uložení použitého jaderného paliva z tlakovodního reaktoru. [34]

Skládá se z vnějšího pouzdra o tloušťce 50 mm a litinové vložky opatřené kanály pro umístění palivových souborů. Z důvodu použití mědi pro vnější pouzdro není potřeba žádné povrchové úpravy, jelikož tento materiál vykazuje výbornou korozivzdornost odolávající případným účinkům podzemní vody. [34]

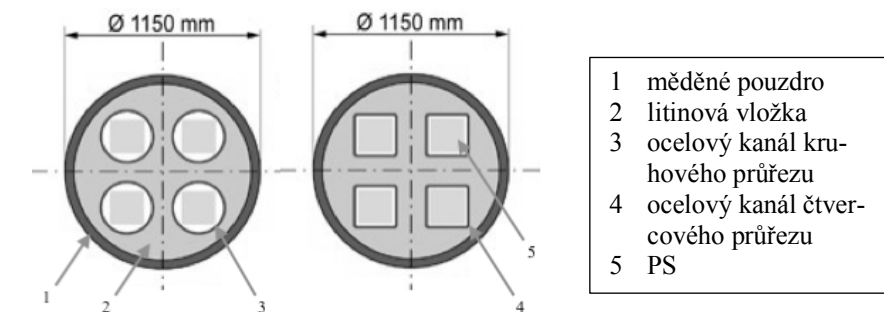


**Obrázek č. 27 Příčný řez ÚOS KBS-3 [34]**

## 5.6 CU1 a CU2

Úložné obalové soubory CU1 a CU2, jejichž příčný řez je znázorněn na **Obrázek č. 28**, jsou francouzské koncepce navržené společností ANDRA a vycházející z úložného souboru KBS-3. Rozdílem obou úložných obalových souborů je především jejich použití, kdy CU1 je určen pro uložení uranového jaderného paliva, kdežto CU2 je navržen pro uložení MOX paliva. [33]

Skládají se z vnějšího pouzdra o tloušťce válcové části 50 mm a spodní části 100 mm, litinové vložky opatřené kanály čtvercového či kruhového průřezu určených pro umístění palivových souborů a litinového víka o tloušťce 50 mm, které je pro upevnění opatřeno závitem. [33]



**Obrázek č. 28 Příčný řez ÚOS CU1 a CU2 [33]**



## 6 Zařízení pro manipulaci PJP

Zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem, které bylo zmíněno v kapitole **Překládání PJP z OS do ÚOS**, je umístěno v horké komoře hlubinného úložiště, kde slouží především pro vykládku použitého jaderného paliva v podobě palivových kazet/souborů z obalového souboru do skladovacích mříží a následně ze skladovacích mříží do úložného obalového souboru. Jedná se tak o obdobu zavázečního stroje, jenž se nachází v reaktorovém sále jaderné elektrárny a je určen pro manipulaci s palivovými kazety/soubory. Manipulátor horké komory má však kromě manipulace s použitým jaderným palivem umožňovat i sejmutí/usazení primárního víka obalového souboru a primárního víka a sekundárního víka úložného obalového souboru.

Z hlediska definování jeho dílčích funkcí v čase se jedná o záchyt primárního víka obalového souboru, odstranění primárního víka obalového souboru, uložení primárního víka na odkládací podstavec, záchyt palivové kazety/souboru, vytažení palivové kazety/souboru z obalového souboru, přemístění palivové kazety/souboru nad skladovací mříž, spuštění palivové kazety/souboru do skladovací mříže, záchyt primárního víka, usazení primárního víka zpět na obalový soubor, záchyt sekundárního víka úložného obalového souboru, odstranění sekundárního víka úložného obalového souboru, uložení sekundárního víka na odkládací podstavec, záchyt primárního víka úložného obalového souboru, odstranění primárního víka úložného obalového souboru, uložení primárního víka na odkládací podstavec, záchyt palivové kazety/souboru, vytažení palivové kazety/souboru ze skladovací mříže, přemístění palivové kazety/souboru nad úložný obalový soubor, spuštění palivové kazety/souboru do úložného obalového souboru, záchyt primárního víka úložného obalového souboru, usazení primárního víka zpět na úložný obalový soubor, uchycení sekundárního víka úložného obalového souboru a nakonec usazení sekundárního víka zpět na úložný obalový soubor.

Návrh manipulátoru horké komory z hlediska interakce s jeho okolím udává několik omezení. Ty jsou dány rozměry palivové kazety, obalového souboru včetně primárního víka, skladovací mříže, úložného obalového souboru včetně primárního a sekundárního víka, horké komory a aktivitou použitého jaderného paliva, jež se odráží na konstrukčním provedení jednotlivých prvků manipulačního zařízení.

Parametr	Hodnota
Délka palivové kazety VVER-440	3 217 mm
Délka palivového souboru VVER-1000	4 570 mm
Šířka palivové kazety VVER-440	144 mm
Šířka palivového souboru VVER-1000	235 mm
Průměr pomocného záchytu vík OS	400 mm
Rozměry suchého bazénu se skladovacími mřížemi	4 x 3 x 6 m
Stupeň vyhoření paliva VVER 440	45 MWd/kgU
Stupeň vyhoření paliva VVER 1000	55 MWd/kgU

Tabulka č. 9 Omezení konstrukčního provedení vlivem interakcí s okolím [16]

### 6.1 Konstrukce

Konstrukce manipulátoru horké komory, jehož koncepční návrh je přiložen, se skládá z nástěnných kolejí, mostu a dvou mostových vozíků, kdy na jednom z nich je umístěn pracovní teleskop a kamera a na druhém se pak nachází manipulátor pro sejímání a usazování vík.

#### 6.1.1 Nástěnné koleje

Nástěnné koleje manipulátoru horké komory umožňují lineární pohyb mostu podél celé délky horké komory společně se dvěma elektromotory připevněnými k mostu, kdy se jedná o bezpečnostní prvek, jelikož k samotnému pohybu je dostačující pouze jeden z motorů a druhý elektromotor slouží z hlediska redundance jako záloha a je tak schopný v případě potřeby zastat

funkci prvního z nich. Z důvodu nezávislosti jsou oba motory napájeny z odlišných elektrických zdrojů. Nástěnné koleje jsou tvořeny čtvercovými profily, jejichž horní plocha je opatřena kolejovými drahami o rozchodu 8,5 metru. Nástěnné koleje jsou ke stěnám horké komory připevněny montážními deskami, jež jsou ke čtvercovým profilům přivařeny a jejichž provedení je patrné z **Obrázek č. 29**.



**Obrázek č. 29** Nástěnná kolej pro manipulátor horké komory

### 6.1.2 Most

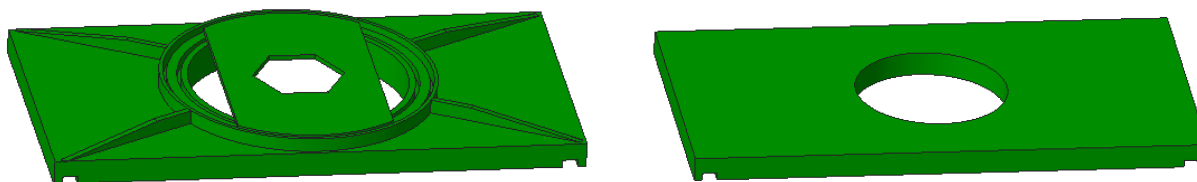
Most manipulátoru horké komory umožňuje pohyb mostových vozíků s pracovním teleskopem pro manipulaci s použitým jaderným palivem a manipulátorem pro manipulaci s víky ve směru kolmém na směr pohybu mostu manipulátoru horké komory po nástěnných kolejích společně se dvěma převodovými motory pro každý z mostových vozíků. Most je tvořen nosníkem obdélníkového půdorysu, jehož horní plocha je pro tento účel opatřena kolejovými drahami a ozubeným hřebenem, kdy samotné provedení mostu je patrné z **Obrázek č. 30**.



**Obrázek č. 30** Most manipulátoru horké komory

### 6.1.3 Mostové vozíky

Mostový vozík s pracovním teleskopem pro manipulaci s použitým jaderným palivem je pro potřeby otáčení palivové kazety/souboru kolem vlastní osy za účelem přesnosti jejich uložení opatřen otočným zařízením v podobě kruhové desky opatřené vnějším ozubením, k níž je připevněn jak samotný pracovní teleskop, tak i akční členy zdvihacího zařízení v podobě kladek. Mostový vozík s manipulátorem pro manipulaci s víky otočný mechanismus nevyžaduje, a je tak tvořen pouze obdélníkovou deskou pohybující se po mostě manipulátoru horké komory. Obě provedení mostových vozíků jsou patrné z **Obrázek č. 31**.



**Obrázek č. 31** Mostové vozíky manipulátoru horké komory

V závislosti na potřebě provedení dané dílčí funkce najede nad obalový soubor či úložný obalový soubor mostový vozík s pracovním teleskopem či manipulátorem. Výhodou dvojího provedení mostových vozíků je především vyšší bezpečnost, jelikož v případě poruchy pohonu vozíku s pracovním teleskopem je umožněno provést manipulační operace zajišťující snížení radiační zátěže v horké komoře pro možnost vstupu pracovníků zajišťujících opravu tohoto zařízení.

#### 6.1.4 Pracovní teleskop

Pracovní teleskop umožňuje vedení zdvihacího zařízení a slouží i jako stínící prvek pro použité jaderné palivo v podobě palivové kazety/souboru vytažené do prostoru horké komory. Je tvořen pevnou šestihrannou konstrukcí, kdy jedna z vnitřních stěn je opatřena drážkami pro vedení zdvihacího zařízení, což je patrné z **Obrázek č. 32**.



**Obrázek č. 32 Pracovní teleskop manipulátoru horké komory**

Uvnitř pracovního teleskopu se ve svislém směru pohybuje zdvihací zařízení s kleštěmi pro záchyt palivové kazety/souboru, jenž je patrný na **Obrázek č. 33** a jehož pracovní rozsah 6,5 metru je umožněn tažnou silou ocelového lana, s nímž se navíjí i optický kabel pro potřebu přenosu dat z polohových senzorů. Z hlediska bezpečnosti je pracovní teleskop opatřen třecí brzdou, která by v případě porušení ocelového lana předešla pádu a poškození použitého jaderného paliva a za stejným účelem jsou kleště v uzavřené poloze uzamčeny a zajištěny proti otevření.



**Obrázek č. 33 Zdvihací zařízení**

#### 6.1.5 Kamera

Kamera manipulátoru horké komory je připevněna k dolnímu konci pracovního teleskopu a umožňuje vizuální kontrolu přesnosti jeho najetí nad obalový soubor, skladovací mříž či úložný obalový soubor pro vytažení či spuštění palivové kazety/souboru.

#### 6.1.6 Manipulátor

Manipulátor umožňuje manipulaci s víky a je tak tvořen teleskopickým stožářem zakončeným hákem pro záchyt pomocného záchytu vík, jenž je především z hlediska potřebné nosnosti 12 tun komerčně dostupný.

## 7 Výpočet stínění navrženého zařízení

Před samotným výpočtem stínění konstrukční části v podobě šestihranné trubky manipulátoru horké komory je důležité nejdříve ozřejmit informace o zdrojích ionizujícího záření, s nimiž je potřeba pro tento účel počítat, a dále popsat možnosti pro jejich odstínění. [35]

## 7.1 Stínění ionizujícího záření PJP

Použité jaderné palivo obsahuje radioaktivní nuklidy, které jsou zdrojem ionizujícího záření. To je částicové či elektromagnetické povahy, avšak jen s kratší vlnovou délkou v porovnání s UV záření. I přesto, že radioaktivita s časem od vyvezení použitého jaderného paliva z reaktoru klesá, je použité jaderné palivo po celou dobu zdrojem ionizujícího záření, kam patří  $\alpha$ -záření,  $\beta$ -záření,  $\gamma$ -záření a neutronové záření. [36]

### 7.1.1 $\alpha$ -záření

Jedná se o částicové záření, jehož proud je tvořen kladnými jádry helia sestávajících se vždy ze dvou protonů a dvou neutronů. Při alfa záření tak dochází k přeměně původního radionuklidu a vzniká tak nový prvek, který je v periodické tabulce umístěn o dvě pozice vlevo. Alfa záření je z ionizujícího záření nejméně pronikavé a lze tak relativně snadno odstínit již listem papíru či tenkou hliníkovou fólií. V případě stínění použitého jaderného paliva, kde se předpokládá výskyt i ostatních druhů záření, je alfa záření vždy odstíněno stíněním jakéhokoliv jiného ionizujícího záření. [37]

### 7.1.2 $\beta$ -záření

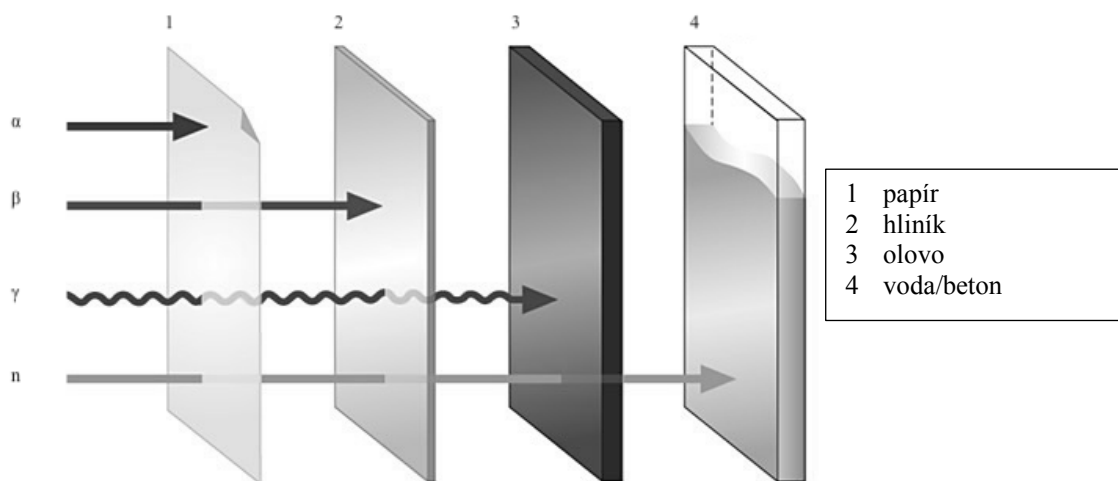
Jedná se o částicové záření, jehož proud je v případě  $\beta^-$  záření tvořen zápornými elektrony a v případě  $\beta^+$  záření kladnými pozitrony. Při beta záření tak dochází k přeměně původního radionuklidu a vzniká tak nový prvek, který je v periodické tabulce umístěn v případě toku elektronů o pozici vpravo a v případě toku pozitronů o pozici vlevo. K odstínění  $\beta^-$  záření postačuje použití lehkých materiálů představující plexisklo či hliník o tloušťce v jednotkách milimetrů ovšem s přidáním tenké vrstvy olova pro odstínění brzděného elektromagnetického záření, které vzniklo zabrzděním elektronů ve stínícím materiálu. K odstínění  $\beta^+$  záření je zapotřebí obdobného stínění, avšak o vyšší tloušťce vrstvy olova pro odstínění gama záření, které vzniklo anihilací pozitronů s elektrony. [37]

### 7.1.3 $\gamma$ -záření

Jedná se o elektromagnetické záření, jehož nečásticová povaha v podobě proudu fotonů na rozdíl od ostatních typů záření způsobuje jeho vysokou pronikavost. Gama záření se tak stíní těžkými materiály vykazující vysokou hustotu a protonové číslo, čímž je olovo, baryt či wolfram. Lze se však setkat i využitím materiálů o nižší stínící schopnosti, avšak o vyšší tloušťce. Proto byl zaveden pojem „polotloušťka“ materiálu, který udává závislost mezi tloušťkou stínícího materiálu a zeslabením energie gama záření. [37]

### 7.1.4 Neutronové záření

Jedná se o částicové záření, jehož proud je tvořen neutrony. Ty však na rozdíl od kladných jader hélia v případě alfa záření a elektronů a pozitronů v případě beta záření nenesou žádný elektrický náboj, což způsobuje jejich velmi vysokou pronikavost. V případě stínění neutronů o vysoké energii představující rychlé neutrony, je před samotným stíněním zapotřebí nejdříve jejich zpomalení na materiálech obsahujících lehké atomy, ideálně se jedná o atomy vodíku. Pomalé neutrony se následně stíní materiály s vysokým účinným průřezem pro absorpci neutronů, mezi které patří bór či kadmium. Provedení absorpce neutronů však způsobí vznik gama záření, s čímž je nutno počítat a doplnit stínění o třetí vrstvu v podobě olova. [37]



Obrázek č. 34 Stínění ionizujícího záření [38]

## 7.2 Serpent

Pro výpočet stínění konstrukční části manipulátoru horké komory bylo využito výpočetního kódu Serpent založeném na statistické a pravděpodobnostní metodě Monte Carlo, který byl vyvinut Technickým Výzkumným Centrem ve Finsku a původně sloužil pouze pro zjednodušený výpočet neutroniky jaderných neutronů. V současnosti lze však tento výpočetní kód využít i v oblasti reaktorové fyziky zahrnující výpočet kritičnosti, výpočet palivového cyklu a modelování výzkumných reaktorů či právě v oblasti transportu neutronů a fotonů zahrnující výpočet stínění a dozimetrických dávek. [39]

V rámci prováděného výpočtu bylo využito nejnovější knihovny jaderných dat ENDF/B-VIII.0 zahrnující potřebné hodnoty parametrů jednotlivých nuklidů představující závislost mikroskopického účinného průřezu na teplotě. V případě, že potřebná teplota není knihovnou definována, je pro co nejpřesnější hodnotu provedena iterace. [39]

### 7.2.1 Příprava použitého jaderného paliva

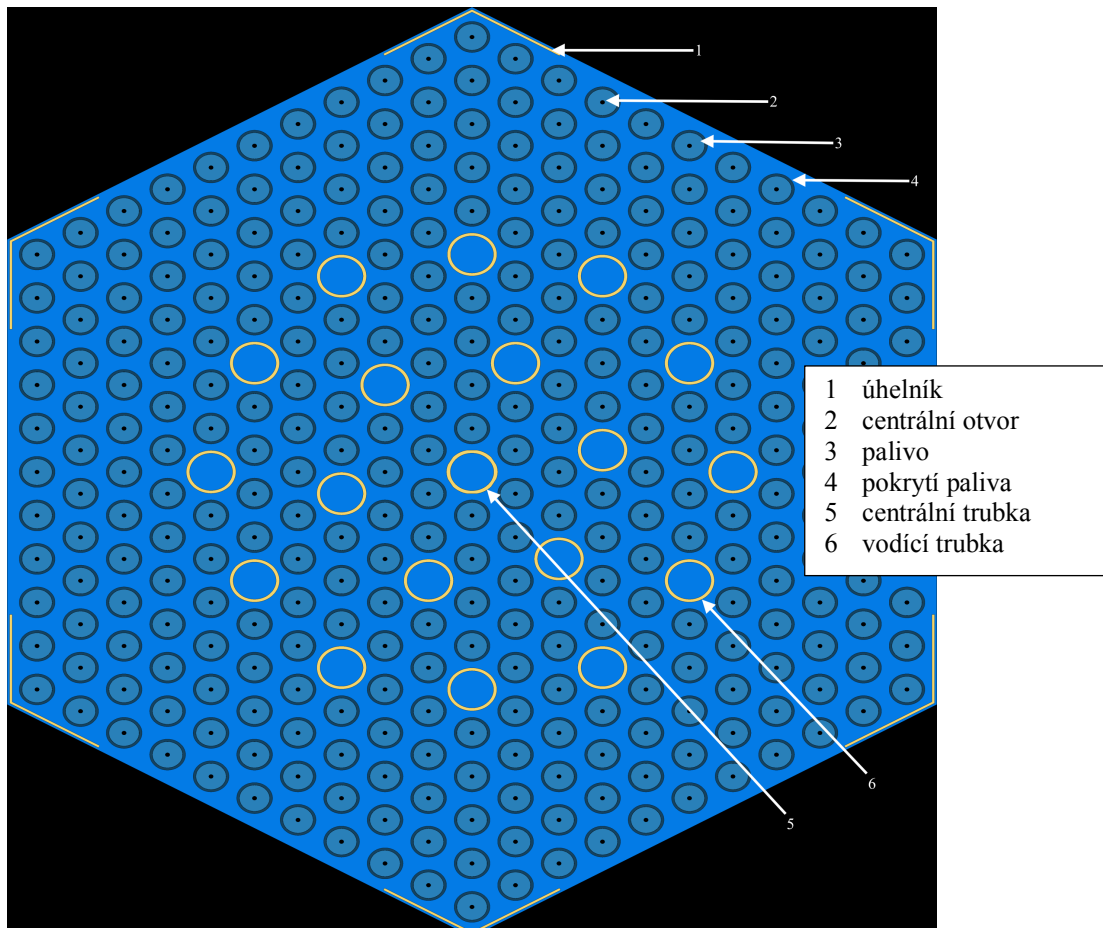
Pro přípravu použitého jaderného paliva bylo využito čerstvého palivového souboru typu TVSA-T mod.1 od společnosti TVEL. Konkrétně se jedná o palivový soubor s uniformním obohacením, jenž se skládá z 306 palivových proutků, 18 vodících trubek a jedné centrální trubky. Využité parametry uvedených konstrukčních částí jsou patrné z **Tabulka č. 10**. [40]

Parametr	Hodnota
Vnitřní průměr peletky	1,2 mm
Vnější průměr peletky	7,6 mm
Vnitřní průměr pokrytí	7,73 mm
Vnější průměr pokrytí	0,91 mm
Vnitřní průměr vodící trubky	10,9 mm
Vnější průměr vodící trubky	12,6 mm
Vnitřní průměr centrální trubky	11 mm
Vnější průměr centrální trubky	13 mm

Tabulka č. 10 Parametry palivového souboru TVSA-T [40]

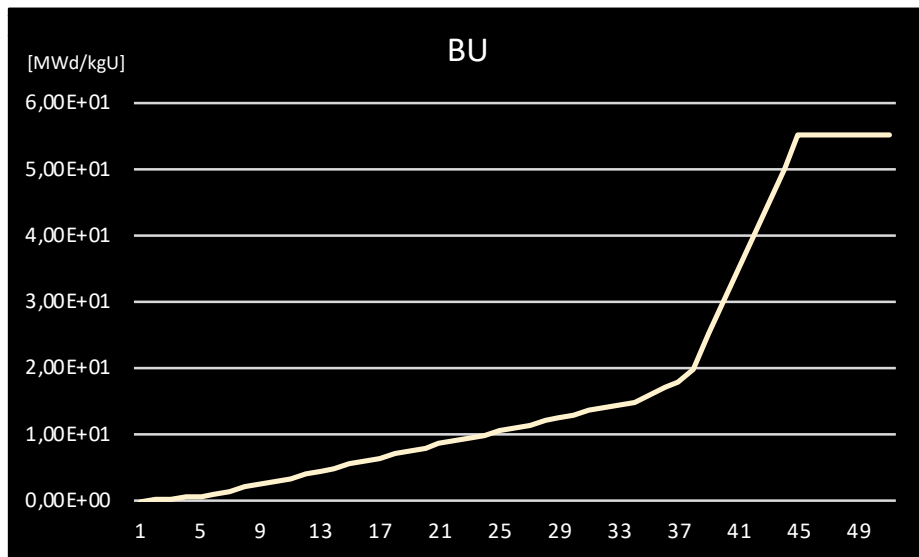
Z hlediska materiálového složení konstrukčních prvků palivového souboru bylo pro peletky zvoleno palivo o uniformním obohacení 5 % štěpitelného izotopu  $U_{92}^{235}$ , pro centrální trubku a vodící trubku ocel s označením E-635, pro pokrytí materiál s označením E-110 a pro chladivo voda. K výčtu obsažených nuklidů byla doplněna i hustota příslušných materiálů a uvažovaná teplota 600 K.

Po zápisu matice o velikosti 23 řádků a 23 sloupců udávající rozmístění konstrukčních prvků v rámci palivového souboru a definici jeho ohraničení došlo k vytvoření 2D geometrie palivového souboru, která je znázorněna na **Obrázek č. 35**. Takto vytvořený čerstvý palivový soubor byl následně podroben vyhořívání po jednotlivých krocích až na kumulativní vyhoření paliva 55 MWd/kgU, jenž je předpokládán pro použité jaderné palivo v podobě palivového souboru vyvezeného z obalového souboru do horké komory projektu hlubinného úložiště. Do vstupního souboru výpočetního kódu Serpent bylo zadáno i chlazení, které je pro zmíněný projekt hlubinného úložiště uvažováno po dobu 65 let. [16]



**Obrázek č. 35** Geometrie palivového souboru TVSA-T

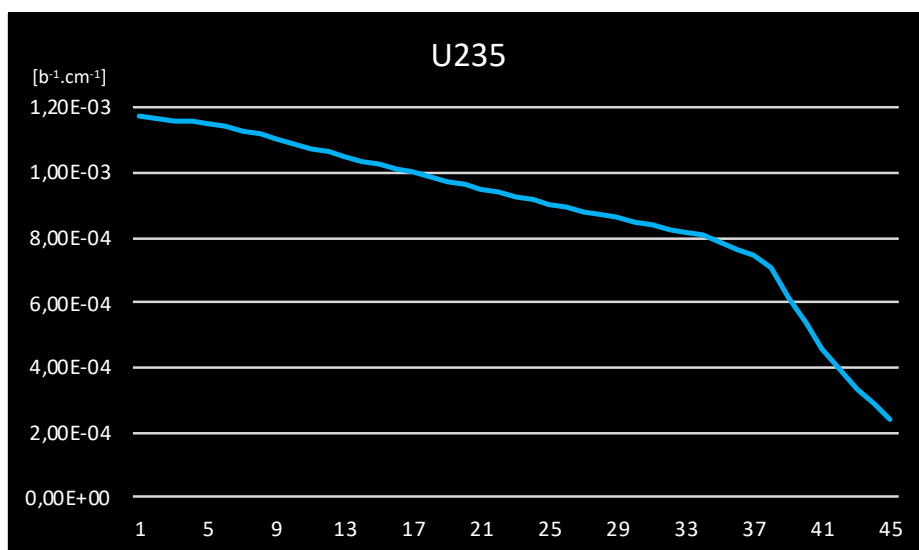
Spuštěním výpočtu vstupního souboru bylo připraveno použité jaderné palivo o odpovídajících parametrech. Pro analýzu jeho složení byly vykresleny následující grafy, které znázorňují závislost koncentrace vybraných nuklidů na krocích vyhořívání jaderného paliva. V případě nuklidu  $\text{Pu}_{94}^{239}$  je z **Graf č. 2** zřejmé, že jeho koncentrace roste až do dosažení požadovaného stupně vyhoření odpovídající kroku 45, což je patrné z **Graf č. 1**, kdy koncentrace dosáhne hodnoty okolo  $1,75\text{E} - 04 \text{ b}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Naprosto opačný průběh pak vykazuje izotop  $\text{U}_{92}^{235}$  znázorněný na **Graf č. 3**, jehož koncentrace klesá až dosáhne hodnoty okolo  $2,37\text{E} - 04 \text{ b}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Obdobné průběhy lze znázornit i ostatních nuklidů obsažených v použitém jaderném palivu. Příkladem může být nuklid  $\text{Cs}_{55}^{237}$ , jenž je jedním z hlavních štěpných produktů  $\text{U}_{92}^{235}$  a proto jeho koncentrace vlivem vyhořívání roste, až dosáhne hodnoty okolo  $8,00\text{E} - 05 \text{ b}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , což je patrné na **Graf č. 4**, či nuklid  $\text{Sr}_{38}^{90}$ , jehož vzrůstající průběh koncentrace vlivem vyhořívání je znázorněn na **Graf č. 5**.



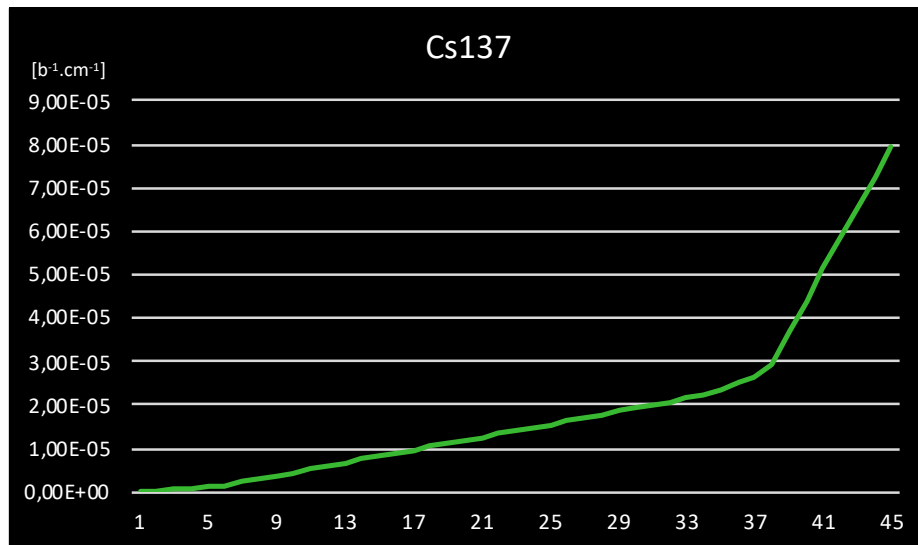
Graf č. 1 Závislost vyhoření na krocích vyhoření



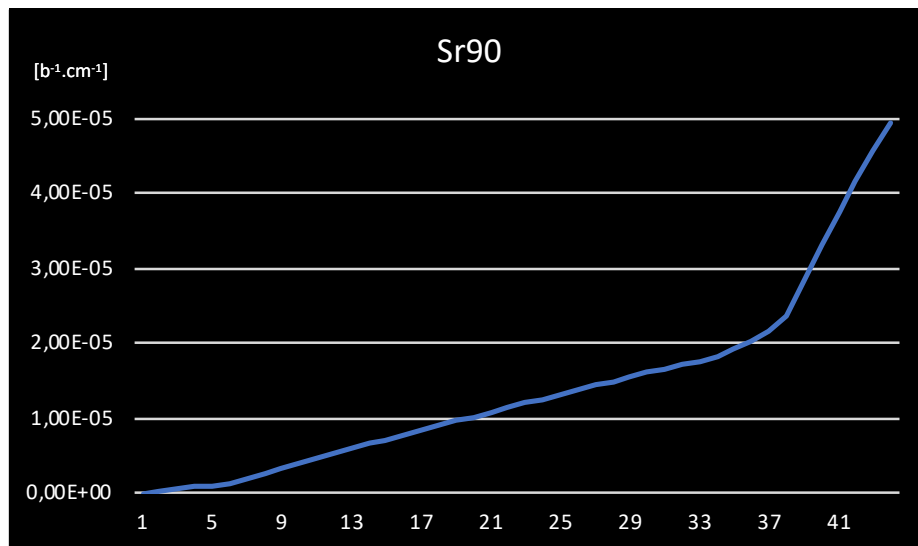
Graf č. 2 Závislost koncentrace nuklidu Pu239 na krocích vyhořívání



Graf č. 3 Závislost koncentrace nuklidu U235 na krocích vyhořívání



Graf č. 4 Závislost koncentrace nuklidu Cs137 na krocích vyhořívání



Graf č. 5 Závislost koncentrace nuklidu Sr90 na krocích vyhořívání

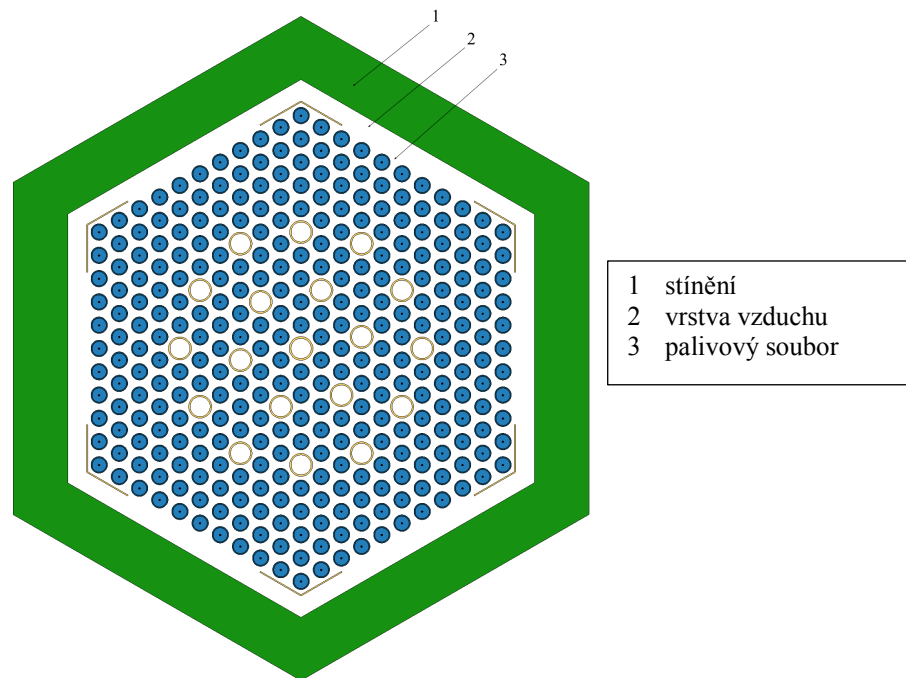
## 7.2.2 Zdroj

Dalším krokem ve výpočtu stínění konstrukční části manipulátoru horké komory byl výpočet vydatnosti neutronového zdroje v podobě použitého jaderného paliva, jenž je dán množstvím vyprodukovaných neutronů za jednotku času.

## 7.2.3 Geometrie stínění

Při vytváření geometrie stínícího šestiúhelníku, jež byla obdobně jako pro palivový soubor vytvořena pouze ve 2D a která je znázorněna na Obrázek č. 36, došlo k zanedbání drážek pro vedení zdvihacího zařízení umístěných na jedné z vnitřních stěn šestiúhelníku. Pro stínění, jehož rozměr byl tak definován hexagonální plochou se středem v počátku souřadnicového systému a poloviční šířkou o velikosti 127,5 mm, byla zvolena tloušťka 30 mm.





Obrázek č. 36 Geometrie palivového souboru a stínění

Materiálem stínění byla zvolena korozivzdorná ocel stabilizovaná titanem s označením 08CH18N10T, jež je svařitelná a zároveň zaručuje nízký obsah kobaltu, což omezuje výskyt indukované aktivity. Tento materiál byl obdobně jako materiály palivového souboru popsán hustotou příslušící uvažované teplotě, a především jeho složením popsáním vyskytujícími se nuklidy.

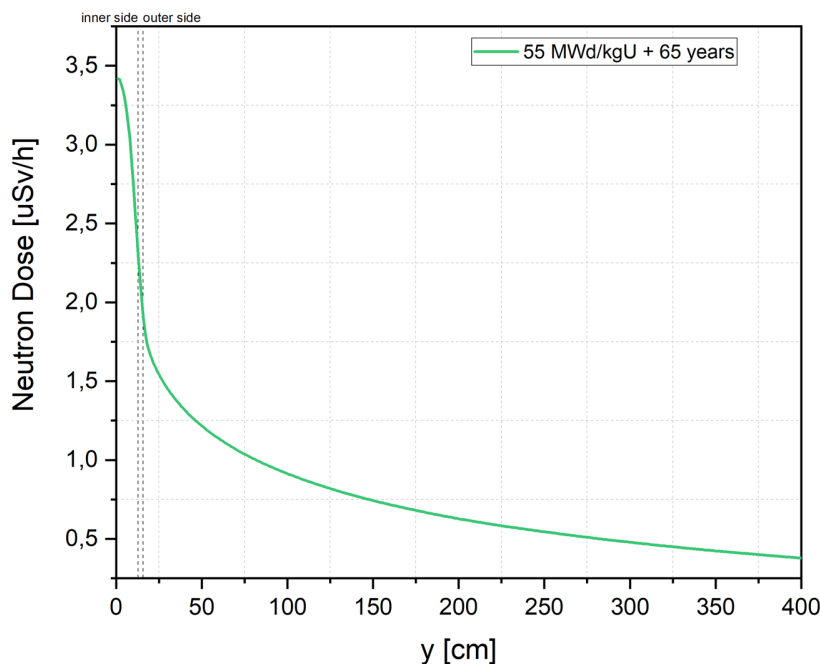
#### 7.2.4 Výpočet stínění

Pro výpočet stínění bylo celkově využito 400 000 neutronů, jež byly zaznamenávány plošnými detektory umístěnými na palivu, vnitřní stěně stínění, uvnitř stínění, na vnější stěně stínění a v celém rozsahu modelu s krokem 1 cm. Schopnost stínění snížit tok neutronů je pak patrný z vykresleného **Obrázek č. 37**, kde nižší barevná intenzita představuje nižší neutronový tok.



Obrázek č. 37 Rozložení neutronového toku palivového souboru se stíněním

Závislost neutronové dávky na vzdálenosti od zdroje zahrnující stínění je znázorněna v Graf č. 6, kde první přerušovaná čára zleva značí vnitřní povrch stínění a druhá jeho vnější povrch, na který navazuje prostor horké komory tvořený vzduchem. Mezi přerušovanými čarami znázorňujícími tloušťku stínění nabývá směrnice poklesu neutronové dávky vysoké hodnoty, což představuje vysoké snížení neutronové dávky na malé vzdálenosti. Z původní hodnoty neutronové dávky o velikosti 3,4  $\mu\text{Sv/h}$  tak vlivem stínění a také vzdálenosti 4 metrů od zdroje neutronů došlo k jejímu poklesu až na hodnotu 0,4  $\mu\text{Sv/h}$ . Na vnějším okraji stínění dosahuje hodnota neutronové dávky přibližně 2  $\mu\text{Sv/h}$ , což při současném limitu 50  $\mu\text{Sv/r}$  pro pracovníka s ionizačním zařízením umožňuje dostatečný čas, jenž by byl v případě potřebné opravy zařízení nutný.



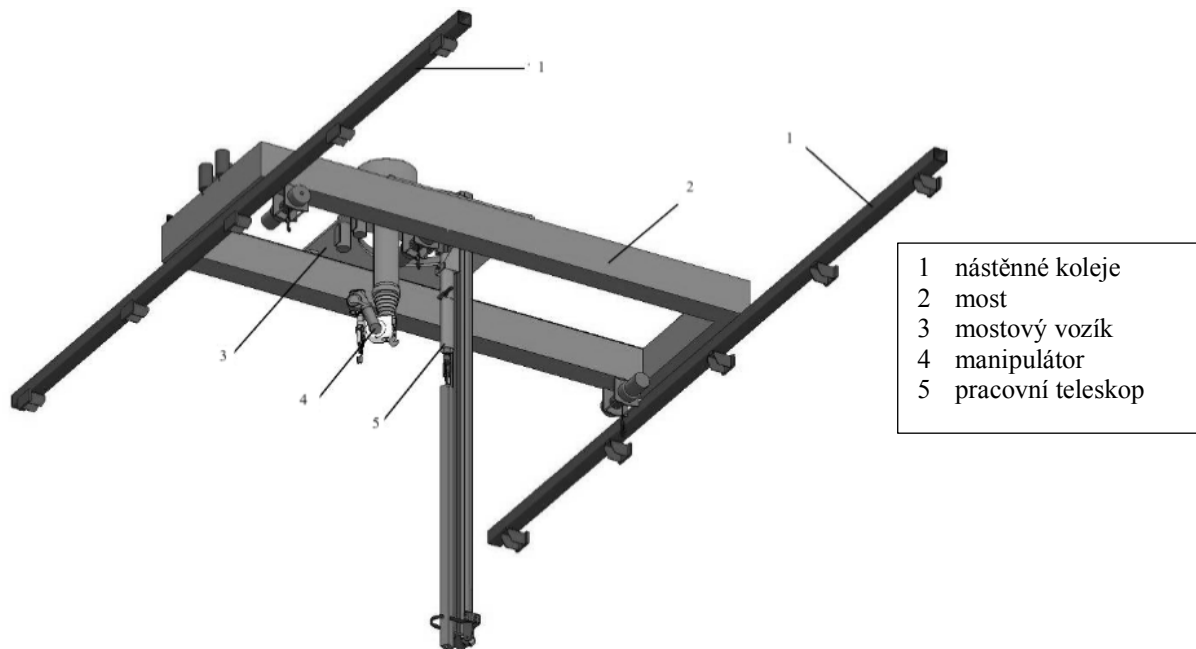
Graf č. 6 Závislost neutronové dávky na vzdálenosti od zdroje

## 8 Porovnání navrženého řešení

Navržené koncepční řešení manipulátoru horké komory lze porovnat hned s několika obdobnými zařízeními, které byly zatím navrženy v závislosti na úrovni přípravy projektů hlubinných úložišť ve světě. K nejrozpracovanějšímu návrhu patří jednoznačně finské zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem, jelikož se jedná o jedinou zemi, jež v současné době buduje trvalé úložiště. Mezi ostatní návrhy, jež však zatím zůstávají jen na papíře, se řadí především zařízení pro hlubinné úložiště ve Švédsku a USA. [41]

### 8.1 Finsko

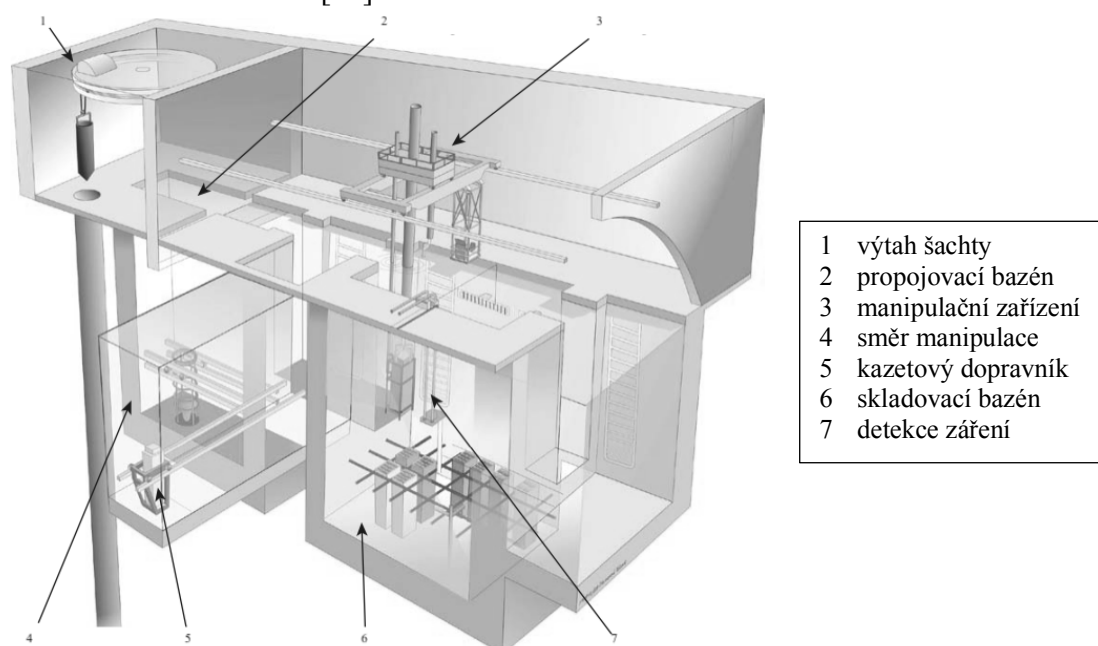
Finské zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem navržené pro hlubinné úložiště Onkalo budované na jihozápadním pobřeží je téměř obdobou již navrženého koncepčního řešení manipulátoru horké komory pro ČR avšak slouží pro přímou překládku použitého jaderného paliva v podobě palivových kazet/souborů z obalového souboru do úložného obalového souboru. Jedná se o dálkově ovládané zařízení umístěné v horké komoře, které se skládá z nástěnných kolejí, mostu, mostového vozíku, pracovního teleskopu, kamery a manipulátoru. Provedení jednotlivých konstrukčních částí se však liší v několika aspektech. Hlavním rozdílem je především absence stínící konstrukční části manipulačního zařízení a využití pouze jednoho mostového vozíku pro umístění jak pracovního teleskopu, tak i manipulátoru, což je patrné z Obrázek č. 38. [42]



Obrázek č. 38 Manipulační zařízení pro HÚ ve Finsku [42]

## 8.2 Švédsko

Švédské zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem navržené pro plánované hlubinné úložiště v lokalitě Forsmark, kde se nachází i stejnojmenná jaderná elektrárna se třemi varnými reaktorovými bloky, se skládá z nástěnných kolejí, mostu, mostového vozíku, pracovního teleskopu a kamery a slouží pro přemístění palivových článků umístěných do přepravní kazety z propojovacího bazénu, kam byla přepravní kazeta vytažena šachtou z vykládacího bazénu, do skladovací mříže, odkud bude dále přemístěna dopravníkem pro další manipulaci s použitým jaderným palivem, kdy celý tento postup je patrný z **Obrázek č. 39**. Stínění je v rámci manipulace tohoto zařízení zajištěno dostatečnou výškou vodní hladiny, což je v porovnání s koncepčním návrhem manipulátoru horké komory pro ČR opačný princip, který však představuje nutnost využití sušícího zařízení před samotným zavezením použitého jaderného paliva do úložného obalového souboru. [43]

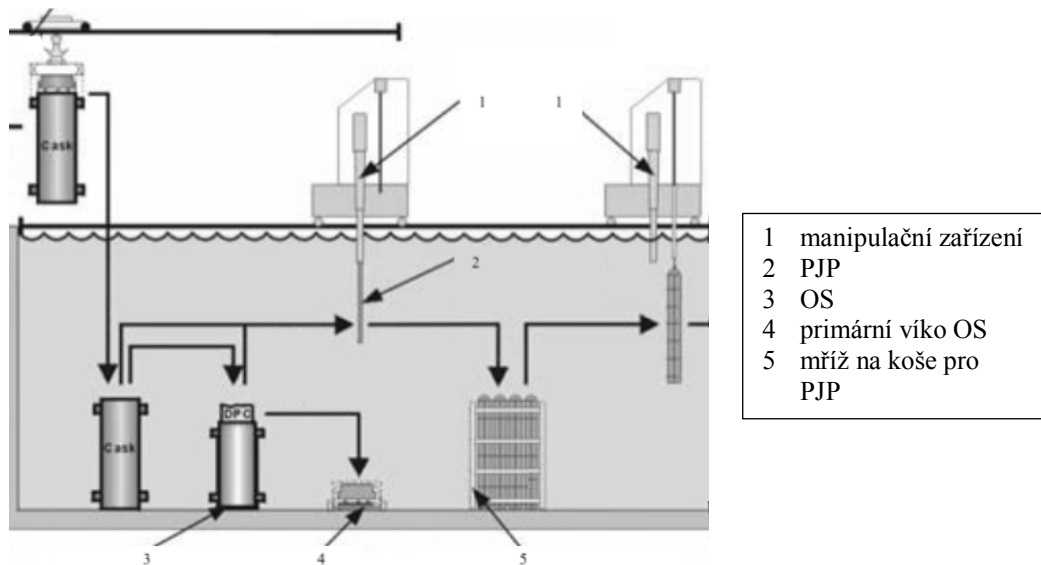


Obrázek č. 39 Manipulační zařízení pro HÚ ve Švédsku [43]

### 8.3 USA

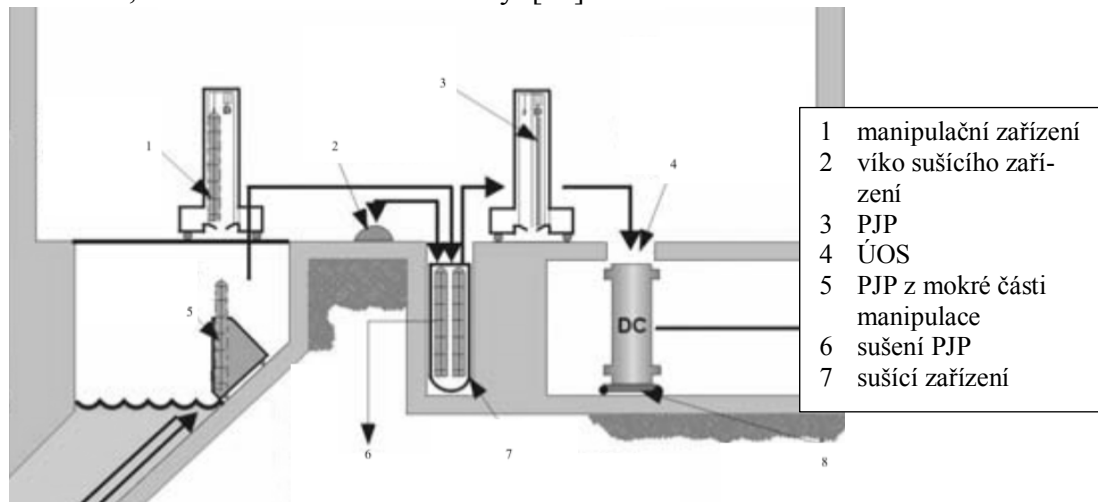
Americké zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem navržené pro plánované hlubinné úložiště v lokalitě Yucca Mountain nacházející se v Nevadské poušti severně od Las Vegas je dvojího provedení v závislosti na tom, zda se jedná o mokrou či suchou část manipulace s použitým jaderným palivem. V mokré části je zařízení přizpůsobeno vyvezení použitého jaderného paliva v podobě palivové kazety/souboru z obalového souboru do košů v mříži pod vodní hladinou a v suché části pokračuje manipulace s použitým jaderným palivem jeho přemístěním do sušicího zařízení a následně zavezením do úložného obalového souboru. [44]

Zařízení pro mokrou část, jehož koncepce je patrná z **Obrázek č. 40**, se skládá z kolejí, mostu, mostového vozíku, pracovního teleskopu, kamery a manipulátoru s koší palivových kazet/souborů. Provedení pracovního teleskopu je zde teleskopické, což je umožněno dostatečně vysokou vodní hladinou, která zajišťuje potřebné stínění a odpadá tak z tohoto pohledu nutnost robustní konstrukce. [44]



**Obrázek č. 40** Mokrá část manipulace s PJP pro HÚ v USA [44]

Zařízení pro suchou část, jehož koncepce je patrná z **Obrázek č. 41**, je opakem zařízení pro mokrou část manipulace s použitým jaderným palivem, jelikož zde je naopak potřeba robustnější konstrukce zajišťující dostatečné stínění, což představuje obdobný požadavek v porovnání s navrženým koncepčním řešením manipulátoru horké komory pro ČR. Skládá se ze stínění, nosné části stínění, zdvihového zřízení a kamery. [44]



**Obrázek č. 41** Suchá část manipulace s PJP pro HÚ v USA [44]

## 9 Kritické vyhodnocení navrženého řešení

Navržené řešení manipulátoru horké komory splňuje veškeré předem definované požadavky z hlediska funkce, které byly vyžadovány pro manipulaci s použitým jaderným palivem a víky obalového souboru a úložného obalového souboru. Z hlediska bezpečnosti jsou jeho prvky důležité pro bezpečnost zálohovány jak z hlediska funkce, tak i z hlediska napájení a v případě poruchy je zařízení vybaveno systémy pro zamezení vzniku nehody. Z hlediska rozměrů se jedná o běžně koncipovaný zavážecí stroj, avšak při porovnání s finským řešením zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem vyžaduje větší prostor kvůli využití dvou mostových vozíků, jež v závislosti na prováděné manipulaci najíždějí nad obalový soubor/úložný obalový soubor. Proto lze od navrženého řešení očekávat vyšší požadavek na šířku horké komory, avšak za cenu vyšší bezpečnosti. Z hlediska radiační bezpečnosti je zde dle výpočtů na rozdíl od finského řešení umožněn vstup pracovníků do horké komory, avšak jen po omezenou dobu za účelem opravy zařízení, kterou by nebylo možné provést na dálku z řídicí místnosti. Nutné je však podotknout, že tento výpočet byl prováděn pouze z hlediska neutronů a ve 2D modelu, který nezohlednil veškerá možná úskalí reálného 3D řešení v podobě absence víka stínění pracovního teleskopu či zcela otevřeného obalového souboru/úložného obalového souboru při prováděné manipulaci. Zavedení stínění přineslo však i nevýhody v podobě znemožnění vizuální kontroly palivové kazety/souboru kamerou během celé manipulace a zvýšení robustnosti zařízení. Tyto nevýhody jsou závislé především na volbě materiálu pro stínění pracovního teleskopu, kdy při změně výběru olovnatého skla za austenitickou ocel dojde k odstranění první z nevýhod, avšak je zapotřebí očekávat zvýšení dávky neutronů na povrchu stínění či tloušťky materiálu stínění.

Pro kritické vyhodnocení je kromě konstrukčních a bezpečnostních měřítek důležitá i finanční stránka zařízení. V současné fázi návrhu manipulátoru horké komory, nelze s přiměřenou přesností určit odpovídající cenu. Jelikož je však manipulátor horké komory navržen z pro tyto účely běžně využívaných zařízení a principů, měla by tomu odpovídat i jeho výrobní cena.

Na základě popsaných hledisek lze učinit kritické vyhodnocení hledisek, kde pouze funkce lze označit za zcela vyhovující. Ostatní hlediska jsou z uvedených důvodů spíše jen vyhovující či přijatelné.

## 10 Závěr

Práce byla věnována manipulaci s použitým jaderným palivem na reaktorech typu PWR. První část práce zkoumala manipulaci zadní části palivového cyklu od vyvezení použitého jaderného paliva z reaktoru až po jeho uložení do úložného obalového souboru a shrnula tak současné konstrukční provedení obalových souborů a úložných obalových souborů. Druhá část práce se zabývala samotným návrhem zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem pro projekt hlubinného úložiště v ČR zahrnující výpočet stínění vybrané konstrukční části. Následně byl tento návrh porovnán s obdobnými zařízeními v jiných zemích a kriticky vyhodnocen.

V rámci první části byla popsána problematika manipulace s použitým jaderným palivem včetně konstrukčních provedení obalových a úložných obalových souborů. Pro samotný návrh manipulačního zařízení je podstatný především obalový soubor typu Castor a typu Škoda, které byly využívány pro uložení použitého jaderného paliva na českých jaderných elektrárnách a je s nimi tak počítáno při manipulaci v rámci projektovaného hlubinného úložiště v ČR. Pro tento projekt bylo původně uvažováno využití úložného obalového souboru typu 7PK VVER440 a 3PK VVER1000, ale v současnosti se počítá již s novějším typem ŠKODA, jenž v případě popsaných variant přináší velkou výhodu v podobě stejného vnějšího průměru, jenž by umožňoval použití shodných technologií v rámci jejich manipulace a následného uložení do vrtu hlubinného úložiště.

V druhé části byl proveden návrh manipulačního zařízení, jenž je určen pro manipulaci s použitým jaderným palivem v horké komoře hlubinného úložiště a skládá se ze základních konstrukčních částí v podobě nástěnných kolejí, mostu a dvou mostových vozíků s pracovním teleskopem pro manipulaci s palivovými kazetami/soubory a manipulátorem pro manipulaci s víky a kamery. Významnou částí návrhu byl výpočet stínění vybrané konstrukční části, jež si kladla za cíl umožnit vstup pracovníků pro potřeby servisu zařízení. Tato možnost byla výpočtem potvrzena, avšak za potřeby vývoje dalších konstrukčních prvků, jenž při 2D výpočtu nebyly zohledněny a mezi něž lze zařadit víko pracovního teleskopu či překrytí otevřeného obalového souboru.

Provedený koncepční návrh manipulačního zařízení pro manipulaci s použitým jaderným palivem je zatím pouhým nástinem, jenž bude vyžadovat řadu dalšího zkoumání, než se dospěje ke konečné verzi, kterou by bylo pro účel projektu hlubinného úložiště v ČR využít.

## Seznam použité literatury

- [1] „Koncepte nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/nakladani-s-radioaktivnimi-odpady/aktualizace-koncepce-nakladani-s-radioaktivnimi-odpady-a-vyhorelym-jadernym-palivem-v-cr--251133>.
- [2] „Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263>.
- [3] „Vyhláška SÚJB č. 377/2016 Sb., Vyhláška o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-377>.
- [4] J. Bečvář a kolektiv, Jaderné elektrárny, Praha: ALFA - vydavatelství technické a ekonomické literatury, 1981.
- [5] J. Zdebor, „Primární okruh jaderné elektrárny - palivové články,“ Plzeň, 2020.
- [6] F. Hezoučský a S. Štech, Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [7] J. Raček, Jaderné elektrárny, Brno: Novpress, 2013.
- [8] Y. Pandey a A. Chauhan, „Fuel Management of VVER-1000,“ [Online]. Available: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/079/39079710.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/079/39079710.pdf).
- [9] K. Bílá, „Teorie jaderného reaktoru - jaderné palivo a palivový cyklus,“ Plzeň, 2020.
- [10] J. Hejduk, „Pomocné systémy PO - Systém TG“.
- [11] J. Zdebor, „Primární okruh jaderné elektrárny - odstavení reaktoru na výměnu paliva,“ Plzeň, 2020.
- [12] „Národní zpráva pro účely Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady,“ září 2005. [Online]. Available: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni\\_zpravy/NZ\\_VP\\_RAO\\_2\\_3\\_CZ.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/NZ_VP_RAO_2_3_CZ.pdf).
- [13] IAEA, „Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/Containers,“ leden 2007. [Online]. Available: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1532\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1532_web.pdf).
- [14] V. Fajman, L. Barták, J. Coufal a K. Brzobohatý, „Czech interim spent fuel storage facility,“ [Online]. Available: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/040/30040070.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/040/30040070.pdf).
- [15] ČEZ, „Mezisklady,“ [Online]. Available: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/mezisklady\\_4.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/mezisklady_4.html).
- [16] F. Fiedler, J. Oubram, J. Eros, M. Vozár, J. Hamšík, I. Prachař, J. Blažek a P. Kotnour, „Interní zdroje společnosti SÚRAO“.
- [17] F. Kepák, „Nakládání s odpady,“ [Online]. Available: <https://www.odpady-online.cz/plynne-odpady-v-palivovem-cyklu-jadernych-elektren/>.
- [18] SÚJB, „Interní zdroje společnosti ŠKODA JS a.s.,“ Plzeň, 2019.
- [19] J. Zdebor, „Primární okruh jaderné elektrárny - transport a ukládání jaderného paliva,“ Plzeň, 2020.

- [20] SÚJB, „Rozhodnutí o typovém schválení obalového souboru Castor 440/84,“ Praha, 2002.
- [21] „Národní zpráva pro účely Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady,“ 2011. [Online]. Available: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/NZ\\_VP\\_RAO\\_4\\_0.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/NZ_VP_RAO_4_0.pdf).
- [22] Transnuclear, Inc., „TN Casks,“ [Online]. Available: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/040/30040089.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/040/30040089.pdf).
- [23] Transnuclear, Inc., „TN-32 dry storage cask system,“ [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML0036/ML003696918.pdf>.
- [24] D. Richmond a K. Geelhood, „FRAPCON analysis of cladding performance during dry storage operations,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573317307477#fig1>.
- [25] „CONSTOR,“ [Online]. Available: <https://www.gns.de/language=en/23336/constor>.
- [26] GNB mbH, „Dry Spent Fuel Storage Facility at Kozloduy Nuclear Power Plant,“ 2004. [Online]. Available: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/35/085/35085626.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/35/085/35085626.pdf).
- [27] Holtec International, „HI-STORM,“ [Online]. Available: <https://holtecinternational.com/products-and-services/nuclear-fuel-and-waste-management/dry-cask-and-storage-transport/hi-storm/>.
- [28] Holtec International, „Final Safety Analysis Report for the HI-STORM 100 Cask System,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1613/ML16138A100.pdf>.
- [29] Transnuclear, Inc., „Adapting the NUHOMOS Interim Storage System for International Spent Fuel Storage Needs,“ [Online]. Available: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/34/079/34079922.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/079/34079922.pdf).
- [30] I. Pospíšková, A. Vokál a L. Vondrovic, „STŘEDNĚDOBÝ PLÁN VÝZKUMU A VÝVOJE PRO POTŘEBY UMÍSTĚNÍ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ VČR 2015 -2025,“ Praha, 2015.
- [31] P. Kotnour, „Interní zdroje společnosti ŠKODA JS“.
- [32] I. Pospíšková, A. Vokál, F. Fiedler, I. Prachař a P. Kotnour, „Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě,“ 2012. [Online]. Available: [http://www.jodn.cz/files/2016/Aktualizace\\_projektu\\_HUJO.pdf](http://www.jodn.cz/files/2016/Aktualizace_projektu_HUJO.pdf).
- [33] Andra, „Architecture and management of a geological repository,“ 2005. [Online]. Available: <https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/8-%20Dossier%202005%20Granite%20Tome%20-%20Architecture%20and%20management%20of%20a%20geological%20repository.pdf>.
- [34] E. Hardin, „Generic Disposal Concepts and Multi-Purpose Canister Strategies for Spent Nuclear Fuel,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1242728>.
- [35] M. Borovička a D. Burket, „Reaktorová fyzika pro operátory,“ 1999.
- [36] NWMO, „Radiation Risk and Safety,“ [Online]. Available: <https://www.nwmo.ca/en/Canadas-Plan/Canadas-Used-Nuclear-Fuel/Radiation-Risk-and-Safety>.
- [37] „Jaderná a radiační fyzika - ionizační záření,“ [Online]. Available: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>.
- [38] N. A. B. Museum, „Mechanism of Radiation,“ 2009. [Online]. Available: <https://nagasakipeace.jp/english/kids/kaisetsu/hoshasen.html>.



- [39] „Serpent,“ 2021. [Online]. Available: <http://montecarlo.vtt.fi>.
- [40] V. Krýsl, P. Mikoláš, D. Sprinzl a J. Švarný, „Interní zdroje společnosti ŠKODA JS a.s.“.
- [41] „Zpráva o jaderném odpadu ve světě 2019,“ 2019. [Online]. Available: [https://worldnuclearwastereport.org/wp-content/themes/wnwr\\_theme/content/WNWR\\_2019\\_CZ\\_summary.pdf](https://worldnuclearwastereport.org/wp-content/themes/wnwr_theme/content/WNWR_2019_CZ_summary.pdf).
- [42] M. Suikki, „Fuel Handling and Auxiliary Systems for a Fuel Handling Cell,“ Optimik Oy, 2013.
- [43] S. K. AB, „Teknisk beskrivning – mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle,“ 2010.
- [44] U. D. o. Energy, „Yucca Mountain Science and Engineering Report,“ 2002.