

## Návrhy zjednodušení licenčního procesu SMR založené na odstupňovaném přístupu

### Graded approach based suggestions on how to simplify SMR licensing process

*Kamil Števanka, Ondřej Šťastný, Karel Katovský*

*Kamil.Stevanka@vutbr.cz, xstast30@stud.feec.vutbr.cz, katovsky@feec.vutbr.cz*

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

DOI: -

**Abstract:** Article focuses on the issue of licensing small modular reactors (SMR). Attention was mainly given to the graded approach, how is it used today and how it could current approach be adjusted to help increase efficiency of SMR licensing process. The application of defense in depth and establishment of emergency planning zone with respect to SMR features was also studied. Finally, several aspects of SMR design and their implications for licensing process were discussed.

# Návrhy zjednodušení licenčního procesu SMR založené na odstupňovaném přístupu

Kamil Števíanka, Ondřej Šťastný, Karel Katovský

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně  
Email: Kamil.Stevanka@vutbr.cz, xstast30@stud.feec.vutbr.cz, katovsky@feec.vutbr.cz

**Abstrakt** – Článek se zabývá problematikou licencování malých modulárních reaktorů (SMR). Největší pozornost byla věnována odstupňovanému přístupu při posuzování projektů SMR. Jsou zkoumány otázky jakým způsobem je odstupňovaný přístup využíván dnes a jak by se dalo stávající legislativu upravit pro efektivnější posuzování SMR. Dále bylo popsáno, k jakým změnám bude potřeba přistoupit v přípravě ochrany do hloubky a zóny havarijního plánování u SMR. Na závěr byly uvedeny některé aspekty designu SMR, které budou vyžadovat změny v legislativě, aby mohla být komercializace SMR úspěšná.

## 1 Úvod

Společně s rozvojem jaderného průmyslu se rozvíjel i regulační rámec jaderného odvětví. Největší změny následovaly po závažných událostech, ve 20. století to byla především nehoda Three Mile Island [1] a nehoda v Černobylu [2]. Ve 21. století to byla především havárie jaderné elektrárny Fukushima, která výrazně ovlivnila nároky na zabezpečení jaderných elektráren [3], ale také například útok na World Trade Center 11. září 2001.

Zvýšené požadavky na zabezpečení elektráren se projeví ve zvýšení nákladů na stavbu velkých jaderných bloků [4]. To vedlo v devadesátých letech v zemích EU a USA, společně se složitou politickou situací, komplikovaným financováním a logistikou, ke snížení zájmu investorů, veřejnosti a politické reprezentace o rozvoj jaderné energetiky. Následně bylo v EU a USA zahájeno jen velmi málo jaderných staveb [5] a ty, které zahájeny byly, mají velké zpoždění a překračují rozpočet [6].

Na tuto situaci zareagovala řada odborníků a firem a začali vyvíjet malé modulární reaktory (SMR) [7]. Ty by měly umožnit zjednodušení schvalovacího procesu, zrychlit výstavbu a usnadnit nasazení jaderných elektráren do energetického mixu, protože se bude jednat o méně výkonné jednotky, které nebudou vyžadovat tak vysoké počáteční investice, umožní postupné přidávání jednotek a měly by představovat menší riziko pro investory než velké jaderné bloky [8]. Aby mohly být SMR reaktory úspěšné, je nutné přezkoumat a případně změnit stávající legislativu v jednotlivých státech, která je primárně určená pro existující reaktory. Tedy především velké tlakovodní (PWR) a varné

jednotky (BWR) [9]. Za tímto účelem bylo pod záštitou IAEA<sup>1</sup> vytvořeno SMR Regulators' Forum [10].

IAEA definuje SMR jako reaktory, které mají elektrický výkon <300 MWe a tepelný <1000 MWt, byly vyvinuty pro komerční použití, jejich design umožňuje přidání několika reaktorů v těsné blízkosti, přičemž využívají stejnou infrastrukturu, používají inovační designové prvky a nebyly běžně analyzovány nebo licencovány úřady dohlížejícími na bezpečnost JE [10].

Společné rysy všech SMR nelze definovat, jelikož mnoho konceptů je stále v rané fázi vývoje, ale všechny koncepty mají několik vlastností, které mohou ovlivnit licenční proces. Mezi tyto vlastnosti patří nižší množství zbytkového tepla, nižší množství radionuklidů, pasivní a inherentní bezpečnostní prvky, integrální design, nižší množství budov, systémů a komponent (SSCs), jiné druhy bariér zabraňující úniku produktů štěpení a nová paliva. Zároveň se objevují nové problémy jako například interakce mezi moduly, nové konstrukční metody, počet operátorů v případě elektrárny s více reaktory, sdílení komponent mezi více jednotkami a riziko selhání více modulů při jaderné události. Tyto skutečnosti budou muset být zohledněny při vytváření legislativního rámce pro licencování SMR. [10]

Jednou z hlavních výhod jak modulárních reaktorů chlazených vodou, tak reaktorů chlazených jinými médii je minimalizace rizika poškození reaktoru a snížení dopadů případné havárie na okolí. Takzvaná frekvence poškození aktivní zóny (CDF)<sup>2</sup> je u standardních PWR reaktorů III+ generace < 10<sup>-6</sup> [11], zatímco u SMR je výrazně nižší, například reaktor NuScale má CDF<sup>3</sup> < 10<sup>-10</sup> [12]. Tato skutečnost může vézt ke snížení nároků na bezpečnostní opatření bez zvýšení rizika pro obyvatele.

Aby mohlo dojít ke snížení nároků na bezpečnostní prvky a opatření elektráren, či jejich úplnému zrušení, musí být všechna rizika a scénáře potenciálního vývoje radičních mimořádných událostí na jaderné elektrárně (JE) řádně vyhodnoceny. Vzhledem k tomu, že převážná většina komerčních reaktorů jsou velké lehkovodní jednotky, je regulační rámec nastavený primárně pro potřeby hodnocení těchto bloků. Aby bylo možné modulární reaktory komercializovat, obrací se společnosti vyvíjející SMR

<sup>1</sup>Mezinárodní agentura pro atomovou energii

<sup>2</sup>CDF - Core damage frequency vyjadřuje pravděpodobnost, že dojde k poškození paliva v aktivní zóně reaktoru

<sup>3</sup>CDF SMR IV. generace není znám, neboť ještě nebyly detailně hodnoceny.

reaktory na národní úřady i na IAEA s žádostí o přehodnocení postupů udělování licencí pro JE. SMR Regulators' Forum identifikovalo tři body, na které by se měly úřady dohlížející na jadernou bezpečnost zaměřit při vytváření pravidel pro hodnocení SMR [10].

- **Odstupňovaný přístup** - Firmy oslovují regulátory s návrhy na zmírnění bezpečnostních požadavků a zjednodušení procesu.
- **Ochrana do hloubky** - Společnosti navrhují alternativní způsoby přístupu k ochraně do hloubky v jejich designech.
- **Zóny havarijního plánování** - Na základě charakteristik SMR navrhují někteří výrobci zmenšení zón havarijního plánování.

Analýzou a harmonizací postupů národních úřadů by mohlo dojít ke snadnější komercializaci nových typů reaktorů.

Státní úřad pro jadernou bezpečnost situaci sleduje, spolupracuje s IAEA a účastní se a organizuje setkání, kde se tématem SMR mezinárodní komunita zabývá [13, 14].

## 2 Odstupňovaný přístup

S rostoucím zájmem a postupujícím vývojem SMR začali jednotliví výrobci oslovovat státní úřady s návrhy na snížení požadavků při provádění designových a bezpečnostních analýz. Je potřeba, aby regulátoři objasnili své stanovisko a přesně definovali, co odstupňovaný přístup („OP“) znamená. Ačkoliv každý stát odstupňovaný přístup ve vztahu k jaderným zařízením a materiálům používá, není jasně definováno kdy, kdo a jakým způsobem tuto metodu aplikuje. [10]

Obecně pojem odstupňovaný přístup znamená, že úroveň aktivit, analýz, verifikace, dokumentace, regulace a procedur, které jsou použity ke splnění bezpečnostních požadavků, by měla být přiměřená potenciálnímu nebezpečí a zároveň neměla negativní vliv na bezpečnost jaderného zařízení. V určitých případech může dojít na základě analýzy ke snížení požadavků na ochranná opatření, ale rovněž může dojít k jejich zpřísnění. Použitím OP může dojít ke zvýšení efektivity při licencování, aniž by byla kompromitována celková bezpečnost, protože umožňuje soustředit se na důležité bezpečnostní aspekty elektrárny. Využití odstupňování je velmi závislé na informacích, které jsou k dispozici pro posouzení bezpečnostních návrhů výrobce. To znamená, že čím osvědčenější použité systémy, metody, postupy atp. jsou, tím přímočařejší může být jejich hodnocení, zatímco u inovačních technologií s vyšší mírou nejistoty může vzniknout požadavek na vyšší bezpečnostní rezervy. Toto staví výrobce do paradoxní situace, kdy si musí vybrat mezi inovacemi a jednodušším licencováním [10].

Každý stát uplatňuje OP jiným způsobem a na jiné problémy. OP se již dnes používá při licencování výzkumných

reaktorů. IAEA publikovala dokument SSG-22<sup>4</sup>, jehož účelem je poskytnout dodatečnou podporu při licencování výzkumných reaktorů [15].

Proto pracovní skupina SMR Regulators Forum zabývající se OP, navrhuje vytvořit podobný dokument, který již existuje pro licencování výzkumných reaktorů. Například francouzský výzkumný reaktor RJH dosahuje výkonu 100 MW<sub>t</sub> [16], tento výkon představuje polovinu tepelného výkonu jednoho modulu NuScale [17]. Z toho vyplývá, že výkon RJH je dostatečně vysoký na to, aby bylo možné využít zkušenosti získané licencováním výzkumných reaktorů při licencování SMR [18].

Příkladem mohou být koncepce společností Rolls-Royce<sup>5</sup> [19] a NuScale [17]. Zatímco koncept NuScale má méně SSCs ovlivňujících bezpečnost, pasivní odvod zbytkového tepla a další netradiční vlastnosti, a tedy potenciálně zjednoduší licenční proces, bude mít situaci při licencování prvních elektráren složitější než Rolls-Royce, neboť ten využívá standardní PWR reaktor a systémy, které byly mnohokrát hodnoceny, a tudíž jsou považovány za osvědčené. Ovšem v případě, že se několikaletým provozem elektráren NuScale bezpečnostní předpoklady potvrdí, měl by být licenční proces zjednodušen a zkrácen. Nedostatek provozních zkušeností a z toho plynoucí nejistoty musí být zohledněny při licencování elektráren, obzvláště u prvních demonstračních jednotek jaderných bloků.

Problematika OP se netýká pouze hodnocení jaderných elektráren, ale také výrobních závodů. Řada konceptů SMR počítá s kompletní výrobou reaktorů, a to včetně zavezení paliva, již v prostorách továrny. Tato situace představuje unikátní problém pro národní regulátory. Bude nutné změnit pohled na jaderná zařízení během fáze výroby, testovací, dopravní a při uvádění do provozu [10].

Žadatel o licenci a regulátor využijí OP jiným způsobem. Žadatel musí poskytnout dostatečné důkazy o tom, že jejich činnost bude prováděna bezpečně a v souladu s požadavky. OP nabízí žadateli možnost soustředit se na implementaci a management vhodných bezpečnostních a kontrolních opatření. Regulátor může použít OP k rozhodnutí o tom jakým způsobem bude žádost posuzovat, rozhodnout, zda žadatel prokázal splnění požadavků pro udělení licence a naplánovat provádění inspekcí [10].

### 2.1 Postoj vybraných států

Mezi zeměmi, na které se pracovní skupina pro OP zaměřila, byly Kanada, USA, Francie, Rusko a Finsko. Čína a Jižní Korea informace neposkytly.

#### 2.1.1 Kanada

V kanadském regulačním rámci je OP chápán tak, že by metody nebo procesy, kterými se bezpečnost hodnotí, měly být úměrné relativnímu ohrožení zdraví, bezpečnosti,

<sup>4</sup>Use of a Graded Approach in the Application of the Safety Requirements for Research Reactors

<sup>5</sup>Byť se nejedná o SMR, neboť má výkon až 450 MWe dle definice IAEA.

zabezpečení, přírodnímu prostředí a implementaci mezinárodních dohod. Mezi nástroje, které CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission) využívá, patří [10, 20, 21, 22]:

- Analytické nástroje - expertní posudky, počítačové analýzy, inženýrské a vědecké výpočty, laboratoře CNSC a laboratoře třetích stran.
- CNSC risk informed decision making process (RIDM) - formální metoda pro analýzu komplexních scénářů rizik. Klíčové prvky RIDM procesu jsou - definice problému, evaluace a vyhodnocení rizika (úroveň rizika), opatření pro kontrolu rizika, monitoring implementace opatření.
- Informační nástroje - výzkumné aktivity, informace od ostatních regulačních orgánů, informace od dalších zainteresovaných subjektů, informace od mezinárodních organizací, - například NEA<sup>6</sup>, IAEA.
- Nástroje systémového managementu - CNSC analýza nákladů a přínosů aplikovaná na aktivity úřadu, interní pracovní procesy a instrukce řídicí hodnocení a inspekce, interní expertní skupiny nebo výbory, které doporučují vhodné postupy při řešení komplexních problémů, využití rozhodovacích matic, které na základě vyhodnoceného rizika stanovují vhodný postup.
- Globální procesy CNSC - financování projektů nezávislého výzkumu, licenční procesy, účast na mezinárodních konferencích a setkáních.

### 2.1.2 Finsko

Princip OP byl přidán do finského jaderného zákona v roce 2013 (499/2013).

Například podle metodiky YVL A.5. - „Construction and commissioning of nuclear facility“ by měly být management kvality a požadavky na zajištění kvality nastavené žadatelem o licenci odstupňovány dle metodiky YVL A.3. Aby byla zajištěna adekvátní úroveň kvality, musí být při použití odstupňování brán ohled na bezpečnostní význam produktu nebo funkce, technickou náročnost a komplexnost produktu nebo funkce, jedinečnost produktu nebo funkce a výsledný nedostatek zkušeností [10, 23, 24].

### 2.1.3 Francie

Pojem OP není ve Francii používán. Předpisy, které stanovují obecná pravidla aplikovatelná na design, konstrukci a provoz jaderných zařízení říkají, že hodnocení zařízení by mělo být proporční míře rizika nebo inherentním nedostatkům instalace.

Ve Francii by „OP“ mohl být založen především na důvěryhodných technických informacích získaných z provozu, zpětné vazbě k designu a kontinuálním výzkumu. Validace kódů je vyžadována pro všechny aplikace a bezpečnostní

rezervy musí být velmi dobře doloženy. Zvýšená pozornost je věnována inovativním prvkům a námětům vzešlým z provozních zkušeností. V případě osvědčených technologií a opatření je nutné prokázat „přenositelnost“ na nová zařízení.

Analytické nástroje používané ve Francii v rámci rozhodovacího procesu jsou následující: expertní posudek, počítačové simulace, nezávislé inženýrské a vědecké výpočty, podpůrné R&D technické hodnocení.

Francie má zkušenosti se standardizovanou flotilou reaktorů. Reaktor, který byl první svého druhu, byl důkladně prověřen, u dalších reaktorů se pozornost věnovala specifikům lokality, popřípadě inovacím designu [10, 25].

### 2.1.4 Rusko

V Rusku, podobně jako ve Francii, neexistuje přesná definice OP.

V prováděcích předpisech článku 24 Federálního zákona „O Využití jaderné energie“ stojí: „Opatření, která zavede státní regulační orgán budou přiměřená potenciálnímu riziku vyplývajícímu z aktivit souvisejících s využíváním jaderné energie a jaderných zařízení.“

V Rusku jsou jaderná zařízení rozdělena do čtyř kategorií. Přidělení kategorie je závislé na hodnocení následků potenciální havárie. Hodnocení nezohledňuje transport materiálů za hranice zařízení nebo vnější vlivy jako pád letadla či útok. V závislosti na kategorii se mění požadavky na umístění a provoz zařízení či velikost hygienického ochranného pásma [10, 26].

- Kategorie I - Jaderná zařízení, kde může mít nehoda dopad na obyvatelstvo. Mohou být požadována opatření na ochranu obyvatel.
- Kategorie II - Jaderná zařízení, kde je radiologický dopad nehody omezen na zónu hygienického ochranného pásma.
- Kategorie III - Jaderná zařízení, kde je radiologický dopad nehody omezen na oblast objektu, ve kterém se zařízení nachází.
- Kategorie IV - Jaderná zařízení, kde je radiologický dopad nehody omezen na prostory budovy, ve které se zařízení nachází.

### 2.1.5 USA

V USA není specifická definice OP, ale koncept zaměřování se na bezpečnostně významné aspekty zařízení je zmíněn v různých strategiích a regulatorních dokumentech.

V prohlášení o zásadách pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (PRA<sup>7</sup>) je napsáno: „Použití PRA by mělo být navýšeno ve všech regulatorních záležitostech do té míry, která je podpořena nejmodernějšími metodami a daty PRA a zároveň doplňuje deterministický

<sup>6</sup>Nuclear Energy Agency

<sup>7</sup>NRC používá termín probabilistic risk assessment

přístup NRC<sup>8</sup> a podpoří tradiční filozofii NRC ochrany do hloubky.“ [27]

Žadatel může dobrovolně implementovat regulaci, která se zakládá na takzvané risk-informed kategorizaci a hodnocení budov, systémů a komponent. Žadatel se může odkázat na certifikovaný design a následně se věnovat pouze rozdílům oproti certifikovanému designu a prvkům, které jsou specifické dané lokalitě. Další žadatelé mohou následně použít stejný postup [10, 28].

## 2.2 Společné a rozdílné prvky přístupu států k OP

Regulátoři se shodují na potřebě flexibilního přístupu při hodnocení a kontroly bezpečnostních opatření bez rizika kompromitování bezpečnosti. V mnoha případech již existují nástroje a zkušenosti pro hodnocení SMR. V jiných případech bude potřeba ve větší míře využít expertního posudku regulátorů, než budou tvrzení jednotlivých SMR reaktorů demonstrována v provozu.

Všechny státy využívají podobné nástroje k hodnocení bezpečnosti (viz část o kanadském OP) a do určité míry implementují základní principy OP. Nicméně přístup každé země je ovlivněn národní legislativou, mírou účasti veřejnosti, systémem procesů pro analýzu, technickým hodnocením a schvalováním, vyspělostí a typem technologií, historickou zkušeností regulátora a průmyslu [10].

Z výše zmíněných důvodů bude harmonizace schvalovacího procesu komplikovaná, přesto snaha o spolupráci existuje.

### 2.2.1 Problematické oblasti

Míra využití OP je závislá na přístupu regulátora. Ne všechny země mají technologicky neutrální předpisy. Z toho důvodu bude nutné bezpečnostní požadavky analyzovat a případně změnit. Například výpočetní kódy mohou být příliš omezující, avšak ve většině případů mohou být základní bezpečnostní principy využity k potřebné úpravě stávající legislativy. Zároveň se liší pohled na to, jak by měl být OP aplikován, jaká opatření by měla být povinná a jaká jsou pouze doporučená.

Další důležité rozdíly existují ve způsobu hodnocení lokality s více jednotkami či moduly. Toto ovlivňuje důležité oblasti jako minimální počet personálu, míru havarijního plánování, velikost zón a studie dopadu na životní prostředí.

Také koncept „prokázaných“ přístupů a technologií se může lišit mezi jednotlivými regulátory. Regulátoři nedefinují co „prokázané“ znamená, ale mohou poskytnout cíle, které „prokázanost“ demonstrují. Z toho vyplývá, že se koncept bude lišit v závislosti na národních strategiích jednotlivých úřadů [10].

## 2.3 Licencování více jednotek

Praxe v Kanadě ukazuje, že je možné provádět udělování jedné licence všem zařízením na jedné lokalitě efektivně a s ohledem na technické rozdíly mezi jednotlivými jednotkami, stáří jednotek či jednotky v různém stádiu životního cyklu. Počet a charakter licencí je navrhnout žadatelem o licenci, ale o konečném počtu rozhoduje regulátor.

Z provozních zkušeností vyplývá, že je potřeba věnovat pozornost managementu stárnutí sdílených prvků elektrárny, například administrativním budovám, elektrickým systémům a systémům stlačeného vzduchu. Toto bude obzvláště významné pro SMR, které počítají s možností postupného přidávání modulů, či s výměnou celých reaktorových modulů po určité době provozu za nové, které se mohou technicky lišit od původních. Při žádosti o licenci je nutné, aby žadatel vzal v potaz maximální možný počet modulů, neboť od tohoto se budou odvíjet analýzy vlivu na životní prostředí nebo bezpečnosti [10].

## 2.4 Doporučení a společný postup

Přestože existuje definice OP dle IAEA, existují rozdílné interpretace co OP znamená, kdo a jak jej může aplikovat. Je potřeba lépe tento pojem definovat, vyjasnit jak se používá ve vztahu k jaderným elektrárnám a prokázat, že nevede ke snížení jaderné bezpečnosti. S výrobou SMR vznikne nový problém u reaktorů, do kterých bude zavezeno palivo v místě výroby a až poté budou převezeny. Jaká bude v takovém případě role provozovatele elektrárny? Bude testování ve výrobním závodu součástí commissioningu a jak se případně zohlední namáhání reaktoru, kterému bude vystaven během transportu? OP by mohl licencování výrobního procesu zefektivnit, neboť se nejedná o provozování elektrárny, avšak zároveň vyplynou pro výrobce reaktorů nové, náročné povinnosti, protože se část prací přesune z lokality elektrárny do areálu výrobce reaktoru.

Postupy, které vyvinula pracovní skupina NEA MDEP Codes and Standards, by mohly sloužit k harmonizaci pro tyto oblasti [10, 29]:

- Společná kritéria pro programy kvalifikace paliva.
- Dohoda o způsobu vytváření zón havarijního plánování.
- Společná kritéria pro inženýrské programy lidských faktorů.

Regulátoři z různých zemí spolu dlouhodobě spolupracují na vývoji požadavků a vedení, a v této snaze pokračují. Byť nejsou jednotlivé národní postupy úplně identické, v mnoha případech jsou si požadavky podobné.

## 3 Ochrana do hloubky a zóna havarijního plánování

Největší otázkou pro licencování SMR je míra a způsob využití odstupňovaného přístupu, ale i hodnocení ochrany do

<sup>8</sup>Nuclear regulatory commission

hloubky a navrhování zón havarijního plánování pravděpodobně projde zásadními změnami. Jelikož mnoho konceptů SMR spoléhá na inherentní bezpečnostní prvky, zakládající se na fyzikálních zákonech a vylučující některé vážné nehody, navrhuje řada výrobců snížení nároků na některé úrovně ochrany do hloubky a omezení zóny havarijního plánování pouze na území elektrárny.

### 3.1 Ochrana do hloubky

Ochrana do hloubky (Defence in Depth - DiD) se skládá z pěti úrovní [30]

1. Prevence odchylek od normálního provozu.
2. Řízení v podmínkách odchylek od normálního provozu.
3. Systém kontroly a řízení v havarijních podmínkách.
4. Řízení činnosti při haváriích včetně udržení celistvosti kontejnmentu.
5. Opatření vnějších havarijních plánů.

Některé atributy SMR vyvolaly otázky, jakým způsobem jsou principy ochrany do hloubky zahrnuty do designu SMR a jak by mělo probíhat hodnocení ochrany do hloubky pro SMR. Dle IAEA by měl být princip DiD použit jako fundamentální základ pro hodnocení designu a bezpečnosti SMR. Nicméně by měl být upraven, neboť byl vyvinut a aplikován především pro velké jednotky [10].

Pracovní skupina SMR Forum zabývající se DiD navrhla rozvíjet v budoucnu předpisy v těchto oblastech:

- Prokázání posílení 1. a 2. úrovně ochrany do hloubky.
- Vytvořit bezpečnostní kritéria a požadavky pro systémy pasivní a inherentní bezpečnosti.
- Využití kritérií selhání pro bezpečnostní funkce zahrnující pasivní systémy.
- Kritéria umožňující vyloučení některých událostí.
- Nové postupy mohou být potřeba pro kontrolu výrobců modulů.
- Vytvoření principů a požadavků pro bezpečnostní hodnocení „multi-modulového“ SMR.
- Přezkoumání nebo vylepšení metod pro evaluaci pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti pasivních prvků a problémů spojených s multi-modulovým uspořádáním.
- Požadavky a postupy pro kvalifikaci nových materiálů a prvků SMR designů, včetně rozsahu a měřítka testování, verifikace a validace modelů a výrobních procesů.

Koncepty SMR se oproti velkým GEN III blokům primárně zaměřují na eliminaci rizika některých vážných havárií<sup>9</sup> a výrazné snížení rizika vzniku dalších havárií, tudíž výrobci nemusí do designu jaderných bloků zahrnovat SSCs pro zvládání havárií. Výrobci se soustředí především na posílení úrovní 1 a 2. Zároveň je však nutné, aby výrobci jasně demonstrovali účinnost opatření na úrovních 3 a 4 během všech provozních stavů. Přestože by měla být havárie s únikem štěpných produktů do okolí vyloučena, je nutné, aby měla elektrárna připravený havarijní plán na úrovni 5 [10].

#### 3.1.1 Nezávislost mezi úrovněmi:

Nezávislost mezi jednotlivými úrovněmi do největší možné míry je považována za důležitou pro zvýšení efektivity ochrany do hloubky. Tento požadavek platí i pro SMR. Především kompaktní design modulů a multi-modulový design může představovat překážku pro nezávislost mezi úrovněmi DiD. Mohlo by dojít k přehodnocení stanoviska a přijetí závislosti mezi úrovněmi [10, 30].

#### 3.1.2 Umístění a design:

DiD bude také významně ovlivněn umístěním elektrárny, neboť variabilita umístění SMR je široká. Nové uspořádání elektrárny, například plovoucí elektrárny, může vyžadovat evaluaci specifických externích rizik a environmentálních vlivů. Kritéria a požadavky pro hodnocení inherentních bezpečnostních charakteristik musí být definována a vymyšlena předem. Bude potřeba zaměřit se na požadavky 1. a 2. úrovně, protože většina požadavků se soustředí na 3. a 4. úroveň [10].

Výrobci musí prokázat, že vyvinuli a aplikovali systematický postup pro identifikování postulovaných iniciačních událostí, které by mohly nastat během všech provozních stavů. V případě, že některé události považuje výrobce za vyloučené, musí tuto skutečnost důkladně prokázat. Kritéria pro vyloučení událostí v případě SMR budou muset být teprve zavedena. Koncept praktického vyloučení by neměl být použit jako důvod pro vynechání kompletní úrovně DiD [10].

Koncept SMR modulu není ekvivalentní konceptu výrobní jednotky nebo elektrárny u velkých reaktorů. Bezpečnostní principy vyvinuté pro více jednotkovou elektrárnu nelze jednoduše přenést na SMR zařízení s více moduly. Proto se musí vytvořit požadavky a kritéria pro bezpečnostní hodnocení více modulového SMR. Je nezbytné prokázat, že zařízení, propojení, společné prvky a závislosti mezi moduly nemají negativní dopad na DiD. SMR koncepty musí počítat s havárií všech modulů najednou a toto může ovlivnit metodologii pro stanovení zóny havarijního plánování [10].

<sup>9</sup>Například riziko prasknutí primárního potrubí je eliminováno tím, že parogenerátor je integrovanou součástí tlakové nádoby

### 3.2 Zóna havarijního plánování

Vzhledem k variabilitě SMR designů je potřeba uvážit, zda je možné stanovit podmínky pro vytvoření proměnlivé velikosti zóny havarijního plánování. Tato velikost by závisela na zhodnocení rizika, použité technologii a specifických designových kritériích.

Pro SMR bez možnosti výměny paliva na lokalitě bude třeba zvážit vytvoření ZHP v místech případných zastávek během přepravy a okolo zařízení na výměnu paliva. I kdyby byla ZHP omezená na objekt elektrárny, je potřeba komunity v okolí zařízení připravit na mimořádnou radiační událost [10].

## 4 Vybraná specifika SMR

Konceptů SMR je ve vývoji poměrně velké množství [31], design jednotlivých reaktorů se liší dle použitého paliva, chladiva, použitých materiálů i pojetím stavby a provozu celé elektrárny. SMR mohou být tlakovodní, varné, chlazené plynem, tekutým kovem nebo tekutou solí. Palivo může být v podobě  $UO_2$  pelet, TRISO paliva či roztažené tekuté soli [32]. Projekty SMR jsou v rozdílných fázích vývoje, jeden z nejpokročilejších projektů je NuScale, který plánuje spustit prototypovou jednotku v roce 2025 [17]. Z toho vyplývá, že se pravidla pro licencování budou v průběhu několika následujících let pravděpodobně upravovat a přizpůsobovat potřebám SMR. V následujícím textu budou představeny některé trendy ve vývoji SMR, které výrazně mění design jaderných reaktorů i celých výrobních bloků a budou vyžadovat změny ve způsobu hodnocení bezpečnosti a udělování licencí jaderným zařízením.

### 4.1 Inherentní bezpečnost

Většina SMR se snaží eliminovat riziko tavení aktivní zóny pomocí inherentních bezpečnostních prvků jako je přirozené proudění kapaliny. Například projekt NuScale má tlakovou nádobu umístěnou v ocelovém kontejnmentu, který je oddělen od tlakové nádoby vakuovou mezerou, ta se v případě výpadku napájení zaplaví vodou a zbytkové teplo z reaktoru je odváděno do bazénu, ve kterém je modul umístěn [17, 12]. Takovéto snížení rizika poškození aktivní zóny a úniku radionuklidů mimo prostor jaderné elektrárny by mohlo mít zásadní vliv na požadavky na velikost ZHP, požadavky na ochranu do hloubky atp.

### 4.2 Integrovaný primární okruh

Integrovaný výměník primárního okruhu má pozitivní vliv na bezpečnost, neboť eliminuje riziko LOCA způsobené prasknutím primárního potrubí. Vyloučení rizika LOCA může vést ke snížení nároků na systémy havarijního chlazení aktivní zóny reaktoru, neboť je riziko ztráty chladiva v primárním okruhu značně sníženo. Velké jednotky mají k dispozici několik systémů, které mají zabránit poškození AZ v případě LOCA [33]. Integrovaný výměník také slouží k pasivnímu odvodu zbytkového tepla z reaktoru [34].

### 4.3 Komplementace reaktoru ve výrobním závodě

Jedním z hlavních aspektů výroby SMR, který by měl vést ke snížení nákladů na stavbu jaderné elektrárny, je kompletní výroba reaktoru a to včetně zavezení paliva do reaktoru v průmyslovém závodě [35]. Takový způsob výroby bude ovšem vyžadovat zvýšené bezpečnostní požadavky. Bude také znamenat nakládání s jaderným palivem už ve fázi výroby a nutnost přípravy odpovídajícího havarijního plánu, neboť jaderné zařízení tímto způsobem nevznikne až na místě jaderné elektrárny, ale už ve výrobním závodě, který bude také jaderným zařízením. Z výše uvedených důvodů budou muset být na výrobní závod aplikovány všechny požadavky jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a odezvy na radiační mimořádnou událost, včetně zabezpečení jaderného zařízení a jaderných materiálů podobný tomu, který je dnes na jaderných elektrárnách nebo v obohacovacích závodech [36].

### 4.4 Tekuté palivo

Některé koncepty SMR vyvíjejí reaktory s tekutými solemi [37], které umožňují provoz s tekutým palivem. Tento typ reaktorů bude vyžadovat zásadní změny v legislativě, neboť nemá jasně definovanou aktivní zónu a chybí zde palivové pokrytí, které je považováno za první bariéru úniku štěpných produktů [36].

Tekuté palivo má ovšem také několik výhod, umožňuje vyšší vyhoření paliva, množení paliva, kontinuální úpravu a inherentní bezpečnost při výpadku napájení, neboť dochází k samovolnému zastavení štěpné reakce vlivem negativní teplotní zpětné vazby [38].

Některé koncepty umožňují množení paliva a teoreticky mohou využívat použité palivo, takovéto reaktory by vyžadovali úpravu legislativy zabývající se zadní částí palivového cyklu [37, 39].

## 5 Závěr

Malé modulární reaktory představují po desetiletích stagnace ve vývoji nových konceptů jaderných elektráren zásadní změnu, na kterou budou muset regulátoři, výrobci i provozovatelé reagovat. Vzhledem ke specifikům jaderného odvětví a dlouholetému vývoji regulatorních opatření zaměřených převážně na velké PWR a BWR jednotky bude potřeba značného úsilí, aby mohla být komercializace SMR úspěšná.

Pro zajištění komerčního úspěchu je nutné, aby měli výrobci možnost postavit a zprovoznit reaktory v krátkém časovém horizontu a v různých zemích světa. Obzvláště v EU představuje dlouhé povolovací řízení problém, který by znemožnil výstavbu elektráren o malém výkonu. Z tohoto důvodu je harmonizace legislativy mezi jednotlivými státy žádoucí, nicméně různé historické zkušenosti a ověřené postupy jednotlivých zemí, založené na desetiletích hodnocení tradičních jednotek, představují překážku ve sjednocení regulatorních rámců. Pozitivní je, že globální jaderná komunita dlouhodobě spolupracuje a regulátoři z

jednotlivých zemí chápou potřebu změny legislativy tak, aby reflektovala vlastnosti SMR.

V návaznosti na nárůst nákladů na bezpečnostní opatření reagovala řada výrobců změnou koncepce reaktorů, která klade důraz na inherentní bezpečnostní prvky vycházející z fyzikálních zákonů, doplněné o pasivní bezpečnostní systémy. Tato skutečnost může potenciálně ovlivnit požadavky na řadu bezpečnostních opatření, například omezení zóny havarijního plánování na plochu objektu jaderné elektrárny nebo změnu přístupu k ochraně do hloubky, kdy bude větší důraz kladen na hodnocení úrovní 1 a 2 a menší pozornost bude věnována úrovním 3 až 5.

Další nástroj, který by mohl zefektivnit licenční řízení je odstupňovaný přístup. OP představuje zajímavou možnost vzhledem k velké variabilitě designů SMR a různým bezpečnostním konceptům, které představují. Ačkoliv je OP regulátory užíván, neexistuje jednotná, mezinárodně uznávaná definice. Je potřeba definovat co přesně OP znamená, kdy a jakým způsobem by měl být použit a kdo jej bude aplikovat. Odstupňovaný přístup by mohl mít velmi pozitivní vliv při komercializaci SMR.

Regulátoři si uvědomují potřebu větší harmonizace předpisů a nutnost nastavit předpisy a požadavky předem, aby bylo možné SMR licencovat. Zároveň jsou však regulátoři při hodnocení bezpečnosti jaderných zařízení konzervativní a nedá se očekávat, že by došlo k zásadním změnám ve způsobu hodnocení bezpečnosti jaderných elektráren předtím, než budou získány potřebné provozní zkušenosti s novými SMR.

## Literatura

- [1] "Clarification of TMI Action Plan Requirements," NRC, Tech. Rep., 1980. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML0514/ML051400209.pdf>
- [2] "International Nuclear Law in the Post-Chernobyl Period," IAEA, NEA, Tech. Rep., 2006. [Online]. Available: <https://www.oecd-nea.org/law/chernobyl/nea6146-iaea-chernobyl.pdf>
- [3] "Reactor and Spent Fuel Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," IAEA, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/sites/default/files/spentfuelsafety190312.pdf>
- [4] J. R. Lovering, A. Yip, and T. Nordhaus, "Historical Construction Costs of Global Nuclear Power Reactors," *Energy Policy*, vol. 91, pp. 371–382, apr 2016.
- [5] "Under Construction Reactors," IAEA PRIS, 2020. [Online]. Available: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByRegion.aspx>
- [6] W. Nuclear Association, "Economics of Nuclear Power," 2020. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
- [7] World Nuclear Association, "Small Nuclear Power Reactors," World Nuclear Association, 2020. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [8] U.S. Department of Energy, "Advanced Small Modular Reactors (SMRs)," 2020. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/small-modular-nuclear-reactors>
- [9] IAEA PRIS, "Operational & Long-Term Shutdown Reactors," Online, 2020. [Online]. Available: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByRegion.aspx>
- [10] "Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors," IAEA - SMR Regulators' Forum, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/01/smr-rf-report-29012018.pdf>
- [11] "AP1000 Design Control Document - 19. Probabilistic Risk Assessment," U.S.NRC, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A411.pdf>
- [12] NuScale Power, "NuScale FSAR: Chapter 19 - Probabilistic Risk Assessment and Severe Accident Evaluation," NuScale Power, LLC., Tech. Rep., 2019.
- [13] "Tc Meeting Regional Workshop on SMR Deployment Scenarios in Global Energy Portfolio," 2019. [Online]. Available: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/clanek/seminar-o-licencovani-malych-modularnich-reaktoru/>
- [14] "Seminář o licencování malých modulárních reaktorů," 2020. [Online]. Available: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/clanek/seminar-o-licencovani-malych-modularnich-reaktoru/>
- [15] "Use of a Graded Approach in the Application of the Safety Requirements for Research Reactors," IAEA. [Online]. Available: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1547'web.pdf>
- [16] The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), "2017 Review of French Research Reactors," CEA, Tech. Rep., 2017.
- [17] NuScale Power, LLC, "Technology Overview," Online, 2020. [Online]. Available: <https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview>
- [18] Pascal C., "GRADED APPROACH AND PRACTICES FOR THE MECHANICAL COMPONENTS OF FRENCH RESEARCH REACTOR PROJECTS." [Online]. Available: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1575'CD'web/datasets/papers/D12%20Pascal.pdf>



- [19] Rolls Royce, "UK SMR - Technical Summary," Online, 2020. [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/smr-technical-summary.pdf>
- [20] CNSC, "Use of the Graded Approach in Regulation," 2017. [Online]. Available: [https://nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Presentations/CNSC Staff/2017/20170810-doug-miller-use-of-graded-approach-eng.pdf](https://nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Presentations/CNSC%20Staff/2017/20170810-doug-miller-use-of-graded-approach-eng.pdf)
- [21] CNSC, "Risk-informed Decision Making in Regulatory Oversight," 2017. [Online]. Available: [https://nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Presentations/CNSC Staff/2017/20170316-gerry-frappier-NRC-regulatory-conference-eng.pdf](https://nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Presentations/CNSC%20Staff/2017/20170316-gerry-frappier-NRC-regulatory-conference-eng.pdf)
- [22] CNSC, "Regulatory documents," 2020. [Online]. Available: <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/regulatory-documents/index.cfm#R9>
- [23] STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority, "Guide YVL A.3, Leadership and management for safety," 2019. [Online]. Available: <https://www.stuklex.fi/en/YVLA.3-memo.pdf>
- [24] STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority, "Guide YVL A.5, Construction and commissioning of a nuclear facility," 2019. [Online]. Available: <https://www.stuklex.fi/en/YVLA.5-memo.pdf>
- [25] ASN, "ASN Report on the State of Nuclear Safety and Radiation Protection in France in 2018," ASN: Autorité de sûreté nucléaire, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/Publications/ASN-s-annual-reports/ASN-Report-on-the-state-of-nuclear-safety-and-radiation-protection-in-France-in-2018>
- [26] R. Federation, *FEDERAL LAW No.170 of 21 November 1995 on the use of atomic energy*. OECD NEA, 1995. [Online]. Available: <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/russ-fed-law170-nov1995-en.pdf>
- [27] U.S. NRC, "Probabilistic Risk Assessment (PRA)," online, 2020. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/pra.html#Level2>
- [28] U.S. NRC, "10 CFR 50.69 RISK-INFORMED CATEGORIZATION AND TREATMENT OF STRUCTURES, SYSTEMS, AND COMPONENTS INSPECTION," 2011. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1027/ML102700396.pdf>
- [29] NEA, "MULTINATIONAL DESIGN EVALUATION PROGRAMME Annual Report," OECD NEA, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://www.oecd-nea.org/mdep/annual-reports/mdep-annual-report-2017.pdf>
- [30] SÚJB, "Vyhláška o požadavcích na projekt jaderného zařízení," 2017. [Online]. Available: <https://www.tzb-info.cz/docu/predpisy/download/V329-2017.pdf>
- [31] "Small Nuclear Power Reactors," IAEA ARIS, 2020. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [32] "Advanced Reactors Information System," IAEA ARIS, 2020. [Online]. Available: <https://aris.iaea.org/>
- [33] SÚJB, "Národní zpráva - „Zátěžové zkoušky“ JE Dukovany a JE Temelín Česká republika: Hodnocení bezpečnosti a bezpečnostních rezerv ve světle havárie JE Fukushima," Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni\\_zprava\\_ceska\\_final\\_1.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni_zprava_ceska_final_1.pdf)
- [34] J. Gou, S. Qiu, G. Su, and D. Jia, "Thermal hydraulic analysis of a passive residual heat removal system for an integral pressurized water reactor," *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2009, 2009.
- [35] B. Mignacca and G. Locatelli, "Economics and finance of small modular reactors: A systematic review and research agenda," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118, p. 109519, 2020.
- [36] "Zákon č. 263/2016 sb., atomový zákon, v platném znění." 2016. [Online]. Available: <https://www.stuklex.fi/en/YVLA.3-memo.pdf>
- [37] World Nuclear Association, "Molten Salt Reactors," 2020. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>
- [38] IAEA - ARIS, "Status report - IMSR 400," 2016. [Online]. Available: <https://terrestrialenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/IMSR400.pdf>
- [39] World Nuclear Association, "The Nuclear Fuel Cycle," 2020. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>