

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba výrobních strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh vnitřní vestavby (koše) kontejneru pro palivo reaktoru typu VVER 1000

Autor: **Bc. Michal Gregor**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Formánek Josef Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Upozornění

Využití a společenské uplatnění diplomové práce včetně uváděných vědeckých a výrobně technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě autorské smlouvy a souhlasu fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Doc. Ing. Josefu Formánkovi Ph.D., konzultantovi Ing. Josefu Mišterovi, oponentovi Ing. Janu Šikovi a dalším, kteří se podíleli na vzniku této práce za poskytnuté informace, materiály a konzultace důležité pro vypracování této diplomové práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu.

Michal Gregor

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Gregor	Jméno Michal	
STUDIJNÍ OBOR	2302T019 „Stavba výrobních strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Formánek Ph.D.	Jméno Josef	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh vnitřní vestavby (koše) kontejneru pro palivo reaktoru typu VVER 1000		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	55	TEXTOVÁ ČÁST	48	GRAFICKÁ ČÁST	7
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Tato práce se zabývá návrhem uložení vyhořelého jaderného paliva. Zhodnocením současného stavu. Navržením variant vnitřní vestavby a popisem vlastností.
KLÍČOVÁ SLOVA	Kontejner, koš, vyhořelé jaderné palivo

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Gregor	Name Michal	
FIELD OF STUDY	2302T019 “Design of Manufacturing Machines and Equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Formánek Ph.D.	Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Designing of internal cluster (basket) for spent nuclear fuel cask of reactor VVER 1000		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	55	TEXT PART	48	GRAPHICAL PART	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This work deals with designing of storage of spent nuclear fuel. It deals with evaluation of the current state. There will be designed versions of basket and described properties.
KEY WORDS	Cask, basket, spent nuclear fuel

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Michal GREGOR
Osobní číslo: S12N0038P
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba výrobních strojů a zařízení
Název tématu: Návrh vnitřní vestavby (koše) kontejneru pro palivo reaktoru typu VVER 1000
Zadávací katedra: Katedra konstruování strojů

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Konstrukční návrh vnitřní vestavby (koše) pro kontejner na ukládání vyhořelého jaderného paliva nové generace z reaktoru typu VVER 1000. Posouzení stávajících používaných konstrukčních řešení a návržení alternativního způsobu uložení vyhořelého paliva. Výběr optimální varianty s ohledem na max. kapacitu uložených palivových souborů, technologickou náročnost a jednoduchost konstrukčního provedení koše. Navržené řešení ověřit výpočtem.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše dané problematiky
2. Technická zpráva
3. Technická dokumentace
4. Výkresová dokumentace
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 50-70 stran A4
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

ŘAŠA, J., SVERCL, J. *Strojnické tabulky*. Scientia, Praha, 2004

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojího inženýra*. Brno: Computer Press, 1999

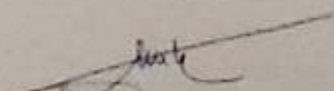
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů


Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Mištera**
ŠKODA JS a.s., Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **23. září 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Maas, CSc.
děkan




Doc. Ing. Václav Fajst
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

Obsah:

1. Úvod	7
2. Jaderná reakce	8
2.1 Druhy záření	9
2.2 Druhy jaderných reakcí	10
2.3 Tok neutronů	10
2.4 Palivová kazeta	10
3. Skladování vyhořelého jaderného paliva	11
3.1. Mokrý skladování	11
3.2. Suchý skladování	12
3.3. Hlubinná uložení	13
3.3.1. Zákonná ustanovení	14
3.4. Druhy kontejnerů	15
4. Patentová a legislativní rešerše	16
4.1. Patentová rešerše	16
4.1.1. Patenty Škody JS a.s.	16
4.1.1.1. CZ 22915	16
4.1.1.2. CZ 5731	18
4.1.2. Ostatní patenty	19
4.1.2.1. Societe pour les transports	19
4.1.2.2. TOSHIBA CORP JP2008292251	21
4.1.2.3. VI Safonov	22
4.1.3. Závěr patentové rešerše	23
4.2. Legislativní rešerše	24
4.2.1. Zkoušky nehod při přepravě	24
5. Konstrukční řešení koše	26
5.1. Současný stav	26
5.2. Rozložení palivových souborů	28
5.3. Varianta 1	29
5.4. Varianta 2	31
5.4.1. Detaily konstrukčního provedení	33
5.5. Engineering design science	36
6. Kontrolní výpočtové hodnocení	39
6.1. Modální analýza	39
6.2. Tepelné výpočty	41
6.2.1. Vlastnosti materiálů	41
6.2.2. Tepelné zatížení koše	44
6.2.3. Výpočtový model	44
6.2.4. Stacionární výpočet	45
6.2.5. Nestacionární výpočet	49
6.2.6. Závěr z tepelných výpočtů	50
6.3. Možnosti neutronového stínění	50
7. Technicko ekonomické hodnocení	52
8. Závěr	53

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Rozdíl aktivity čerstvého a použitého paliva [120].....	9
Obrázek 2 Vyhořelé jaderné palivo uložené v Sellafieldu[108].....	11
Obrázek 3 Mezisklad vyhořelého jaderného paliva Dukovany [109]	12
Obrázek 4 Koncept hlubinného uložení v ČR [107]	14
Obrázek 5 Schema kontejneru CASTOR V/19 na VJP [110]	15
Obrázek 6 Profil koše [100]	17
Obrázek 7 Půdorysný pohled na řez košem [100]	17
Obrázek 8 Profil koše [100]	18
Obrázek 9 Profil koše [115]	19
Obrázek 10 Detail tvarovek [115].....	19
Obrázek 11 Tvar koše [115]	20
Obrázek 12 Znárodnění patentu [116]	21
Obrázek 13 Rozložení palivových kazet [117].....	22
Obrázek 14 Castor 440/84-M [119].....	26
Obrázek 15 Navržený profil koše (vlevo).....	28
Obrázek 16 Varianta tvaru kontejneru (vpravo)	28
Obrázek 17 Zařízení pro spékání prášků [100].....	30
Obrázek 18 Hexagonový profil tyče	30
Obrázek 19 Koš složený z profilů varianty 1	30
Obrázek 20 Koš složený z profilů varianty 2 v místě spoje	31
Obrázek 21 Řez spojem profilů	32
Obrázek 22 Šroubový spoj.....	33
Obrázek 23 Řez spojem	33
Obrázek 24 Okrajový profil	34
Obrázek 25 Navaděče palivových souborů.....	34
Obrázek 26 Dno vnitřní vestavby	35
Obrázek 27 Černá skříňka.....	36
Obrázek 28 Základní technologická funkce	36
Obrázek 29 Diagram hodnocení vlastností TS	37
Obrázek 30 Diagram hodnocení jednotlivých výrobků	38
Obrázek 31 Tvar vlastní frekvence při 45,36 Hz	40
Obrázek 32 Tvar vlastní frekvence při 297,4 Hz	40
Obrázek 33 Tvar vlastní frekvence při 376,4 Hz	40
Obrázek 34 Náhradní součinitel tepelné vodivosti palivového souboru	41
Obrázek 35 Tvar žebra kontejneru.....	43
Obrázek 36 Průběh součinitele přestupu tepla žebrovaného povrchu v závislosti na teplotě povrchu obalového souboru	43
Obrázek 37 Model obalového souboru s vnitřní vestavbou.....	44
Obrázek 38 Síť a výpočtový model	45
Obrázek 39 Teplotní výpočet při zatížení 17 kW a okolní teplotě 25°C, maximální teplota pokrytí je 180°C.....	46
Obrázek 40 Teplotní výpočet při zatížení 19 kW, okolní teplotou 38°C, maximální teplota pokrytí je 216,1°C.....	47
Obrázek 41 Teplotní výpočet při zatížení 22 kW a teplotě okolí 38°C, nejvyšší teplota pokrytí palivového souboru je 233,5°C	48
Obrázek 42 Průběh teplot 0-1 hod	49
Obrázek 43 Průběh teplot 0-12 hod	49
Obrázek 44 Neutronové stínění uvnitř kontejneru.....	50

Seznam tabulek a grafů:

Tabulka 1 Parametry reaktorů používaných v ČR [101]	8
Tabulka 2 Vlastní frekvence	39
Graf 1 Náklady variant	52

Seznam použitých zkratk a symbolů:

JS Jaderné strojírenství

PWR **P**ressurized light-**W**ater cooled and moderated **R**eactor

VVER **V**odo-**V**odjanyj**E**nergetičeskij **R**eaktor

ČR Česká Republika

OMZ Uralmash-Izhora Group

VJP vyhořelé jaderné palivo

CASTOR **C**ask for **s**torage and **t**ransport **o**f radioactive material

JE jaderná elektrárna

IAEA Mezinárodní agentura pro atomovou energii

EDS Engineering design science

1. Úvod



Kontejnery pro palivo z jaderných reaktorů se používají při transportování a ukládání nových, nebo použitých palivových tyčí. Problematika nakládání s palivem je komplikovaná tím, že jaderné elektrárny, narozdíl od uhelných, využívají pro svůj provoz surovinu, která se po použití, narozdíl od koksového uhlí, stane nebezpečnou pro své okolí a tím klade zvýšené nároky na další uchování a transport, které definují požadavky pro obalový soubor. Kontejnery jsou schránkou pro jaderné palivo, které zabraňují úniku nebezpečných vlivů do okolí, kterými by jej mohlo palivo ovlivnit. Dále chrání samotné palivo před vlivy zvenčí a udržují stav, kdy jsou veškeré procesy pod řízenou kontrolou. Pro kontejnery jsou uvažovány různé stavy havárií a poškození, při kterých nesmí být narušena jeho funkčnost ani ochrana.

Tato práce se zaměří na konstrukci vnitřní vestavby kontejneru. Touto problematikou se zabývá jedno z konstrukčních oddělení ve společnosti Škoda JS a.s., kde byla tato práce konzultovaná. Škoda JS a.s. byla založena v roce 1956. V současnosti je vlastněna ruskou skupinou OMZ, která ji zakoupila v roce 2004. Vývoj a výroba košů má ve společnosti dlouhou historii. Byly zde navrženy a jsou vyráběny koše pro použité jaderné palivo z reaktorů typu VVER 440 a VVER 1000. V současnosti probíhá vývoj koše pro ruské palivo, kterým bylo nahrazeno palivo americké, v elektrárně Temelín. Palivo TVEL bylo nasezeno v červnu roku 2011.

2. Jaderná reakce

Jaderný reaktor je zařízení, v němž se energie uvolněná při jaderném štěpení přeměňuje na energii tepelnou, která se pak v klasické elektrárenské části využívá k výrobě elektrické energie. Palivem je obohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 , moderátorem i chladivem obyčejná voda. Přírodní uran je složen ze dvou izotopů s nukleonovými čísly 238 a 235. Pro štěpení je vhodný jen izotop 235, kterého je v přírodním uranu pouze 0,7 % a proto se musí jaderné palivo tímto izotopem uměle obohacovat. V jaderném reaktoru dochází k řízené štěpné reakci v palivu - jádra izotopu ${}_{92}U^{235}$ zasažená pomalými neutrony se rozpadají na jádra lehčích prvků (odštěpky, fragmenty) a současně se při každém štěpení uvolní 2 - 3 rychlé neutrony. Fragmenty se vzájemně odpuzují a velkou rychlostí se od sebe rozlétají. Při jejich zabrzdění srážkami s ostatními atomy paliva se kinetická energie mění na teplo, materiál se silně zahřívá. Uvolněné neutrony mohou způsobit štěpení dalších uranových jader a jaderná reakce může dále probíhat jako řízená řetězová reakce. [101]

V České republice jsou používány lehkovodní tlakové reaktory, pro jejichž označení se používá anglická zkratka PWR, nebo ruská zkratka VVER. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 1. [101]

	JE Dukovany	JE Temelín
typ reaktoru	VVER 440	VVER 1000
tepelný výkon	1375 MW	3000 MW
průměr tlak. nádoby	3,56 m	4,5 m
výška tlak. nádoby	11,8 m	10,9 m
palivové kazety	312 ks	163 ks
hmotnost paliva	42 t	92 t
moderátor a chladivo	obyčejná (lehká) voda	obyčejná (lehká) voda
tlak v reaktoru	12,25 MPa	15,7 MPa
teplota chladiva	267 °C - 297 °C	290 °C - 320 °C
		

Tabulka 1 Parametry reaktorů používaných v ČR [101]

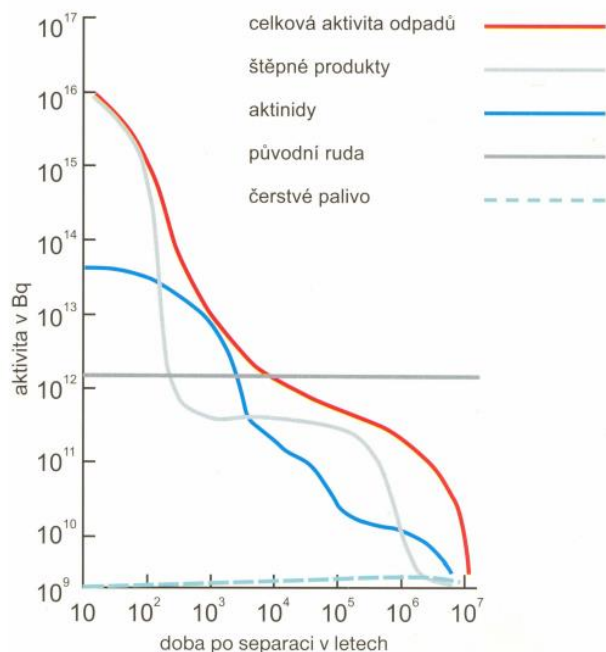
Jádra některých nuklidů jsou nestabilní a bez vnějšího zásahu se samovolně přeměňují za současného vysílání ionizujícího (radioaktivního) záření. Tomuto jevu říkáme radioaktivita.

Přeměny jader mohou probíhat také u stabilních nuklidů, je k tomu však nutný vhodný vnější zásah. Přeměny jader vyvolané vzájemným působením (srážkami) s jinými jádry nebo částicemi nazýváme jaderné reakce, při nichž mohou vzniknout jádra úplně jiných prvků. Vhodnými jadernými reakcemi se například vyrábějí umělé radionuklidy pro využití v průmyslu nebo v medicíně. [101]

2.1 Druhy záření

- Záření alfa
Vydáváno většinou přírodně radioaktivních izotopů, silně ionizuje prostředí, dá se lehce odstínit případně pohlit např. papírem.
- Záření beta
Jedná se o proud elektronů, případně pozitronů, které lze pohlit např. hliníkovou deskou.
- Záření gama
Je silným elektromagnetickým zářením, které vzniká, když jádro ztratí část své energie. Odstínit lze jen silnou vrstvou betonu nebo kovu (nejlépe olova). [101]

Na obrázku 1 je znázorněn průběh záření u jaderného paliva umístěného v kontejneru. V příloze č. 1 je uveden přepočít mezi jednotkami, které se používají pro vyjádření dávek záření a porovnání množství ionizujícího záření, se kterými se lidé běžně setkávají.



Obrázek 1 Rozdíl aktivity čerstvého a použitého paliva [120]

2.2 Druhy jaderných reakcí

- Transmutace - Ostřelováním jádra prvku jiným prvkem vznikne třetí prvek a zbylé protony ${}_7\text{N}^{14} + {}_2\text{He}^4 \ggg {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{p}^1$
- Štěpení jader - U jaderné reakce je původní jádro uranu štěpeno pomalými neutrony, při kterém vznikají dvě jádra s přibližně stejnými protonovými čísly ${}_{92}\text{U}^{235} + {}_0\text{n}^1 \ggg {}_{56}\text{Ba}^{144} + {}_{36}\text{Kr}^{89} + 3 {}_0\text{n}^1$
- Syntéza - Za vysoké energie dochází k vytvoření jednoho jádra s větším protonovým číslem, než mají dvě jádra, která jej vytvořily ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^2 \ggg {}_2\text{He}^3$ [104]

2.3 Tok neutronů

Nejčastěji se využívá pro řízenou štěpnou reakci izotop uranu U^{235} . Štěpení jádra probíhá pomocí jednoho tzv. pomalého neutronu, který je tímto jádrem absorbován. Jádro uranu U^{235} tedy zvýší počet nukleonů na 236 a vznikne izotop uranu U^{236} . Tento izotop je vysoce nestabilní a je velmi vysoká pravděpodobnost (cca 88 %), že se ihned rozpadne na dvě jádra těžkých prvků (v opačném případě je pouze vyzářeno z jádra γ záření). Nejčastěji to bývá dvojice prvků Ba^{144} a Kr^{89} nebo Sr^{101} a Xe^{133} . Dále se uvolní určitý počet neutronů podle toho, kolik nukleonů právě vzniklé prvky dohromady obsahují. Tyto jádra mají v okamžiku vzniku vysokou kinetickou energii rovnající se přibližně energii 166 MeV. Nárazy jader do krystalické mřížky okolních prvků se snižuje jejich kinetická energie ve prospěch zahřívání okolní hmoty. [111]

Podkritický stav nastane, když počet štěpných reakcí způsobené neutrony uvolněné při štěpení v první generaci je menší než počet štěpných reakcí v první generaci. To může být způsobeno úbytkem jader U^{235} - spotřeba paliva, neutrony opouští aktivní zónu a zbylé neutrony nejsou schopny zajistit konstantní štěpný výkon, neutrony jsou absorbovány okolními látkami (příměsi v palivu) či moderátorem. Postupně může dojít k ukončení řetězové štěpené reakci v daném objemu paliva. [111]

2.4 Palivová kazeta

Palivo vzniká z oxidu uraničitího UO_2 , který se lisuje do malých pelet (o hmotnosti asi 5 g). Pelety se vkládají do hermeticky uzavřených trubek ze zirkonové slitiny o tloušťce 0,4 mm a vytvářejí palivové proutky. Svazek palivových proutků tvoří palivovou kazetu (palivový soubor, palivový článek), každá kazeta je sestavena z 312 palivových proutků. Každý proutek obsahuje asi 370 pelet. [104]

Po využití daného potenciálu, který jsme schopni dnešními technologiemi v jaderných elektrárnách třetí generace získat, se použité jaderné palivo, dnes hovorově nazývané jako vyhořelé jaderné palivo (VJP), vyjme z reaktoru a dále se s ním nakládá podle předpisů pro skladování radioaktivního odpadu. Většina energie v něm obsažená se skladuje pro další generace, které nás technicky předčí.

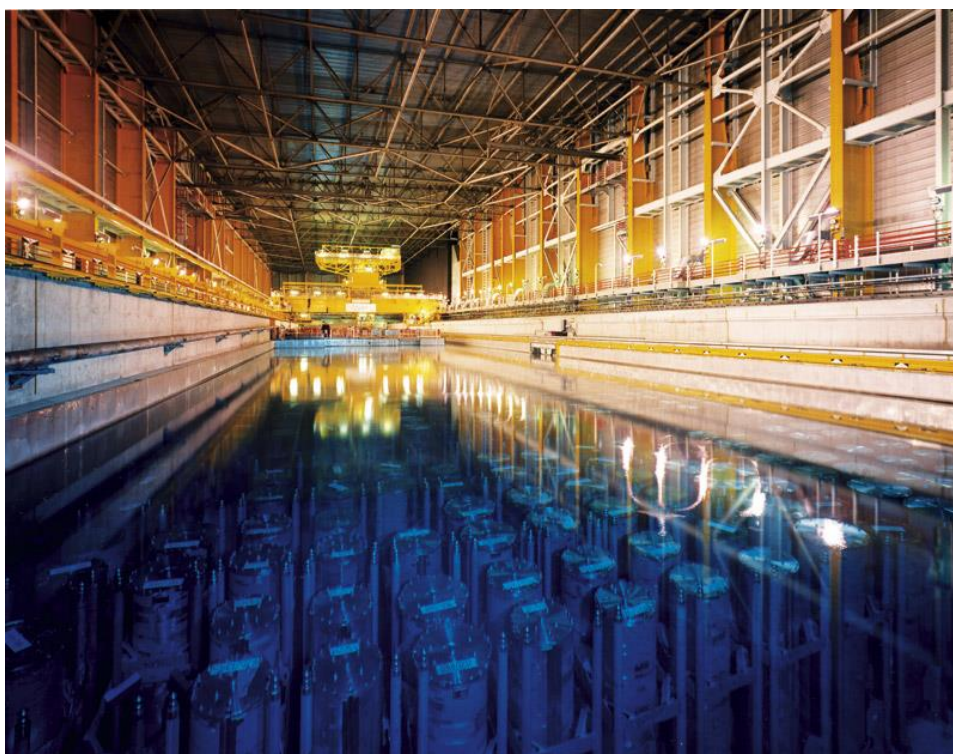
3. Skladování vyhořelého jaderného paliva

Nevypělost dnešních technologií, kdy je přepracování vyhořelého jaderného paliva velice energeticky náročné a tím se jeví jako neekonomické, nás nutí řešit tento problém jiným způsobem. Skladování vyhořelého jaderného paliva je formou čekání na období, kdy budeme schopni využít jeho zbylý potenciál, případně slouží k jeho trvalému uložení, za splnění požadavku trvalé ochrany společnosti a prostředí před jeho nepříznivými vlivy.

Problematiku skladování lze tedy rozdělit na období, kdy je palivo vyjmuté z reaktoru a určitý čas, podle druhu paliva, se skladuje v bazénu poblíž reaktoru. Řádově se jedná o roky, kdy ztratí největší část tepla. Poté je s palivem dále manipulováno. Záleží na konkrétním přístupu, zda se VJP uloží do tzv. mokrého nebo suchého meziskladu vyhořelého jaderného paliva, nebo je rovnou umístěno do hlubinného uložení vysoce radioaktivního odpadu.

3.1. Mokré skladování

Tento způsob skladování je dnes ve světě nejrozšířenější. Vyhořelé palivo se skladuje ve vodních bazénech buď přímo u reaktoru, nebo mimo něj. Voda zajišťuje spolehlivý odvod tepla, zajišťuje i ochranu před zářením. Vizuální kontrola vyhořelého paliva je snadná. Nevýhodou je nutnost stálého chlazení a čištění vody, přičemž vznikají kapalné radioaktivní odpady. Provozní náklady jsou vyšší než u suché metody skladování. Přímou u reaktorů je to častý způsob, mimo reaktor existují mokré sklady ve Švédsku (CLAB), ve Francii v přepracovacím závodě La Hague a ve Velké Británii v přepracovacím závodě v Sellafieldu. [105]



Obrázek 2 Vyhořelé jaderné palivo uložené v Sellafieldu[108]

Při skladování je VJP v palivových souborech umístěno do speciálních pouzder, která jsou uložena v bazénech zaplněných vodou. Voda a silné stěny bazénu bezpečně chrání zaměstnance před nebezpečným radioaktivním zářením. Navíc slouží i jako chladicí

médium odvádějící zbytkové teplo jaderného opadu. Teplo se z bazénu odvádí za pomoci chladících okruhů. Voda z chladících okruhů je odváděna do výměníku, který je chlazen vnějším okruhem. Aby nedošlo při poruše chladícího okruhu k úniku radioaktivity do vnějšího okruhu, musí být ve vnějším okruhu větší tlak. Velkou nevýhodou mokrého skladování je větší energetická náročnost a vznik dalších radioaktivních odpadů (chladící médium). [106]

3.2. Suché skladování

Tento způsob se preferuje při delších intervalech skladování. Bývá řešeno dvojitým způsobem: palivo je umístěno do betonových staveb (sklípků), nebo do betonových či kovových kontejnerů. Příkladem prvního přístupu jsou modulové boxy vyhořelé palivo je umístěno v trubkách naplněných inertním plynem. Trubky jsou vertikálně umístěny v hnízdech v betonové stavbě s cirkulujícím vzduchem. Takové řešení je použito v USA u reaktoru Fort Saint Vrain nebo v Anglii na elektrárně Wylfa. Další možností jsou betonová síla. Vyhořelé palivo je v zapouzdřených ocelových koších uloženo do betonových nádob. Chladicí vzduch proudí ve speciálních kanálech. Tento systém je v USA na elektrárně Oconee nebo v Kanadě na elektrárně Gentilly. [105]



Obrázek 3 Mezisklad vyhořelého jaderného paliva Dukovany [109]

Suchý způsob skladování v kovových kontejnerech je poměrně nový a stále více používaný po celém světě. Při suchém skladování VJP jsou v podstatě palivové soubory uloženy do speciálních kontejnerů umístěných ve zvláštních budovách nebo na volném prostranství. Teplo jaderného odpadu se odvádí přirozenou cirkulací vzduchu. Kontejnery jsou vyrobeny z různých materiálů (slitin, betonu, oceli), které zamezují úniku radioaktivity

do životního prostředí. Suché skladování má řadu výhod. Provoz meziskladu oproti mokrému skladování je podstatně levnější a spolehlivější díky chlazení přirozenou cestou. [106]

3.3. Hlubinná uložení

Slouží k trvalému uložení radioaktivních odpadů včetně VJP. Možnost vyvinutí ekonomicky přijatelné metody přepracování VJP neodstraní potřebu vybudování hlubinného uložení, jelikož přepracováním dojde pouze ke snížení množství paliva k uložení, případně míry jeho rizikovosti. V každém případě však bude nutné řešit otázku trvalého uložení radioaktivních odpadů i v České republice.

Toto hlubinné uložení pro vysokoaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo se bude skládat ze tří částí: [107]

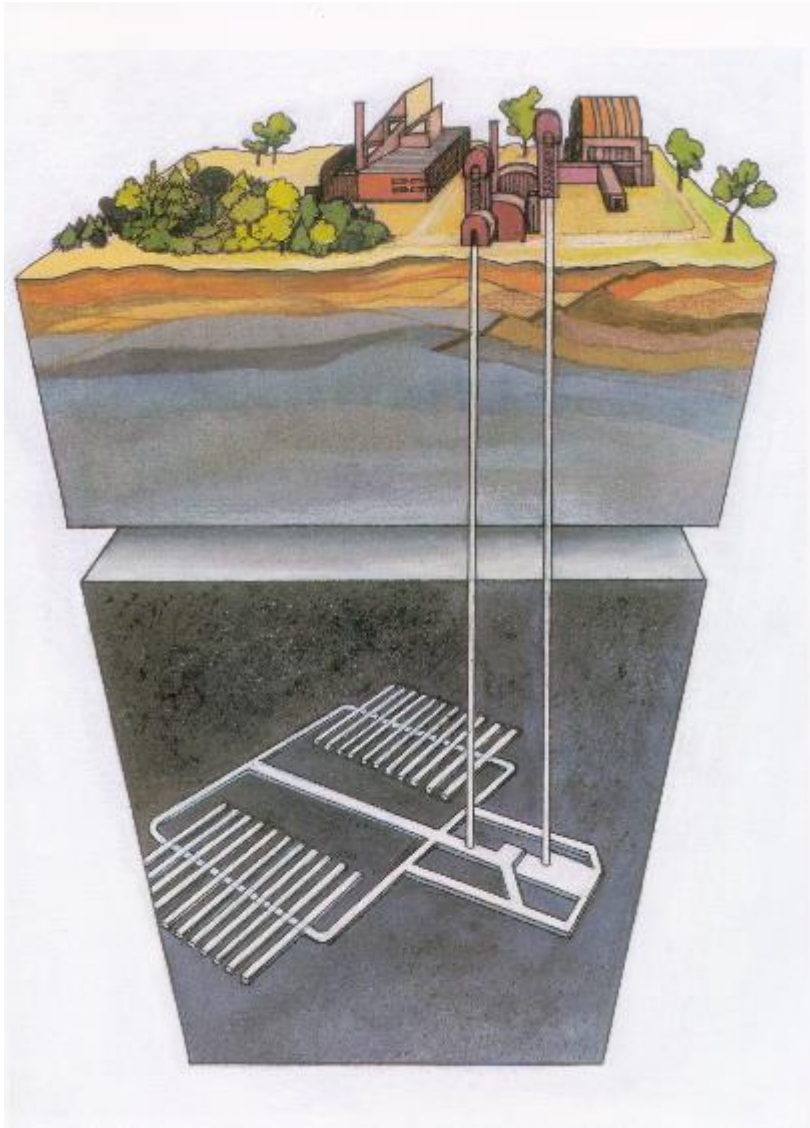
- podzemních prostorů pro ukládání a manipulaci s kontejnery s vyhořelým palivem a vysokoaktivními odpady
- přístupových šachet a tunelů
- nadzemního - povrchového areálu

Ukládací komory budou vybudovány v hloubce zhruba 500 m (dle charakteristiky horninového podloží) ve stabilní geologické formaci a odpad bude umístěn ve speciálních kontejnerech s dlouhodobou životností. Podzemní chodby se mohou podle množství ukládaného odpadu rozprostírat na ploše několika km² v závislosti na koncepci řešení uložení (např. jednopatrové nebo vícepatrové, horizontální či vertikální ukládání kontejnerů). Podzemní prostory a v nich probíhající ukládací činnost však nikterak neovlivní ani neomezí dění na povrchu. [107]

Ukládací prostory budou s povrchovým areálem propojeny svislými přístupovými šachtami a tunelem ve tvaru šroubovice. Nadzemní areál uložení bude zajišťovat nezbytné technické zázemí a jeho rozloha může být jen několik hektarů. Bude zahrnovat provozy a zařízení zabezpečující dodávky elektřiny, větrání uložení, dílny pro servis důlních zařízení, správní budovy, sociální zázemí, sklady a také informační středisko. Způsob výstavby celého uložení musí zohledňovat jak hlediska ochrany přírody a krajiny v dané lokalitě, tak oprávněné požadavky obcí. [107]

Pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti hlubinného uložení je klíčová role ukládacího kontejneru. Musí vyhovět řadě požadavků, mj. na dlouhodobou těsnost, odolnost vůči chemickému prostředí v uložení či na odolnost vůči okolnímu tlaku. [107]

Celkové náklady na přípravu hlubinného uložení včetně jeho výstavby byly v tzv. referenčním projektu vyčísleny na 47 mld. Kč v cenách z roku 1999. V roce 2009 bylo na jaderném účtu uloženo cca 13 miliard korun a každý rok přibývá částka kolem 1,4 mld. korun. [107]



Obrázek 4 Koncept hlubinného uložení v ČR [107]

3.3.1. Zákonná ustanovení

Při skladování VJP je potřeba dodržet zákonná ustanovení uvedená v atomovém zákoně, a to hlavně:

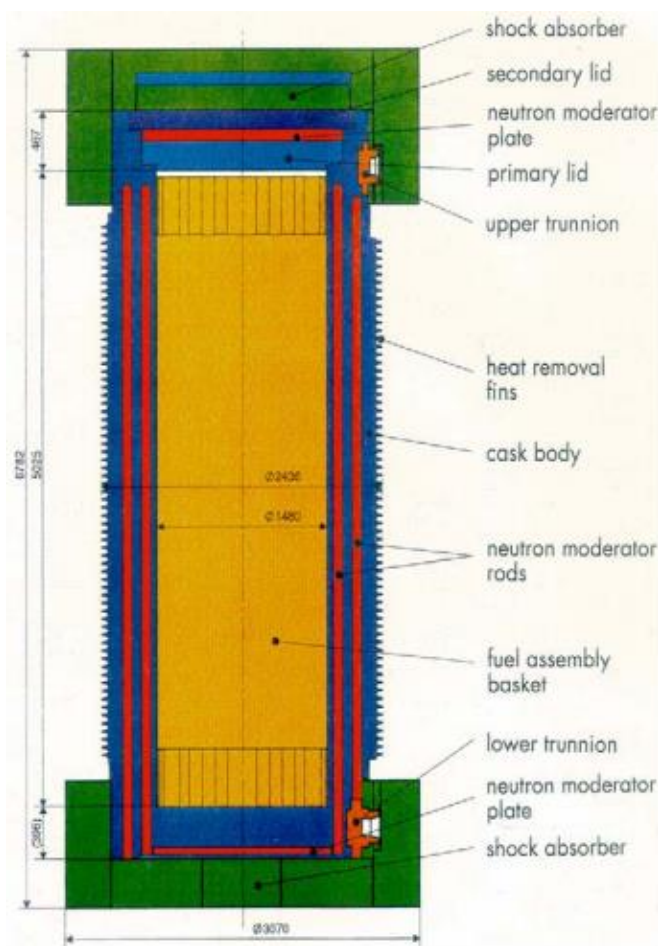
- podkritičnost - stav neumožňující vznik následné štěpné reakce, jež musí být zaručena ve všech případech a to i při havárii
- těsnost a stínění - sklady musí zajišťovat těsnost a stínění a zajistit tak ochranu proti úniku radioaktivních materiálů do životního prostředí
- odvod zbytkového tepla – nesmí být překročena maximální teplota, která je určena pro každý typ paliva [106]

3.4. Druhy kontejnerů

Kontejnery mohou plnit tři účely: sloužit pro dopravu, pro skladování nebo pro trvalé uložení. Existují i takové, které plní více účelů najednou. Ve skladu stojí kontejnery na betonové podložce a kolem nich proudí přirozeným tahem vzduch, který je ochlazuje. Jsou buď umístěny v budově podobné lehké průmyslové hale, nebo jen na volném prostranství. Příkladem tohoto řešení může být sklad v Ahausu v Německu, v elektrárně Surry v USA, nebo v Dukovanech. [105]

Kontejnery se dále dělí podle druhu skladovaného paliva. Tvarem lze palivo rozdělit na čtvercové a šestistěnné. V této práci bude dále řešeno jen palivo hexagonální, které je dáno zadáním práce.

Ukázky kontejnerů a paliva jsou v příloze číslo 2.



Obrázek 5 Schema kontejneru CASTOR V/19 na VJP [110]

4. Patentová a legislativní rešerše

4.1. Patentová rešerše

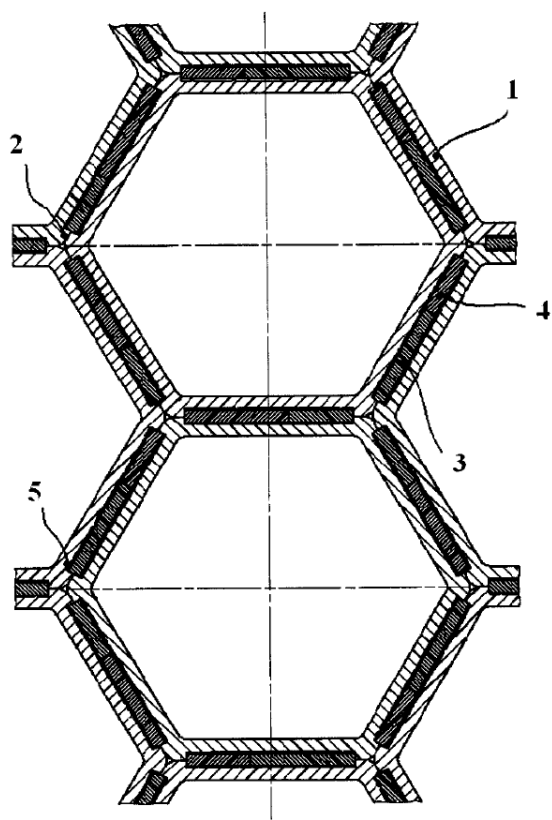
Náhled na moderní trendy v řešené problematice a přehled používaných technických řešení bude analyzován na základě rešerše patentů. Jelikož se segment výrobců kontejnerů pro vyhořelé palivo chová značně konzervativně, je problém získat informace z veřejných zdrojů, a proto bylo přistoupeno k databázi patentů, jako k jedinému relevantnímu a technicky názornému zdroji.

4.1.1. Patenty Škody JS a.s.

4.1.1.1. CZ 22915

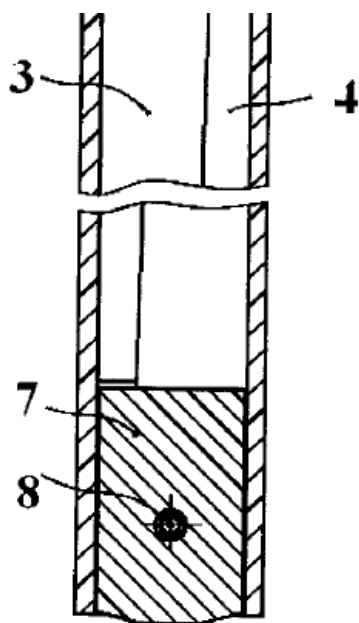
Pro tuto práci je nejvýznamnějším dokumentem užitný vzor CZ 22915 - Vnitřní vestavba kontejneru pro uložení použitých palivových kazet reaktoru. V tomto platném dokumentu jsou chráněny prvky koše pro palivo z reaktoru VVER 440. Jeho podoba je zobrazena na obrázku 6.

V tomto užitném vzoru je chráněno technické provedení vložení plechů z ATABORu (odrážka 4 na obrázku 6) do prostor mezi hexagonovými tyčemi (odrážka 1 na obrázku 6). Tento princip nemůže být použit u konstruovaného koše, jelikož by navržený koš nesplňoval požadované vlastnosti z pohledu stínění. Dále je chráněn obsah bóru a hydridu titanu u ataborového plechu. Nakonec je v nárocích na ochranu uvedeno šroubové nebo nýťové spojení koncovek (odrážka 8 na obrázku 7) a opatření koše naváděcími prvky pro palivové tyče. Tyto prvky obsahuje většina existujících košů a bude je obsahovat i navržený koš. Jejich použitím tedy nebude využito ochrany tohoto užitného vzoru. [100]



Obrázek 6 Profil koše [100]

1 šestihránný profil 2 stěna šestihranu 3,4 klínové vložky 5 drážka



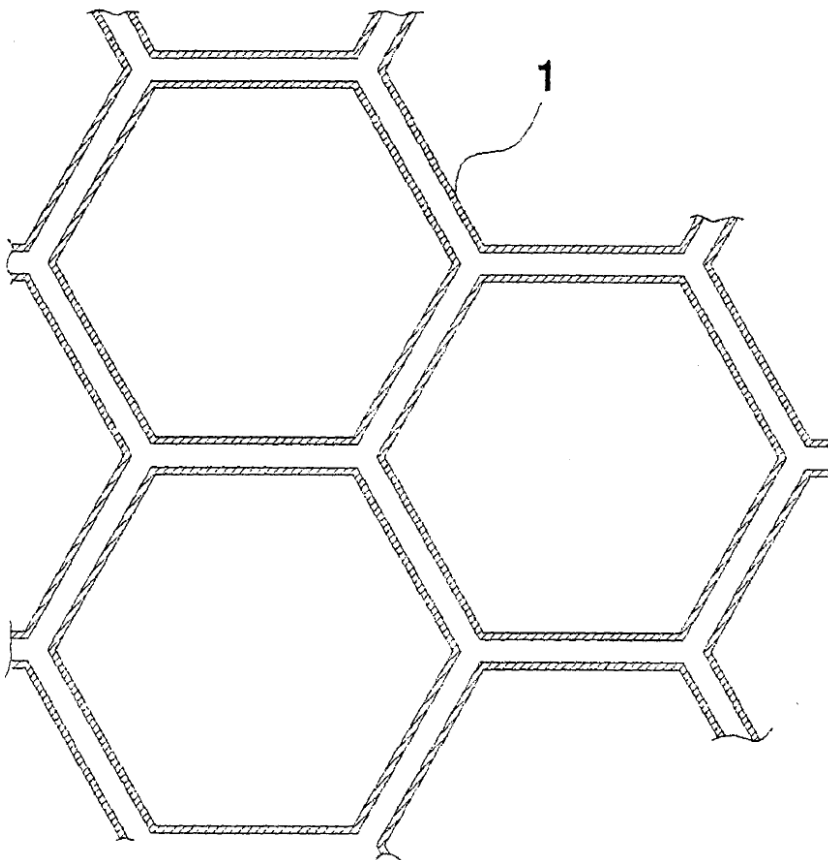
Obrázek 7 Půdorysný pohled na řez košem [100]

3,4 klínové vložky 7 Koncovka 8 šroubový spoj

4.1.1.2. CZ 5731

Užitný vzor CZ 5731 Vnitřní vestavba kontejneru pro mokré skladování palivových článků ze dne 17.2.1997.

Pro jednu z konstrukčních variant bude použito poznatků uvedených v zaniklém užitném vzoru číslo CZ, kde bylo chráněno osazení koše pomocí šestihranných absorpčních trubek, které navzájem přiléhají, mají funkční mezery a obsahují bór, které je zobrazeno na obrázku číslo 8. [100]



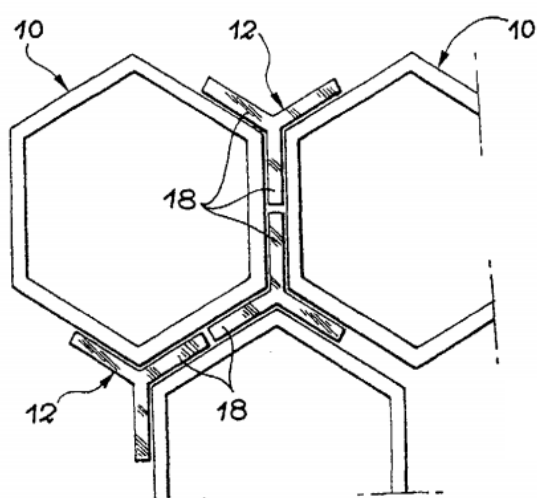
Obrázek 8 Profil koše [100]

4.1.2. Ostatní patenty

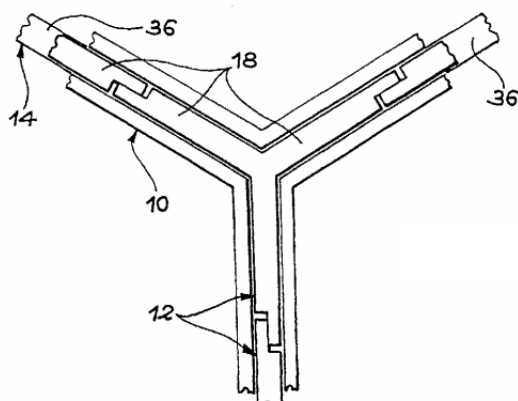
4.1.2.1. Societe pour les transports

Zásobník pro radioaktivní materiály společnosti Societe pour les transports de, Francie, zveřejněný 14.8.2002.

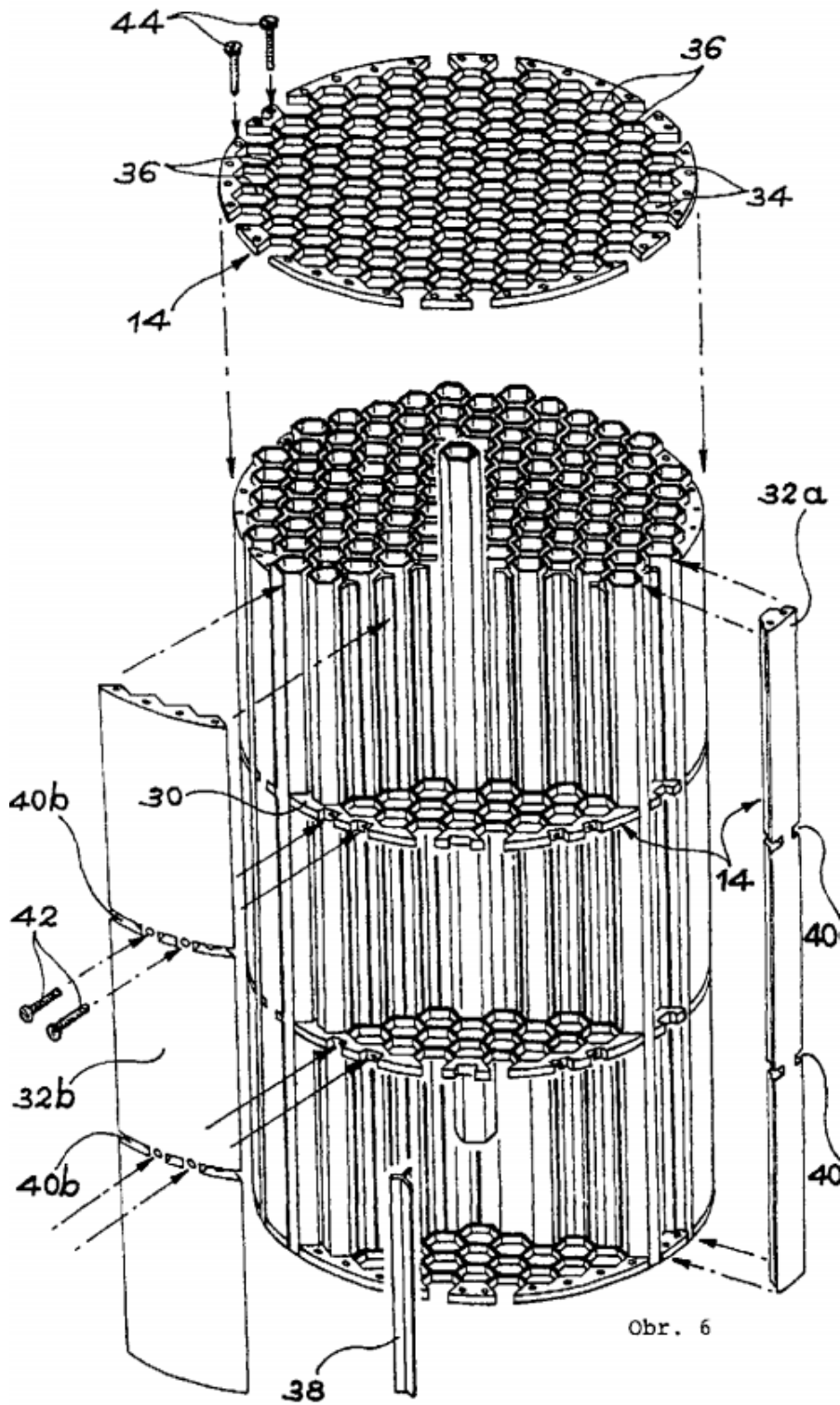
Kovové tvarovky, které mají alespoň tři příruby, navzájem spojené společným okrajem, přičemž svým umístěním vytvářejí druhou souvislou stěnu okolo první stěny a jsou s ní alespoň v částečném kontaktu. Tento patent chrání elementy vložené mezi hexagonové tyče (odrážka 18 na obrázku 9). V nárocích je definováno, že elementy se dotýkají, nebo jsou spojeny, zobrazeno na obrázku 10. [115]



Obrázek 9 Profil koše [115]



Obrázek 10 Detail tvarovek [115]

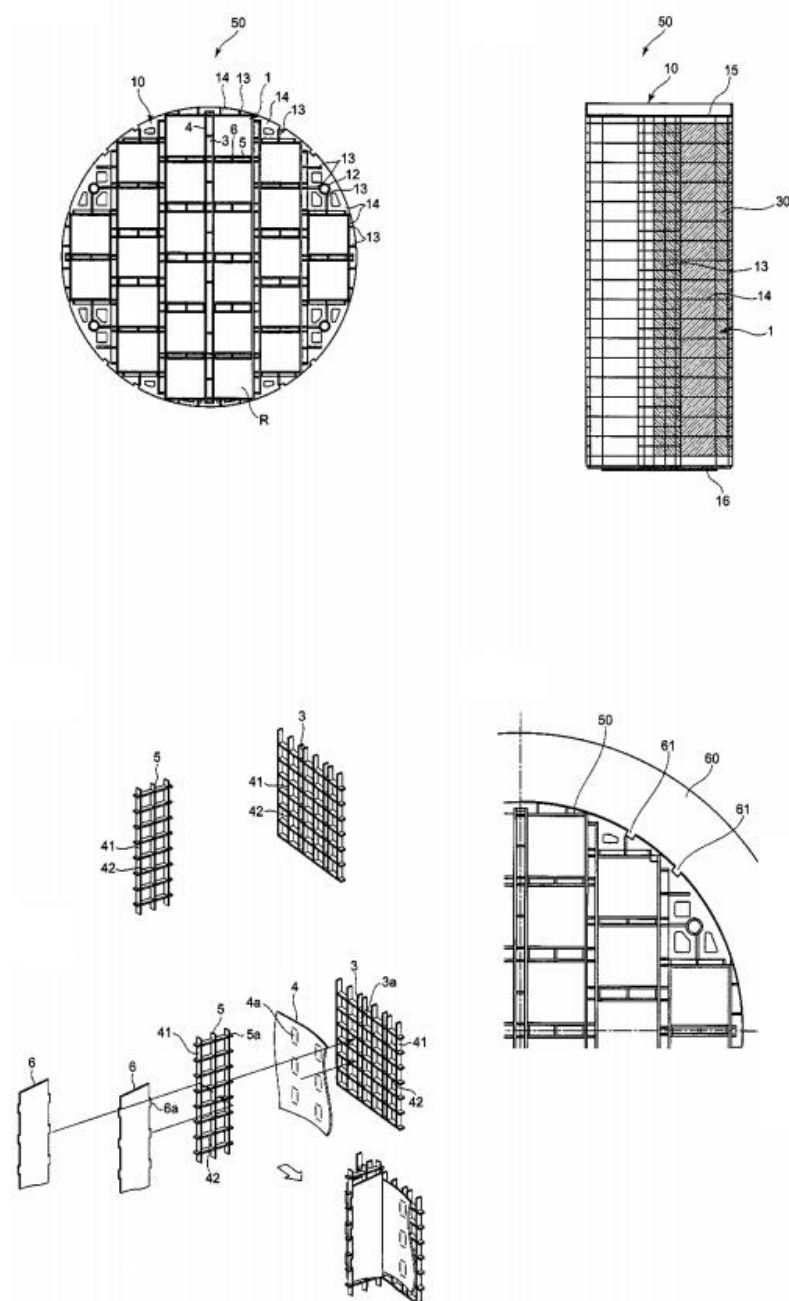


Obrázek 11 Tvar koše [115]

4.1.2.2. TOSHIBA CORP JP200829251

V tomto patentu je chráněna podpěrná deska vyrobená z hliníku s nerezovým rámem, který snižuje náklady na hliníkovou slitinu s obsahem bóru, která je použita ve stěnách koše.

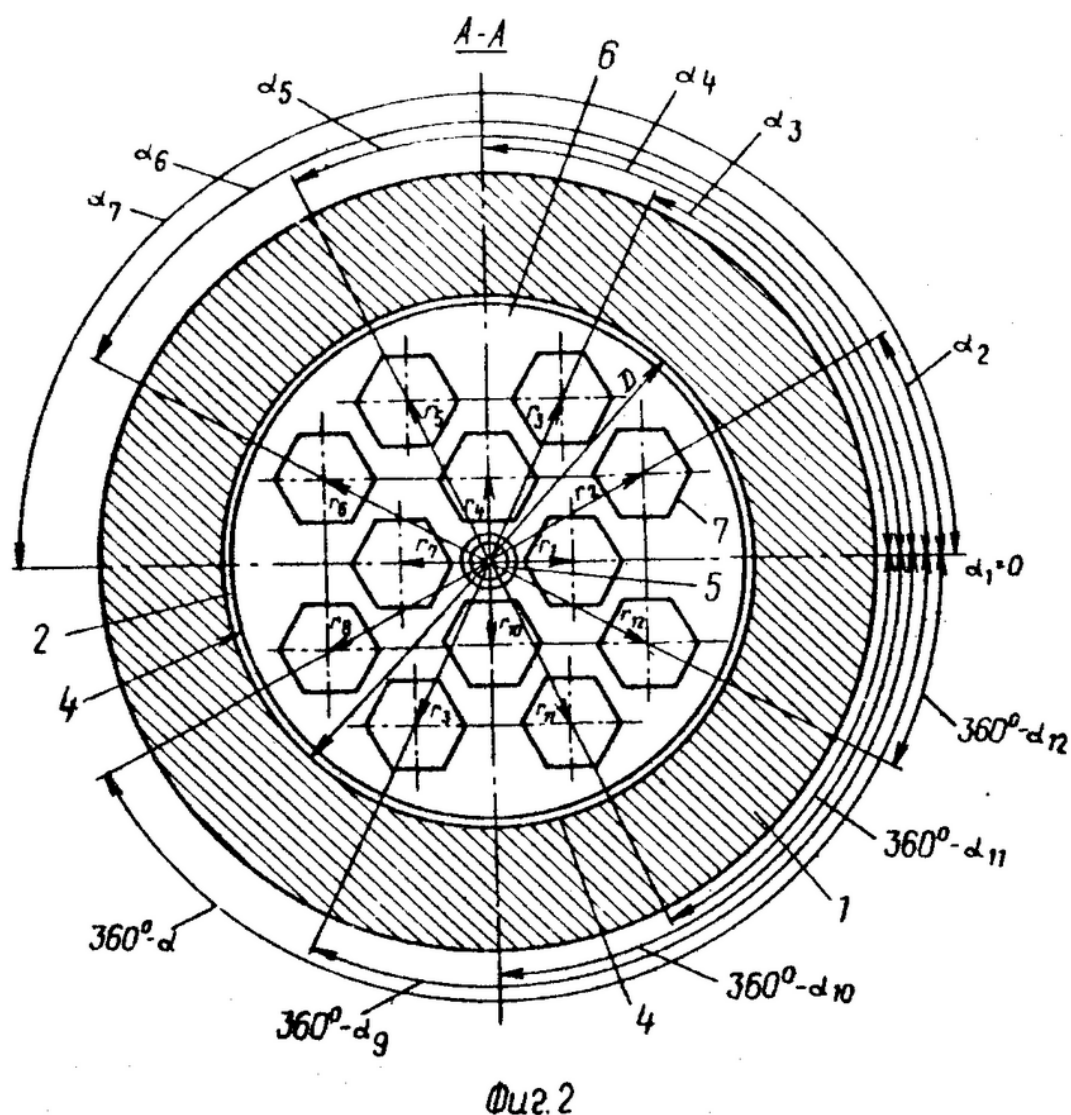
Obdobným způsobem jsou asijskými patenty chráněny různorodé tvary a materiály obalového souboru, které slouží jako výplň koše, a nebo se dotýkají palivových kazet a jsou vloženy do koše zevnitř. [116]



Obrázek 12 Znárodnění patentu [116]

4.1.2.3. VI Safonov

Z hlediska rozložení palivových kazet se této problematice nejpodrobněji věnuje ruský patent 1653456 SU z 20.3.2000. Pro palivo z bloku VVER 1000. Patent chrání souřadnice jednotlivých palivových souborů, čímž podle dokumentace snižuje náklady na použití oceli s obsahem bóru, kterou lze nahradit levnější nerezovou ocelí o vyšší pevnosti. [117]



Obrázek 13 Rozložení palivových kazet [117]

4.1.3. Závěr patentové rešerše

Na základě provedené patentové rešerše lze konstatovat, že není možné navrhnout koš, který by se sestával z hexagonových tyčí, které by byly spojeny tvarovými elementy. Je problematické, s ohledem na mezinárodní patenty konkurence, jednotlivé tyče svařovat, nýtovat, šroubovat, kolíkovat, či spojit pomocí zděří. Rozdělení profilů na nosnou část a výplň je chráněna vyobrazením nejrůznějších tvarů.

Konstrukce koše s ohledem na stínící efektivitu by byla velice nákladná, jelikož by každá část byla jedinečná a tím by byl koš velice nákladný, bez reálné úspory v nákladech na levnější materiál, který by bylo možné použít.

4.2. **Legislativní rešerše**

Byla provedena rešerše zákona 317/2002 Sb. O typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek. Níže jsou uvedeny úryvky, které se významně vztahují k této práci.

Obalovým souborem je soubor obalů nezbytných k úplnému uzavření radioaktivního obsahu. Přitom radioaktivním obsahem je štěpný materiál nebo radioaktivní látka se všemi kontaminovanými nebo aktivovanými pevnými látkami, kapalnými látkami a plyny uvnitř obalového souboru. Obalový soubor může sestávat z jednoho nebo více obalů, absorpčních materiálů, distančních konstrukcí, stínících prvků, pomocných zařízení pro plnění a vyprazdňování, větrání a snižování tlaku, zařízení pro chlazení, tlumičů nárazu, zařízení pro manipulaci a upevnění, tepelně izolačních prvků a rovněž ze zařízení k údržbě a opravám celého obalového souboru. Obalovým souborem může být bedna, sud nebo podobná nádoba, nebo přepravní kontejner, cisterna nebo střední kontejner na volně ložený náklad. [118]

Radioaktivní zásilka musí být schopna odolat vlivům zrychlení, vibrací nebo rezonancí z vibrací. Materiály obalového souboru a jakýchkoliv jeho částí musí být navzájem i vůči radioaktivnímu obsahu zásilky fyzikálně a chemicky kompatibilní. Konstrukce radioaktivní zásilky musí vyhovovat teplotám a tlakům vnějšího prostředí, které mohou nastat při běžných podmínkách přepravy. [118]

Obalový soubor, musí být vyroben bez vystupujících částí vnějšího povrchu tak, aby mohl být snadno dekontaminován, pokud by tím nebyl omezen důležitější bezpečnostní požadavek. [118]

Radioaktivní zásilka musí být vyrobena tak, aby po provedených zkouškách zabránila:

- (a) ztrátě či rozptýlení radioaktivního obsahu
- (b) ztrátě účinnosti stínění, která by způsobila větší než 20 % nárůst příkonu dávkového ekvivalentu ve kterémkoliv místě vnějšího povrchu radioaktivní zásilky [118]

Zásilka musí:

- zachovat si dostatečné stínění zajišťující příkon dávkového ekvivalentu ve vzdálenosti 1 m od povrchu obalového souboru nižší než 10 mSv/h
 - po provedených zkouškách nesmí umožňovat vložení krychle o hraně 10 cm
- [118]

4.2.1. **Zkoušky nehod při přepravě**

Teoreticky nejhorším scénářem, který by se mohl odehrát s kontejnerem pro vyhořelé jaderné palivo ihned po jeho naplnění je, že se kontejner naloží na vagon. Během cesty na něj prší, padají drobné předměty a kontejner lehce nadskakuje. Následně z vagonu při železniční nehodě spadne na pevnou podložku, která je 9 m pod mostem. Teoreticky lze předpokládat, že na spadlý kontejner dopadne z mostu další hmota (na 116 tun kontejneru závaží o hmotnosti 500 kg), dále následuje skulení a pád z metru na blízkou tyč, ve chvíli, kdy

vznikne požár. Kontejner se z ohně podaří vyprostit po půlhodině tak nešťastně, že spadne do blízkého jezera a z hloubky 15 metrů se vyprostí po 8 hodinách. [118]

Takto by mohla vypadat nejhorší nehoda kontejneru, která je popsána v atomovém zákoně podle režisérů z Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Tuto katastrofální příhodu lze rozdělit do definovaných bodů, které musí plnit každý kontejner pro vyhořelé jaderné palivo: [118]

- Volný pád z výšky 9 metrů na neúhybnou podložku
- Volný pád na kolmou tyč dlouhou 0,2 metru o průměru 0,15 m z výšky 1 metru
- Volný pád tělesa o hmotnosti 500 kg na obalový soubor z výšky 9 metrů

- Těsnost kontejneru pod hladinou 15 metrů (150 kPa) po dobu 8 hodin
- Těsnost kontejneru pod hladinou 200 metrů (2 MPa) po dobu 1 hodiny

- Odolnost kontejneru ohni o teplotě 800 °C po dobu 30 minut

- Postřik vodou 5cm/hod
- Pád z výšky 0,3 m bez poškození
- Pád tyče o hmotnosti 6 kg z výšky 1 metr bez známek poškození

V plném měřítku se modelují a zkouší pomocí crash testů srážky nákladního přepravníku s železniční vlečkou, přičemž hermetičnost kontejneru zůstává zachována. [7]

5. Konstrukční řešení koše

Na základě poznatků získaných v předchozích kapitolách budou vytvořeny dva návrhy konstrukčních variant koše, které budou shrnuty ve znalostní bázi požadavků pomocí EDS.

5.1. *Současný stav*

Zadavatel práce v současné době vyrábí jednotlivé segmenty koše metodou protlačování. Protlačení vznikají hexagonové tyče, které se s použitím spojovacího materiálu skládají do výsledného tvaru koše. Každá tyč slouží k uložení jednoho palivového souboru. Tyto tyče mají při výrobě přesně daný vnitřní rozměr hexagonu a z technologických důvodů, výroby metodou protlačování je tloušťka stěny a vnější rozměr hexagonu možné tolerovat v řádu milimetrů. Tento fakt velice ztěžuje montáž a klade vysoké nároky na docílení výsledné rozměrové přesnosti koše.

Technologií protlačování jsou u zadavatele této práce vyráběny hexagonové tyče menších rozměrů tj. pro kontejner typu CASTOR 440/84-M (zobrazen na obrázku 14), do kterého se vkládají palivové tyče z reaktoru VVER 440, typu V213. Tento kontejner se skládá z 85 hexagonálních tyčí vyrobených z AlMg 1,8. Do jejich stěn jsou vkládány vyztužující plechy z ATABORu [119].

Hlavní vlastnosti, které vystihují tento kontejner lze zjednodušit na:

- ✚ podkritičnost
- ✚ omezení dávkového příkonu
- ✚ pasivní odvod tepla
- ✚ mechanická celistvost



Obrázek 14 Castor 440/84-M [119]

Kontejner je vyroben jako jeden kus z tvárné litiny. Tloušťka stěny je 37 cm. Vnitřní povrch pokrývá niklová vrstva, která ho chrání proti korozi. Vnitřní prostor kontejneru je zaplněn heliem, kterým je vytvořen podtlak. Tento prostor je uzavřen primárním víkem. Helium mezi primárním a sekundárním víkem má vyšší tlak než okolí a při poruše netěsnosti tím pádem směřuje tok plynu dovnitř kontejneru. Helium zamezuje oxidaci palivových souborů a stěn kontejneru.[120] Kontejner pojme 84 palivových kazet o hmotnosti 10 tun, celková hmotnost naplněného kontejneru je 115,5 tuny.[6]

Při nakládání kontejneru se z bazénu postupně překládají kazety. Po naplnění se kontejner uzavře, vytáhne z bazénu, vysuší, naplní heliem a dekontaminuje se. Dekontaminace pro snížení úrovně radiace probíhá pomocí ostřiku jedním z možných roztoků a oplachem demineralizovanou vodou. Dezaktivacími roztoky jsou [100]:

- ✚ 10 g/l $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$
- ✚ 10 g/l $\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$
- ✚ 10 g/l $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ + 1 g/l HNO_3
- ✚ 10 g/l NaOH + 5g/l KmnO_4

V současné době byly ve Škodě JS a.s. dokončeny konstrukční práce na koši pro palivo z reaktoru o výkonu 1000 MWe. Pro jednotlivé části bylo zahájeno mezinárodní patentové řízení a probíhají přípravné práce na výrobě jednotlivých dílů. Tato práce má za cíl navrhnout koš pro stejné palivo se znalostí poznatků a problémů které byly získány při pracích na projektu, který se nyní připravuje k výrobě.

Jedním z problémů je technologie výroby. Jelikož se počítá s použitím koše na palivo obohacené až na 5 % U^{235} , bylo potřeba změnit materiál koše tj. jeho mechanické, tlumící a tepelné vlastnosti. Na základě fyzikálních a metalurgických zkoumání byla navržena hliníková slitina obohacena karbidem bóru (B_4C) na hodnotu 8 - 15 %. Tento materiál má výrazně horší protlačitelnost. Teoretický limit této slitiny je 35 kg/m. Při zkouškách byly zjištěny problémy s drsností povrchu, vylamováním materiálu, borcením hran, rozložením karbidu bóru ve slitině a dodržování rozměrových tolerancí.

Na základě požadavků vedení tepla, stínění a mechanických vlastností bude v této práci uvažován stejný materiál, který je použit v návrhu koše pro palivo z reaktoru VVER 1000. Volba vhodnějšího materiálu by přesahovala objem této práce, jelikož při změně chemického složení dochází ke změnám ve vlastnostech jak k lepšímu, tak se jiné vlastnosti naopak zhoršují.

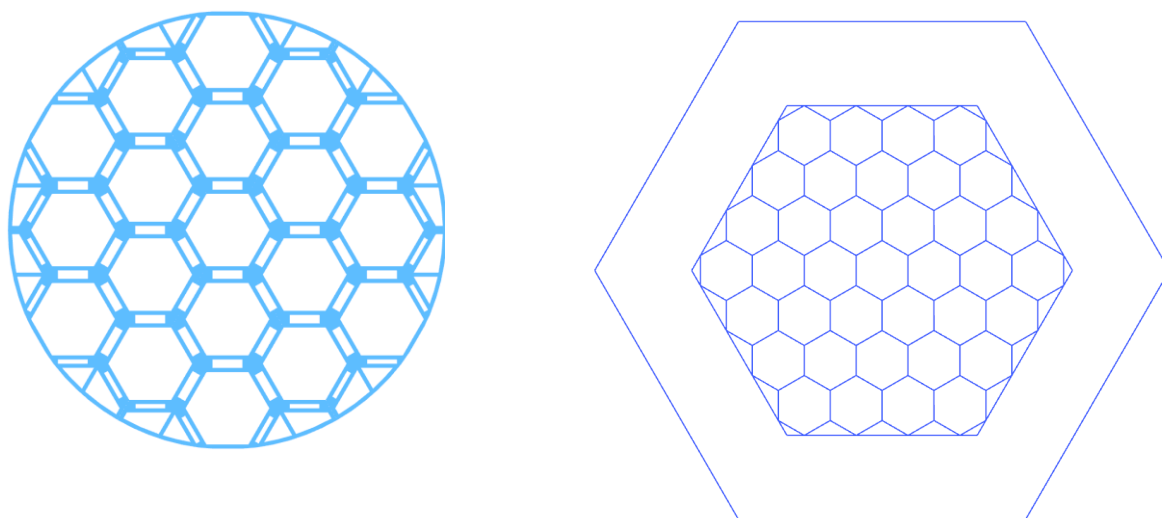
Nově navržený koš byl konstruován pro palivo, které má vyšší zbytkový tepelný výkon, než tomu bylo u dosud vyráběných košů. Je zde tedy potřeba zhodnotit problém odvodu tepla z koše. V neposlední řadě je třeba uvažovat i neutronové a gama stínění koše a kontejneru.

5.2. Rozložení palivových souborů

Koš je definován profilem a vnitřním rozměrem zvoleného kontejneru. Navržený koš bude umístěn do kontejneru CASTOR 1000/19. Z toho vyplývá, že je třeba uvažovat rozmístění hexagonových profilů palivových souborů po kruhu. Je požadováno vložit do koše největší možný počet kazet. Jelikož je žádoucí použít co nejméně prvků, ze kterých se bude koš sestávat, musí mít co nejvíce os symetrie. Při konstruování rozložení souborů je třeba uvažovat i odvod tepla a stínění, které musí splňovat dané požadavky.

Na základě výše zmíněných požadavků byl sestaven profil koše, který se sestává ze dvou druhů profilu, který je potřeba vyrobit. Jedná se tedy o variantu, která minimalizuje výrobní náklady. Z hlediska konkurenceschopnosti navrženého výrobku je třeba vedle bezpečnosti a životnosti zohledňovat ekonomičnost dané varianty. Tento tvarově jednoduchý profil, který je zobrazen na obrázku 15, bude v kapitole 6 zkontrolován na vedení tepla.

Z hlediska technologičnosti návrhu profilu koše se pro šestistěnné palivové tyče jeví nejlépe nakonstruování kontejneru do tvaru šestistěnu. Tato varianta je zobrazena na obrázku 16. Není možné jí dále rozpracovat vzhledem ke zvyklostem a současným parametrům používaných kontejnerů na VJP.



Obrázek 15 Navržený profil koše (vlevo)

Obrázek 16 Varianta tvaru kontejneru (vpravo)

5.3. *Varianta 1*

Při předpokladu vkládání palivových souborů do hexagonových tyčí plného profilu, je třeba nalézt technologicky vhodný způsob výroby. V současnosti používané protlačování by bylo použitelné, pokud by se podařilo snížit hmotnost profilu výrazně pod 35 kg/m. Tato varianta by znamenala vyrábět hexagon s velmi tenkou stěnou, což však není možné, z důvodu špatných pevnostních vlastností takto vyrobeného profilu.

S ohledem na možnosti materiálu lze uvažovat o moderních technologiích, za pomoci kterých lze vytvářet profily rozličných tvarů. Jedná se o výrobu metodou práškové metalurgie, nebo 3D tisku, dnes známé jako Rapid Prototyping.

Pro práškovou metalurgii, kdy se slitina za zvýšené teploty protlačuje ve formě prášku a spéká, byla nalezena výrobní firma, která by byla schopna vyrábět požadovaný profil v dané délce předpokládaných profilů. Pro práškovou metalurgii svědčí fakt, že garantuje rovnoměrné rozložení karbidu bóru v profilu, čehož nemůže být dosaženo u konvenčního protlačování. Největší nevýhodou je obava z nízkých hodnot mechanických vlastností, kterých by nebylo možné docílit, jako při výrobě konvenčním protlačováním.

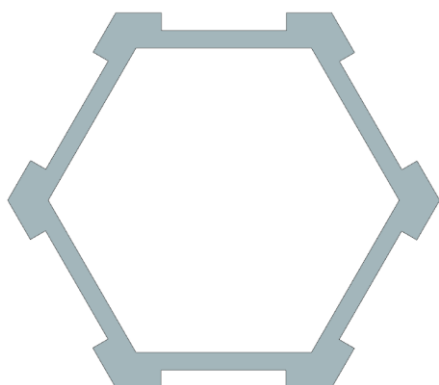
Metoda práškové metalurgie by značně prodražila výrobu tyčí. Ty by však byly vyráběny s odpovídající výrobní přesností, jejíž toleranční pásmo by se mohlo zmenšit, s ohledem na nově používanou technologii, tím by se zlepšila jakost vstupních vlastností jednotlivých profilů, což by mělo vliv na zamezení problémů s montáží. Jednotlivé aspekty této metody byly graficky znázorněny, ohodnoceny a poměřeny s jinými variantami v kapitole 5.5 Engineering design science, s níž souvisí příloha číslo 3.

Zařízení určené pro spékání a výrobu profilu je zobrazeno na obrázku 17. Profily, ze kterých se skládá koš navržený v podkapitole 5.2, zobrazený na obrázku 15 jsou znázorněny ve spojené poloze na obrázku 19 a samostatný profil je na obrázku 18.

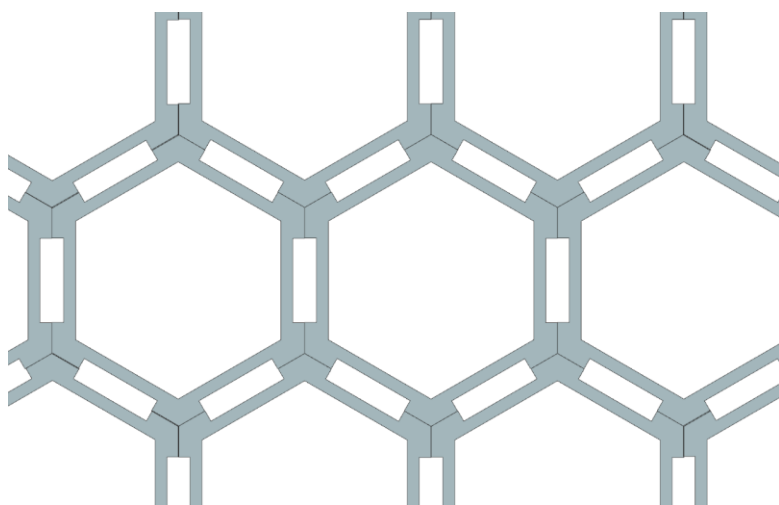
Práškovou metalurgii by bylo možné nahradit, dnes velice se rozvíjejícím, 3D tiskem. Na zařízení s technickými vlastnostmi odpovídajícími požadavkům, tedy schopnost nanášet materiál o teplotě tání hliníkové slitiny a suportu regulovatelném v délce cca. 5 metrů. Tiskárna splňující tyto parametry nebyla v dostupné oblasti nalezena, a proto se tato idea jeví jako vize, pro období, kdy bude dávat smysl z technologického a ekonomického hlediska.



Obrázek 17 Zařízení pro spékání prášků [100]



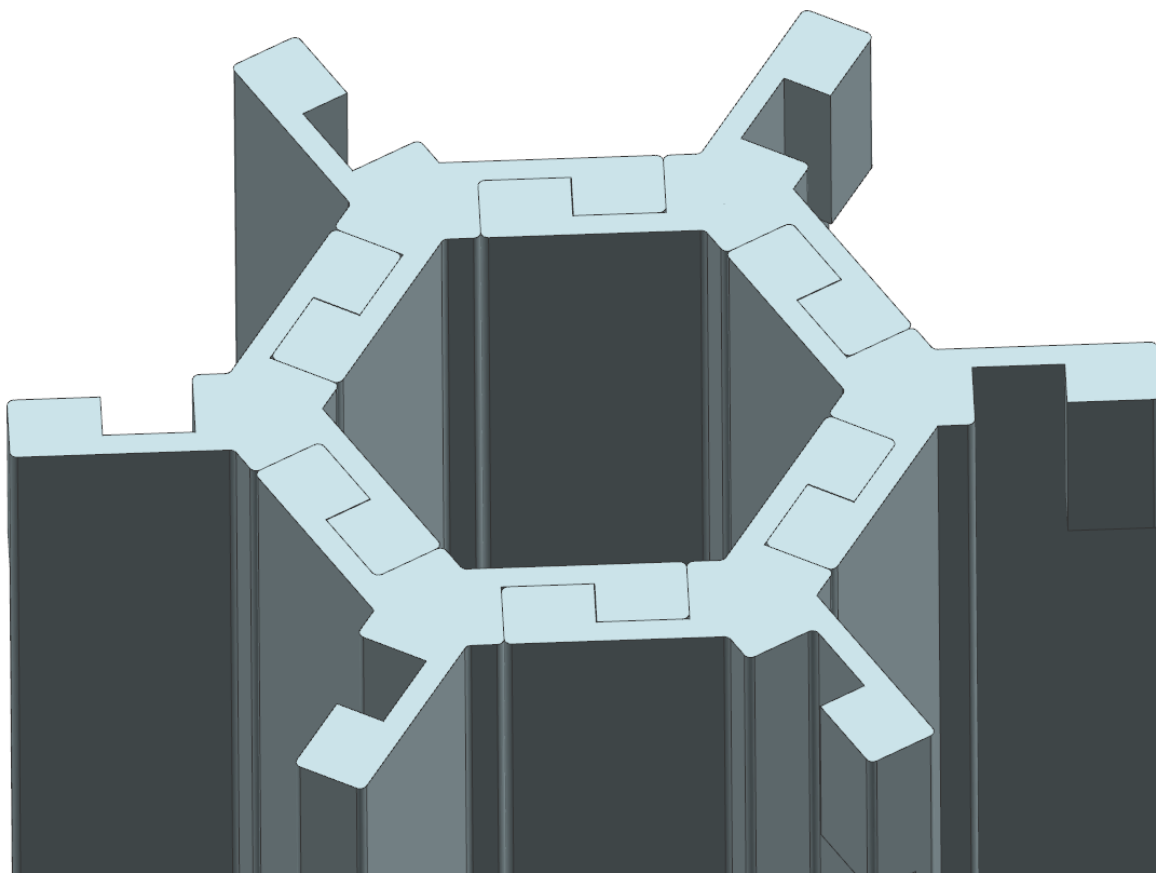
Obrázek 18 Hexagonový profil tyče



Obrázek 19 Koš složený z profilů varianty 1

5.4. Varianta 2

U druhé varianty vnitřní vestavby je brán ohled na, v současnosti používané technologie, kdy by se změnou konstrukce zásadně neměnila současná strojní, technologická a dodavatelská struktura. Z konstrukčního pohledu se není třeba dívat na koš, jako na skladbu spojených hexagonových tyčí, tak jak nám tento pohled nabízí současný trh a patentové nároky, ale lze uvažovat o složení dílů nešestistěnného tvaru, do profilu palivových kazet. Při tomto návrhu se nejlogičtěji jeví rozdělení koše z obrázku 15 na trojčipé útvary, které vzájemným propojením vytvoří daný profil.



Obrázek 20 Koš složený z profilů varianty 2 v místě spoje

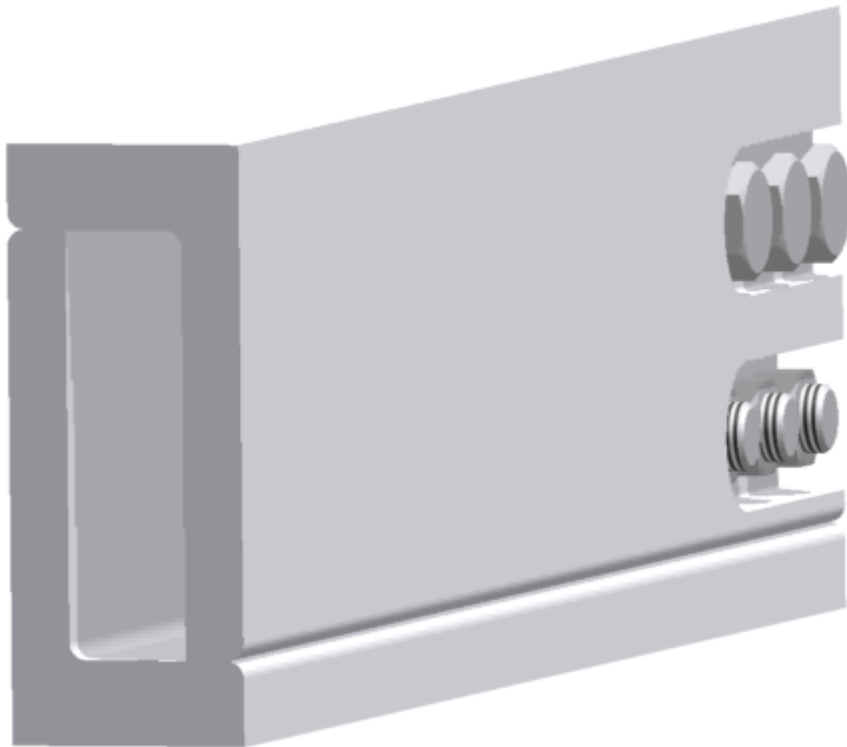
Tyto elementy by bylo možné spojit pomocí šroubů, nýtů, kolíků, zděří nebo drážek ať už vnějších nebo vnitřních (T nebo rybinových). Nabízí se i možnost spojení pomocí nerozebíratelných spojů, kterými jsou svaření, slisování, slepení, stmelení nebo spečení.

Z metalurgického hlediska není u zvoleného materiálu možné provádět svary, pro vysoký obsah karbidu bóru. Z lepidel a tmelů má nejvhodnější parametry dvousložkový epoxid pryskyřice a tvrdidla Hysol® 3479 od společnosti Loctite [121], jehož provozní teplota je až 190 °C což, jak bude zobrazeno v kapitole číslo 6 je nedostatečná hodnota a pravděpodobně by byla problematická i životnost spoje, kdy je požadovaná stálá pevnost po dobu 60 let. Spékání dané slitiny též není realizovatelné.

Spojení vnějšími nebo vnitřními drážkami – tvarovými plochami nelze použít, jelikož samotný protlačený profil by nespĺňoval geometrické tolerance, nutné pro spojení

elementů. Případné obrábění ploch do podoby drážek by bylo náročné a nákladné. Pro spojení a vymezení polohy profilů je tedy potřeba použít šroubové a kolíkové spoje. Jako kompromisní řešení byly zvoleny lícované šrouby, kterými lze přesně definovat polohu tvarových profilů a zároveň tuto polohu zajistit.

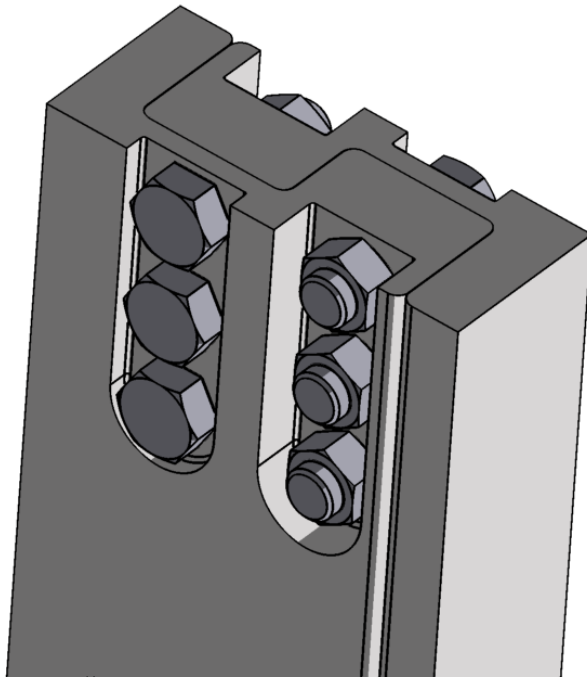
Šroubová spojení jsou rovnoměrně rozložena do čtyř spojů rozložených po profilu délky 4500 mm. Každý spoj se skládá z šesti šroubových spojení lícovaných šroubů M16 x 52 z nerezavějící oceli. Tyto spoje jsou dlouhé 100 mm a použitím vhodných tolerancí jsou profily k sobě při montáži v místech spojů lisovány a následně sešroubovávány.



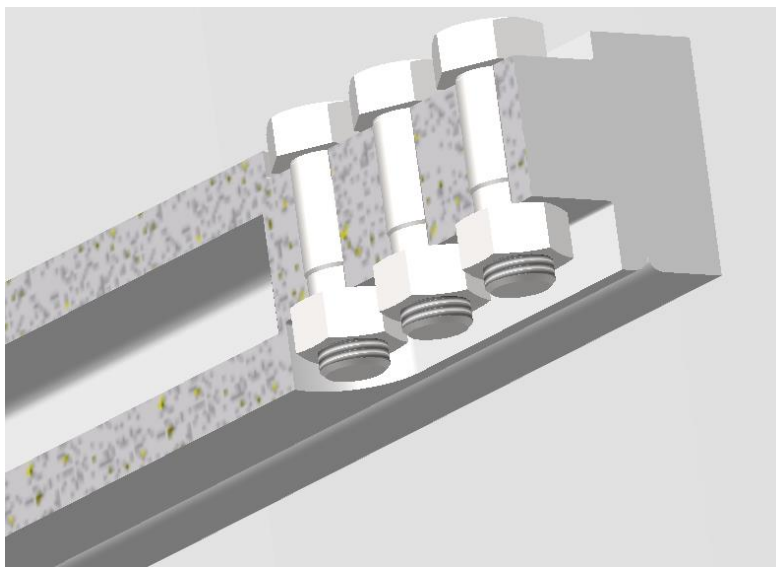
Obrázek 21 Řez spojem profilů

Na obrázku 20 je znázorněno složení profilů do sestavy s prostorem pro palivový soubor. Obrázek 21 představuje řez tvarovým stykem dvou dílů, kde je v popředí mezera mezi profily, která je u naplněného kontejneru vyplněna heliem a v pozadí je znázorněn šroubový spoj profilů.

5.4.1. Detaily konstrukčního provedení

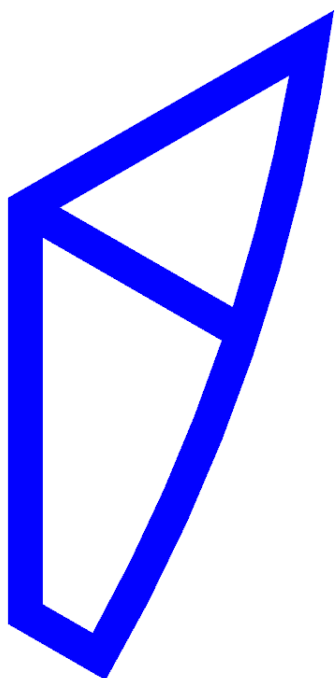


Obrázek 22 Šroubový spoj

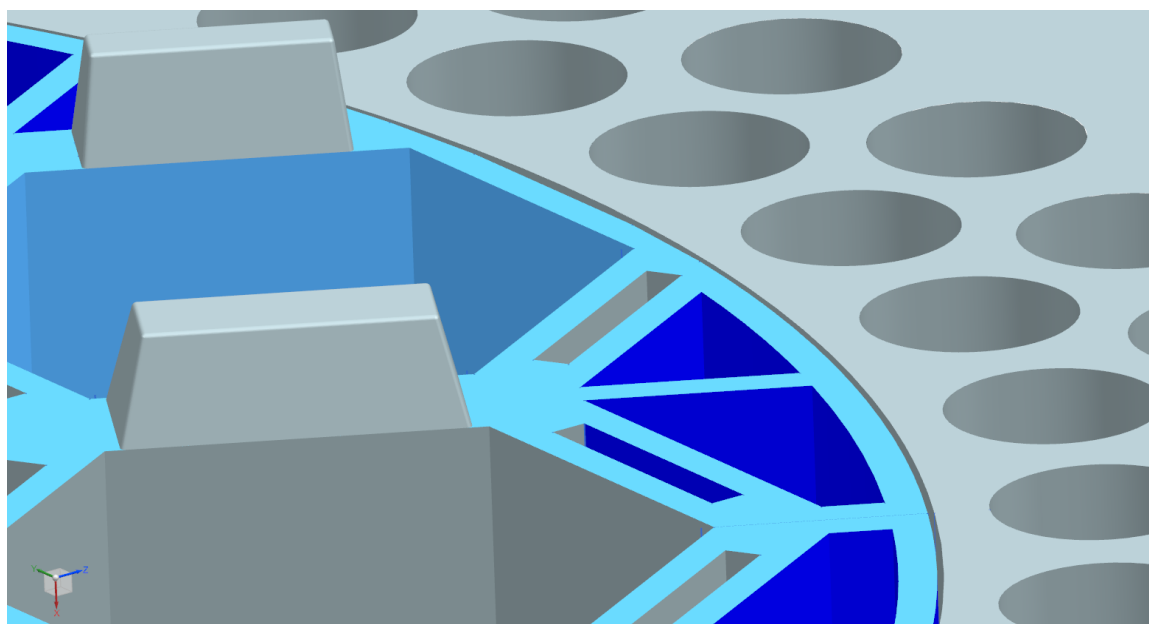


Obrázek 23 Řez spojem

Výrobní výkresy profilu koše a okrajového profilu (obrázek 25) jsou přílohou práce. Na obrázku 22 je tvar šroubových spojů, jejichž detail je zobrazen na obrázku 23. Montáž je uvažována pomocí přípravků, kterými bude možné dotáhnout i vnitřní šroubové spoje, ke kterým bude přístup skrz prostor pro palivové soubory. Ke dvěma krajním, ze čtyř, spojů jsou připojeny krajní elementy. V horní části koše jsou umístěny navaděče palivových souborů, které jsou zobrazeny na obrázku 24. Tyto navaděče jsou připevněny v místě šroubového spoje, kde pro ně bude vytvořena drážka, pomocí které budou spojeny stejnými šrouby ke koši.



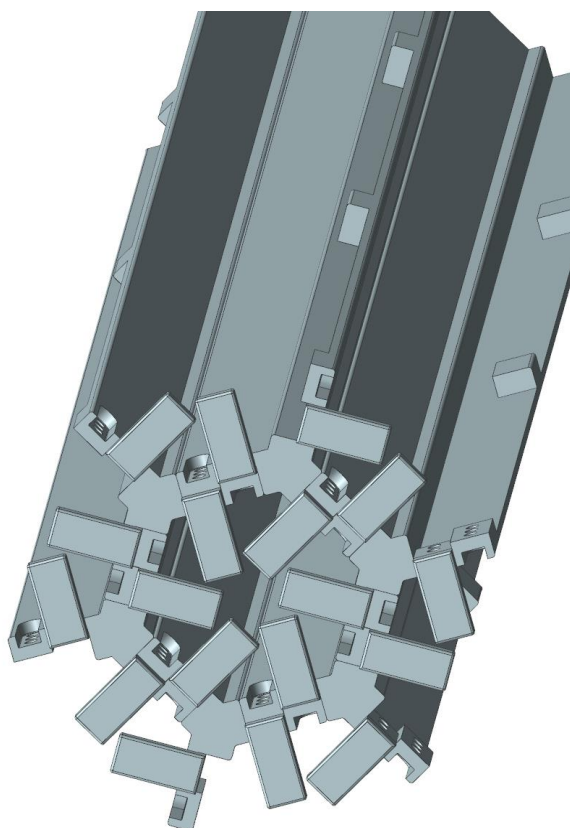
Obrázek 24 Okrajový profil



Obrázek 25 Navaděče palivových souborů

Na druhé straně kontejneru je pomocí tvarových profilů vytvořeno dno kontejneru, které je součástí koše, díky šroubovému spojení obdobně připevněného, jako u navaděčů na vrchní straně vnitřní vestavby. Dna košů byla dosud samostatnými tělesy, které se připevňovaly ke spodní stěně košů, čímž netvořily homogenní strukturu a muselo na ně být nahlíženo samostatně z tepelného, pevnostního i stínícího hlediska. V návrhu je dno součástí vnitřní vestavby a tvoří homogenní strukturu.

Okrajovými profily z obrázku 23 je vytvořen kruhový tvar koše, který vyplní prostor uvnitř tělesa kontejneru. Okrajové profily jsou k trojcípím profilům obdobně přišroubovány.

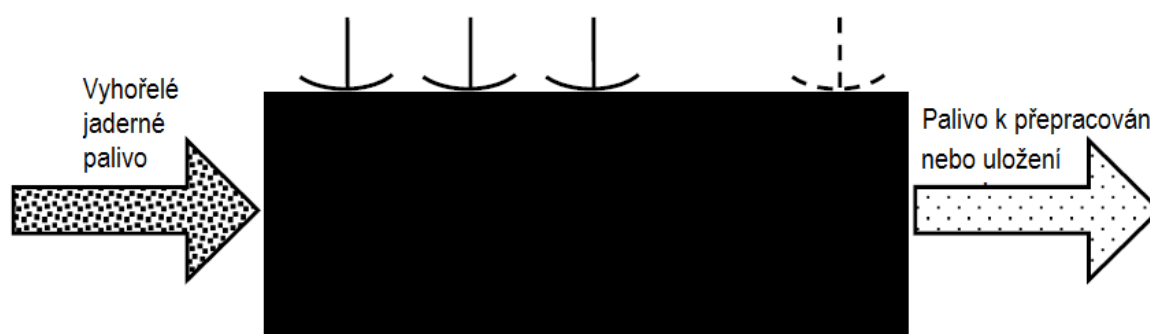


Obrázek 26 Dno vnitřní vestavby

5.5. Engineering design science

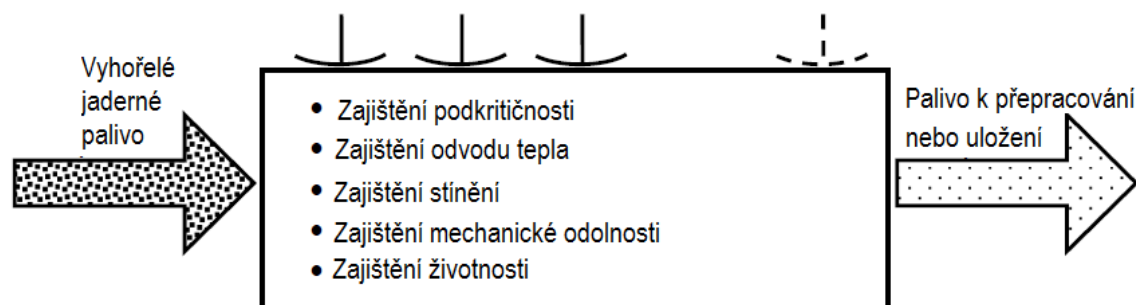
V této kapitole se systematicky zpracují poznatky ovlivňující technický návrh. Nejprve se technický systém (TS) zkoumá z pohledu transformačního procesu, jaké do procesu vstupují proměnné. EDS neřeší jednotlivé problémy, ale řeší vazby, které ovlivňují transformační proces (TP).

Jako transformační proces by bylo možné chápat samotné nakládání s vyhořelým palivem, nebo jako kontejneru na vyhořelé jaderné palivo a nejen samotný koš, který je zadán. Pro úplnost bude v tomto návrhu uvažován celý kontejner na vyhořelé jaderné palivo, který se stane černou skříňkou (black box) a budou mu nadefinovány vstupy a výstupy. Operátory ovlivňující TP jsou znázorněny oválnými šipkami (TS, člověk, okolí aj.).



Obrázek 27 Černá skříňka

Rozpracováním transformačního procesu vznikne hrubá podoba technologické funkce skladování vyhořelého jaderného paliva.



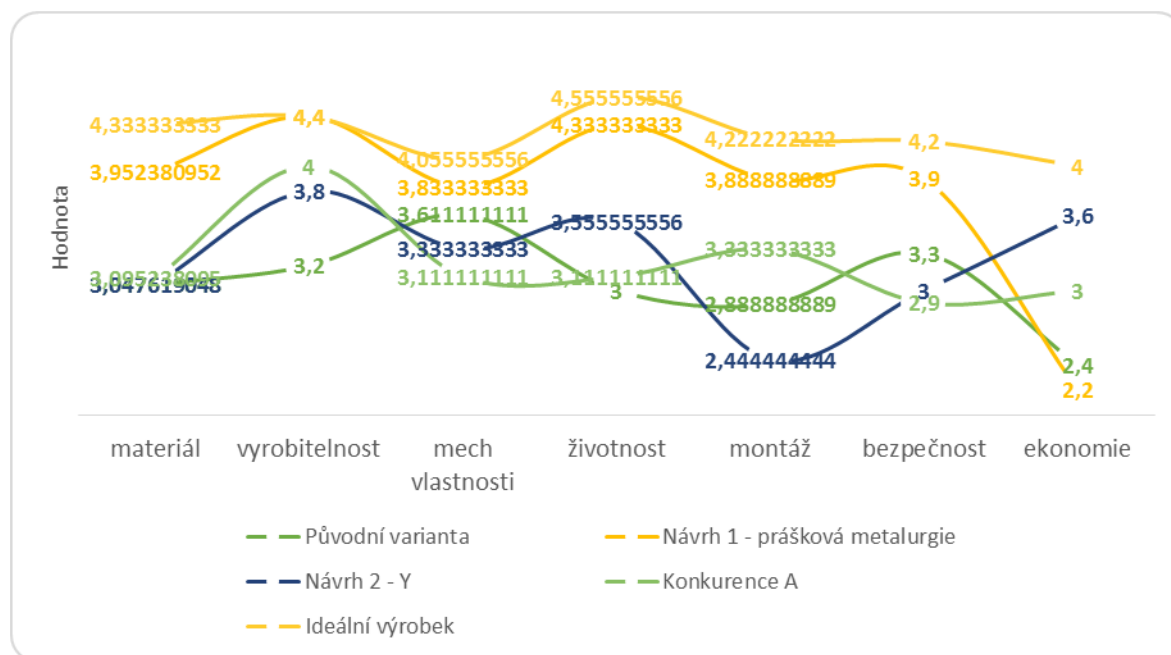
Obrázek 28 Základní technologická funkce

Znázornění úplného transformačního procesu by bylo velice komplikované a jednotlivé podprocesy, pro svoji složitost, nelze zjednodušit do formy grafu. Popis technologie skladování vyhořelého paliva je vysvětlen v kapitole 3.

V příloze číslo 3 je zobrazena specifikace požadavků výrobku. Jako výrobky určené k hodnocení byly zvoleny: původní navržená varianta, návrh varianty 1 dále popsany v této práci, varianta 2, konkurenční výrobek, v současnosti dodávaný do elektrárny Temelín firmou GNS GmbH a pro porovnání je zobrazena i ideální varianta, která by mohla nastat v případě souběhu nejlepších vlastností z každé kategorie vlivů. Do specifikace byly zahrnuty vlivy, pro které byly hodnoceny reflektivní vlastnosti. Jako vlivy byly určeny:

- ✚ Materiál
- ✚ Vyrábělnost
- ✚ Mechanické vlastnosti
- ✚ Životnost
- ✚ Montáž
- ✚ Bezpečnost
- ✚ Ekonomie

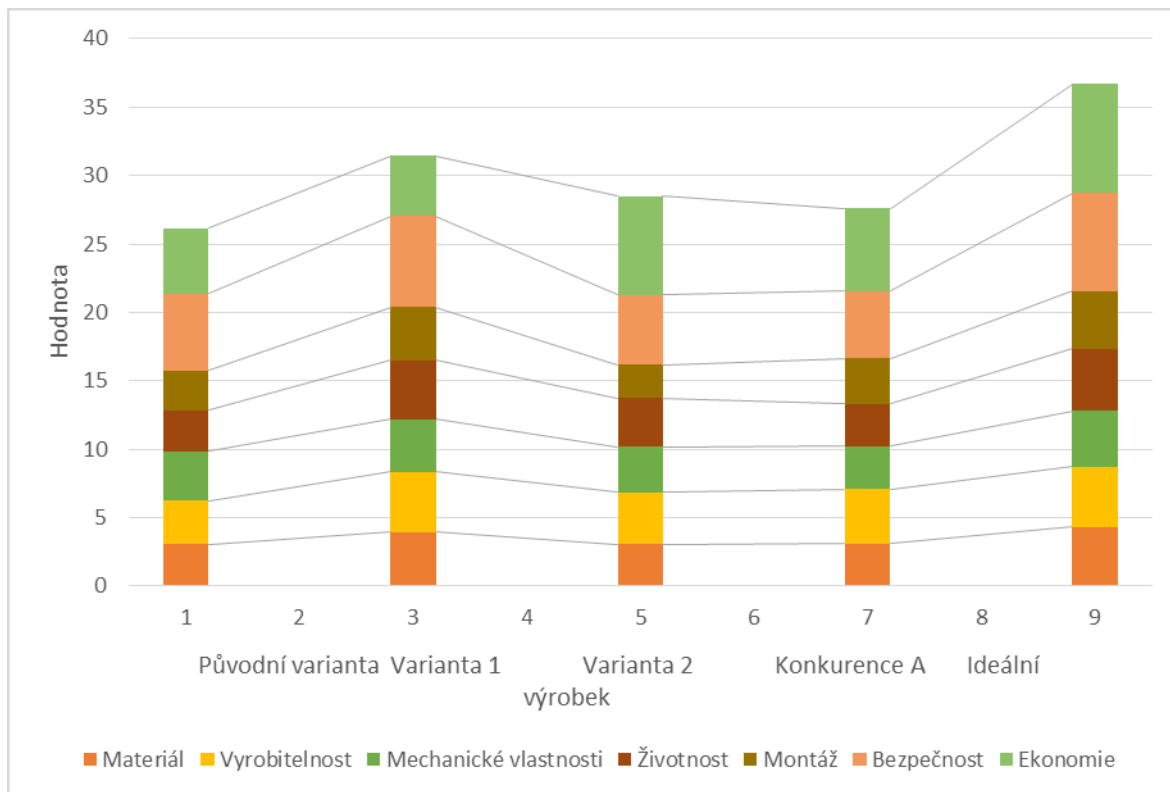
Specifikace požadavků je přílohou číslo 3. Na základě analýzy dat specifikace vznikl diagram hodnocení TS, zobrazený na obrázku 29.



Obrázek 29 Diagram hodnocení vlastností TS

Jednotlivé hodnoty vlastností, seřazené podle variant konstrukce, jsou zobrazeny na obrázku 30. Zvoleným kritériím nejlépe vyhovuje varianta 1, výroba hexagonových tyčí metodou práškové metalurgie. U druhé navržené varianty, složení koše z trojcípích elementů, vyšlo, že splňuje zvolená kritéria lépe než konkurenční výrobek i než v současnosti vyráběná varianta.

Nejlépe splněným kritériem všech variant je bezpečnost daných návrhů, což je samořejmé s ohledem na normy a požadavky, na základě kterých jsou tyto výrobky konstruovány. Kritériem s největšími rozdíly je ekonomičnost návrhu, kde dopadla nejhůř varianta 1, u které se tak stala jediným kritériem, ve kterém nepředčila své konkurenty.



Obrázek 30 Diagram hodnocení jednotlivých výrobků

Závěry z EDS lze chápat jako subjektivně podjaté, jelikož zkreslování výsledků neprobíhá jen samotným hodnocením vlastností, ale i při výběru jednotlivých hodnotících kritérií. Podle provedeného hodnocení je nejlepší varianta 1, která však nebude použita, protože obsahuje dnes ne zcela rozšířené technologie.

6. Kontrolní výpočtové hodnocení

U navržené vnitřní vestavby je potřeba zkontrolovat její mechanické vlastnosti. Požadavky zákazníka (zadání práce), normy bezpečnosti a zákony definují kritéria, pomocí kterých se výsledky výpočtů hodnotí, podle kterých jsou analýzy prováděny a jakým způsobem jsou nastavovány pořáteční a okrajové podmínky. Z hlediska navržené konstrukce je nejproblematictější vlastností vedení tepla tělesem, kde je uvažovaná vyšší hodnota, než jaká je používána u současných košů.

Pevnostní a životnostní problematika návrhu nebude v této práci řešena, jelikož se jedná o velice složitou problematiku s obtížně interpretovatelnými výsledky, kdy je kontejner deformován plastickými deformacemi, které přeneseně působí i na koš. Tyto analýzy byly provedeny pro obdobný profil ve společnosti Škoda JS a splňují požadavky, kdy musí být možno vyjmout neporušené, nedeformované palivové soubory po předepsaných testech.

Jelikož byl navržen nový, dosud nepoužívaný profil, ze kterého je koš složen, bude provedena modální analýza tělesa, aby se zjistilo, zda nemůže dojít k poškození vnitřní vestavby kmitáním. U současných hexagonových tyčových profilů tento problém nehrozil díky tvarové tuhosti profilu.

6.1. Modální analýza

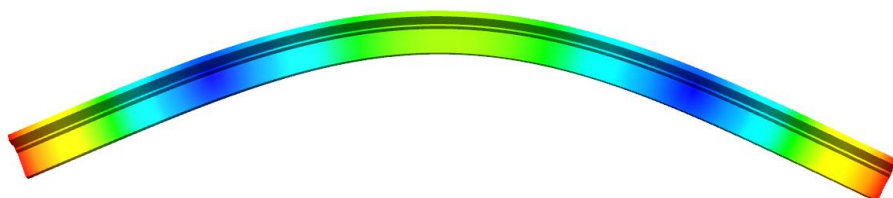
Pro samostatný profil, ze kterého je složen koš, byla provedena kontrola vlastních frekvencí, aby při transportu, případně havárii, nedošlo k deformacím koše od vlastních frekvencí tělesa. Je proto důležité naladit první vlastní frekvenci tělesa na dostatečně vysokou hodnotu, s jejíž amplitudou kmitání se koš neseťká.

Pořadí	Vlastní frekvence (Hz)
1	45,36
2	98,29
3	122,9
4	197,2
5	235,1
6	297,4
7	376,4

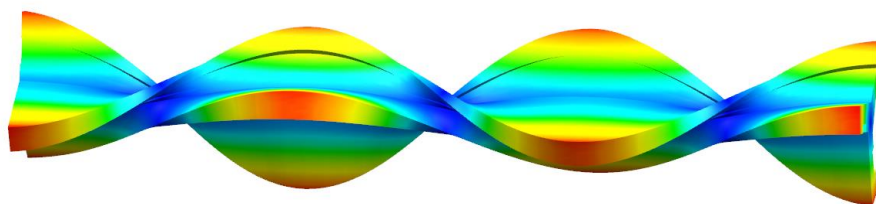
Tabulka 2 Vlastní frekvence

Analýzou v řešiči 103 programu NX Unigraphics 8,5 byly zjištěny vlastní frekvence. První má hodnotu 45,36 Hz. Tato hodnota by se dala zvýšit pomocí žebrování a výztuh v profilu, které by nebyly žádoucí ze stínícího a tepelného hlediska. Jelikož se jedná o jedinou, dostatečně vysokou, frekvenci pod 90 Hz, lze tento profil považovat za vyhovující.

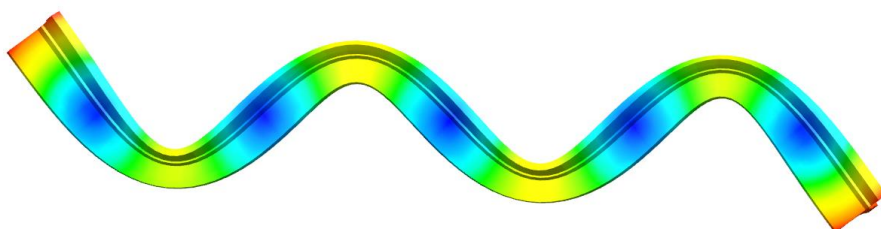
Na obrázcích 31 – 33 jsou zobrazeny průběhy deformací při konkrétní vlastní frekvenci. Podle předpokladu dochází ke střídání ohybových (31, 33) a krutových (32) deformačních účinků.



Obrázek 31 Tvar vlastní frekvence při 45,36 Hz



Obrázek 32 Tvar vlastní frekvence při 297,4 Hz



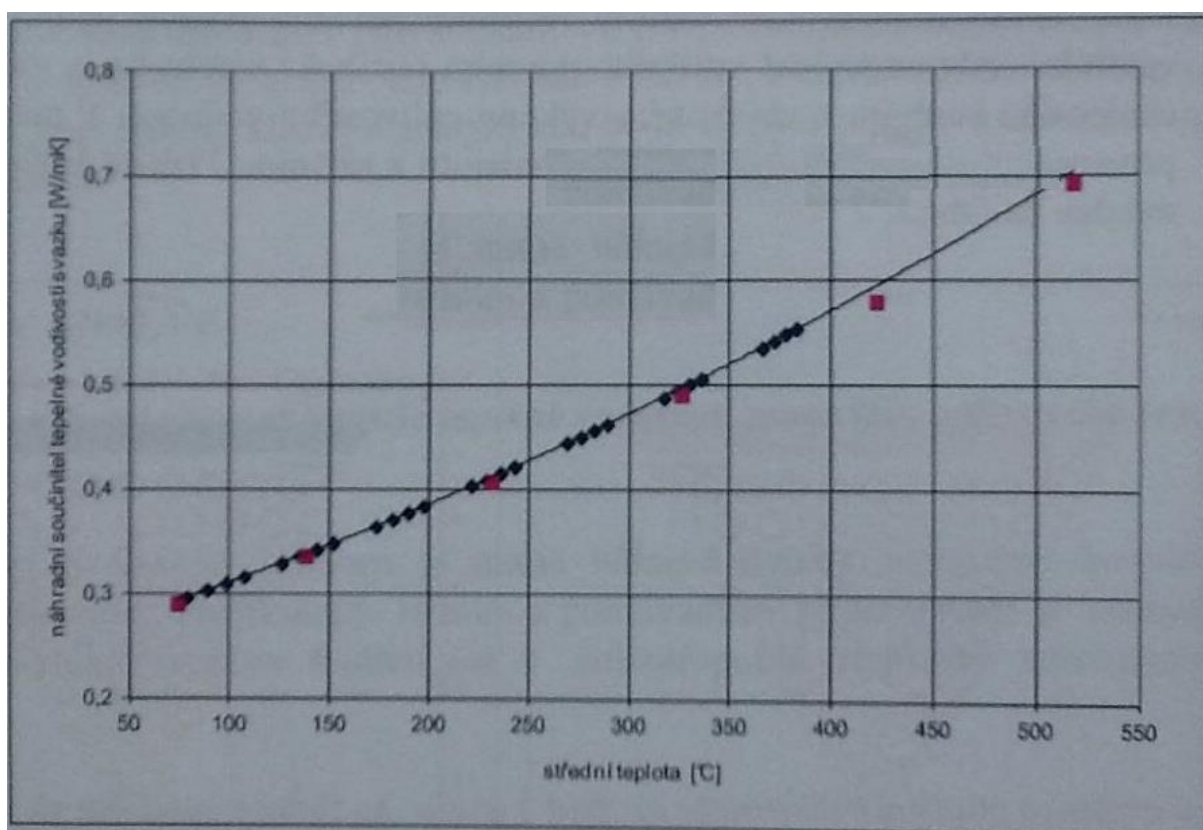
Obrázek 33 Tvar vlastní frekvence při 376,4 Hz

6.2. Tepelné výpočty

Pro výpočet je použit program Siemens NX Unigraphics 8,5 s řešičem Nastran Thermal/Flow, ve kterém lze řešit metodou konečných prvků lineární i nelineární, stacionární i nestacionární úlohy. Budou provedeny výpočty stacionárních úloh obalového souboru pro zatížení tepelným výkonem 17, 19 a 22 kW. Pro výkon 19 kW bude vytvořena nestacionární úloha simulující odolnost obalového souboru tepelné zkoušce, definované ve vyhlášce SÚJB 317/2002 Sb.


6.2.1. Vlastnosti materiálů

Obalový soubor je třeba zjednodušit na několik částí, které budou definované svými mechanickými, chemickými a tepelnými vlastnostmi. Problematickým se v tomto ohledu jeví vyhořelé jaderné palivo, které nelze s ohledem na rozměry kontejneru modelovat a počítat po jednotlivých uranových peletách, ale palivový soubor je třeba chápat jako těleso s anizotropními vlastnostmi. Toto zjednodušení předpokládá zjednodušení jak palivových proutků, zirkonového obalu tak heliové atmosféry. Na základě těchto vlastností byl sestaven model teploty vnitřního povrchu pokrytí palivového proutku v centrální řadě a z něj byl za předpokladu zbytkového tepelného výkonu v palivu stanoven součinitel tepelné vodivosti náhradního materiálu, jehož závislost na teplotě je zobrazena na obrázku 34.



Obrázek 34 Náhradní součinitel tepelné vodivosti palivového souboru

Hodnoty vlastnosti materiálů použitých při výpočtu jsou:

 Ocel

hustota	: 7770 kg/m ³
součinitel tepelné vodivosti	: 42 W/(m*K)
měrná tepelná kapacita	: 500 J/(kg*K)

 Hliníková slitina

hustota	: 2700 kg/m ³
součinitel tepelné vodivosti	: 170 W/(m*K)
měrná tepelná kapacita	: 870 J/(kg*K)

 Náhradní materiál palivové kazety

hustota	: 286.8 kg/m ³
součinitel tepelné vodivosti	: 0.45 W/(m*K)
měrná tepelná kapacita	: 4545.8 J/(kg*K)

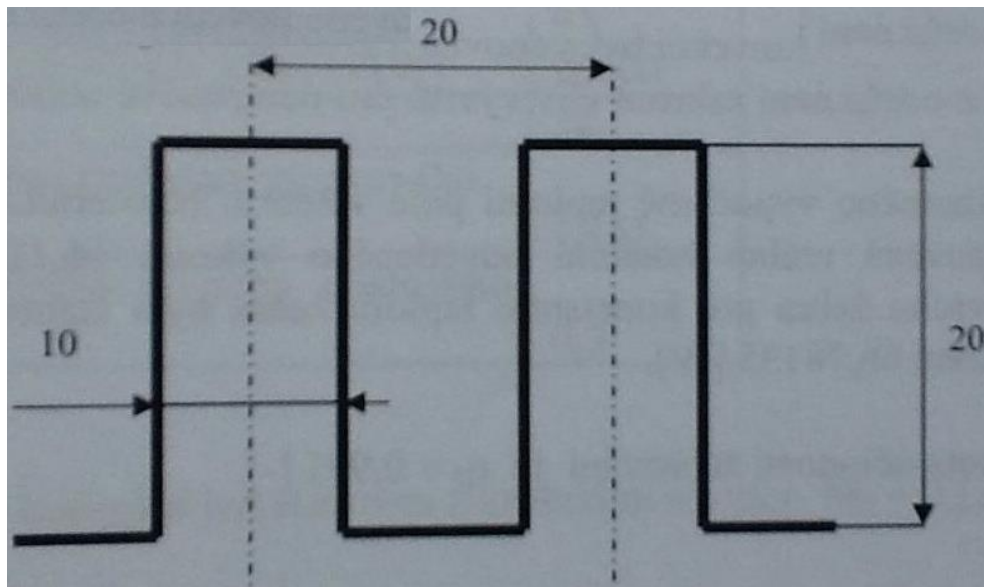
 Polyetylen

hustota	: 920 kg/m ³
součinitel tepelné vodivosti	: 0.7 W/(m*K)
měrná tepelná kapacita	: 870 J/(kg*K)

 Helium

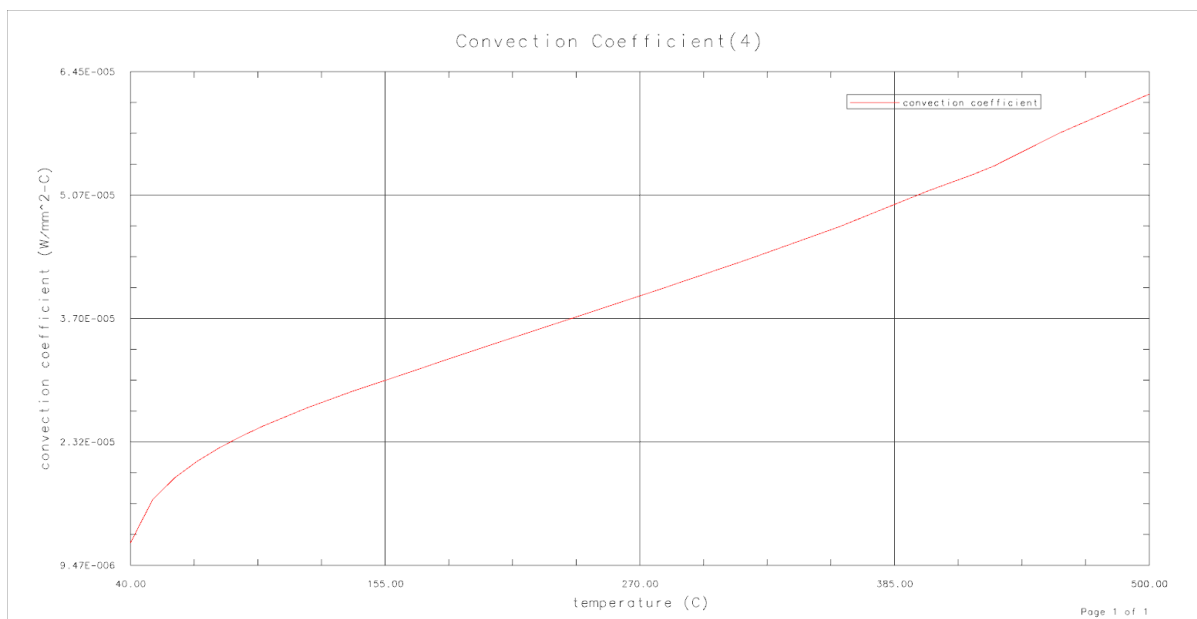
Hustota	: 0.1 kg/m ³
součinitel tepelné vodivosti	: 0.213 W/(m*K)
měrná tepelná kapacita	: 5203 J/(kg*K)

Jako okrajová podmínka do výpočtu vstupuje odvod tepla do okolí žebrovaným vnějším povrchem obalového souboru. Žebra odvádí teplo konvekcí a sáláním do okolí, jehož teplota je 38°C. Tato hodnota je stanovena vyhláškou 317/2002 Sb. Tvar žebra nově navrženého tělesa obalového souboru z lité oceli je zobrazen na obrázku 35.



Obrázek 35 Tvar žebra kontejneru

Hodnota koeficientu žebrování je 3, účinnost žebra 0,98. Závislost součinitele přestupu tepla žebrovaného povrchu na teplotě povrchu obalového souboru se zahrnutím vlivu žebrování, volné konvekce a sálání při okolní teplotě 38°C je zobrazen na obrázku 36.



Obrázek 36 Průběh součinitele přestupu tepla žebrovaného povrchu v závislosti na teplotě povrchu obalového souboru

6.2.2. Tepelné zatížení koše

Koš bude zatížen třemi stavy. Ve vnitřní vestavbě je umístěno 19 palivových kazet, jejichž rozměr na klíč je 234 mm. Aktivní výška kazet je 3550 mm.

$$\text{Tepelný výkon kazety: } Q_1 = Q_c / n = 19 / 19 = 1 \text{ [kW]} \quad (1)$$

$$\text{Objem palivové kazety : } V = 0,16834 \text{ [m}^3\text{]} \quad (2)$$

Vnitřní objemový zdroj tepla v palivovém souboru pro sumární výkon v obalovém souboru 19, 17 a 22 kW:

$$q_{v19} = Q_{19} / V = 5940 \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (3)$$

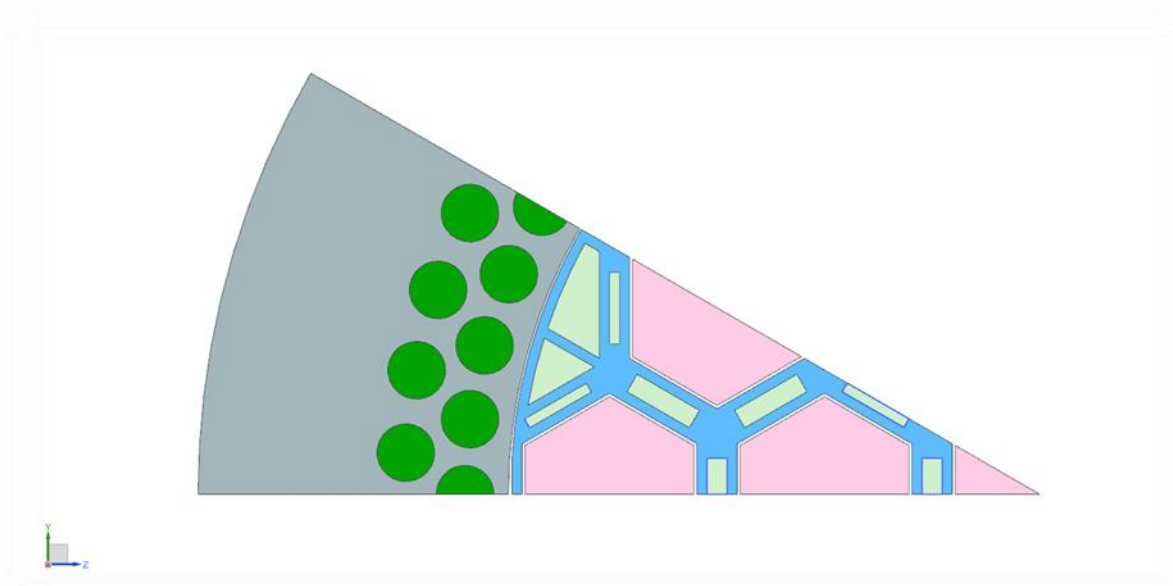
$$q_{v17} = Q_{17} / V = 5315 \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (4)$$

$$q_{v22} = Q_{22} / V = 6879 \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (5)$$

Vzhledem k proměnnému rozložení výkonu po výšce palivového souboru je při dvourozměrném řešení uvažován tzv. "peaking factor" v hodnotě 1.16, kterým se uvedená výše stanovená střední hodnota vnitřního objemového zdroje tepla přenásobuje.

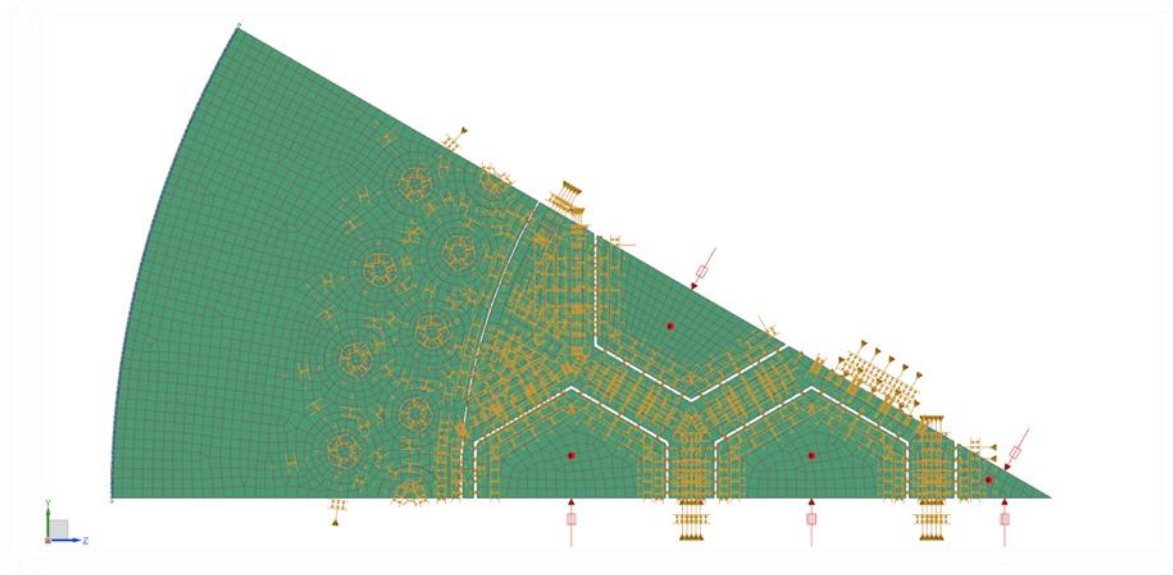
6.2.3. Výpočtový model

Pro výpočet byla využita obvodová symetrie obalového souboru a model vnitřní vestavby a obalového souboru byl zjednodušen na 1/12. Model je znázorněn na obrázku 37.



Obrázek 37 Model obalového souboru s vnitřní vestavbou

Síť je tvořena krychlovými prvky chexa20 s meziuzly o velikosti 12,5 mm. Síť, okrajové podmínky a teplotní kontakty mezi plochami jsou znázorněny na obrázku 38. Mezi kontaktními plochami vnitřní vestavby je uvažován dokonalý kontakt. Mezi kontejnerem a vnitřní vestavbou je uvažována mezera 5 mm vyplněná heliem.



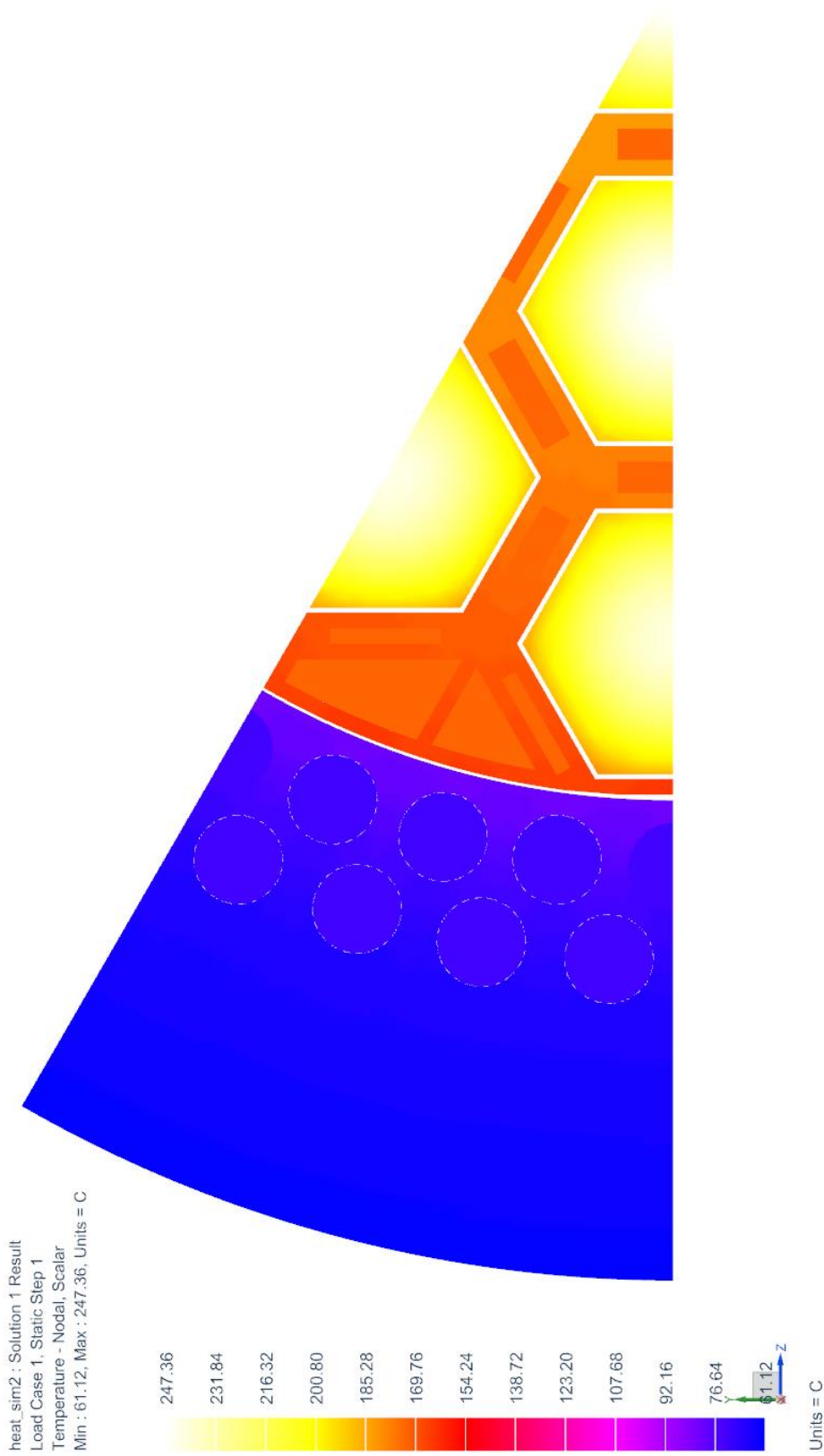
Obrázek 38 Síť a výpočtový model

6.2.4. Stacionární výpočet

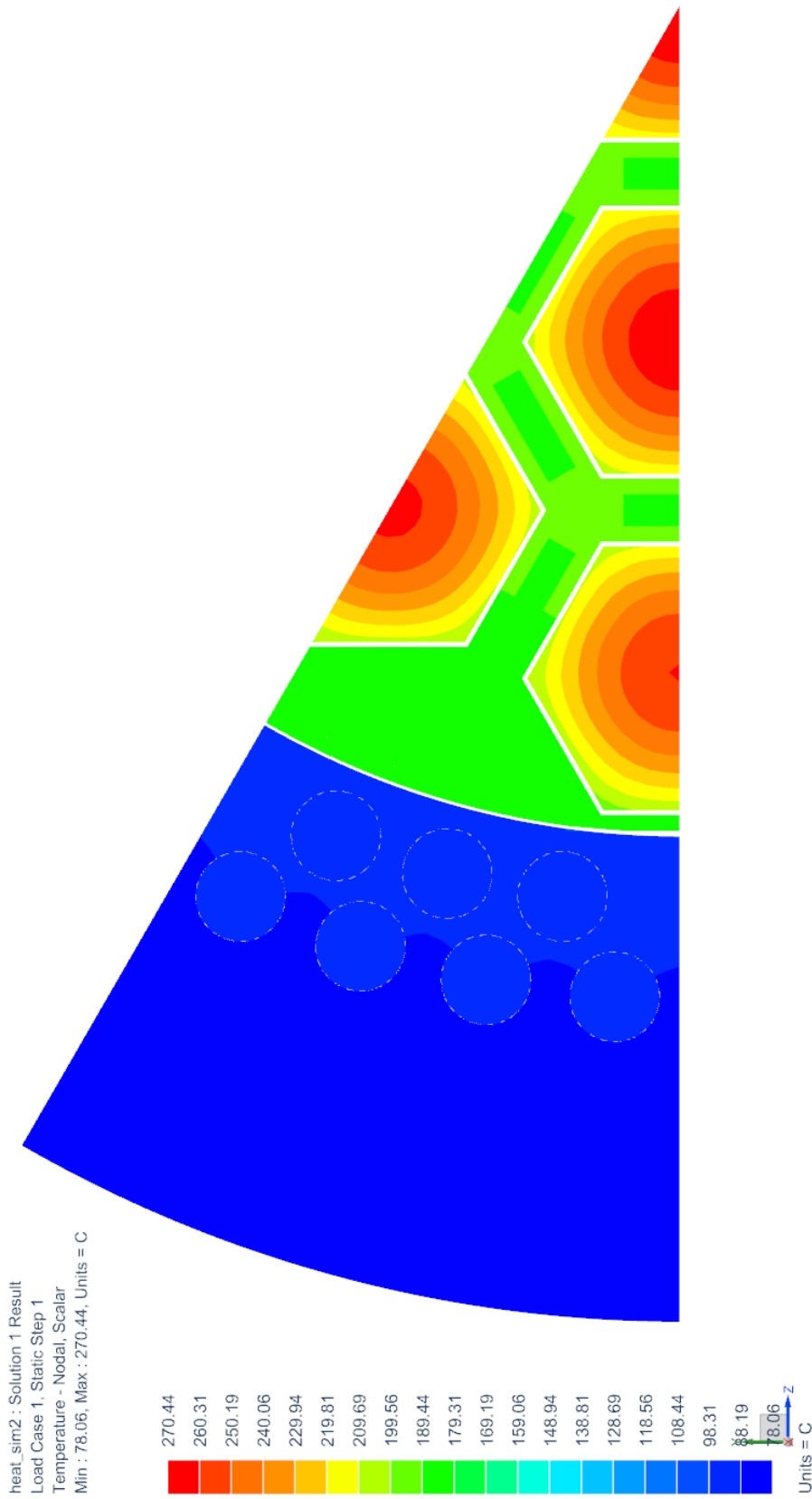
Stacionární výpočet je proveden pro hodnotu tepelného zatížení 17 kW, což je hodnota, na kterou jsou navrženy v současnosti používané koše. Dále je výpočet proveden pro hodnotu 19 kW, což je předpokladaná hodnota pro palivové soubory VVER 1000 firmy TVEL, které se budou vkládat do obalového souboru z bazénu vyhořelého jaderného paliva. Hodnota 22 kW je počítána pro předpoklad neoptimálních vlastností palivového souboru a pro ověření dostatečného dimenzování koše.

Mezními hodnotami jsou:

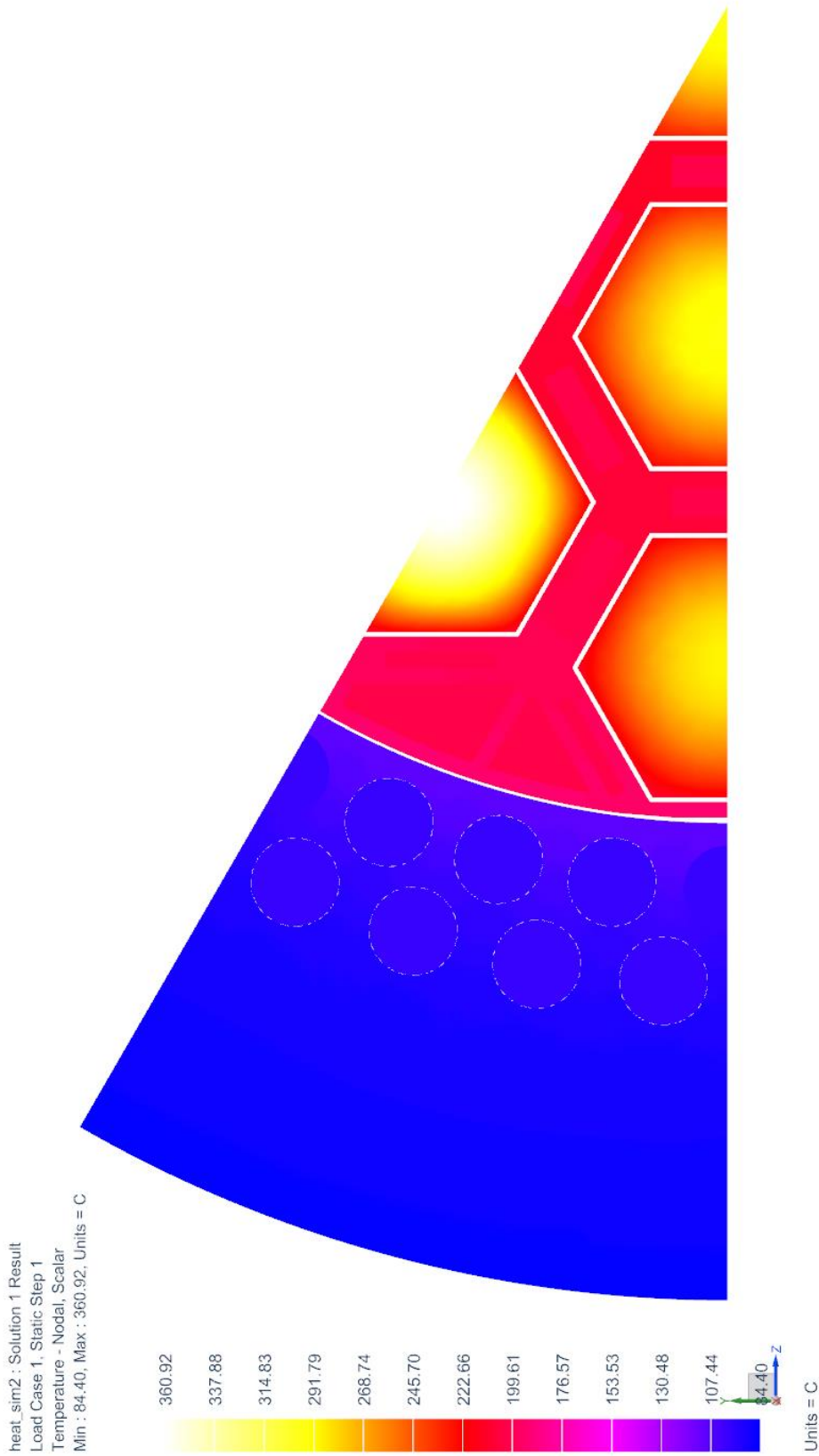
- ✚ Teplota povrchu kontejneru na snadno přístupných místech v režimu výlučného použití 85 °C
- ✚ Teplota palivového pokrytí 350 °C
- ✚ Teplota tání materiálů



Obrázek 39 Teplotní výpočet při zatížení 17 kW a okolní teplotě 25°C, maximální teplota pokrytí je 180°C







Obrázek 40 Teplotní výpočet při zatížení 19 kW, okolní teplotou 38°C, maximální teplota pokrytí je 216,1°C

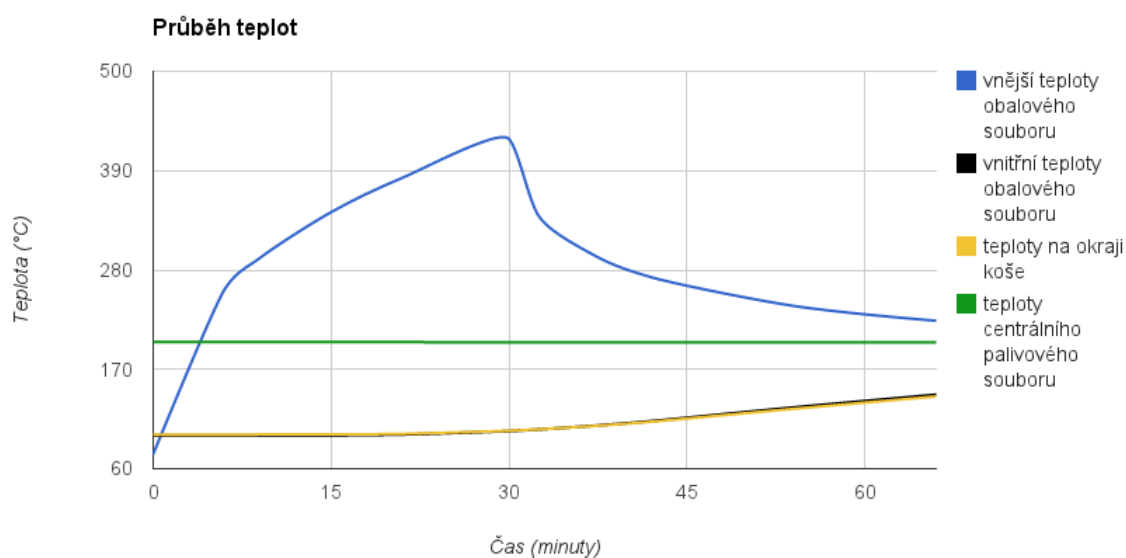


Obrázek 41 Teplotní výpočet při zatížení 22 kW a teplotě okolí 38°C, nejvyšší teplota pokrytí palivového souboru je 233,5°C

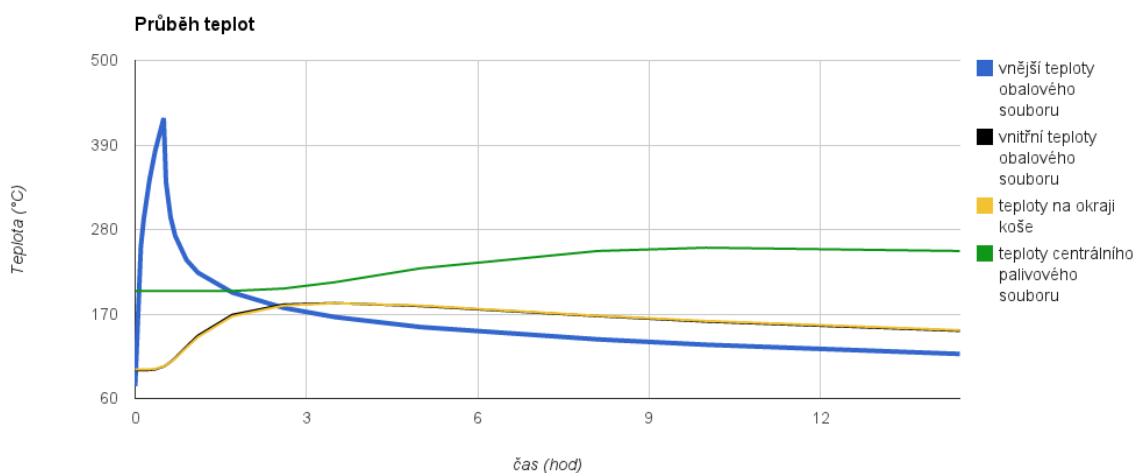
6.2.5. Nestacionární výpočet

Výpočet simuluje odolnost kontejneru teplu podle vyhlášky 317/2002 Sb. Tato norma předpokládá nehodu kontejneru a vystavení ohni tj. teplotě 800 °C po dobu 30 minut. Výsledky jsou zobrazeny v příloze č. 4. Teploty významných částí kontejneru a koše byly pro názornost časového průběhu vyneseny do obrázku 42 a 43:

-  Teplota povrchu kontejneru na povrchu
-  Teplota kontejneru uvnitř
-  Vnější teplota koše
-  Teplota ve středovém souboru



Obrázek 42 Průběh teplot 0-1 hod



Obrázek 43 Průběh teplot 0-12 hod

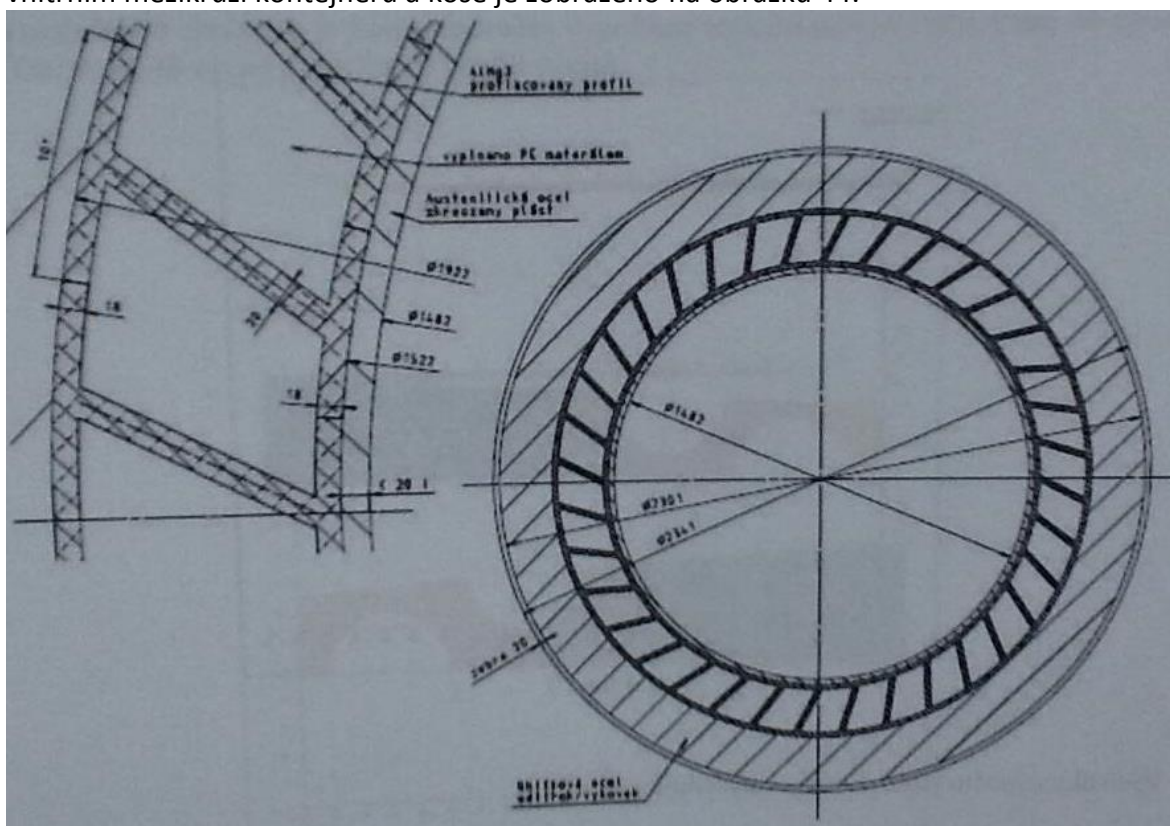
Z grafů je patrný nárůst teploty povrchu a jeho okamžitý pokles ve chvíli, kdy se teplota okolí po 30 minutách sníží na 38 °C. Je důležité sledovat průběh teploty centrálního palivového souboru, která by neměla přesáhnout 350 °C z důvodů udržení hermetičnosti palivových proutků. Její hodnota dosáhne maxima v čase 8 hodin od počátku oteplování. Zbylé hodnoty teplot vnějšího povrchu koše a vnitřního povrchu kontejneru jsou si podle předpokladu velmi blízké a svojí diferencí značí směr a intenzitu tepelného toku. U výpočtu bylo zanedbáno sálání mezi elementy koše, jelikož je výrazně nižší než vedení tepla.

6.2.6. Závěr z tepelných výpočtů

Tepelné výpočty navržené vnitřní vestavby značí, že koš splňuje normy i pro palivo o zbytkovém tepelném výkonu 22 kW. Při zatížení 19 kW plně splňuje normy havárie obalového souboru.

6.3. Možnosti neutronového stínění

Neutronové stínění je řešeno umístěním polyetylenu do 96 otvorů, které jsou umístěny u vnitřní stěny obalového souboru CASTOR. Tyto otvory zhoršují mechanické vlastnosti kontejneru a jsou náročné na výrobu. Stínění by bylo možné řešit umístěním stínícího materiálu dovnitř kontejneru, nebo na jeho povrch. Jeho umístění do profilů ve vnitřním mezikruží kontejneru a koše je zobrazeno na obrázku 44.



Obrázek 44 Neutronové stínění uvnitř kontejneru

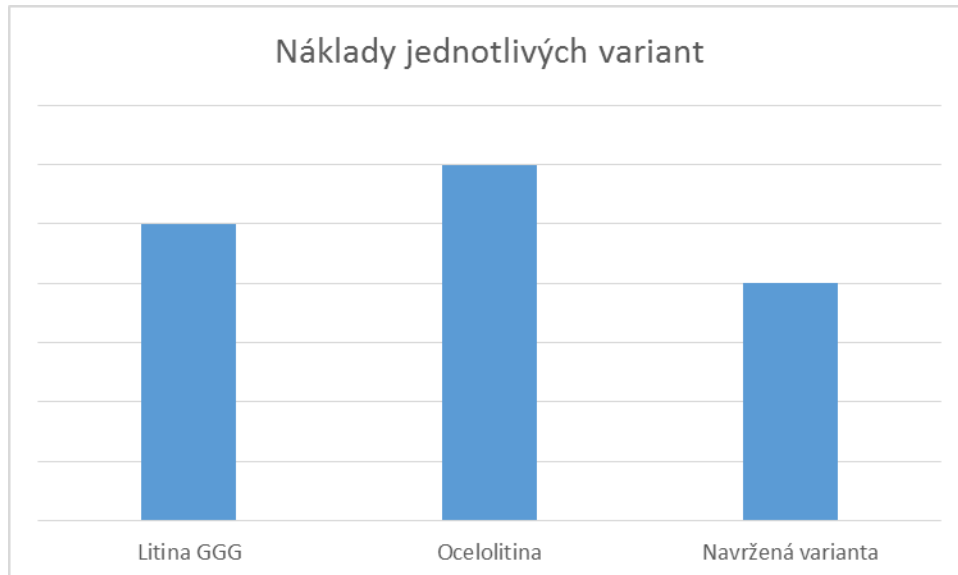
S ohledem na provedené tepelné výpočty u vnitřní vestavby navržené v této práci vyvstává otázka teplotní stálosti polyetylenů. Ve výpočtu je uvažován součinitel tepelné vodivosti náhradního materiálu pásu – polyetylen a hliníková slitina vyztužená ocelí o velikosti $22,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Nejvyšší teplota polyetylenů při zatížení koše výkonem 19 kW u stacionárního výpočtu nedosahuje $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Jelikož teplota tání vysokohustotního polyetylenů je přibližně $150 \text{ }^\circ\text{C}$, dalo by se o použití této varianty uvažovat.

7. Technicko ekonomické hodnocení

U ekonomického hodnocení nebudou uvažovány náklady na konstruovaný koš. Tato data jsou ve společnosti Škoda JS důvěrná. Cena kontejneru se skládá jednak z nákladů na materiál, která je u všech variant obdobná a fixních nákladů na mechanické, technologické a metalurgické zkoušky. Mění se pouze náklady související se zvolenou technologií výroby, tato hodnota je však tajná. Proto bylo přistoupeno k ekonomickému hodnocení obalového souboru, tj. tělesu kontejneru, u kterého jsou výše zmíněné faktory předvídatelnější.

Nejvýznamější položkou nákladů u kontejneru na vyhořelé jaderné palivo je cena tělesa kontejneru, která nejvýznamněji definuje konečnou cenu celé sestavy. Hmotnost prázdného kontejneru, který se v současnosti dodává na elektrárnu Temelín, je 97 860 kg [106]. Toto těleso kontejneru je vyrobeno z tvárné litiny s kuličkovým grafitem (Litina ggg). Nově konstruované těleso se bude mimo jiné lišit i tím, že bude z lité oceli (ocelolitina).

V kapitole 6.3 této práce je zmíněna konstrukční varianta (navržená varianta), díky které by se hmotnost tělesa kontejneru snížila o 40 %. V grafu 1 jsou znázorněny náklady na jednotlivá tělesa kontejneru. Částky nejsou uvedeny, jelikož se jedná o interní informace společnosti Škoda JS.



Graf 1 Náklady variant

8. Závěr

V této diplomové práci byly vytvořeny návrhy vnitřní vestavby kontejneru na vyhořelé jaderné palivo. Na základě rešerše druhů paliva, konkurenčních a patentovaných řešení byly vytvořeny dva návrhy vnitřních vestaveb koše. Detailně na úroveň výrobních výkresů byla rozpracovaná jedna z variant, pro kterou byly provedeny kontrolní výpočty. Modální analýzou a tepelnými výpočty bylo ověřeno, že navržená varianta splňuje legislativní nároky, které jsou kladeny na vnitřní vestavbu.

Návrhy obsahují řadu inovací a tím vyvstává otázka, zda vznikne ve velice konzervativním oboru prostor pro uplatnění alespoň části z nich v praxi, jelikož u přínosů každé z ideí byly zmíněny i vzniklé otázky. Autor předpokládá, že v tomto dynamicky rozvíjícím se oboru, nalezne uplatnění alespoň část ze zmíněných myšlenek. U návrhu vytvořeného metodou práškové metalurge lze předpokládat výrobu košů o vyšší jakosti s lepšími mechanickými a geometrickými vlastnostmi. S ohledem na náklady výroby však nelze předpokládat její brzké použití. Druhý návrh byl řešen tak, aby mohl být realizován současným strojním vybavením a dával smysl z ekonomického hlediska. Při respektování mezinárodních patentových nároků konkurence, které velice komplikují podobu konstrukčního řešení, proto vznikl návrh spojení trojcípích elementů. V úvodu práce byla vysvětlena problematika palivových souborů, její skladby, chemického složení a vlivu ionizujícího záření na okolí. Byly analyzovány alternativní způsoby ukládání vyhořelého jaderného paliva i kontejnery několika výrobců pro palivo různých tvarů a výkonů. Tyto poznatky jsou uvedené v příloze této práce se též využily jako výchozí informací pro patentovou a legislativní rešerši. Dále byly shrnuté poznatky obohaceny o zkušenosti ze společnosti Škoda JS a na tomto základě bylo vytvořeno nové konstrukční řešení.

Tato varianta nabízí řešení problémů, které vznikají při současné výrobě tyčového hexagonového profilu protlačováním. Díky nižší hmotnosti na metr délky nebude docházet k borcení hran, trhlinám v povrchu, velké drsnosti a rozměrové nestálosti. V této práci navržený profil odstraňuje zmíněné problémy, při současném prodloužení času na montáž a náročnějším spojení. Tento návrh řeší vzniklé problémy z výroby protlačováním a ukazuje jednu z cest pro realizaci vnitřní vestavby na vyhořelé jaderné palivo.

Navržené řešení bylo podrobena výpočtové kontrole pomocí MKP, kdy byly použity okrajové podmínky, které vyplývají z předepsaných crashtestů v zákoně (317/2002 Sb.). Výsledné hodnoty byly podrobena zpětné analýze podle příslušné normy a bylo zjištěno, že navržený koš zcela odpovídá těmto normám a předpisům. Analýzou byly zkoumány stacionární a nestacionární stavy obalového souboru. Pro stacionární stav byl proveden výpočet zatížením třemi teplotními výkony a u nestacionárního výpočtu byl zkoumán stav obalového souboru během půlhodinového zatížení ohněm o teplotě 800°C a následné patnáctihodinové chladnutí.

Seznam literatury:

- [1] STANĚK, J., NĚMEJC, J. Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací. Plzeň: ZČU, 2005
- [2] ŘAŠA, J., ŠVERCL, J. *Strojnické tabulky*. Scientia, Praha, 2004
- [3] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra*. Brno: Computer Press, 1999
- [4] LAŠOVÁ, V. Metoda konečných prvků ve výpočtech obráběcích strojů. Plzeň: ZČU, 2011
- [6] ŠTAMBERG, K. Technologie jaderných paliv II. Praha: ČVUT, 2005
- [7] HEŘMANSKÝ, B. Jaderná zařízení. Praha: ČVUT, 1990

Ostatní zdroje:

- [100] Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem práce.

Internetové zdroje:

- [101] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/obsah.htm> cit. ke dni 1.12.2013
- [102] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1523_web.pdf cit. ke dni 2.12.2013
- [103] <http://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/zajimavosti-z-praxe-radiacni-ochrany/pouzivani-rentgenu-lekarske-ozareni/> cit. ke dni 3.12.2013
- [104] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k31.htm> cit. ke dni 4.12.2013
- [105] http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/mezisklady_4.html cit. ke dni 5.12.2013
- [106] http://is.muni.cz/th/209747/pedf_m/Odvod_tepla_a_vyvin_tepla_vyhoreleho_jaderneho_paliva_v_ulozistich.txt cit. ke dni 6.12.2013

- [107] <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Co-je-hlubinne-uloziste> cit. ke dni 7.12.2013
- [108] <http://www.sellafieldsites.com/wp-content/uploads/2012/08/Ong-recAGR.jpg> cit. ke dni 8.12.2013
- [109] https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/imgs/jaderna-bezpecnost/MSVP_60Castoru_2.jpg cit. ke dni 9.12.2013
- [110] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1532_web.pdf cit. ke dni 10.12.2013
- [111] <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energie.html> cit. Ke dni 11.12.2013
- [112] http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/048/40048126.pdf cit. ke dni 12.12.2013
- [113] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1081_prn.pdf cit. ke dni 13.12.2013
- [114] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1089_prn.pdf cit. ke dni 14.12.2013
- [115] <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/301/301852.pdf> cit. ke dni 15.12.2013
- [116] http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=JP&NR=2008292251A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20081204&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en_EP cit. ke dni 16.12.2013
- [117] <http://www.findpatent.ru/patent/165/1653456.html> cit. ke dni 17.12.2013
- [118] http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/8_317_2002_Sb.pdf cit. ke dni 18.12.2013
- [119] http://ntc.zcu.cz/download/kos-SKODA440_rev.pdf cit. ke dni 19.12.2013
- [120] <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/11749/bakalarka-batek2010official.pdf?sequence=1> cit. ke dni 20.12.2013
- [121] http://www.henkel.co.uk/3185_UKE_HTML.htm?countryCode=ke&BU=industrial&parentredDotUID=productfinder&redDotUID=1000000ID38 cit. ke dni 21.12.2013

Seznam příloh

- Příloha č. 1 Přepočet jednotek záření a porovnání dávek ionizujícího záření
Příloha č. 2 Kontejnery a vnitřní vestavby
Příloha č. 3 Specifikace požadavků výrobku
Příloha č. 4 Výsledky nestacionárního výpočtu

Obsah dvd

soubory:

diplomová práce.PDF

přílohy.PDF

PŘÍLOHA č. 1

Přepočítání jednotek záření a porovnání dávek ionizujícího záření

Přepočet jednotek

becquerel (Bq) jednotka intenzity záření

curie (Ci) aktivita radioaktivní látky, při níž dojde k jednomu rozpadu radioaktivního jádra za sekundu – jednotka soustavy SI

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ Ci/cm}^2 = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/cm}^2$$

$$1 \text{ Bq/cm}^2 = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci/cm}^2$$

sievert (Sv) množství absorbované energie v určité hmotnosti
roentgen (rem) starší jednotka nahrazena sievertem

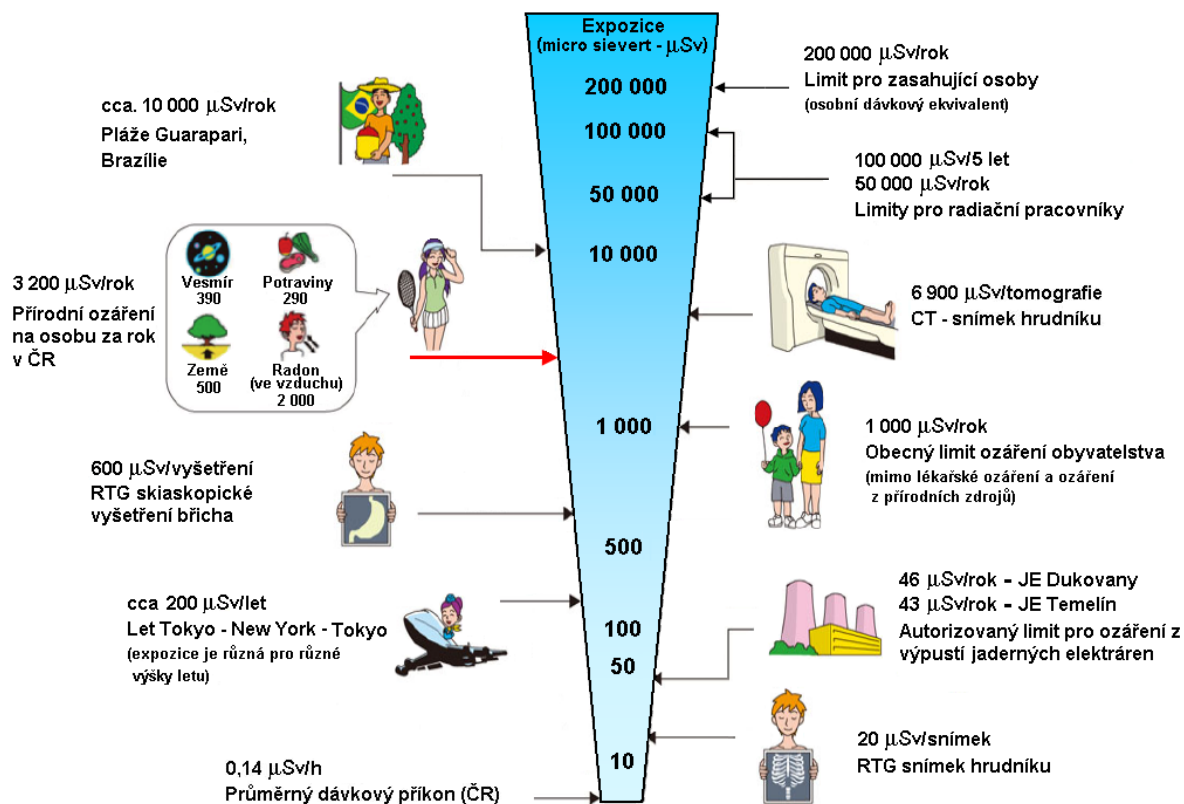
$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ Sv/h} = 100 \text{ rem/h}$$

Příklady záření [103]

Příklady některých expozičních ionizujícímu záření včetně limitů platných v ČR

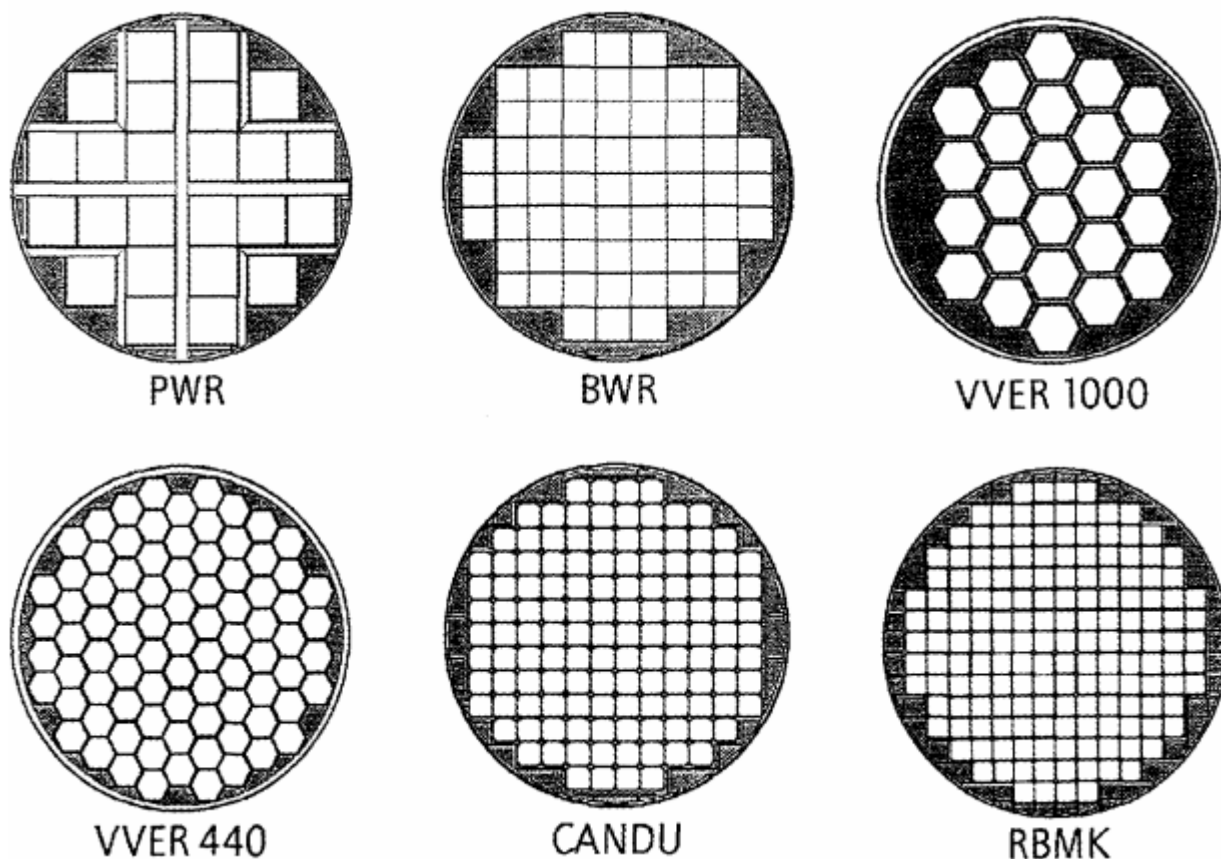
Jednotky : μSv



PŘÍLOHA č. 2

Kontejnery a vnitřní vestavby

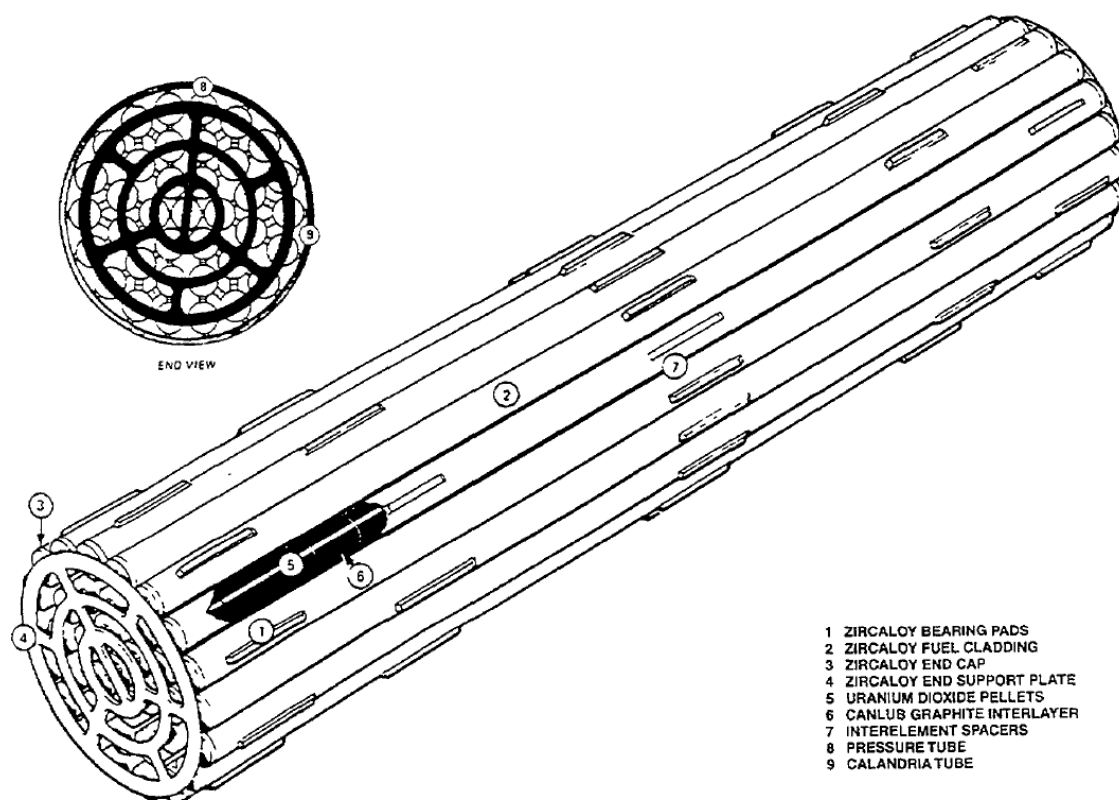
Druh jaderného paliva, způsob jeho ukládání a dominující faktory národních energetických koncepcí lze rozdělit podle jednotlivých zemí, které jsou ovlivňovány geografickými, historickými a politickými vlivy. V kapitole je níže uvedeno několik zemí a v nich vybrán nejrozšířenější zástupce kontejnerů, nebo vnitřních vestaveb. Lze sledovat specifika v konstrukcích na základě různých profilů paliva, které jsou znázorněny na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Tvary používaných košů [114]

1. Kanada

Koš pro 36 svazků použitého jaderného paliva typu CANDU používaný pro kontejnery NAC/NLI 6502. Koš je vyroben z vnějšího a vnitřních plášťů silných 12 mm, vyrobených z uhlíkové oceli vyplněné betonem o vysoké hustotě. Do koše se vkládá palivo po minimálně 10 letech chlazení v bazénu. Hmotnost prázdného koše je 59 t, naloženého 69. [113]



Obr. 2.2 Koř kontejneru Candu [113]

2. Česká republika

České republice měla v roce 1996 na výběr z několika výrobců kontejnerů pro skladování a trvalé uskladnění vyhořelého jaderného paliva, kteří jsou uvedeni v tabulce č.2.1. [113]

Země	Společnost	Typ kontejneru
Spolková republika Německo	Nukem	CASTOR
Česká republika	Škoda	ŠKODA
Francie	Transnucléaire	TN
Rakousko/USA	Voest Alpine/NAC	NAC

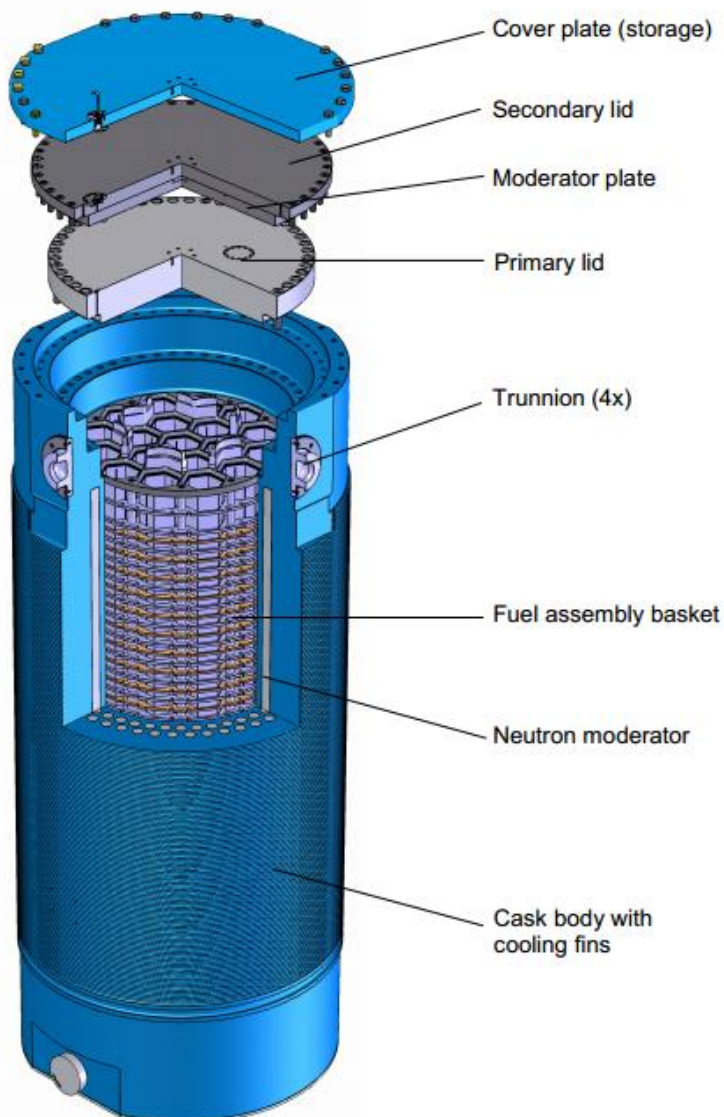
Tabulka č.2.1 Seznam potenciálních výrobců kontejnerů pro ČR [113]

S ohledem na nejnižší cenu, nejnovější technologie a konstrukční úpravy vyhrály kontejnery typu CASTOR 440/84. Hlavním důvodem bylo splnění požadavku pro uskladnění v té době nově používaného paliva v elektrárně Dukovany, u kterého se zvýšilo obohacení z 3.6 % na 4.3 %. [113]

V současnosti se v ČR používají kontejnery CASTOR 1000/19 na JE Temelín navržené a vyráběné německou společností GNS GmbH. Řez kontejnerem je zobrazen na obr. 2.3.

Kontejner je navržen pro transport a skladování paliva obohaceného až na 5 hm% U^{235} o výkonu 60 GWd/MTU a 17 kW/kontejner. V této práci je pro palivo uvažována hodnota 19 kW, pro mezní stav 22 kW. Kontejner je vysoký 5,5m o průměru 2,33 m, vnitřní průměr je 1,47 m a výška koše je 4,63 m. Hmotnost uskladněného kontejneru je 116 tun. [112]

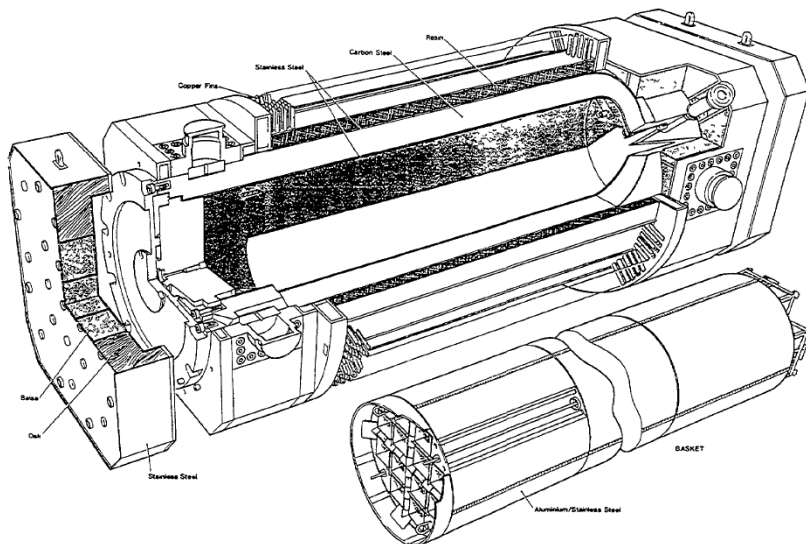
Koš se sestává z 19 hexagonálních tyčí z nerezové oceli s příměsí bóru. Vložené plechy podélně jsou střídavě z nerezové oceli a eloxovaného hliníku, což zajišťuje splnění mechanických i tepelných nároků na koš. Koš je sešroubován 12 závitovými tyčemi. [112]



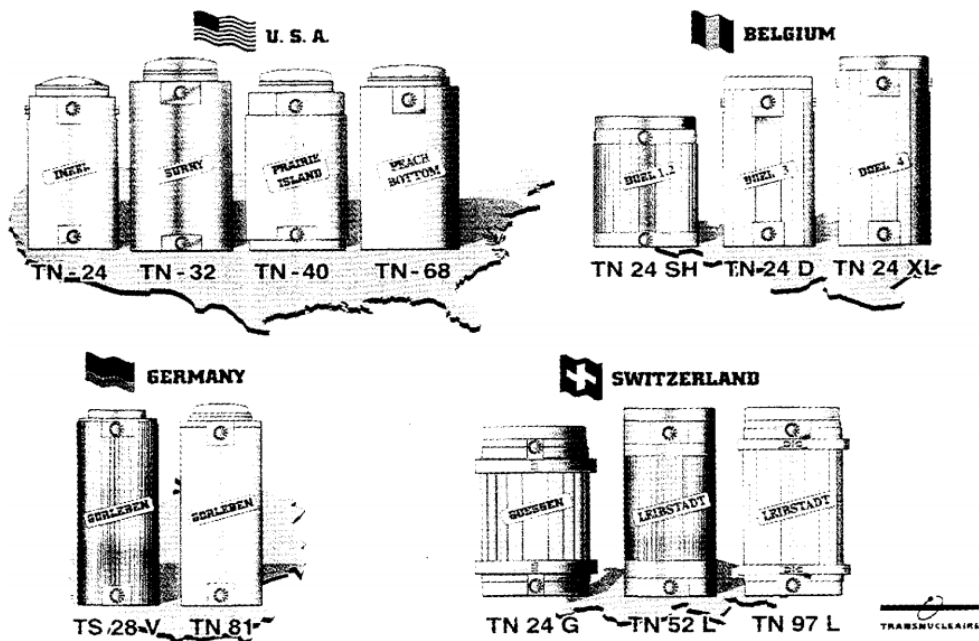
Obr. 2.3 Kontejner Castor 1000/19 s košem navrženým v GNS GmbH [112]

3. Francie

Typ kontejneru TN 12 slouží k uskladnění 12 palivových tyčí z reaktoru o výkonu 900 MW. Kontejnery pro palivo z reaktorů o vyšším výkonu se liší pouze délkou. [113]



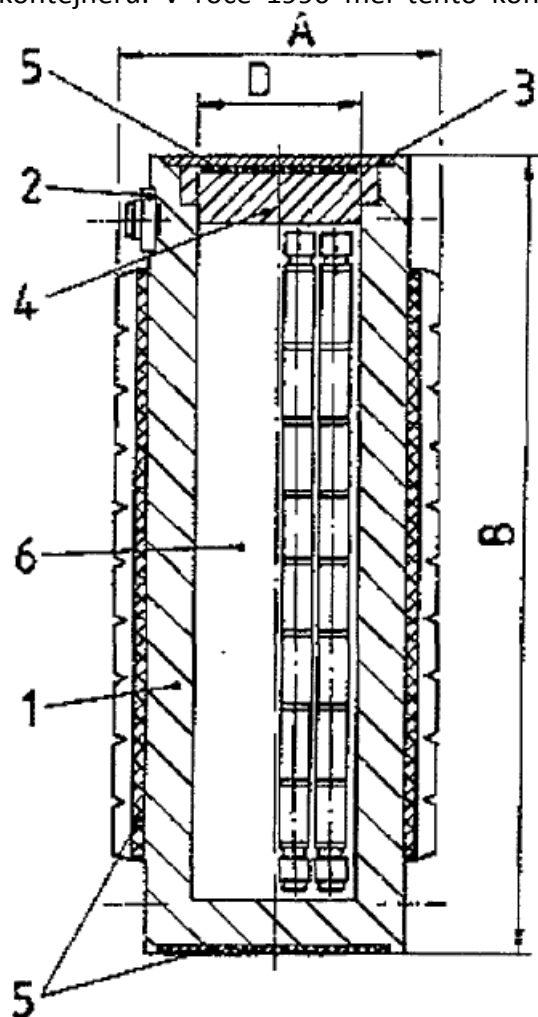
Obr. 2.4 Kontejner a koš TN 12 [113]



Obr. 2.5 Přehled kontejnerů řady TN [114]

4. Německo

Kontejner TN 1300 pro palivo z lehkovodních reaktorů o výkonu 1300 MW, jehož tělo je z litiny (GGG 40.3) odlito vcelku, s vnitřní vložkou z nerezové oceli o tloušťce od 8 mm do 50 mm a stíněným víkem z kované oceli X5CrNi134 přišroubovanému pomocí 36 šroubů k tělu koše. Neutronové stínění je provedeno pomocí směsi z pryskyřice uložené mezi chladícími žebry. Spodní a horní tlumič je přišroubovaný čtyřmi šrouby ke kontejneru. V roce 1990 měl tento kontejner ceníkovou cenu 17,3 milionů Kčs. [113]



Key

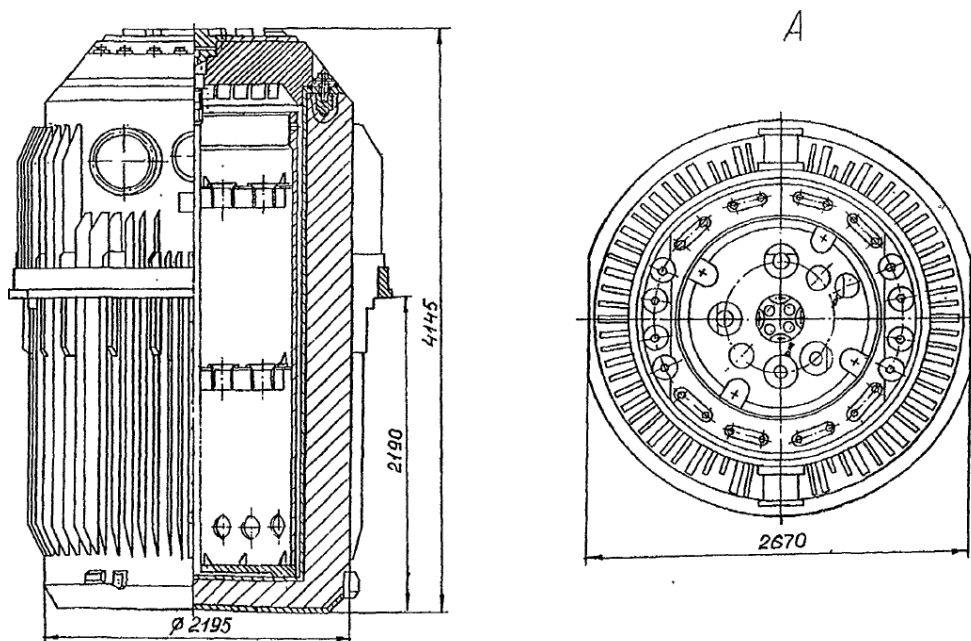
- 1 cask body
- 2 lifting trunnion
- 3 secondary lid
- 4 primary lid
- 5 moderator
- 6 FE shaft

main dimensions (mm)	TN-1300
A	∅2425
B	5967
C	2425
D	∅1220
weight (kg)	
transport weight (loaded)	121,000
max. weight (handling)	115,500
no. FE's and weight	12peace 10,000

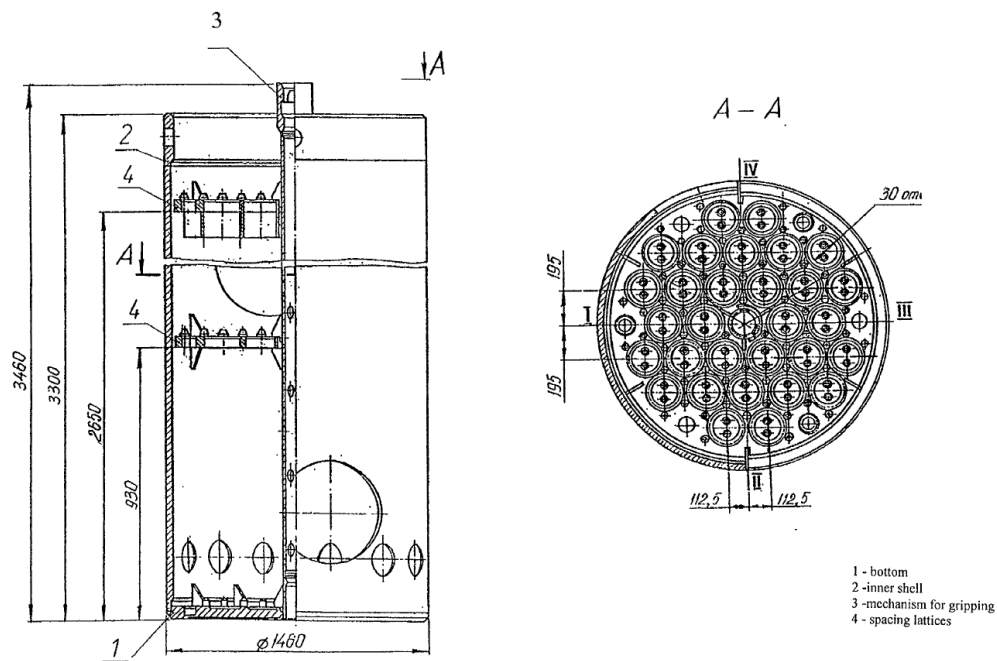
Obr. 2.6 Kontejner a koš tn 1300 [113]

5. Ruská federace

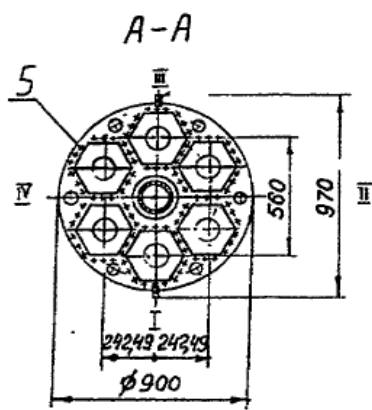
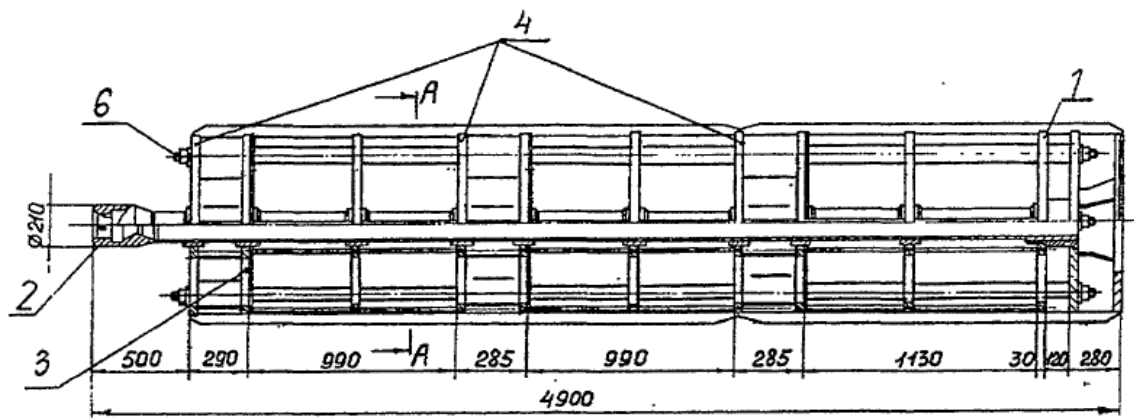
Kontejnery používané v Ruské federaci pro palivo z reaktorů VVER 1000 jsou TK-6 a TK-10-B, jejich koše jsou znázorněny na obrázcích. [113]



Obr. 2.7 Kontejner Tk 6 pro palivo z reaktoru VVER 1000 [113]



Obr. 2.8 Koš kontejneru TK 6 [113]



- 1 - base
- 2 - mechanism for gripping
- 3 - grid
- 4 - guide bushing
- 5 - absorber rod
- 6 - tie

Obr. 2.9 Koš kontejneru TK-10-B pro palivo z VVER 1000 [113]

PŘÍLOHA č. 3

Specifikace požadavků výrobku

			<i>Současný stav</i>	<i>Varianta 1</i>	<i>Varianta 2</i>	<i>Konkurence A</i>	<i>Idealni dil</i>
	Důležitost kriteriá (1-3)						
materiál							
	chemické prvky	1	5	5	4	4	5
	vazby mezi prvky	1	3	5	1	4	5
	vyrobitelnost	2	4	3	2	3	4
	opracovatelnost	2	2	3	4	3	4
	tvářitelnost	3	1	4	2	2	4
	dosahnutelná kvalita	2	3	4	4	3	4
	mech vlastnosti	2	4	2	3	3	4
	pohlcování záření	3	4	5	4	4	5
	teplotní vlastnosti	3	3	4	3	3	4
	homogenita	2	3	5	3	3	5
vyrobitelnost							
	tyci	2	2	5	5	4	5
	kose	3	4	4	3	4	4
mech vlastnosti							
	pevnost kose	3	4	3	3	3	4
	pevnost kontejneru	3	4	4	4	3	3
	narazuvzdornost	3	4	3	3	3	4
	teplotni vodivost	2	3	4	4	2	4
	teplotni zivotnost	2	3	4	2	3	4
	teplotni tlumivost	1	4	3	4	3	4
	zarení	3	3	5	4	4	5
	spoje	1	4	5	2	4	5

životnost

pevnost	2	4	4	3	5	5
creep	2	3	4	4	3	4
stárnutí	3	3	5	4	2	5
degradace	2	2	4	3	3	4

montáž

tyčí	2	4	5	3	4	5
koše	3	2	3	2	3	4
celku	1	3	4	4	4	4
spoje	3	3	4	2	3	4

bezpečnost

dle mez. norem	3	4	4	3	3	4
crash testy	3	3	3	3	4	4
přidaná hodnota	2	3	5	4	2	5
možná rizika	2	3	4	2	2	4

ekonomie

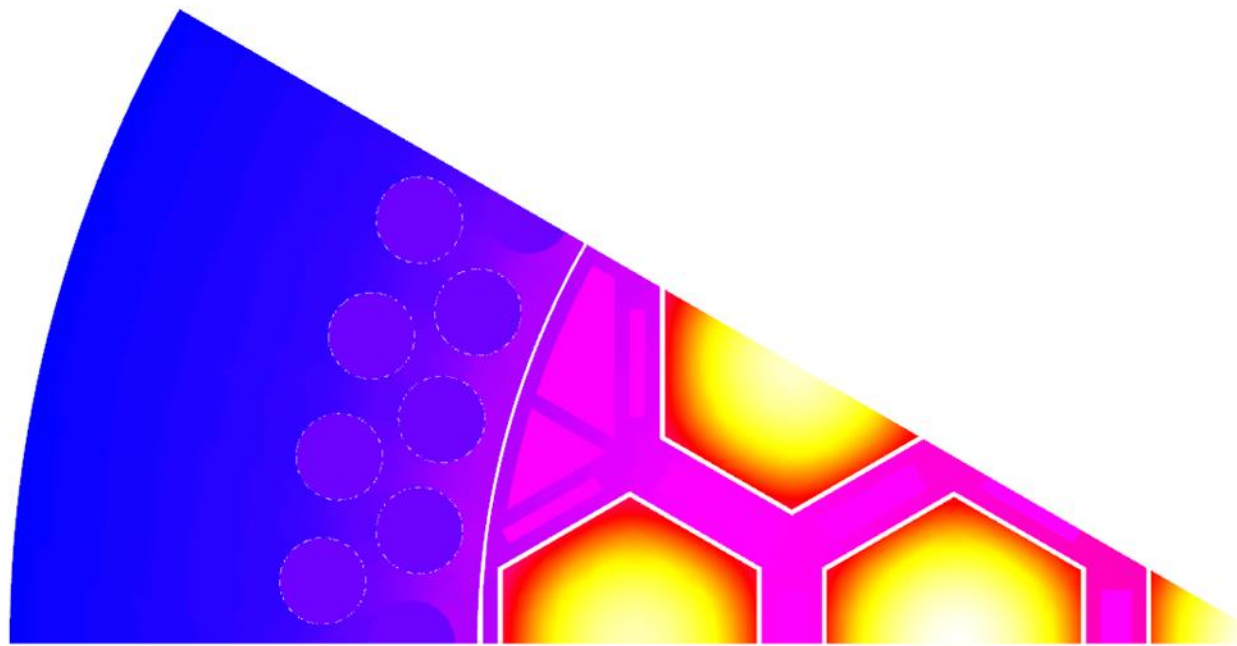
náklady na výrobu	3	2	1	4	3	4
poměr cena/užitné vlastnosti	2	3	4	3	3	4

PŘÍLOHA č. 4

Výsledky nestacionárního výpočtu

T = 0 s Ustálený stav, zatížení 19 kW, teplota okolí 38 °C

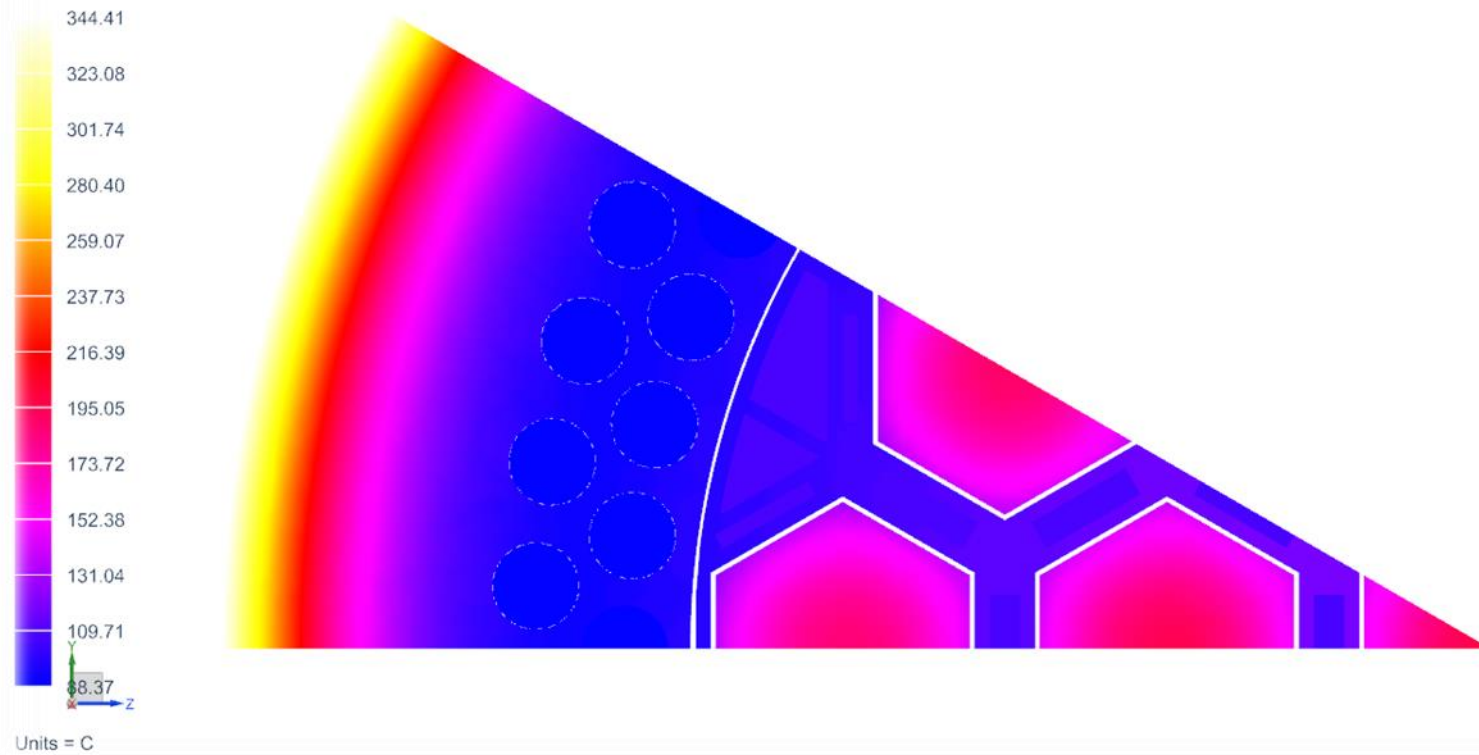
heat_sim2 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 78.06, Max : 201.66, Units = C



Units = C

T = 15 minut, teplota okolí 800°C.

heat_sim2 : Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 6, Time = 9.000e+002 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 88.37, Max : 344.41, Units = C



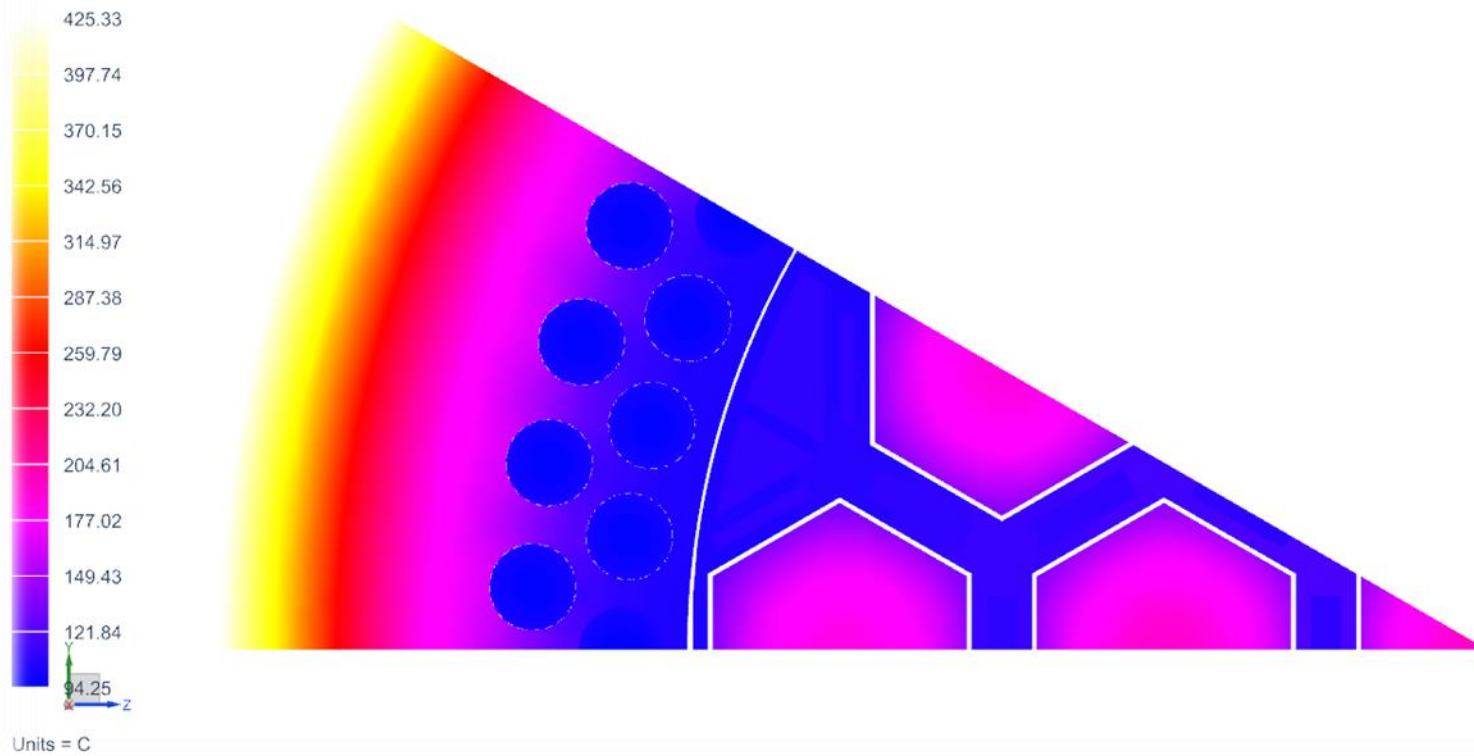
T = 0,5 hodiny změna teploty okolí z 800°C na 38 °C.

heat_sim2 : Solution 2 Result

Load Case 1, Increment 11, Time = 1.800e+003 s

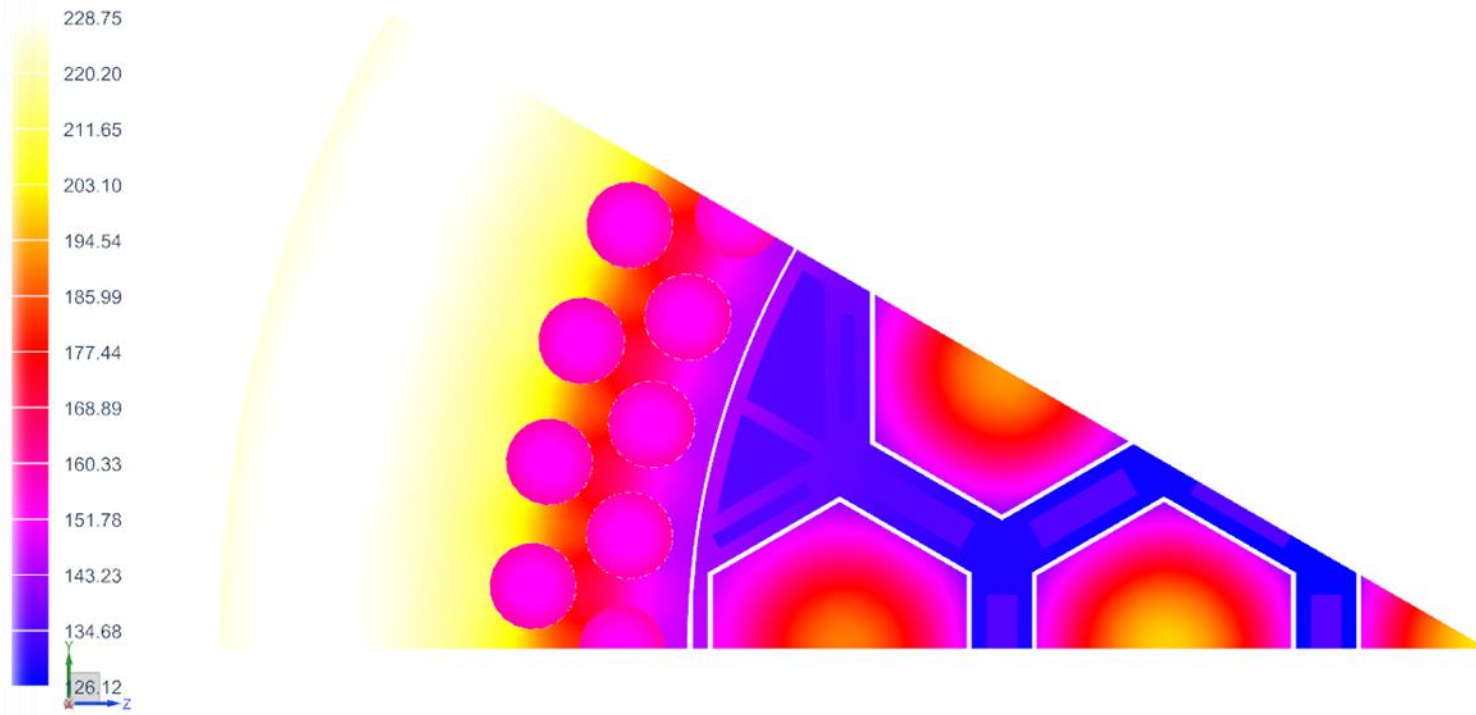
Temperature - Nodal, Scalar

Min : 94.25, Max : 425.33, Units = C



T = 1 hodina

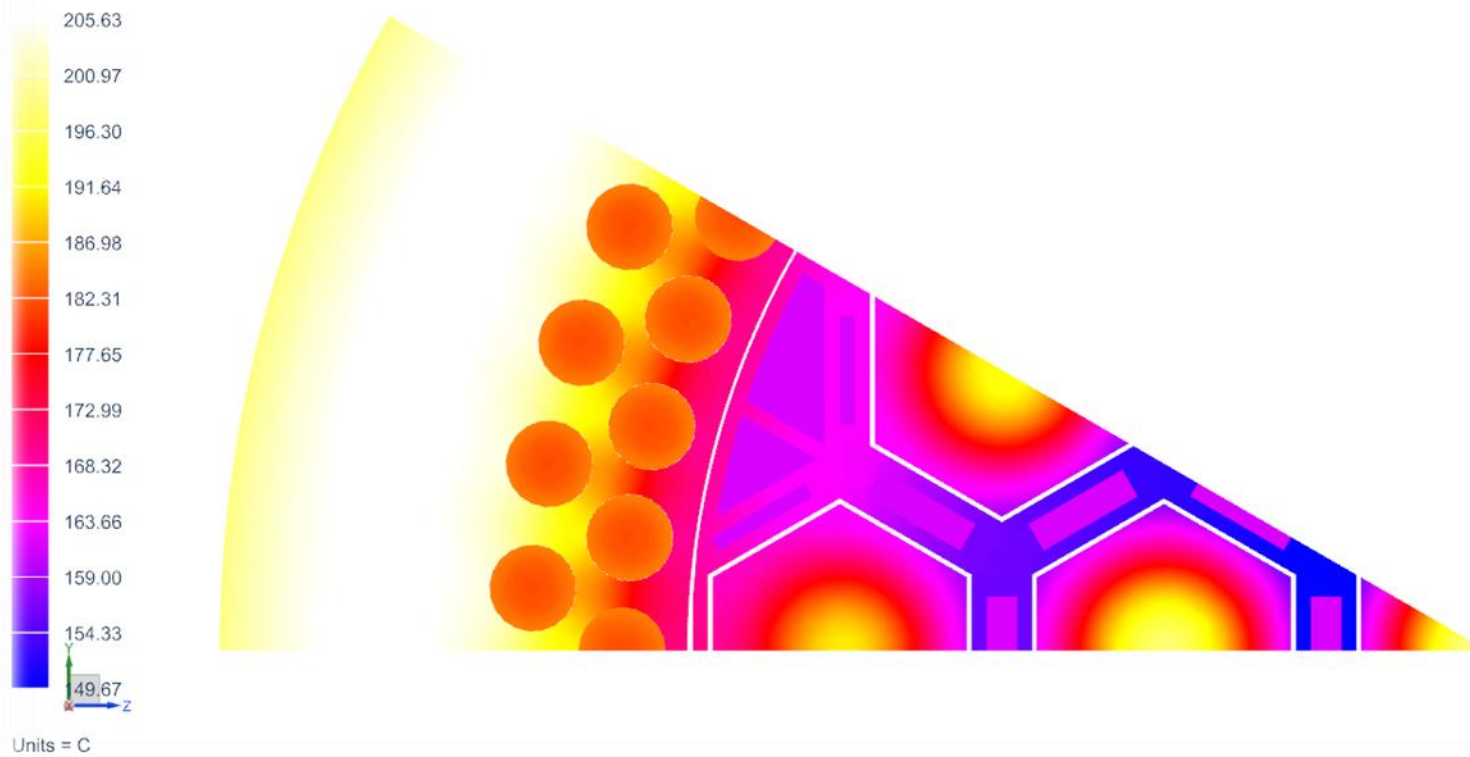
heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 3, Time = 3.961e+003 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 126.12, Max : 228.75, Units = C



Units = C

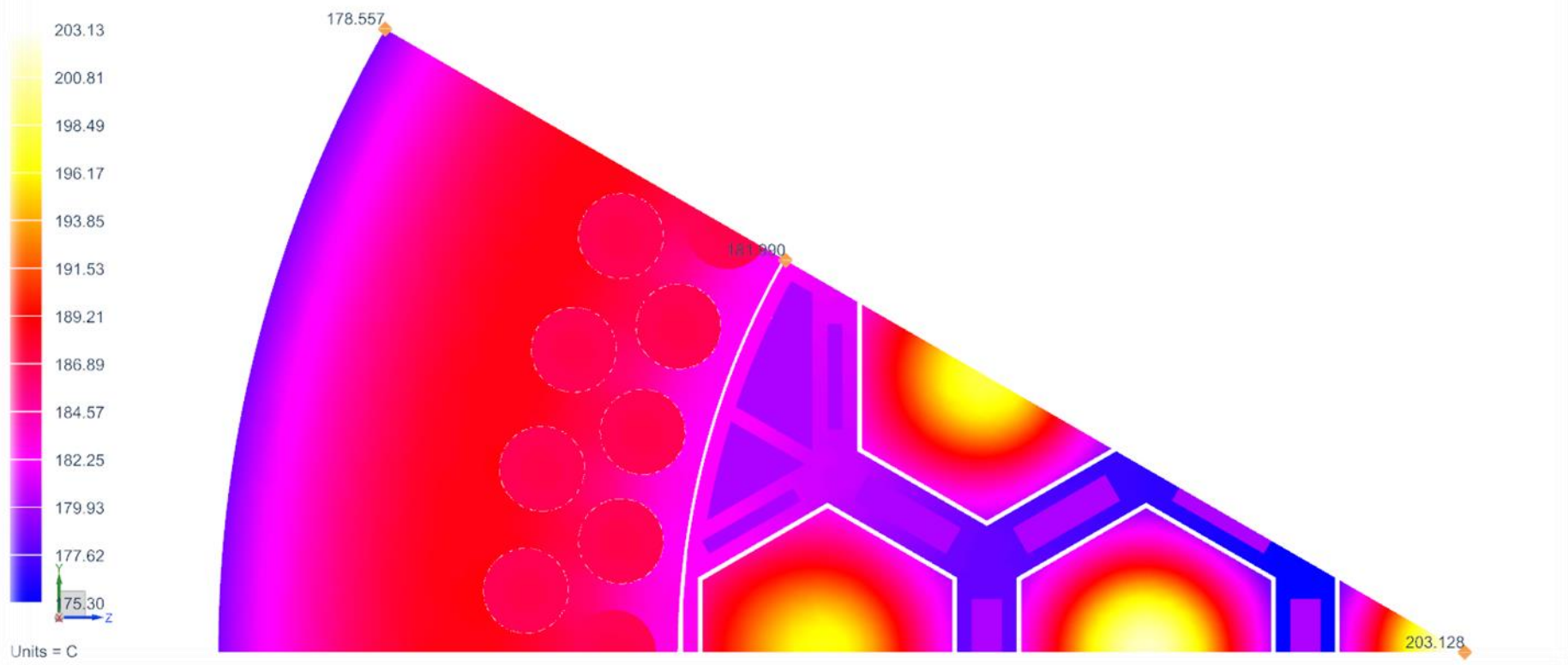
T = 1,5 hodiny

heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 5, Time = 6.121e+003 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 149.67, Max : 205.63, Units = C



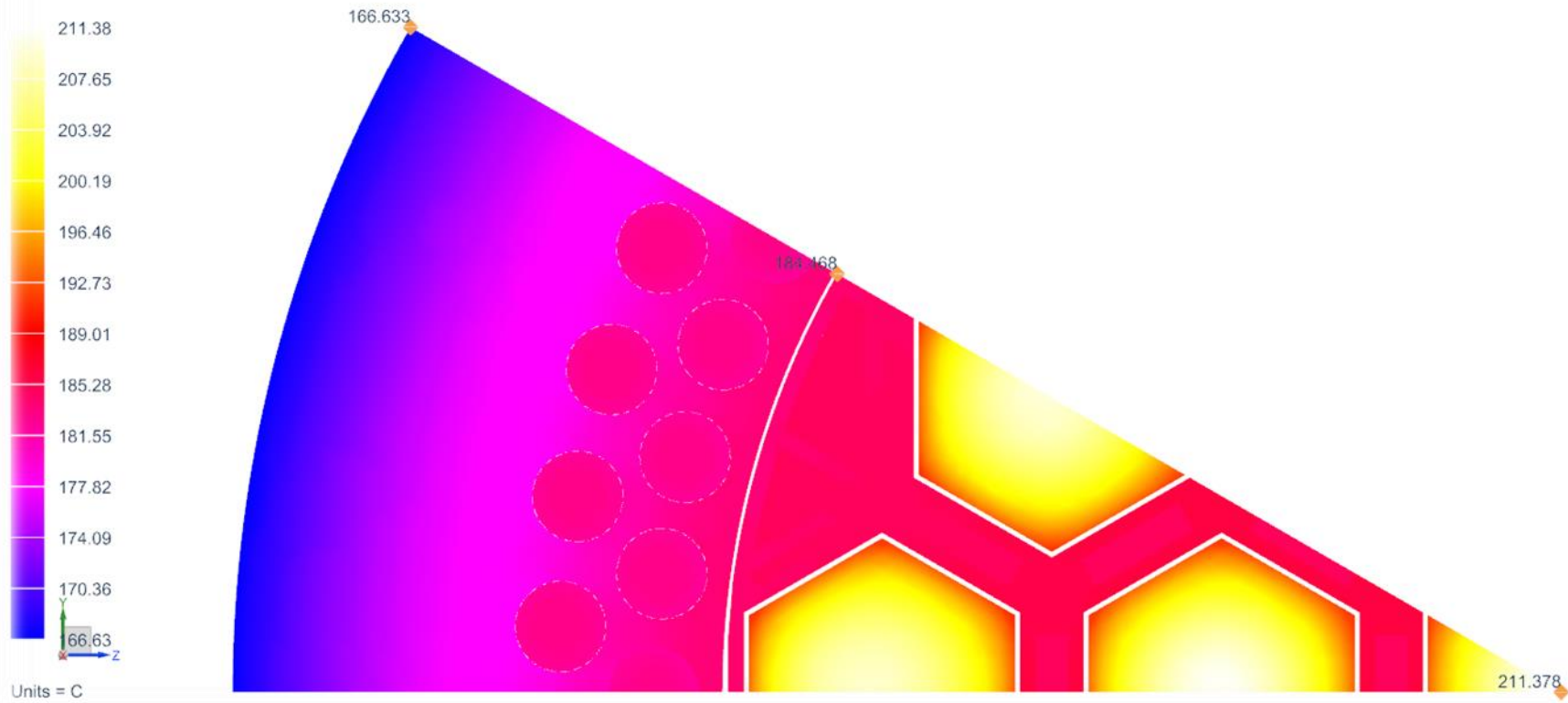
T = 2,5 hodiny

heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 8, Time = 9.361e+003 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 175.30, Max : 203.13, Units = C



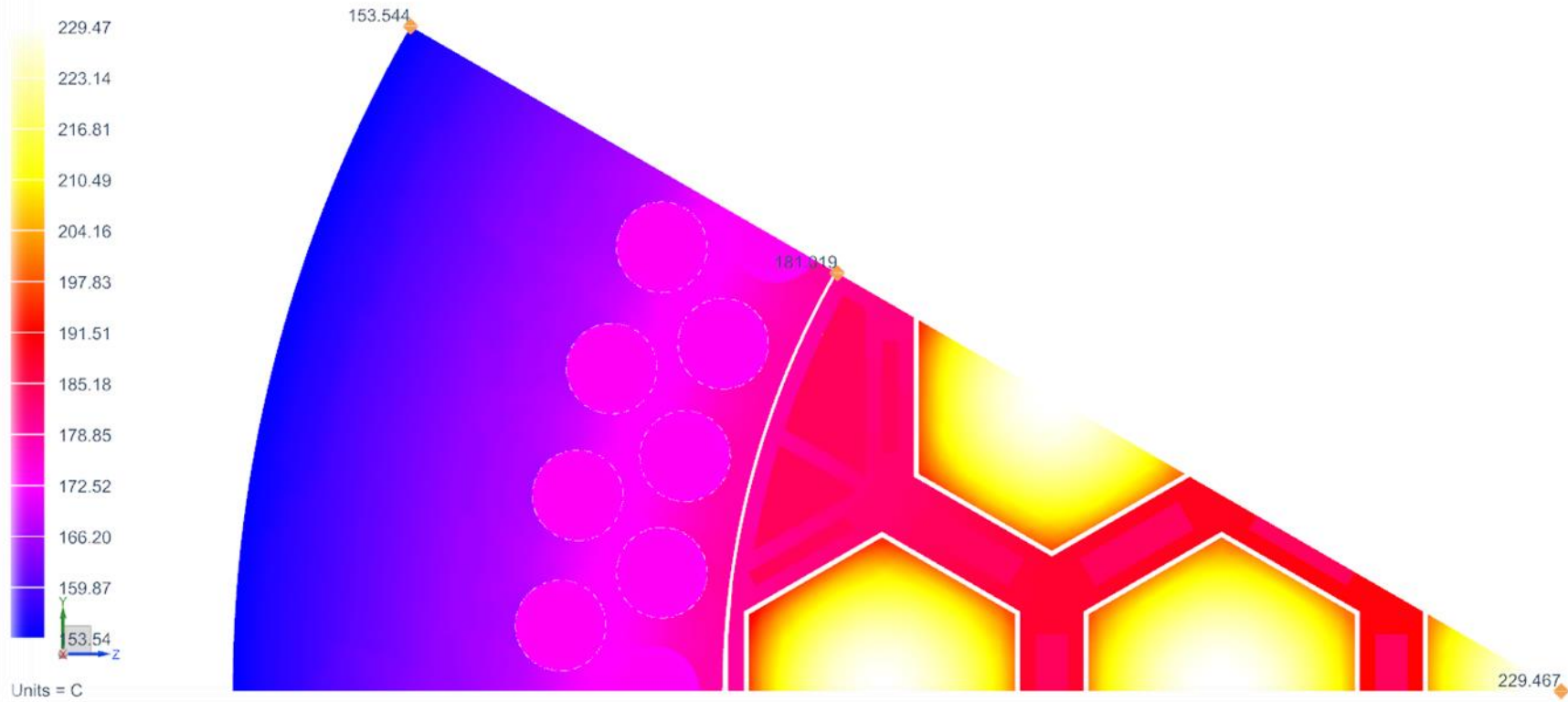
T = 3 hodiny

heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 11, Time = 1.260e+004 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 166.63, Max : 211.38, Units = C



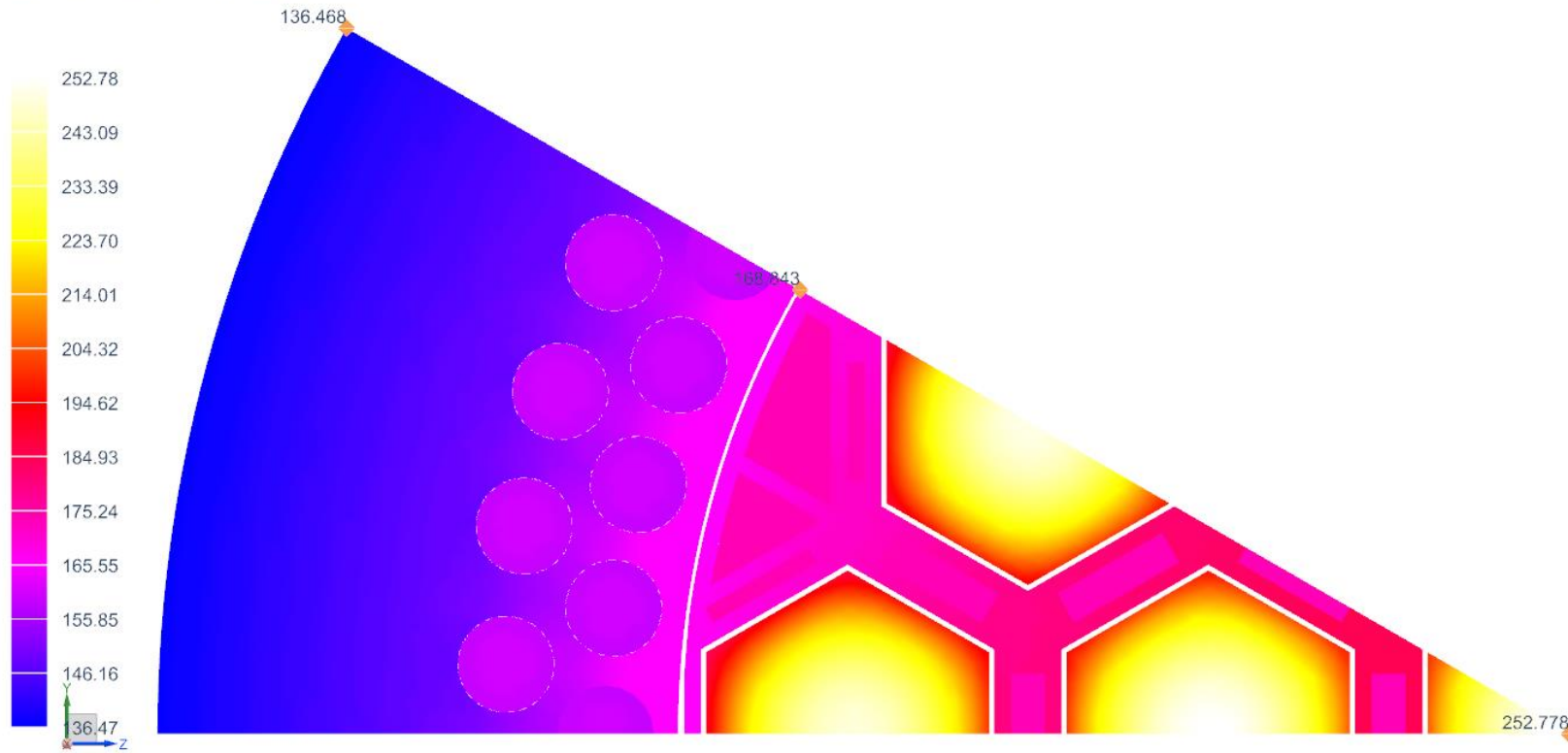
T = 5 hodin

heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 16, Time = 1.800e+004 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 153.54, Max : 229.47, Units = C



T = 8 hodin

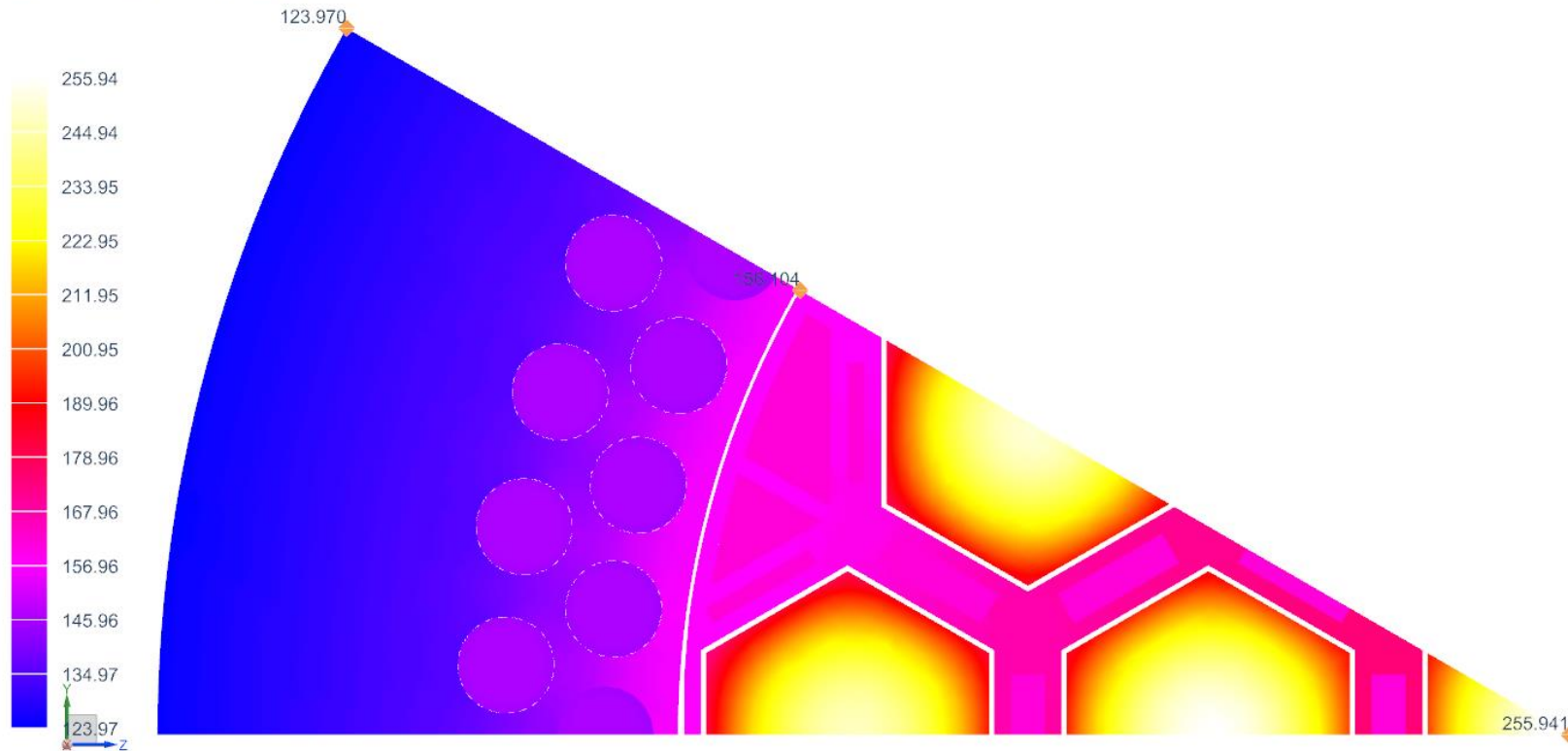
heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 9, Time = 2.964e+004 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 136.47, Max : 252.78, Units = C



Units = C

T = 12 hodin

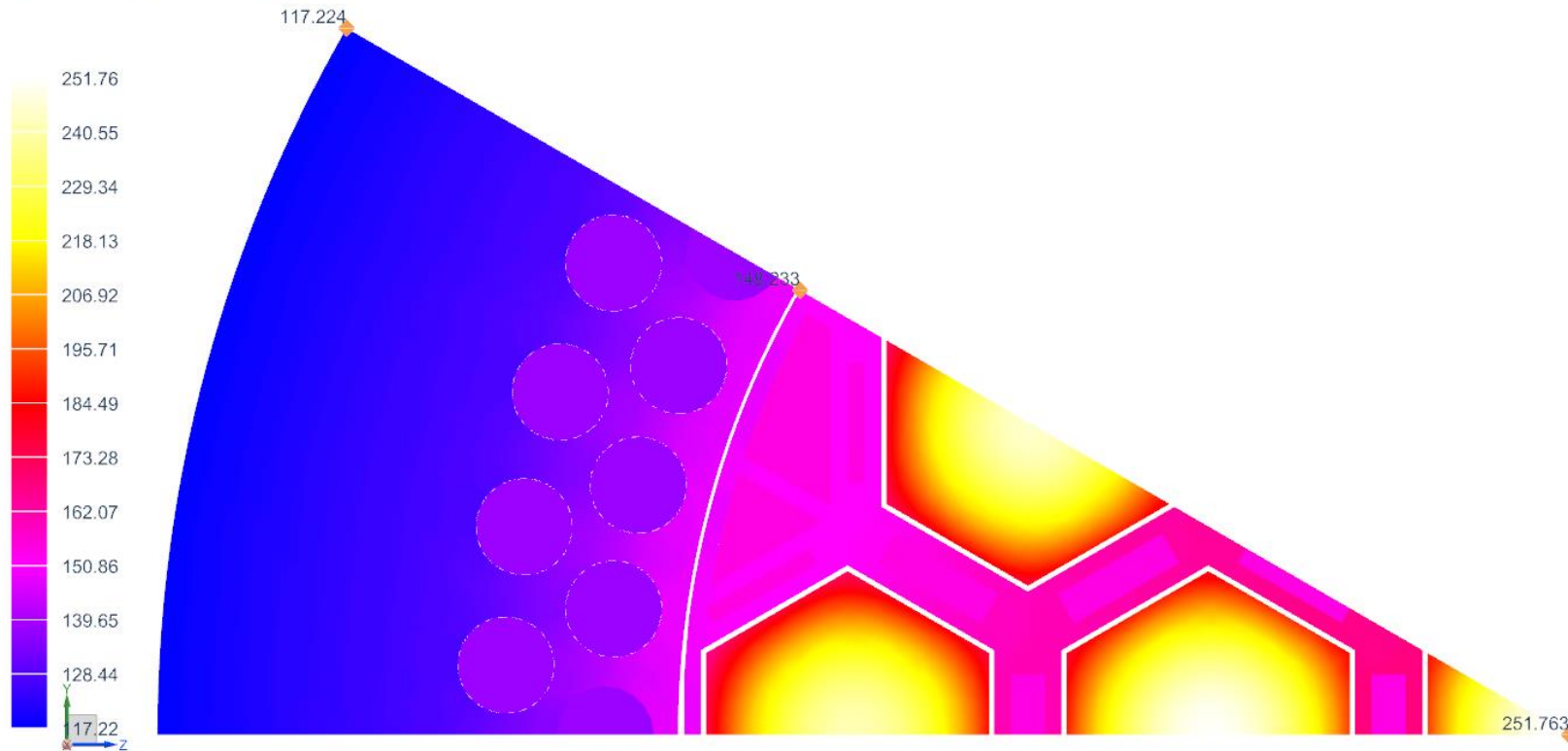
heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 13, Time = 4.356e+004 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 123.97, Max : 255.94, Units = C



Units = C

T= 15 hodin

heat_sim2 : Copy of Solution 2 Result
Load Case 1, Increment 16, Time = 5.400e+004 s
Temperature - Nodal, Scalar
Min : 117.22, Max : 251.76, Units = C



Units = C

