



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

PLÁN VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU

Plán vyřazování školního reaktoru VR-1 z provozu

CTU-14117-S-27-22

	Jméno	Funkce	Podpis	Dne
Vypracoval		VPR		
Odsouhlasil		DO		
Schválil		VKJR		

Obsah

1 Úvod	5
2 Plán vyřazování z provozu	6
2.1 Popis počátečního a konečného stavu jaderného zařízení	6
2.1.1 Popis počátečního stavu	6
2.1.2 Popis konečného stavu	6
2.2 Provozní historie jaderného zařízení nebo pracoviště III. Kategorie nebo IV kategorie	7
2.3 Popis technologií schopných zabezpečit vyřazování z provozu	8
2.4 Bezpečnostní rozbor k vyřazování z provozu	8
2.5 Popis jaderného zařízení	8
2.5.1 Reaktorové nádoby	9
2.5.2 Hradítko koridoru	10
2.5.3 Vnitřní části reaktoru	10
2.5.4 Vertikální kanály	10
2.5.5 Absorpční tyče	11
2.5.6 Palivo	11
2.5.7 Ovládací zařízení reaktoru	12
2.5.8 Neutronový zdroj	13
2.5.9 Radiační monitorovací systém	14
2.5.10 Systém napájení reaktoru	15
2.5.11 Vodní hospodářství	15
2.6 Stavební části reaktoru	16
2.7 Harmonogram, rozsah a termín vyřazování z provozu	17
2.8 Předpokládané radionuklidové složení látek vyskytujících se v jaderném zařízení v okamžiku před ukončením provozu	19
2.9 Návrh organizační přípravy personálního zajištění v období vyřazování z provozu	21
2.10 Návrh zajištění fyzické ochrany v období vyřazování z provozu	21
2.11 Návrh programu monitorování	21
2.11.1 Osobní monitorování	22
2.11.2 Monitorování pracoviště	22
2.11.3 Monitorování okolí a vlivu na životní prostředí	22
2.11.4 Monitorování výpustí	22
2.12 Záměr provádění úprav zóny havarijního plánování a záměr připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost	23
2.13 Popis bezpečného nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem včetně financování	23
2.14 Popis využití území a systémů, konstrukcí a komponent	24
2.15 Výchozí podklady pro odhad nákladů na vyřazování z provozu	25
2.16 Návrh zajištění radiační ochrany v období vyřazování z provozu	25
3 Vazba vyřazování na podkritický reaktor VR-2	26
Literatura	27

Seznam zkratek

AZ aktivní zóna

ČVUT České vysoké učení technické v Praze

FJFI Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

H01, H02 nádoby reaktoru

H03 zásobní nádrž demineralizované vody

HMI human machine interface

IAEA International Atomic Energy Agency

JM jaderný materiál

KJR Katedra a jaderných reaktorů

MFF UK Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze

MŠMT Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

MU mimořádná událost

NZ neutronový zdroj

NVO nezávislá výkonová ochrana

OZ ovládací zařízení

PČ palivový článek

PMV provozní měření výkonu

RMS radiační monitorovací systém

SÚJB Státní úřad pro jadernou bezpečnost

TL těžké laboratoře

VAO výšeaktivní odpady

ZIZ zdroj ionizujícího záření

ZKE základní kritický experiment

1 Úvod

Plán vyřazování školního reaktoru VR-1 z provozu je vypracován na základě požadavků § 9 odst. 1 písm. g) zákona 263/2016 Sb. [1]. Návrh je uspořádán tak, aby svou strukturou vyhověl požadavkům § 13 odst. 3 vyhlášky 377/2016 Sb. [2] o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie, která stanovuje rozsah a způsob vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie a stanovuje rozsah a způsob provedení schvalované dokumentace. Při vypracování návrhu bylo přihlédnuto také k doporučením International Atomic Energy Agency (IAEA), která jsou zpracována v Safety Guide WS-G-2.1 [3]. Návrh je detailně rozepsán v následujících kapitolách, které analogicky pokrývají jednotlivé body § 13 odst. 3 písm. a) až o) vyhlášky č.377/2016 Sb. Pro přehlednost, je na začátku každé kapitoly uveden obsah příslušného písmene § 13 odst. 3 vyhlášky č.377/2016 Sb.

Projektová dokumentace reaktoru VR-1 (původní označení VR-1P) explicitně dobu životnosti zařízení nespécifikuje, uvádí ji však pro technologii, a to v rozmezí 25 až 30 let. Přestože je reaktor v době zpracování tohoto návrhu provozován již 32 let, prokázaly kontroly provedené v roce 2017 jeho vynikající stav, který nevyžaduje žádná zvláštní opatření. Jednalo se především o defektoskopické kontroly reaktorových nádob, koridoru spojující obě nádoby a absorbátorů řídicích tyčí. Vzhledem ke stavu technologie a paliva (jeho záměna se uskutečnila na podzim 2005), pravidelným kontrolám včetně potřebné údržby, jakož i dosavadnímu a perspektivnímu rozsahu využívání reaktoru, se v nejbližších deseti až patnácti letech s jeho vyřazením z provozu nepočítá. Podle současného vývoje je mnohem reálnější předpokládat, že bude i nadále probíhat modernizace zařízení reaktoru a celková životnost reaktoru se tak bude pohybovat zcela jistě nad hranicí čtyřiceti let.

I přes tento pozitivní výhled mohou nastat situace, které by mohly vést k ukončení provozu reaktoru a jeho vyřazení z provozu. Proto je jistě užitečné se s potřebným předstihem alespoň koncepčně touto problematikou vyřazení zabývat. To pak povede i k tomu, že důsledky současného provozu reaktoru VR-1 budou zvažovány i z hlediska přístupu k jeho vyřazení z provozu a návazných likvidačních prací.

2 Plán vyřazování z provozu

2.1 Popis počátečního a konečného stavu jaderného zařízení

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. a) Popis počátečního a konečného stavu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo pracoviště IV. kategorie.

2.1.1 Popis počátečního stavu

Školní reaktor VR-1 je výzkumným jaderným zařízením malého výkonu (do 0,5 kW_t), které je využíváno pro výuku studentů vysokých škol, výcvikové kurzy, vědeckovýzkumné práce a osvětovou činnost. Reaktor je obvykle provozován v dvousměnném provozu, cca 1200 hodin ročně. V období ukončení provozu bude (podle současných představ, které nepředpokládají, že reaktor bude vyřazován z provozu v důsledku nečekané mimořádné události) stav pracoviště velmi blízký současnému stavu. Ten je rámcově charakterizován popisem hlavních technologických a stavebních částí reaktoru v následujících částech kapitoly a podrobně popsán v řadě dokumentů, zejména bezpečnostní zprávě [4]. Nepředpokládají se tedy žádné významné změny v technologii reaktoru, ani v jeho stavební části (menší úprava plošin a nevelké disposiční změny).

Držitelem povolení (dle § 9 odst. 2 písm. b) atomového zákona) k provozu reaktoru VR-1 je České vysoké učení technické v Praze (ČVUT), Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI). Jedná se v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. (zákon o vysokých školách) o veřejnou vysokou školu. Provoz a využívání reaktoru VR-1 zajišťuje Katedra jaderných reaktorů (KJR) se sídlem v areálu Matematicko-fyzikální fakulty, Univerzity Karlovy v Praze (MFF UK), V Holešovičkách 2, Praha 8. Reaktor VR-1 je umístěn a provozován v hale objektu těžkých laboratoří (TL) areálu MFF UK.

2.1.2 Popis konečného stavu

Jak bude lokalita využívána po vyřazení VR-1 z provozu není zatím známo a není to zatím ani předmětem jednání mezi FJFI ČVUT v Praze (provozovatel reaktoru) a MFF UK (vlastník objektu). Podle současného vývoje se ukazuje jako pravděpodobné, že po skončení provozu školního reaktoru VR-1 a jeho vyřazení z provozu budou prostory předány MFF UK. Ani v důsledku provozu reaktoru VR-1 ani při jeho vyřazování z provozu nedojde v okolí pracoviště reaktoru VR-1 k žádným změnám, nebo jeho ovlivnění dlouhodobějšího charakteru. U provozu reaktoru je to možné konstatovat na základě již více než dvacetileté provozní zkušenosti, u jeho vyřazování z provozu je to s ohledem na předpokládané postupy velmi reálný předpoklad.

Z hlediska způsobu vyřazování se bude jednat o okamžité vyřazování (§ 11 písm. a) vyhlášky č.377/2016 Sb.), při kterém budou vyřazovací činnosti prováděny plynule v nepřetržitě sledu od okamžiku zahájení vyřazování do jeho ukončení. K uvedené volbě způsobu vyřazování opravňuje jak charakter zařízení (reaktor nulového výkonu), tak i předpokládaná příznivá radiační situace na pracovišti reaktoru (většina komponent reaktoru neaktivní a ostatní mají nízké aktivity). Nicméně uvedený způsob vyřazování může být korigován podle aktuálního stavu v době rozhodnutí o vyřazení reaktoru VR-1.

Z vypracovaného návrhu na ukončení provozu školního reaktoru VR-1 a jeho vyřazení z provozu vyplývá, že bude potřebné věnovat hlavní pozornost nakládání s jaderným pali-

vem. Proto bude této problematice (možnostem jejího řešení podle vývoje situace) v dalších letech věnována vyšší pozornost. Vyřazování reaktoru VR-1 z provozu by nemělo znamenat zásadní organizační ani finanční problém. Organizaci vyřazování bude zajišťovat speciálně určená skupina pracovníků FJFI ČVUT v Praze, náklady na vyřazení budou hrazeny z rozpočtu MŠMT ČR. Zatím nevyjasněné zůstávají některé otázky, zejména pak celková představa, jak má celá hala a přilehlé prostory po vyřazení reaktoru VR-1 vypadat a k čemu budou využívány. To se týká i bloku stínění (tělesa reaktoru) s revizní a manipulační chodbou pod reaktorem. Tyto komponenty však nepředstavují žádný problém ani z hlediska jaderné bezpečnosti, ani z hlediska radiační ochrany. V případě potřeby mohou být s určitými (v současné době těžko odhadnutelnými) náklady zbořeny a hala (po demontáži velínu a plošin) dokonce uvedena do původního stavu.

Po vyřazení reaktoru VR-1 z provozu a provedení likvidačních prací nebude nutné jeho lokalitu dále monitorovat ani zajišťovat institucionální dozor. Aktualizace tohoto dokumentu se předpokládá v souladu s požadavkem § 13 odst. 4 vyhlášky č. 377/2016 Sb. v roce 2022.

2.2 Provozní historie jaderného zařízení nebo pracoviště III. Kategorie nebo IV kategorie

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. b) Provozní historie jaderného zařízení nebo pracoviště III. Kategorie nebo IV. kategorie.

Výstavba reaktoru byla zahájena v dubnu roku 1985, montáž reaktorové technologie proběhla v roce 1988. Stavební práce zajišťovaly Pozemní stavby Praha, hlavní technologickou část reaktoru dodala ŠKODA JS Plzeň. První kritický stav byl na reaktoru VR-1 dosažen dne 3. 12. 1990. V roce 1991 probíhal zkušební provoz reaktoru a od 1. 1. 1992 je reaktor v trvalém provozu.

Provoz reaktoru byl původně zahájen s palivem IRT-2M obsahující vysoko-obohacený uran (36 % ^{235}U). S tímto palivem byl reaktor provozován do roku 1997, kdy bylo nahrazeno palivem IRT-3M (stejně obohacení jako v případě paliva IRT-2M). Palivo typu IRT-2M bylo převezeno do ÚJV Řež a.s., kde bylo využito pro provoz reaktoru LVR-15. V roce 2005 proběhl přechod reaktoru z vysoce-obohaceného paliva na nízko-obohacené palivo typu IRT-4M s již zmiňovaným obohacením 19,7 %. Tento krok byl součástí mezinárodního programu zaměřeného na snížení obohacení paliva ve výzkumných jaderných reaktorech RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors). Vysoko-obohacené palivo IRT-3M bylo navráceno do země svého původu, tj. do Ruské federace v rámci Russian Research Reactor Fuel Return program.

V průběhu let 2001 až 2007 proběhla rozsáhlá inovace řídicího systému reaktoru VR-1. V roce 2001 byl vyměněn ovládací pult a částečně zmodernizován systém komunikace pultu s řídicím systémem. Následně, v roce 2002 proběhla inovace bezpečnostního řetězce a ovládání absorpčních tyčí UR-70. V roce 2005 byl reaktor osazen novými kanály nezávislé výkonové ochrany a v roce 2007 byla dokončena modernizace a inovace ovládacího zařízení reaktoru (včetně provozního měření výkonu) a ovládání technologie (vodního hospodářství) VR-1. V těchto letech byl také kompletně inovován na pracovišti reaktoru radiační monitorovací systém. Lze předpokládat, že modernizace reaktoru bude dle potřeb probíhat i nadále tak, aby byl zajištěn nejen bezpečný provoz reaktoru, ale i jeho vysoká technická úroveň a spolehlivost.

2.3 Popis technologií schopných zabezpečit vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. c) Popis dostupných nebo uvažovaných technologií schopných zabezpečit bezpečnou realizaci vyřazování z provozu.

Při vyřazování reaktoru VR-1 z provozu nebude (resp. nemělo by být) potřebné použití žádného postupu, který by nebyl dostupný nebo již v praxi ověřený. To se týká jak přepravy jaderných materiálů a radioaktivních odpadů z pracoviště včetně následného nakládání s nimi, tak i demontáže reaktorové technologie a stavebních částí reaktoru.

2.4 Bezpečnostní rozbory k vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. d) Bezpečnostní rozbory k vyřazování z provozu.

Vyřazování reaktoru VR-1 z provozu nepředstavuje, ve srovnání s běžným provozem reaktoru, jiná radiační rizika. V úvahu přicházejí pouze mimořádné události spojené s poškozením PČ resp. NZ při jejich manipulaci. Tento typ mimořádných událostí je již řešen a plně pokryt ve stávajícím vnitřním havarijním plánu reaktoru VR-1 [5]. Po odvozu jaderného paliva a NZ z pracoviště reaktoru VR-1, nemají mimořádné události (při dodržování běžných postupů bezpečnosti práce) prakticky žádný prostor. S ohledem na odhadované velmi nízké aktivity konstrukčních materiálů reaktoru (viz kapitola 2.8) i stavebních částí reaktoru lze považovat radiační rizika v průběhu vyřazování reaktoru VR-1 z provozu za zanedbatelná. Taktéž dopad vyřazovacích činností na pracovníky, obyvatelstvo a životní prostředí bude minimální, takže lze prakticky vyloučit překročení limitních hodnot stanovených SÚJB v oblasti radiační ochrany pracovníků se zářením, obyvatelstva a životního prostředí. I přes výše uvedené předpoklady a skutečnosti bude zpracován vnitřní havarijní plán a předložen SÚJB ke schválení.

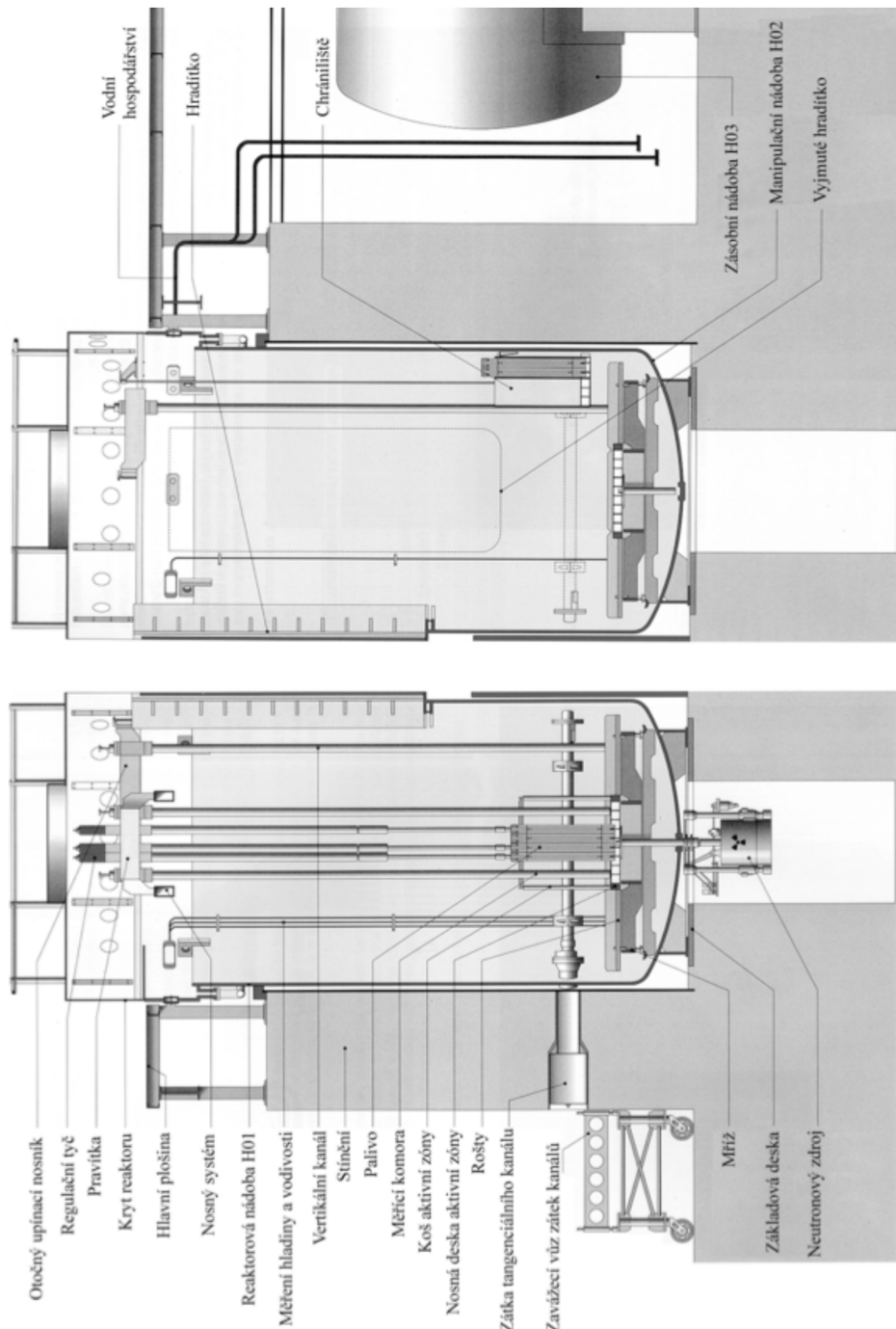
2.5 Popis jaderného zařízení

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. e) Popis jaderného zařízení nebo pracoviště III. Kategorie nebo pracoviště IV. Kategorie včetně technologických součástí a stavebních částí.

Reaktor VR-1 je lehkovodní reaktor bazénového typu, pracující s palivem obsahující nízkoobohacený uran (19,7 % ^{235}U). Moderátorem neutronů je lehká demineralizovaná voda, která zároveň slouží jako reflektor, biologické stínění a chladivo. Odvod tepla z aktivní zóny (AZ) probíhá přirozenou konvekcí. Těleso reaktoru VR-1 má tvar osmistěnu, vyrobeného ze stínícího betonu. V tělese reaktoru jsou umístěny dva bazény - nádoby, značené H01 a H02 (viz obr. 1). Obě jsou prakticky shodné, různá je však jejich funkce a tím i vybavení vnitřními částmi. První nádoba (H01), reaktorová, je určena pro AZ, druhá (H02) je manipulační. Manipulační nádoba slouží především k odkládání ozářených materiálů, mimo jiné je vybavena chránilištěm pro odkládání palivových článků. V případě potřeby lze obě nádoby pomocí hradítka vodotěsně oddělit. To je výhodné zejména při prohlídkách a kontrolách jednotlivých nádob, příp. i při větších úpravách AZ. Vnitřní části reaktoru se skládají z několika funkčních skupin, které vesměs navazují na AZ reaktoru. Patří mezi ně zejména nosný systém AZ, rošty, nosný systém regulace, měřicí kanály, provozní a měřicí potrubí a chrániliště palivových článků (PČ) v nádobě H02. V reaktorové nádobě je i plošina, která umožňuje manipulace v AZ a jejím okolí při snížené hladině vody.

2.5.1 Reaktorové nádoby

Reaktorové nádoby (H01 a H02) jsou konstrukčně shodné, nádoba H01 má navíc průchodky pro radiální a tangenciální kanál. Nádoby jsou vyrobeny z nerez oceli 17.247 (08Ch18N10T), jejich výška je 4 720 mm, vnitřní průměr 2 300 mm, tloušťka stěn je 15 mm a dna 20 mm. Každá z nádob má objem přibližně 17 m³ a hmotnost 5 000 kg. Nádoby jsou celosvařované, dno tvoří klenutý výlisek. Horní část nádob je tvořena přírubovým lemem, v jehož prstenci je 7 oken. Vnitřek nádob je vyčištěn do vysokého lesku. Vnitřní části nádob (vestavby) jsou vyrobeny z hliníku nebo nerez oceli. Nádoby jsou propojeny koridorem, který je jejich součástí.



Obr. 1: Příčný řez reaktorovými nádobami H01 a H02.

2.5.2 Hradítko koridoru

K vodotěsnému oddělení reaktorových nádob slouží tzv. hradítko. Hradítko je vysoké 2 520 mm a široké 980 mm a je vyrobeno z nerez oceli 17.247. Při zavezeném a uzavřeném hradítku lze provozovat nádoby H01 a H02 s různou hladinou vody (např. jedna nádoba je plná a druhá prázdná).

2.5.3 Vnitřní části reaktoru

Vnitřní části reaktoru jsou vyrobeny z nerez oceli 17.242 (17Ch18N9) až na nosnou desku AZ, která je vyrobená z hliníku. Vnitřní části jsou stejné pro obě nádoby H01 i H02, pouze v nádobě H01 je navíc koš AZ a nosný systém regulace. Oproti tomu se v nádobě H02 nachází chrániliště PČ.

Nosný systém AZ v každé nádobě je určen k nesení roštů a nosné desky AZ, je největším a nejtěžším kusem materiálu v nádobě. Nosná deska AZ slouží k jednoznačnému ustavení spodních koncovek palivových článků, které tvoří AZ. Do nosné desky AZ se také vkládají hydraulické tlumiče absorpčních tyčí, které mohou sloužit i k fixaci přesné polohy vertikálních ozařovacích kanálů. Koš AZ v nádobě H01 je lehká konstrukce určená pro vymezení tvaru AZ reaktoru. Horní koncovky palivových článků se v koši AZ fixují pomocí „pravítek“ (tenké pásky z nerez oceli). Rošty vytvářejí plošinu v nádobě ve výšce, kde končí dno nádoby a umožňují ukládání experimentálního vybavení nebo pohyb osob na této plošině. Rošty jsou uchyceny v nosném systému AZ.

Nosný systém regulace v nádobě H01 je konstrukce určená pro zavěšení a upevnění absorpčních tyčí a měřících kanálů umístěných v AZ reaktoru. Nachází se v prostoru nad hladinou moderátoru a pod horní plošinou H01.

Chrániliště je mokřým skladem pro ukládání PČ. Nachází se v nádobě H02 po části jejího vnitřního obvodu a ve stejné hloubce, jako je v H01 aktivní zóna. Skládá se z šesti hliníkových buněk, do každé lze umístit vždy až čtyři PČ. Všechny buňky jsou opatřeny uzamykatelnou zajišťovací vidlicí. Do chrániliště se PČ ukládají ručně pomocí manipulátoru na palivo.

Provozní a měřící potrubí v nádobách H01 a H02 umožňuje manipulaci s demivodou, její napouštění a vyčerpání podle potřeb provozu a jeho kontrolu, tj. měření vodivosti v nádobě H01 a teplot v obou nádobách.

Horní plošina u obou nádob H01 a H02 je samostatný celek, vyrobený z nerez oceli 17.242, který je připojen montážními sváry k hornímu lemu nádob. Poklop, který je její součástí je uzamykatelný pro zamezení vstupu neoprávněných osob do vnitřku nádob reaktoru. Dolní plošina nádoby H01 je samostatný celek, vyrobený z nerez oceli 17.242, který je zavěšený pod horní plošinu na závěsech na vnitřní stěně nádoby H01 pod hladinou moderátoru. Na plošinu lze sestoupit po žebříku H01 po snížení hladiny moderátoru na tzv. sníženou hladinu. Z dolní plošiny lze sestoupit do prostoru AZ. Žebřík H01 umožňuje sestup do nádoby H01 na dolní plošinu po snížení hladiny moderátoru a také sestup až do prostoru AZ na dno nádoby H01. Je vyroben z nerez oceli. Podobně žebřík H02 umožňuje sestup do nádoby H02.

2.5.4 Vertikální kanály

Kanály o průměru 56 mm slouží především k umístění detektorů ovládacího zařízení nebo jiných detektorů pro experimentální účely a k ozařování menších předmětů (do průměru 56 mm) v blízkosti AZ. Jsou hliníkové - Al 424415 (AlMg4), mají však nerezové hlavice.

Kanály se upevňují standardním způsobem do nosného systému regulace nebo na pohyblivé upínací nosníky (pravítka). V případě upevnění v nosném systému regulace musí mít svoji dolní koncovku vloženou do pouzdra, zajišťujícího přesnou fixaci kanálu v dané poloze. Při zavěšení kanálů na upínacích nosnících je nutné spodní část kanálu opatřit závažím, aby kanál nemohl vyplavat. Kanály o průměru 56 mm v počtu 12 ks byly součástí dodávky technologie reaktoru.

Kanály o průměru 32 mm, 23 mm a 12 mm jsou tvořeny tenkostěnnými hliníkovými trubkami se zavařeným dnem - Al 424413 (AlMg3). K dispozici jsou nyní 2 kanály o vnějším průměru 32 mm a vnitřním 30 mm a délce od 4470 mm, 5 kanálů o vnějším průměru 25 mm a vnitřním 23 mm a délkách od 4470 do 4720 mm, 6 ks kanálů o vnějším průměru 14 mm a vnitřním 12 mm a délkách od 4005 do 4505 mm a 2 ks kanálů o vnějším průměru 12 mm a vnitřním 10 mm a délkách od 4005 do 4505 mm. Délka kanálů umožňuje založit kanály i v místech, kde nejsou vodící pouzdra absorpčních tyčí tak, aby jejich dna dosahovala cca 350 mm pod nosnou desku AZ (tj. až na dno reaktorové nádoby). Kanály se upevňují na nosná pravítka regulace pomocí speciálních držáků (hlavic kanálů) podobným způsobem jako absorpční tyče.

2.5.5 Absorpční tyče

Celkový počet absorpčních tyčí na reaktoru VR-1 je sedm. Při provozu reaktoru se jich používá 5 až 7 v závislosti na aktuální konfiguraci AZ. Tyče jsou konstrukčně shodné, liší se pouze funkcí, určenou způsobem zapojení do ovládacího zařízení. Absorpční tyče UR-70 mají integrální provedení a jsou určeny pro použití v bazénových reaktorech s palivem typu IRT-M. Tyč je zavěšena na pravítku nosného systému regulace, spodní zúženou částí (vedení absorbátoru) může procházet čtyřtrubkovým nebo šestitubkovým palivovým článkem či případně maketou palivového článku. Pohon tyče zajišťuje rotační krokový motor. Vlastní absorbátor tyče je tvořen uzavřenou ocelovou trubkou, do které je vsunuta hliníková vložka s navinutým kadmiovým plechem tloušťky 1 mm.

Absorpční tyč je tvořena několika samostatnými částmi, které jsou rozebíratelně spojeny:

- pohon tyče, kterým se rozumí komplet, obsahující všechny mechanismy, ohraničený víkem krokového motoru a bajonetovým závěsem s pojistnou maticí. Jeho délka je 2 666 mm, hmotnost 34 kg
- absorbátor, skládá se z ocelového nástavce a ocelového pouzdra (ocel 17.247) ve kterém je hliníková vložka - Al 424005 (Al99,5) s navinutým kadmiovým plechem, absorbátor je ukončen koncovkou, hmotnost pohyblivé části je 5,1 kg,
- vodící pouzdro absorpční tyče (eloxovaný hliníkový kanál – Al 424005), připojené bajonetovým závěsem ke spodnímu konci pohonu a zajištěné převlečnou maticí,
- blok řízení tyčí, což je samostatný celek, který zabezpečuje všechny funkce tyče, tj. řízení krokového motoru, informaci o poloze tyče, ovládání magnetu.

2.5.6 Palivo

Palivo typu IRT-4M bylo na reaktor VR-1 dodáno ve třech modifikacích: čtyřtrubkové, šestitubkové a osmitubkové palivové články. Celkem je na reaktoru VR-1 k dispozici 21 PČ. PČ tvoří koncentrické trubky čtvercového průřezu, spojené dolní a horní koncovkou (hlavicí).

Do šestitrubkového a čtyřtrubkového PČ lze umístit absorpční části regulačních tyčí či jiné kanály (např. koncovku potrubní pošty). Palivová vrstva článku IRT-4M je tvořena disperzí Al a UO₂ o tloušťce 0,6 mm, která je z obou stran pokryta vrstvou čistého hliníku tloušťky 0,5 mm. Celková síla stěny trubky je 1,6 mm. Obohacení ²³⁵U je 19,7 %. Ve čtyřtrubkovém PČ je přibližně 200 g ²³⁵U, ve šestitrubkovém 260 g ²³⁵U a ve osmitrubkovém PČ přibližně 300 g ²³⁵U. S ohledem na malý výkon reaktoru VR 1 zůstává jeho palivo prakticky fyzikálně čerstvé. Dle teoretických odhadů v reaktoru vyhoří za 1 rok méně než 0,1 g ²³⁵U.

2.5.7 Ovládací zařízení reaktoru

Ovládací zařízení (OZ) reaktoru VR-1 slouží k zajištění jaderné bezpečnosti a řízení reaktoru. Blokové schéma OZ reaktoru VR-1, které přibližuje jeho jednotlivé komponenty, jejich vzájemné propojení a rozmístění, je znázorněno na obr. 2. OZ lze z hlediska vlivu na jadernou bezpečnost dělit na čtyři základní části – ochranný systém, řídicí systém, rozhraní člověk-stroj a systémy zálohového napájení (48 V a 230 V).

Nejdůležitějším systémem OZ z hlediska jaderné bezpečnosti je ochranný systém jaderného reaktoru. Ochranný systém se skládá ze 4 kanálů provozního měření výkonu (PMV) a 4 kanálů nezávislé výkonové ochrany (NVO).

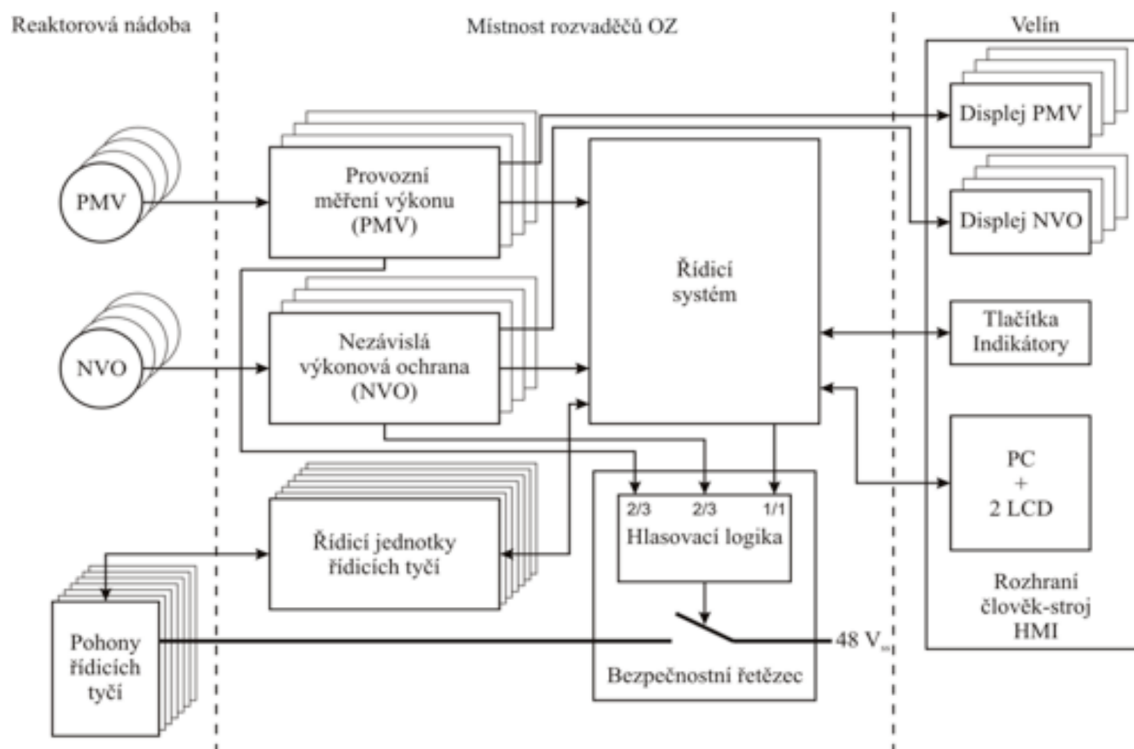
Kanály PMV zpracovávají signály ze širokopásmových nekompenzovaných štěpných komor typu RJ 1300, které jsou umístěny ve vertikálních kanálech 56 mm v nádobě H01 v těsné blízkosti AZ. Kanály PMV určují v celém výkonovém rozsahu reaktoru jeho okamžitý výkon a rychlost změny výkonu, porovnávají zjištěné hodnoty s bezpečnostními úrovněmi, a pokud jsou tyto úrovně překročeny, aktivují bezpečnostní řetězec, který v logice „dva ze tří“ rozhoduje o bezpečnostním odstavení reaktoru. Dále posílají provozní data řídicímu systému a na individuální displeje jednotlivých kanálů. Kanály PMV se nacházejí v místnosti rozvaděčů OZ (místnost č. 193).

Kanály NVO snímají stav reaktoru pomocí bórových komor typu SNM-12, které jsou rozmístěny na vnější straně dna nádoby H01 v revizní a manipulační chodbě reaktoru. Kanály NVO měří výkon pouze v cca posledních dvou dekádách výkonového rozsahu, rovněž vyhodnocují výkon a rychlost změny výkonu, aktivují bezpečnostní řetězec a vysílají zjištěná data řídicímu systému a na své individuální displeje. Kanály NVO se nacházejí v místnosti rozvaděčů OZ (místnost č. 193).

Bezpečnostní řetězec představuje reléový systém, který zajišťuje vyhodnocení logiky „dva ze tří“ pro bezpečnostní signály z PMV a NVO, dále vyhodnocení bezpečnostního signálu z řídicího počítače a případně z technologie v logice „jeden z jednoho“. Bezpečnostní řetězec je umístěn v místnosti rozvaděčů OZ (místnost č. 193).

Řídicí systém je na reaktoru VR-1 realizován na základě jednoho počítače (průmyslové PC), který se nachází v místnosti rozvaděčů OZ (místnost č. 193). Řídicí systém přijímá data z kanálů PMV a NVO, provádí vyhodnocení stavu reaktoru a v případě překročení bezpečnostních úrovní odstavuje reaktor. Rovněž vypočítává střední hodnoty výkonu a rychlosti změny výkonu, které pak předává rozhraní člověk-stroj. Řídicí systém přijímá příkazy od rozhraní člověk stroj a provádí je za předpokladu, že jsou povoleny, ovládá polohy absorpčních tyčí a zajišťuje funkci automatického regulátoru výkonu reaktoru. Poloha absorpčních tyčí je nastavována krokovými motory, které jsou řízeny pomocí PLC Simatic S700. Komunikace mezi řídicím počítačem a PLC jednotlivých tyčí je zajišťována sběrnicí Profibus.

Rozhraní člověk-stroj (human machine interface – HMI) umožňuje operátorovi řídit jaderný reaktor. HMI na reaktoru VR-1 se skládá z počítače, dvou monitorů pro alfanumerickou



Obr. 2: Blokové schéma OZ.

komunikaci a grafické zobrazení dat, individuálních displejů pro sledování hodnot z individuálních kanálů PMV a NVO, klávesnice pro zadávání příkazů, tlačítek, indikátorů a tiskárny. Uvedené komponenty jsou ergonomicky rozmístěny na pultu operátora, který se nachází ve velínu reaktoru.

2.5.8 Neutronový zdroj

Pro bezpečné spuštění reaktoru VR-1 je používán neutronový zdroj (NZ) typu $^{241}\text{Am-Be}$. Jedná se vysokoaktivní zářič (185 GBq) s emisí neutronů $1,2\text{E}7 \text{ s}^{-1}$, který je tvořen směsí oxidu americia s metalickým beryliem slisovanou ve dvojitým válcovém pouzdře z nerez oceli (výška 60 mm a průměr 30 mm). Pouzdro je uzavřené svařováním obloukem. NZ je našroubován do pouzdra (tělesa) z nerezové oceli o průměru 36 mm a délce 130 mm. NZ slouží jako stabilní zdroj neutronů k bezpečnému uvádění reaktoru do kritického stavu (spuštění) a pro vybraná experimentální měření.

Neutronový zdroj je umístěn uvnitř zařízení pro vstřelování, které se skládá z:

- vlastního NZ,
- pneumatického dopravního válce,
- elektropneumatického ovládání,
- stínícího kontejneru.

Zařízení se nachází v revizní a manipulační chodbě pod nádobou H01.

2.5.9 Radiační monitorovací systém

Radiační monitorovací systém (RMS) reaktoru VR-1 je stacionární dozimetrický systém, který zajišťuje soustavné monitorování radiační situace reaktorového pracoviště a jeho okolí na základě sledování dávkových příkonů gama, neutronů a koncentrace radioaktivních aerosolů.

Systém je řízen centrálním počítačem, který zajišťuje komunikaci, sběr a archivaci dat z jednotlivých sond a je i propojen s informačním dotykovým LCD monitorem. Provoz RMS je nepřetržitý, při normální situaci jsou údaje zaznamenávány v intervalu 1 hod., při překročení vyšetřovací či zásahové úrovně v intervalu 3 s. Překročení vyšetřovací resp. zásahové úrovně je pak signalizováno akustickým a optickým signálem přímo na příslušné sondě a zároveň na centrálním monitoru.

Hlavními komponentami RMS VR-1 jsou následující detekční sondy, jejichž rozmístění na pracovišti je uvedeno v tab. 1:

- 6 ks detekčních sond záření gama BQM GMS3 (100 nSv/hod až 10 mSv/h),
- 4 ks detekční sondy záření gama BQM GMS3-V (100 nSv/hod až 10 mSv/h),
- 2 ks detekční sondy záření gama BQM GMS3-D (100 nSv/hod až 10 mSv/h),
- 1 ks vysoko rozsahová sonda záření gama BQM VRS 2 (100 nSv/hod-10 Sv/h),
- 2 ks monitorů neutronů TEMA JKA300n

Tab. 1: Umístění pevných měřících bodů RMS VR-1 v objektu TL MFF UK.

Sonda	Typ sondy	Monitorování	Umístění
D1	BQM GMS3-D	záření γ	Velín reaktoru
D2	BQM GMS3-V	záření γ	Nad hladinou nádoby H01
D3	BQM GMS3	záření γ	Vstup do reaktorové haly
D4	BQM VRS2	záření γ	Horní podlaží +7,60 m (nad nádobou H01)
D5	BQM GMS3	záření γ	Stěna haly podlaží +0,00 m proti RK
D6	BQM GMS3	záření γ	Stěna haly podlaží +0,00 m proti TK
D7	BQM GMS3	záření γ	Demineralizační stanice – sklad paliva
D8	BQM GMS3-V	záření γ	Revizní chodba pod nádobou H01
D9	BQM GMS3-V	záření γ	Likvidační stanice odpadních vod (LSOV)
D10	BQM GMS3	záření γ	Laboratoř NAA TL327
D11	BQM GMS3-V	záření γ	Střecha těžkých laboratoří MFF UK
D12	TEMA JKA300	neutrony	RK (radiální kanál)
D13	TEMA JKA300	neutrony	TK (tangenciální kanál)
D14	BQM GMS3	záření γ	Rozvodna OZ
D15	BQM GMS3 -D	záření γ	Sklad paliva

Detekční sonda typu BQM GMS3, resp. GMV3-V a GMS3-D je určena pro měření příkonu dávkového ekvivalentu záření gama ve vzduchu v určeném místě a signalizuje opticky i akusticky převýšení nastavené úrovně. Měřící rozsah je od 100 nSv/h do 100 mSv/h. Sonda

BQM GMS3-V má stejné parametry, ale je určena do vlhkého prostředí, sonda GMS3-D má LCD displej pro možnost přímého odečtu.

Monitor neutronů TEMA JKA300 registruje příkon dávkového ekvivalentu od neutronů v určeném místě a signalizuje opticky převýšení nastavené prahové úrovně. Vlastní přístroj je přenosný tříkanálový analyzátor, který byl upraven pro měření neutronů. Standardně je používán s moderační polyetylenovou sférou o průměru 250 mm a malým scintilačním detektorem (monokrystal $^6\text{LiI}/\text{Eu}$), který se nachází ve středu sféry. Jeho měřicí rozsah je 0,01 – 100 mSv/h.

2.5.10 Systém napájení reaktoru

Na pracovišti reaktoru VR-1 jsou použity tyto napěťové soustavy:

- 3PEN 400 V 50 Hz /TN-C nezálohované síťové napájení
- 2PE 48 V/TN-S zálohované napájení 48 Vss
- 2PE 24 V/TN-S zálohované napájení 24 Vss
- 1NPE 230 V 50 Hz/TN-S zálohované napájení 230 Vst

Systém zálohovaného napájení 230 Vst je tvořen šesti zdroji zálohovaného napájení pro počítače (UPS) typu APC SmartUPS 1400. Zdroj 48 Vss se skládá ze staniční akumulátorové baterie G3 a nabíjecího zařízení G1. Staniční akumulátorová baterie je sestavena ze 4 ks monobloků typu Dryfit A412/48,0 M8. Nabíjecí zařízení je automatické bezúdržbové typu Dryfit Compact 19"230/48 V/25 A. Zdroj 24 Vss se skládá ze staniční akumulátorové baterie G9 a nabíjecího zařízení G7. Staniční akumulátorová baterie je sestavena z 8 ks serioparalelně zapojených monobloků typu Dryfit A412/48,0 M8. Nabíjecí zařízení je automatické bezúdržbové typu Dryfit Compact 19"230/24 V/25 A.

Systém napájení je situován v elektrorozvodně (místnost č. 085) s výjimkou systému zálohovaného napájení 230 Vst, který je umístěn v místnosti rozvaděčů OZ (místnost č. 193).

2.5.11 Vodní hospodářství

Vodní hospodářství se skládá z těchto hlavních částí:

- zásobní nádrž H03 (ležatá nerezová nádoba o objemu 19 m³), která slouží k uchování demivody, nádoba je umístěna na podlaží +0,00 m v blízkosti demineralizační stanice,
- demineralizační stanice je určena k přípravě demineralizované vody, zbavené převážné části rozpuštěných minerálních látek pomocí měničů iontů (ionexů), demistanice obsahuje tři za sebou řazené tlakové filtry s měniči iontů (anex, katex a směsný filtr – tzv. MIX-BED) a nádoby pro chemikálie sloužící k regeneraci měničů iontů, demineralizační stanice je umístěna na podlaží +0,00 m,
- manipulační čerpadlo P01, odstředivé spirálové čerpadlo (0,5 - 2,0 l/s), nasává a přečerpává demivodu z H01 do H02 a zpět přímo nebo přes ohřívák E01,
- čerpadlo P02 čistícího okruhu, odstředivé spirálové čerpadlo (0,5 - 2,0 l/s), slouží k dopravě demivody z H01 do H02 a H03, do demistanice F01 a zpět,

- čerpadlo P03 plnicího okruhu, odstředivé spirálové čerpadlo (0,5 - 2,0 l/s), přečerpává demivodu z H03 do H01 nebo H02 a slouží k odvzdušnění potrubních tras,
- elektrický průtokový ohřívák E01 (30 kW), slouží k ohřevu demineralizované vody v H01 a H02;
- nerezová vana H04 pod demineralizační stanicí je určena ke sběru úkapů ze stanice, odvodu regeneračních roztoků a proplachových vod; do vany je vyvedeno potrubí odběru vzorků demivody z nádoby H03, přepad vody z H03 a drenážní potrubí ucpávky čerpadla P03; výpusť z vany je vedena do likvidační stanice odpadních vod,
- nerezová vana H05 pod čerpadly je určena k záchytu úkapů demivody z čerpadel a ventilů. Je umístěná pod čerpadly P01 a P02 a pod ventily s elektropohony na technologické plošině +3,60 m. Výpusť z vany je vedena do likvidační stanice odpadních vod,
- dvě oběhová čerpadla zajišťující pomalou cirkulaci vody v nádobách H01 a H02 v případě, že v AZ nebo v chránilišti je umístěno palivo.

Systém vodního hospodářství je řízen technologickým panelem, který je umístěn ve velínu reaktoru (podlaží +3,60 m). Demineralizační stanice má svůj vlastní řídicí panel, který se nachází na dolním podlaží +0,00 m haly reaktoru.

V celém vodním hospodářství se používají standardní armatury, dálkově nebo ručně ovládané. Plní funkci uzavíracích ventilů, zpětných klapek a pojistného ventilu. Všechny armatury určené pro vodu jsou třídy PN 16 DN 50, příp. DN 25.

2.6 Stavební části reaktoru

Reaktor a celé jeho technologické vybavení je umístěno v hale č. 083, 182 a 286 (tři podlaží) v budově TL areálu MFF UK. Hala reaktoru je umístěna v severovýchodní části budovy TL, má rozměry 15 × 8,4 m a výškově přesahuje tři podlaží. Vlastní stavební část reaktoru umístěná v hale reaktoru se skládá z manipulační a přístupové plošiny, základů a stínění reaktoru, manipulační a revizní chodby, velínu reaktoru a inženýrských sítí. Hala reaktoru je vybavena systémem manipulačních plošin tak, aby byl v maximální míře umožněn pohodlný přístup k technologickému vybavení reaktoru. Pro reaktor byly využity stávající inženýrské sítě v hale, které byly dostatečně dimenzovány pro provoz velkého experimentálního zařízení, jako je reaktor, např. přívod vody, speciální kanalizace, elektrické rozvody nebo rozvody stlačeného vzduchu. V hale je vestavěn jednonosníkový mostový jeřáb o nosnosti 5 t. Reaktor se nachází přímo v centru haly, v rohu haly vedle vstupních vrat je umístěn velín reaktoru, který tvoří prosklená uzavřená místnost o rozměrech přibližně 4 × 4 m. Ve velínu je umístěn pult operátora a panel ovládání technologie reaktoru.

Nejvýznamnější stavební úpravou v prostoru haly bylo vybudování tělesa reaktoru, složeného z jeho základu a betonového stínění, ve kterém jsou umístěny obě reaktorové nádoby. V konstrukci stínění došlo oproti původnímu projektu k určité změně. Projekt původně předpokládal zabetonování reaktorových nádob. To však bylo ještě před zahájením stavebních prací nahrazeno požadavkem vyměnitelnosti nádob. Z tohoto důvodu byla do konstrukce stínění umístěna ocelová pouzdra. Tím se částečně (přibližně o 50 mm) zmenšila tloušťka stínění. Za účelem zvýšení účinnosti stínění byla provedena jeho betonáž až do výšky 2,2 m od podlahy haly (dolním podlaží +0,00 m) zvláště těžkým betonem s průměrnou

hustotou 3 826 kg/m³ a teprve od výšky 2,2 m do 3,6 m původně předpokládaným těžkým barytovým betonem s průměrnou hustotou 3 071 kg/m³. Navíc bylo stínění zesíleno ve směru trubkovnice (slouží k odkládání absorpčních tyčí a kanálů o průměru 56 mm v době, kdy se nenacházejí v nádobě H01 nebo H02). Trubkovnice je umístěna v periferní části betonového stínění nádoby H01 a skládá se z 10 nerezových odkládacích trubek 100 mm silnou vrstvou litiny. Prostor pod reaktorovými nádobami je za zvlášť stanovených podmínek přístupný pomocí kontrolní chodby.

V hale, ve které je reaktor provozován, je kromě vlastní reaktorové technologie (těleso reaktoru s reaktorovým a manipulačním bazénem, řídicí a bezpečnostní systém reaktoru, velín reaktoru, vodní hospodářství, experimentální vybavení) umístěno i potřebné přístrojové vybavení. Na halu reaktoru přímo navazují další tři místnosti, jedná se o místnost rozvaděčů OZ (místnost č. 193), rozvodnu reaktoru (místnost č. 085) a sklad čerstvého paliva (místnost č. 084). Místnost rozvaděčů OZ se nachází na úrovni prostředního podlaží haly (+3,60 m), rozvodna reaktoru a sklad čerstvého paliva na úrovni dolního podlaží (+0,00 m). Vchod do těchto místností je možný pouze přímo z haly reaktoru.

K pracovišti reaktoru VR-1 patří i některé laboratoře v objektu TL, ty však s vyřazováním reaktoru VR-1 z provozu nemají, resp. nemusí mít přímou souvislost (mohou a jsou často využívány nezávisle na provozu reaktoru VR-1).

2.7 Harmonogram, rozsah a termín vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. f) Předpokládaný termín zahájení vyřazování z provozu, zdůvodnění způsobu a rozsahu vyřazování z provozu a časový harmonogram vyřazování z provozu.

Strategie vyřazování v současnosti předpokládá zahájení vyřazovacích činností nejdříve v roce 2025, tedy 35 let od dosažení prvního kritického stavu reaktoru VR-1. Tento termín může být zkrácen, zejména pokud dojde k nějaké (blíže nespecifikované) události či změně. Podle konkrétního vývoje situace ovšem nelze vyloučit ani prodloužení doby provozu reaktoru VR-1 do období po roce 2025.

Na základě současných představ se v případě reaktoru VR-1 bude jednat o okamžité vyřazování. Okamžité vyřazování je definováno v § 11 odst. 1 vyhlášky č.377/2016 Sb. Jako způsob vyřazování, při kterém se vyřazovací činnosti provádějí plynule v nepřetržitém sledu od okamžiku zahájení vyřazování do jeho ukončení. Uvedený způsob vyřazování může být korigován podle aktuálního stavu v době rozhodnutí o vyřazení reaktoru VR-1. Odhad nákladů na vyřazování z provozu reaktoru VR-1, který se předkládá dle § 13 odst. 3 písm. n) vyhlášky č.377/2016 Sb. Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) společně s návrhem způsobu vyřazování z provozu, je vypracován jako samostatný dokument.

Z hlediska rozsahu vyřazování se předpokládá jeho provedení v jedné etapě, která bude zahrnovat jak ukončení provozu, tak i přípravu k likvidaci a vlastní likvidaci zařízení. Postup jednotlivých činností je blíže specifikován níže, nicméně detailní harmonogram činností není v současnosti zpracován. Reálně lze však předpokládat, že celkový proces vyřazování reaktoru VR-1 z provozu, tj. od ukončení provozu po ukončení vyřazování, bude trvat přibližně 3 roky.

První fází bude ukončení jeho provozu, za nějž lze považovat rozebrání AZ, tj. vyvezení PČ a dalších komponent z AZ (absorpční tyče, vertikální kanály a experimentální zařízení apod.). Veškeré palivo bude dočasně přesunuto do chrániliště v nádobě H02. Všechny ostatní komponenty AZ budou před jejich konečnou likvidací uskladněny v hale reaktoru, přičemž

budou nejprve pečlivě očištěny a bude provedena jejich dozimetrická kontrola. O způsobu a výsledcích kontroly bude pořízen záznam. Po dostatečném poklesu aktivity PČ (předpokládá se cca 3 až 5 měsíců od ukončení provozu reaktoru) budou všechny PČ přemístěny do skladu paliva, kde budou ponechány až do jejich odvozu z pracoviště. Po celou tuto dobu budou probíhat v pravidelných intervalech (cca měsíčních) dozimetrické kontroly PČ a prováděny záznamy o výsledcích. Před vlastním odvozem paliva bude také provedena vizuální a rozměrová kontrola PČ a opět pořízen záznam o této kontrole. Dále bude vyjmut NZ ze stínícího kontejneru (zařízení pro vstřelování zdroje) pod nádobou H01 a uložen do skladovacího stínícího kontejneru, který bude uskladněn na hale reaktoru až do rozhodnutí o jeho dalším nakládání. Souběžně s uvedenými činnostmi bude probíhat tvorba potřebných podkladů pro SÚJB za účelem podání žádosti o povolení vyřazování v souladu s § 13 atomového zákona. Do této části bude spadat především vypracování bezpečnostní zprávy způsobu vyřazení reaktoru VR-1 z provozu a další dokumentace požadované atomovým zákonem. Mezi hlavní body obsahu bezpečnostní zprávy bude patřit:

- (a) popis změn jaderného zařízení nebo pracoviště III. Kategorie a pracoviště IV. kategorie v průběhu jeho vyřazování z provozu, včetně seznamu systémů, konstrukcí a komponent dosud nevyřazených,
- (b) aktualizace jejich zařazení do bezpečnostních tříd,
- (c) změny v plánovaném způsobu vyřazování z provozu a jejich odůvodnění,
- (d) popis a zdůvodnění nutnosti instalace a provozu nových systémů, konstrukcí a komponent a jejich vlivu na zajištění radiační ochrany, monitorování radiační situace a zvládání radiační mimořádné události a
- (e) posouzení vlivu současně probíhajících vyřazovacích činností na zajištění radiační ochrany, monitorování radiační situace a zvládání radiační mimořádné události.

Dále budou vypracovány tři dokumenty, které budou předány SÚJB ke schválení před podáním vlastní žádosti o povolení vyřazování jaderného zařízení z provozu:

- limity a podmínky,
- plán zajištění fyzické ochrany
- program monitorování.

Jakmile získá provozovatel reaktoru VR-1 povolení k vyřazování z provozu, budou zahájeny vlastní vyřazovací práce. Nejprve bude z pracoviště reaktoru odvezeno jaderné palivo IRT-4M a také proutky s nízko-obohaceným uranem EK-10 (proutky se na pracovišti reaktoru používají pouze k experimentálním účelům). To bude zřejmě odprodáno (buď v tuzemsku, nebo v zahraničí), příp. za předem dohodnutých podmínek předáno do země původu (Ruská federace) k následnému zpracování. Vhodným odprodejem paliva by mohly být doplněny finanční zdroje potřebné pro vlastní likvidační práce. Pokud by se nenašlo další využití pro toto palivo, bude na něj nahlíženo jako na radioaktivní odpad, který bude uskladněn s největší pravděpodobností ve skladu VAO v ÚJV Řež a.s. až do doby konečného řešení, které bude v souladu s platnou koncepcí nakládání s radioaktivními odpady v ČR. V současné době se však jeví jako nejpravděpodobnější jeho odprodej a další využití v ÚJV

Řež a.s. Z pracoviště reaktoru bude odstraněn i NZ (typ Am-Be), který se používá při jeho provozu. Zdroj bude využit buď v některé školní laboratoři k výukovým účelům, nebo bude odborně zneškodněn prostřednictvím vybrané externí organizace (pravděpodobně Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s.). Stejným způsobem bude přistoupeno k likvidaci ionizačních komor RJ 1300, které se používají pro měření výkonu reaktoru.

Návazné likvidační práce by neměly z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany představovat již velký problém. Předpokládá se, že všechny reaktorové komponenty (technologie i stavební části) budou rozříděny podle hodnot specifických aktivit. Na jejich základě bude stanoven vlastní postup vyřazovacích činností. Ty bude organizačně zajišťovat dosavadní držitel povolení k provozu reaktoru (ČVUT v Praze), který si pro demontáž a následnou likvidaci technologických a stavebních celků objedná součinnost s vybranými externími organizacemi (s největší pravděpodobností ŠKODA JS a.s. Plzeň a Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s.).

Vyřazení z provozu bude formálně ukončeno vydáním příslušné zprávy, ve které budou výsledky vyřazení reaktoru VR-1 z provozu podrobně popsány a dokladovány.

2.8 Předpokládané radionuklidové složení látek vyskytujících se v jaderném zařízení v okamžiku před ukončením provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. g) Předpokládané radionuklidové složení látek vyskytujících se v jaderném zařízení nebo na pracovišti III. Kategorie nebo pracovišti IV. kategorie v okamžiku před ukončením provozu, posouzení jejich fyzikální a chemické formy, aktivity, toxicity, objemu a hmotnosti.

Radionuklidové složení látek vyskytujících se na pracovišti v okamžiku ukončení provozu bude s vysokou pravděpodobností opět velmi blízké současnému stavu. Bude se tedy jednat o ozářené (nicméně fyzikálně stále čerstvé – nespotřebované) jaderné palivo typu IRT-4M, EK-10 a používaný neutronový zdroj Am-Be.

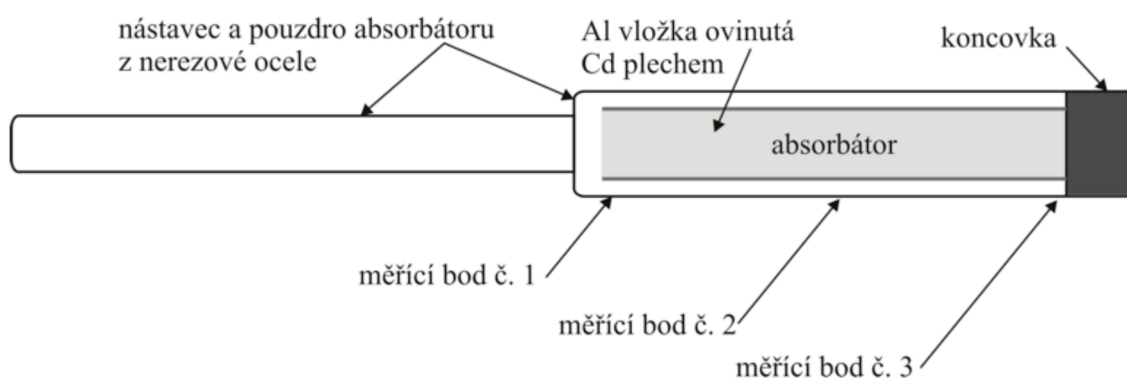
V případě paliva IRT-4M je uran pevně vázán ve formě oxidu v hliníkové matici (směs $\text{UO}_2 + \text{Al}$). Celková hmotnost uranu v palivu IRT-4M nepřesahuje 30 kg s obohacením 19,7 % ^{235}U (cca 5,8 kg ^{235}U). V palivových proutcích EK-10 (celkem 252 ks) je uran pevně vázán ve formě oxidu v hořčíkové matici ($\text{UO}_2 + \text{Mg}$). Celková hmotnost uranu v palivu EK-10 nepřesahuje 21 kg s obohacením do 10 % ^{235}U (cca 2 kg ^{235}U). Hodnota dávkového příkonu gama na povrchu paliva se pohybuje v závislosti na historii jeho ozáření¹ v rozmezí několika 100 $\mu\text{Sv}/\text{hod}$ až jednotek mSv/h . Uvedené hodnoty by se neměly významně měnit, protože se zvýšením výkonu reaktoru VR-1 se v současné době nepočítá. Co se týká izotopickeho složení, lze vzhledem k výkonu, na kterém je reaktor provozován, považovat palivo prakticky za čerstvé. Dle konzervativních odhadů se spotřebuje v typické AZ reaktoru VR-1 méně než 0,1 g ^{235}U za rok. Z uvedeného vyplývá, že palivo po ukončení provozu reaktoru VR-1 bude obsahovat především ^{238}U a ^{235}U (99,9 % původního obohacení po 35 letech provozu) a jen v nepatrné míře produkty štěpení a aktinoidy.

Neutronový zdroj, který je používán při provozu reaktoru, je tvořen směsí oxidu americia s metalickým beryliem. Směs je slisována ve dvojitěm válcovém pouzdře z nerez oceli. Aktivita zdroje je 185 GBq, dávkový příkon gama záření ve vzdálenosti 1 m je 125 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ a ekvivalentní dávkový příkon neutronů ve vzdálenosti 1 m je 110 $\mu\text{Sv}/\text{h}$. Ani palivo ani neutronový zdroj nepředstavují toxická rizika, pokud nedojde k jejich poškození.

¹Doba a intenzita ozáření. Pokud není palivo delší dobu využíváno v reaktoru (> 3 měsíce), klesají obvykle dávkové příkony záření gama na jeho povrchu pod 1 mSv/h .

Pokud jde o další (relativně velmi slabě) aktivované materiály, pak z vnitřních částí reaktoru půjde o absorbatory řídicích tyčí (7 kusů) a detektory neutronů (štěpné komory RJ 1300 – 11 kusů).

Absorbátory řídicích tyčí obsahují především nerez ocel 17.247 (pouzdro absorbátoru), hliník 424005 (vnitřní vložka a vodící pouzdro absorbátoru) a kadmium (absorpční materiál). Délka absorbátoru je 2 205 mm a hmotnost je 5,1 kg (celkem tedy cca 36 kg materiálu ze všech tyčí). Délka vodícího pouzdra je 1 846 mm, a hmotnost je 1,9 kg. Po ukončení provozu reaktoru se v těchto komponentách (zejména v částech umístěných v AZ, nebo blízko ní) může nacházet malé množství dále žijících radioizotopů (např. ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{62}Ni nebo ^{54}Mn), které vznikly reakcemi neutronů², s některými prvky obsaženými v oceli. Velmi často obsahuje ocel také nečistoty, což v případě přítomnosti ^{59}Co vede ke vzniku ^{60}Co ³. Měření dávkového příkonu na povrchu absorbátoru probíhá vždy po vyjmutí absorpčních tyče z AZ reaktoru (zpravidla v průběhu letní odstávky). Měření je prováděno obvykle ve třech bodech ocelového pouzdra absorbátoru (viz obr. 3). V tab. 2 jsou uvedeny průměrné hodnoty dávkového příkonu gama na povrchu absorbátoru získané z těchto měření.



Obr. 3: Schématický nákres absorbátoru s vyznačením bodů měření dávkových příkonů na jeho povrchu.

Tab. 2: Průměrné dávkové příkony gama na povrchu absorbátoru.

PDE _γ [μSv/h]		
Měřicí bod č. 1	Měřicí bod č. 2	Měřicí bod č. 3
5	8	10

Štěpné ionizační komory RJ 1300 se používají pro měření výkonu reaktoru, každá obsahuje cca 0,5 g ^{235}U (jedná se o odborný odhad, v podkladech k detektorům se tato hodnota neuvádí). Maximální dávkový příkon na povrchu detektoru se pohybuje bezpečně pod 100 μSv/hod.

Slabě aktivovaná mohou být dále některá pouzdra (hydraulické tlumiče) vkládaná do základové desky AZ (rozměry řádově cm, hmotnost pod 0,5 kg), a nerezové části koše AZ (včetně pravítek). Zde se jedná zhruba o 30 kg nerezového materiálu ve formě úzkých plechů. Přehled hodnot dávkových příkonů na povrchu vybraných komponent reaktorové nádoby H01 je uveden v tab. 3.

²Zpravidla reakce (n,γ), v menší míře pak reakce (n,p).

³Reakce ^{59}Co (n,γ) ^{60}Co .

2.9 Návrh organizační přípravy personálního zajištění v období vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. h) Návrh organizační přípravy personálního zajištění v období vyřazování z provozu.

Odpovědnost za vyřazení reaktoru VR-1 z provozu bude na jeho současném provozovateli (držiteli povolení), tj. ČVUT v Praze. Organizační přípravu bude zajišťovat provozní personál reaktoru VR-1, a to pod vedením vedoucího pracoviště KJR, který bude mít k této činnosti příslušné pověření od rektora ČVUT, jakožto představitele držitele povolení. Za účelem dohledu nad radiační ochranou bude k dispozici také osoba dohlížející, která má k této činnosti příslušná oprávnění a pověření. Na vyřazovacích činnostech se budou podílet také pracovníci externích organizací (především ŠKODA JS a.s. a Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s.).

Ze všech výše uvedených pracovníků bude operativně vytvořena organizační jednotka, která bude zajišťovat přípravu i vlastní vyřazení reaktoru VR-1 z provozu. Před zahájením vyřazovacích činností budou všichni pracovníci podrobně a prokazatelně seznámeni jak s vlastním plánem vyřazování, tak i aktuálním stavem pracoviště reaktoru VR-1.

2.10 Návrh zajištění fyzické ochrany v období vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. i) Návrh zajištění fyzické ochrany v období vyřazování z provozu.

Fyzická ochrana bude na pracovišti reaktoru VR-1 zajišťována ve stávajícím rozsahu do okamžiku odvozu jaderného paliva a jiných jaderných materiálů. Po odvozu všech jaderných materiálů budou opatření fyzické ochrany zrušena a elektronické systémy zabezpečení budou demontovány. Po celou dobu vyřazovacích činností bude evidován a kontrolován pohyb osob na pracovišti reaktoru.

Před vlastním vyřazováním bude zpracován průkaz zajištění fyzické ochrany reaktoru VR-1 vyřazeného z provozu.

2.11 Návrh programu monitorování

Vyhláška č. 377/2016., § 13 odst. 3 písm. j) Návrh programu monitorování v období vyřazování z provozu.

Tab. 3: Hodnoty dávkového příkonu gama měřené na povrchu vnitřních částí reaktorové nádoby H01

Komponenta	PDE _γ [μ Sv/h]
Pouzdro	1-3
Základová deska	1,5-4,5
Rám základové desky	0,1-0,4
Rošty	0,15-0,2
Koš aktivní zóny	0,3-0,7

Monitorování při vyřazování z provozu bude probíhat po celou dobu vyřazování a to standardním způsobem, jak je popsáno v programu monitorování pracoviště reaktoru VR-1.

2.11.1 Osobní monitorování

zahrnuje monitorování následujících kategorií osob vstupujících do KP reaktoru VR-1:

- radiační pracovníci reaktoru VR-1 kategorie A (zaměstnanci KJR FJFI ČVUT v Praze),
- radiační pracovníci reaktoru VR-1 kategorie B (zaměstnanci FJFI ČVUT v Praze),
- servisní pracovníci,
- účastníci experimentálních měření,
- návštěvníci – exkurze (hromadný vstup),
- jednotlivec z obyvatelstva.

2.11.2 Monitorování pracoviště

Monitorování pracoviště reaktoru VR-1 zahrnuje:

- kontinuální měření příkonu dávkového ekvivalentu záření gama a neutronů radiačním monitorovacím systémem RMS VR-1 (BQM Praha),
- monitorování pracoviště termoluminiscenčními dozimetry v osmi vybraných bodech uvnitř objektu, - měření přenosnými přístroji pro měření příkonu dávkového ekvivalentu a plošných aktivit na pracovišti.
- pravidelné monitorování objemové aktivity aerosolů v ovzduší uvnitř haly reaktoru přístrojem Canberra iCAM.

2.11.3 Monitorování okolí a vlivu na životní prostředí

Tab. 4: Monitorování okolí pracoviště reaktoru VR-1 TL dozimetry

TLD č.	Umístění
1	Kryopavilon MFF UK
2	Vrátnice vývojových dílen
3	Vrátnice katedrového objektu
4	Vrátnice těžkých laboratoří
5	Katedrový objekt – místnost A643

2.11.4 Monitorování výpustí

Monitorování výpustí na reaktoru VR-1 zahrnuje monitorování:

- odpadních vod,
- radioaktivních aerosolů.

2.12 Záměr provádění úprav zóny havarijního plánování a záměr připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost

Vyhláška č. 377/2016., § 13 odst. 3 písm. k) Záměr provádění úprav zóny havarijního plánování, pokud byla stanovena, a záměr připravenosti k odezvě na mimořádnou radiační událost.

Dle vyhlášky 359/2016., § 2 odst. 1 písm. c) pracoviště reaktoru VR-1 spadá do kategorie C, tudíž se havarijní zóna nezřizuje.

2.13 Popis bezpečného nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem včetně financování

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. l) Popis bezpečného nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem včetně financování tohoto nakládání, bude-li radioaktivní odpad nebo vyhořelé palivo vznikat.

Provozovatel reaktoru VR-1 (ČVUT v Praze) je v souladu s § 38 odst. 1 písm. b) Atomového zákona zproštěn povinnosti vytvářet finanční rezervy na vyřazování z provozu, jelikož se jedná o veřejnou vysokou školu.

Pokud se při vyřazování reaktoru VR-1 z provozu nenajde další využití pro jaderné palivo typu IRT-4M (obohacení 19,7 % ^{235}U) a EK-10 (obohacení 10 % ^{235}U) vznikne pevný radioaktivní odpad o celkové hmotnosti paliva 120 kg (palivová směs + hliníkové pokrytí a koncovky), který bude uskladněn s největší pravděpodobností ve skladu VAO v ÚJV Řež a.s. až do doby konečného řešení, které bude v souladu s platnou koncepcí nakládání s radioaktivními odpady v ČR. Přepravu a uskladnění paliva by zajistilo Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s. Stejným způsobem by byla řešena i problematika NZ, používaného při provozu reaktoru. Pokud by se pro tento zdroj nenalezlo další vhodné uplatnění, zajistilo by jeho likvidaci opět Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s. Radioaktivní odpad budou představovat také slabě aktivované konstrukční části z nejbližšího okolí aktivní zóny reaktoru (koš aktivní zóny, základová deska v nádobě H01, pouzdra, absorbatory řídicích tyčí a další) a štěpné komory RJ 1300. Celkem se bude jednat o cca 200 kg konstrukčního materiálu, který bude obsahovat především nerez ocel 17.247, hliník 424005 a kadmium. V případě detektoru RJ 1300 se jedná o vysoce obohacený uran (více než 90 % ^{235}U), který obsahuje přibližně 0,5 g ^{235}U v každé komoře (tj. 5,5 g ^{235}U odhadovaná hmotnost pro všechny komory). Likvidaci těchto materiálů by zajišťovala opět externí organizace (pravděpodobně Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s.).

Co se týká kapalných odpadů⁴, které vzniknou při vyřazování reaktoru VR-1 z provozu, nepředpokládá se, že by se jednalo o RA odpady. Odpadní vody z haly reaktoru jsou svedeny do havarijní jímky a odtud přečerpávány do likvidační stanice odpadních vod, která slouží pro všechny aktivní laboratoře v objektu TL MFF UK a která obsahuje dvojici sběrných jímek (vymírací nádrže) a vypouštěcí jímku. Před vypuštěním do kanalizace se provádí odběr vzorků a měření aktivity. Objemová aktivita vypouštěných odpadních vod musí splňovat požadavky § 105 odst. 5 vyhlášky č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. Možným zdrojem kapalných RA odpadů by mohly být pouze RA látky

⁴Bude se jednat především o oplachy vzniklé při čištění vnitřních částí reaktorových nádob a konstrukčních materiálů)

uvolněné do chladiva v případě poškození povrchu palivových článků. Prevence kontaminace chladiva je zde založena především na pravidelných a pečlivých vizuálních kontrolách povrchu palivových článků. Cílem kontrol je včasné odhalení případných mechanických nebo korozních, či jiných chemických opotřebení, jež by mohla vést k porušení povrchu palivových článků. V případě pochybností plynoucích z vizuální kontroly jsou provedeny další rozšiřující kontroly, například formou otěrové zkoušky. Při dodržení všech bezpečnostních postupů pro manipulaci s radioaktivním odpadem nebudou při vyřazování reaktoru VR-1 z provozu uvolněny do životního prostředí žádné radioaktivní odpady.

Při provozu školního reaktoru VR-1 vyhořelé jaderné palivo nevzniká. Jak již bylo uvedeno, jedná se sice o ozářené palivo, nicméně prakticky fyzikálně čerstvé. Jako příklad lze uvést, že běžné konfigurace AZ, používané při provozu reaktoru VR-1, obsahují mezi 4500 až 6000 g izotopu ^{235}U . Přitom roční „spotřeba“ tohoto izotopu je menší než 0,1 g ^{235}U . (maximálně 0,002 % za rok). Přesto bude nakládání s palivem (jedná se o jaderné materiály ve smyslu příslušných předpisů) věnována prvořadá pozornost. Podle současné představy bude toto palivo vyvezeno z reaktoru, zkontrolováno (vizuálně i z hlediska jeho aktivity) a z pracoviště VR-1 odvezeno. Nejpravděpodobnějším místem přepravy bude ÚJV Řež s.r.o. za účelem jeho dalšího využití (například v reaktoru LVR-15, který provozuje Centrum výzkumu Řež s.r.o.), vyloučit však nelze ani jeho repatriaci do Ruské federace, nebo přeprava do některého výzkumného ústavu v zahraničí. Teprve tehdy, když se nepodaří najít další využití pro toto palivo, bude na něj nahlíženo jako na radioaktivní odpad, který bude uskladněn s největší pravděpodobností ve skladu VAO v ÚJV Řež a.s. až do doby konečného řešení, které bude v souladu s platnou koncepcí nakládání s radioaktivními odpady v ČR.

Kromě současného paliva typu IRT-4M jsou na pracovišti reaktoru používány pro experimentální práce v nevelkém rozsahu palivové proutky typu EK-10 (obohacení 10 % ^{235}U). Opět se jedná o fyzikálně čerstvé palivo. Způsob nakládání s tímto palivem (není bezprostředně spojeno s provozem reaktoru VR-1) bude stejný jako v případě paliva IRT-4M. Stejným způsobem by byla řešena i problematika NZ používaného při provozu reaktoru. Další jaderné materiály, které jsou používány na pracovišti reaktoru k výukovým a experimentálním účelům (malé množství uranu a thoria v podobě fólií, resp. ampule s přírodním a mírně obohaceným uranem) budou pravděpodobně využity dále ve výuce na FJFI ČVUT v Praze. Veškeré jaderné materiály budou vyjmuty z evidence jaderných materiálů a řádně převedeny do jiné oblasti materiálové bilance (pracoviště mající povolení k nakládání s jadernými materiály). Ve stejném duchu se uvažuje i o využití dalších dvou NZ (oba zdroje jsou typu Am-Be), které jsou součástí laboratoří KJR. Teprve tehdy, když se nepodaří pro tyto materiály najít další využití, bude na ně nahlíženo jako na radioaktivní odpad, který bude zneškodněn externí organizací (pravděpodobně Centrum nakládání s radioaktivními odpady ÚJV Řež a.s.).

2.14 Popis využití území a systémů, konstrukcí a komponent

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. m) Popis a využití území a systémů, konstrukcí a komponent nebo, není-li možné úplné vyřazení, program pro údržbu, zkoušky, kontrolu systémů, konstrukcí a komponent zohledňující jeho změny v průběhu vyřazování z provozu.

Materiály neuvedené v kap. 2.13 – nakládání s RAO, by po důkladném proměření měly být likvidovány již jako materiály neaktivní (cca 20 000 kg nerezové oceli a 1000 kg hliníku).

Jak bude lokalita využívána po vyřazení VR-1 z provozu není zatím známo a není to

zatím ani předmětem jednání mezi FJFI ČVUT v Praze (provozovatel reaktoru) a MFF UK (vlastník objektu). Podle současného vývoje se ukazuje jako pravděpodobné, že po skončení provozu školního reaktoru VR-1 a jeho vyřazení z provozu budou prostory předány MFF UK. Ani v důsledku provozu reaktoru VR-1 ani při jeho vyřazování z provozu nedojde v okolí pracoviště reaktoru VR-1 k žádným změnám, nebo jeho ovlivnění dlouhodobějšího charakteru. U provozu reaktoru je to možné konstatovat na základě již více než dvacetileté provozní zkušenosti, u jeho vyřazování z provozu je to s ohledem na předpokládané postupy velmi reálný předpoklad.

2.15 Výchozí podklady pro odhad nákladů na vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. n) Výchozí podklady pro odhad nákladů na vyřazování z provozu.

Viz dokument Odhad nákladů na vyřazování školního reaktoru VR-1 z provozu [6]

2.16 Návrh zajištění radiační ochrany v období vyřazování z provozu

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 13 odst. 3 písm. o) Návrh zajištění radiační ochrany v období vyřazování z provozu.

Radiační ochrana bude zajišťována stávajícími prostředky. Po celou dobu vyřazování z provozu se budou pracovníci řídit programem monitorování VR-1, který zahrnuje monitorování pracoviště, osobní dozimetrii apod., dále pak řídicím postupem č. 5 Řízení radiační ochrany [7], kde jsou popsány zásady radiační ochrany při veškeré manipulaci. Vzhledem k častým manipulacím v rámci ZKE (rozebírání aktivní zóny a její opětovné složení) mají pracovníci VR-1 bohaté zkušenosti s radiační ochranou.

3 Vazba vyřazování na podkritický reaktor VR-2

Vazba školního reaktoru VR-1 na podkritický reaktor VR-2 je primárně vytvořena přítomností VR-2 v prostorách haly VR-1.

Významným faktem provázanosti VR-1 a VR-2 z hlediska jejich vyřazování je, že VR-2 nevyužívá žádný konstrukční celek, který je klíčový pro vyřazení VR-1. Tudíž není nutné předem definovat posloupnost vyřazení jednotlivých zařízení a obě varianty, tj. VR-2 před VR-1, resp. VR-1 před VR-2, jsou proveditelné a po praktické stránce zaměnitelné. Je ale nutné zdůraznit, že v oblasti systémů, konstrukcí a komponent existuje určitý překryv. Jedná se o radiační monitorovací systém a zajištění fyzické ochrany zařízení, a to hlavně v případě, kdy by VR-1 mělo být vyřazeno dříve než VR-2.

Způsob provozu obou zařízení umožňuje dočasně pozastavit provoz jednoho zařízení, je-li druhé zařízení vyřazováno z provozu. Díky této provozní flexibilitě je jakýkoli problém v rámci vazeb obou zařízení během přípravy zařízení (a také v případě jakékoli nehody během vyřazování) snadno řešitelný. Podkritický reaktor VR-2 navíc umožňuje i jeho dočasné kompletní demontování, vznikne-li taková potřeba během vyřazování VR-1.

Plán vyřazování podkritického reaktoru VR-2 je uveden v dokumentu [8].

Literatura

1. ČESKO. Atomový zákon 263 ze dne 14. července 2016. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2016.
2. ČESKO. Vyhláška č. 377/2016 Sb., o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2016.
3. IAEA. *Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors*. IAEA Safety Standards Series No. WS-G-2.1, 1999. Č. ISBN:92-0-102599-8.
4. RATAJ, J.; al. et al. *Bezpečnostní zpráva školního reaktoru VR-1, CTU-14117-P-040-17*. Praha: KJR FJFI ČVUT v Praze, 2017.
5. FRÝBORTOVÁ, L. *Vnitřní havarijný plán pro pracoviště KJR, CTU-14117-S-09-22*. Praha: KJR FJFI ČVUT v Praze, 2022.
6. RATAJ, J. *Odhad nákladů na vyřazování školního reaktoru VR-1 z provozu, CTU-14117-P-017-17*. Praha: KJR FJFI ČVUT v Praze, 2017.
7. LOSA, E. *Řídicí postup č. 5 - Řízení radiační ochrany na pracovišti KJR, CTU-14117-P-13-22*. Praha: KJR FJFI ČVUT v Praze, 2022.
8. FEJT, F. *Koncepce bezpečného ukončení provozu podkritického reaktoru VR-2, CTU-14117-P/2-11-20*. Praha: KJR FJFI ČVUT v Praze, 2020.