

Významné úspěchy České republiky v oblasti bezpečnosti jaderných elektráren

Česká jaderná energetika si v roce 2020 připomíná hned několik výročí spojených s jadernou energetikou. Jak uvádí deník Právo ze soboty 23. května 2020, „*je letošní rok doslova nabitý výročími událostí, které se vážou k jaderné energetice*“. Vstup Československa do „jaderného klubu“ byl zahájen před 65 lety, 10. června 1955, kdy byla zahájena výstavba československých jaderných výzkumných pracovišť Ústavu jaderného výzkumu v Řeži u Prahy. V témže roce dne 25. srpna 1955 byla zřízena nařízením vlády Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská Českého vysokého učení technického v Praze. Fakulta měla za povinnost vychovávat odborníky pro nový obor spojený s využíváním jaderné energie. Před 60 lety v roce 1960 promovalo prvních 63 jaderných inženýrů této fakulty. Před 50 lety, v roce 1970 bylo v nedávno vzniklé (1969) Československé komisi pro atomovou energii vytvořeno samostatné oddělení jaderné bezpečnosti a záruk, které zajišťovalo v souvislosti s rozvíjející se československou jadernou energetikou kontrolu jaderné bezpečnosti a kontrolu jaderných materiálů, což byl požadavek OSN, přesněji její odborné složky, Mezinárodní agentury pro jadernou energii. Dne 12. února 1985 byl dosažen minimální kontrolovaný výkon na prvním reaktoru jaderné elektrárny Dukovany. Tím se Česká republika zařadila do jaderného klubu provozovatelů jaderných elektráren. Takže Česká republika provozuje jadernou energetiku na svém území již 35 let. A konečně před 20 lety, 21. prosince 2000 byl první blok Jaderné elektrárny Temelín poprvé připojen do rozvodné sítě.

Po tak dlouhé historii české jaderné energetiky vyvstávají otázky, zdali jsou česká jaderná zařízení spolehlivá a bezpečná. Uvedené pojmy, spolehlivost a bezpečnost, mají své konkrétní měřitelné veličiny, které lze porovnávat s jadernými zařízeními jiných zemí, a které se tak stávají měřitelnou, a tudíž objektivní odpovědí na uvedenou otázku. Pro stanovení spolehlivosti jaderného zdroje elektřiny se používá veličina koeficient ročního využití, nebo také koeficient využitelnosti. Tato veličina ukazuje, nakolik je v průběhu roku využíván instalovaný výkon jaderné elektrárny. Počítá se jako porovnání skutečného množství vyrobené energie s ideálním maximálním množstvím, vyrobeným při celoročním provozu na nominálním výkonu:

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \times h}$$

kde k_r je koeficient využitelnosti [%], W_r je roční množství vyrobené energie [MWh/rok], P_i je instalovaný výkon [MW] a h je celkový počet hodin v roce [h]. Tato veličina je dobrým, nikoliv však jediným ukazatelem spolehlivosti provozu jaderné elektrárny, protože nezohledňuje odstávky z provozu způsobené jinými než technickými nebo bezpečnostními důvody neprovoznosti elektrárny (např. politické vlivy, správní a soudní rozhodnutí a podobně). Nicméně pro určitý odhad spolehlivosti se jedná o veličinu vhodnou. Pro české jaderné elektrárny kolísá tato veličina v intervalu hodnot 75–87 % v závislosti na délkách a typu odstávek. Jaderná elektrárna Dukovany tak například v roce 2012 dosáhla koeficient ročního využití 85,51 % a Jaderná elektrárna Temelín dosahovala v letech 2012–2018 hodnoty okolo 80 %. Pro srovnání, jedna z největších offshore větrných farem světa London Array překonala v prosinci roku 2015 svůj měsíční rekord ve výrobě elektrické energie. Celkem za prosinec vyrobila 369 GWh elektřiny. S instalovaným výkonem 630 MW dosáhl

offshore park v prosinci 2015 koeficient využití instalovaného výkonu 78,9 %. Tato práce však není primárně zaměřena na hodnocení spolehlivosti provozu českých jaderných elektráren, i když spolehlivost s bezpečností souvisí, a je možné se k tématu vrátit příště. I tak je možné konstatovat, že hodnoty k_r okolo čísla 80 % naznačují vysokou spolehlivost tohoto českého zdroje elektrické energie.

Co se týče bezpečnosti provozu existuje zde několik bezpečnostních oblastí, kterými je jaderné zařízení hodnoceno. Jedná se o fyzickou bezpečnost, jadernou bezpečnost, technickou bezpečnost a radiační ochranu. Všechny čtyři uvedené oblasti se nějakým způsobem promítají do kultury bezpečnosti provozu. Definice všech bezpečnostních oblastí a jejich vztahů upravuje zákon č. 263/2016 Sb., ve znění zákona č. 183/2017 Sb., atomový zákon [1]. Tento článek nepojednává o všech oblastech bezpečnosti provozu českých jaderných elektráren, ale všímá si zatím jedné oblasti, která úzce souvisí s kulturou bezpečnosti a je dobrým ukazatelem přístupu českého provozovatele jaderných elektráren k bezpečnosti provozu jako takové. Pojem „kultura bezpečnosti“ je podle § 30 odst. 7 atomového zákona definována jako „*vlastnosti a postoje osob vykonávajících činnosti související s využíváním jaderné energie a činnosti v rámci expozičních situací a vlastnosti a postoje jejich pracovníků zajišťující jadernou bezpečnost, radiační ochranu, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a zabezpečení pozornosti odpovídající jejich významu*“. Tímto ukazatelem souvisejícím s kulturou bezpečnosti je kolektivní efektivní dávka všech osob, které pracují na českých jaderných elektrárnách, tedy jak osob vlastního obslužného personálu českých jaderných elektráren, tak i osob vstupujících do kontrolovaného pásma jaderných elektráren ze strany dodavatelů od různých firem, výzkumníků, dozorných orgánů a podobně.

$$\text{kolektivní efektivní dávka (CED)} = \sum_n E_n$$

Jedná se o sumu efektivních dávek všech osob v kontrolovaném pásmu (dále jen „KP“) elektrárny vybavených dozimetry, kde E_n je efektivní dávka n -té osoby a n je počet osob vstupujících do KP. Efektivní dávka E se pak stanovuje jako součet ekvivalentních dávek v jednotlivých tkáních či orgánech vážených tkáňovým váhovým faktorem w_T , jež vyjadřuje rozdílnou radiosenzitivitu orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (zhoubných nádorů a genetických změn).

$$E = \sum_T w_T H_T$$

kde H_T je ekvivalentní dávka a w_T je příslušný tkáňový váhový faktor. Bližší vysvětlení všech pojmů a další relevantní údaje obsahuje vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen „SÚJB“) č. 422/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů [2]. Jak vyplývá z výše uvedeného textu není hodnota veličin kolektivní efektivní dávka a efektivní dávka přímo měřitelná a musí se vypočítávat z hodnot přímo měřitelných. Ani ekvivalentní dávka H_T není přímo měřitelná, ale spočitatelná podle vzorce:

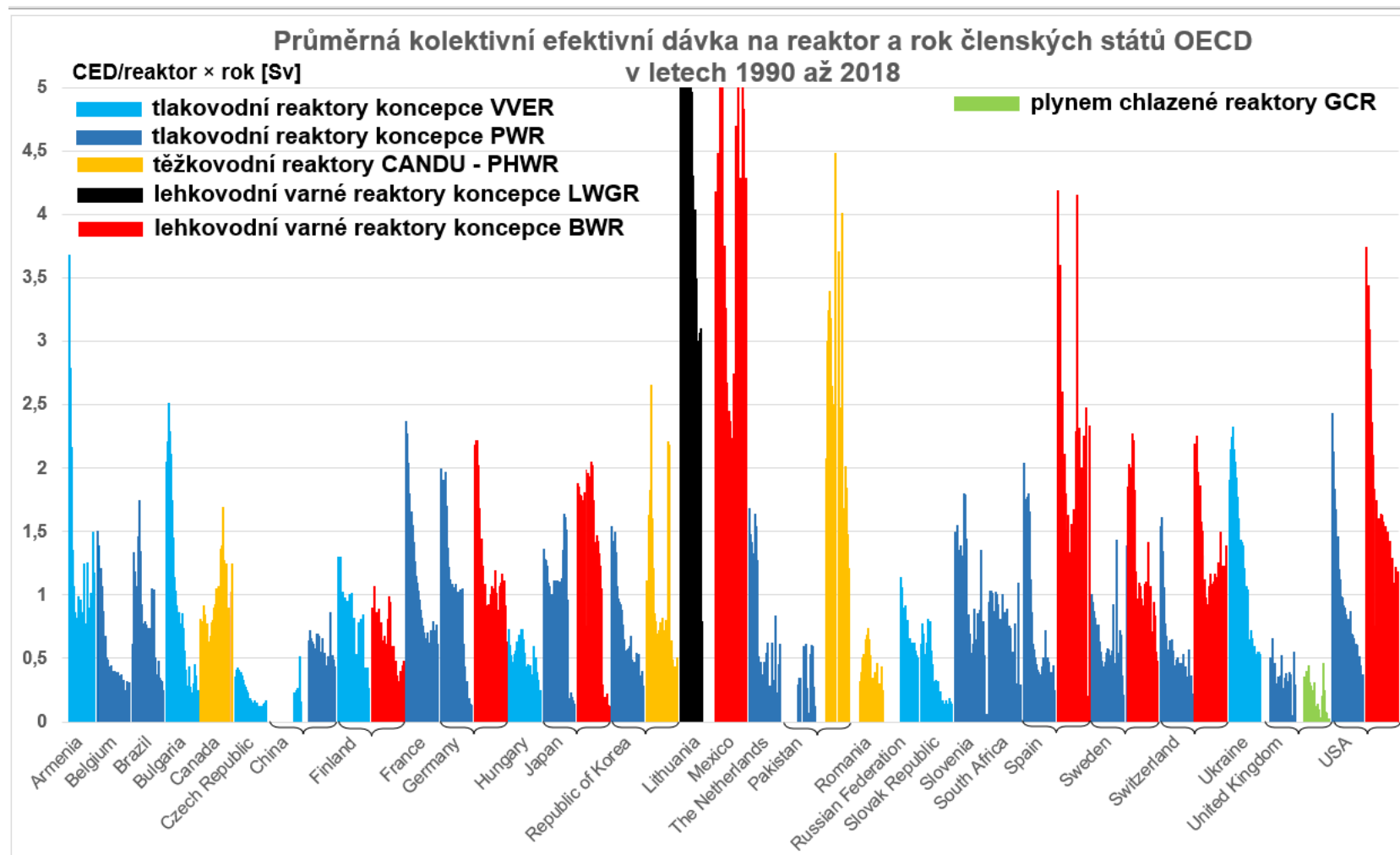
$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

kde H_T je ekvivalentní dávka, w_R je příslušný radiační váhový faktor různý pro různé částice ionizujícího záření R a $D_{T,R}$ je střední absorbovaná dávka ve tkáni či orgánu, způsobená zářením druhu R. Teprve absorbovaná dávka je veličina měřitelná a jde o veličinu měřenou dozimetrem, která je zpracována v systémech elektrárenské dozimetrie a po přepočtu na výše uvedené veličiny ekvivalentní dávku, efektivní dávku a kolektivní efektivní dávku jsou data poskytována do systému Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD). Jedná se prostě, a laicky řečeno, o ukazatel ozáření všech lidí na jaderných elektrárnách, kteří dostanou dozimetr. Jde o absolutní hodnotu, kterou nelze „naředit“ neozářenými lidmi, nebo nějak jinak upravit tak, aby vypovídací hodnota byla zkreslena. Údaje se, jak je výše uvedeno, zasílají do mezinárodní instituce OECD v Paříži, která je schopna si příchozí údaje v případě nesrovnalostí nebo podezření ověřit. OECD vydává každoročně zprávu Occupational Exposures at Nuclear Power Plants, která informuje právě o obdržení dávkách ionizujícího záření na jaderných elektrárnách v systému OECD [3]. To ovšem znamená, že systém nepostihuje úplně všechny reaktory, chybějí například ruské LWGR, jde o reaktory „černobylského“ typu a jediná ruská (a světová) komerční jaderná elektrárna s rychlými reaktory chlazenými kapalným sodíkem. Proto obr. 1 ukazuje hodnoty CED na elektrárnách zařazených do systému OECD jako průměr hodnot CED na jeden reaktor, podle typů reaktorů v dané zemi a jeden rok, mezi lety 1990 až 2017. Z uvedeného obrázku přímo vyplývají zajímavé informace:

1. Podle obrázku se zdá, že nejrozšířenějšími komerčními reaktory pro výrobu elektrické energie jsou reaktory tlakovodní, ať již ruského projektu VVER (водо-водяной энергетический реактор neboli vodně-vodní energetický reaktor, nikoliv vodo-vodní, jak se často novinářsky chybně uvádí, název obsahuje informaci, že se jedná o dvouokruhový reaktorový systém), nebo západního typu PWR (pressurized water reactor neboli tlakovodní reaktor).
2. Na druhém místě, co do rozšířenosti reaktorů jsou zřejmě lehkovodní, varné reaktory BWR (boiling water reactor), které jsou jednookruhové.
3. Zcela marginální roli hrají reaktory chlazené plynem, které pracují zejména ve Velké Británii a sodíkové tříokruhové reaktory, které obr. 1 nepostihuje vůbec.
4. Ale co je nejdůležitější, obrázek ukazuje, že stabilně v čase jsou nejmenší hodnoty kolektivní efektivní dávky dosahovány na českých jaderných elektrárnách. Velmi nízké hodnoty této veličiny jsou zřetelně patrné také u britských plynem chlazených reaktorů, ale jsou oproti hodnotám na českých jaderných elektrárnách přece jen vyšší. Uvedená skutečnost ovšem řadí Českou republiku na **první místo** v měřitelném ukazateli bezpečnosti provozu jaderných elektráren, kolektivní efektivní dávce.

Je samozřejmě logické se ptát po příčinách takové pozoruhodné, zajímavé a pro Česko určitě lichotivé skutečnosti. Tyto příčiny lze rozdělit do několika skupin:

- A) Objektívni důvody dané **typem reaktoru**, jeho provedením, tedy projektem a konstrukcí jaderného zařízení. Tyto důvody jsou v průběhu provozu málo ovlivnitelné, jak ze strany provozovatele jaderné elektrárny, tak i ze strany jaderných regulátorů, v Česku je to Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB).
- B) Subjektivní důvody, dané **způsobem** provozu a údržby, tedy **kulturou bezpečnosti**.



Obr. 1 – Průměrné kolektivní efektivní dávky na reaktor a rok u členských států OECD podle typů reaktorů zařazených do systému OECD v letech 1990 až 2018 [3]

Objektivní důvody

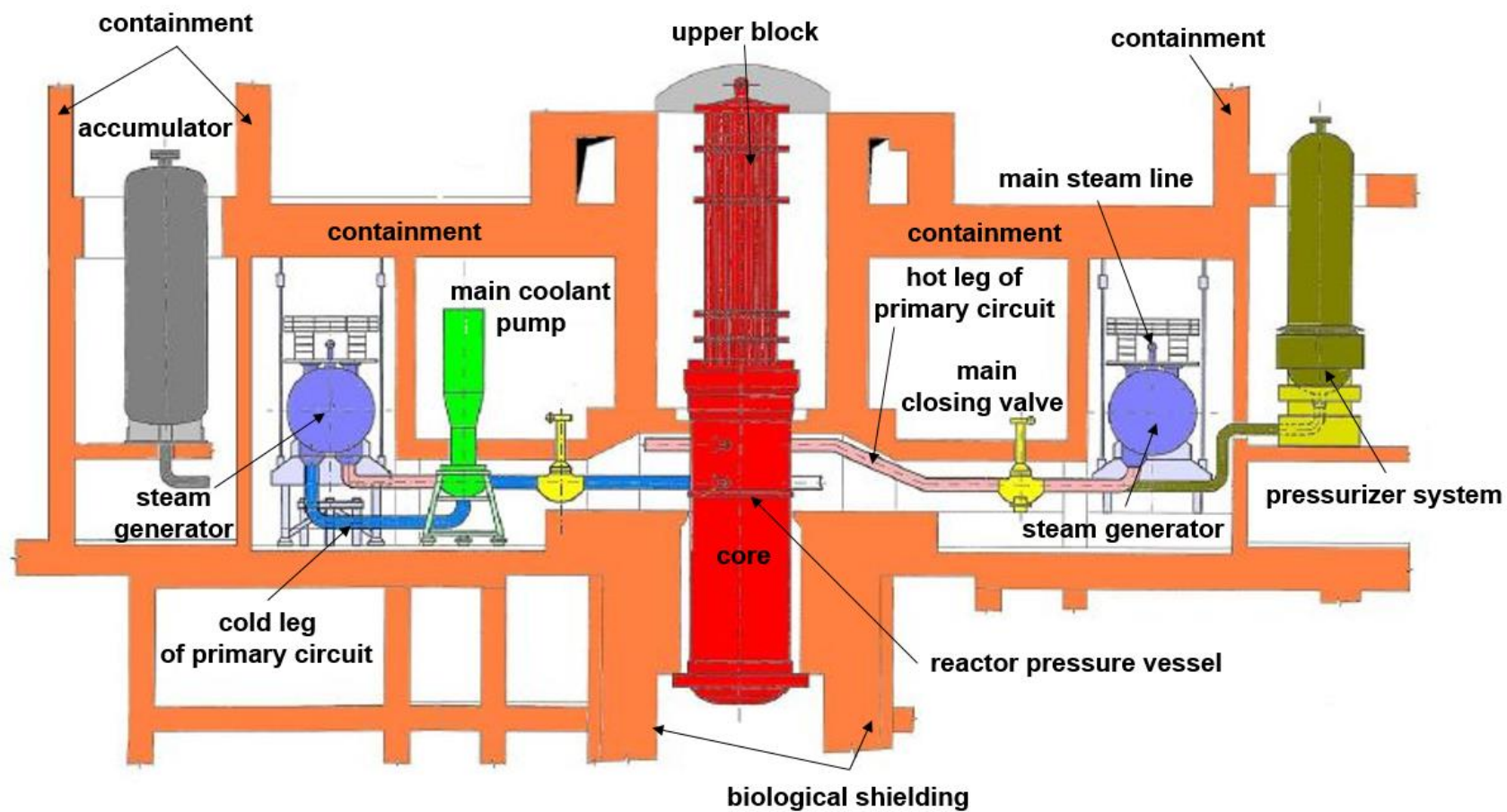
Objektivní důvody, jak je výše uvedeno jsou dány projektem a konstrukcí jaderného zařízení a v průběhu provozu jaderné elektrárny je lze ovlivňovat velmi málo, pokud vůbec to připouští jaderná legislativa, která z bezpečnostních důvodů razí zásadu tzv. „configuration management“, neboli nezasahování do projektu, který byl vytvořen v určitém čase s určitými znalostmi a možnostmi a komplexně s přihlédnutím ke všem technickým a bezpečnostním vazbám a souvislostem, a které případný „napravovatel stavu“ nemůže znát a nemůže tak postihnout původní záměr projektanta, jehož projekční kolektiv často již dávno neexistuje. K zásadním oblastem objektivních důvodů patří:

- Dispoziční uspořádání zařízení v primární části českých jaderných elektráren,
- malý obsah kobaltu v konstrukčních materiálech systémů a komponent primárního okruhu a
- těsné pokrytí paliva v reaktorech českých jaderných elektráren.

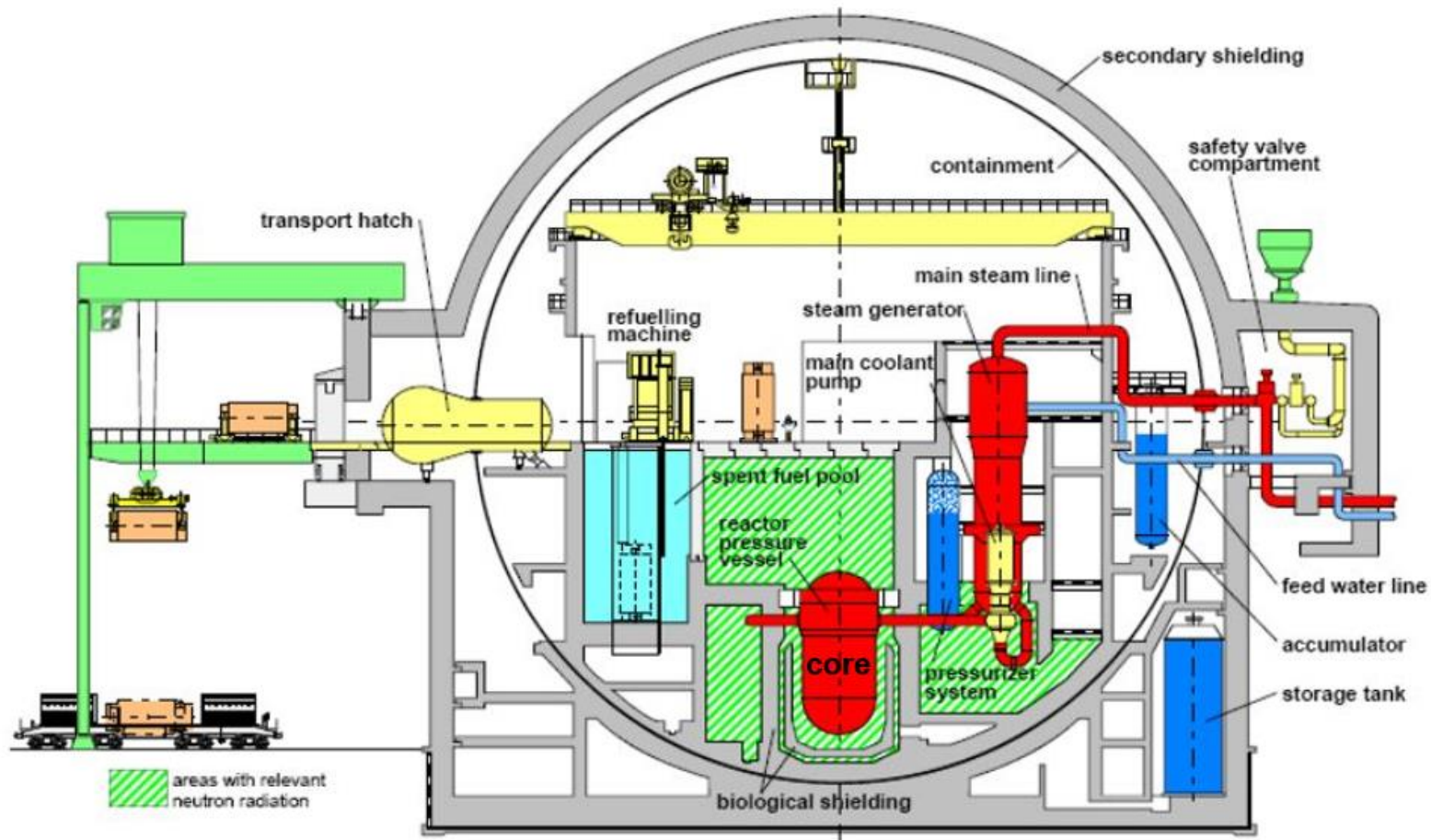
Jak lze snadno postřehnout z obr. 1, jsou na některých typech reaktorů systematicky vyšší hodnoty kolektivních efektivních dávek nežli u jiných typů reaktorů. Docela příznivě to vychází pro tlakovodní reaktory koncepce VVER i když tuto „via triumphalis“ kazí výsledky zejména východoevropských elektráren. Je to dáno „volnějším“ dispozičním uspořádáním primární části jaderné elektrárny VVER ve srovnání s dispozičním uspořádáním s tlakovodních reaktorů koncepce PWR, které je naopak „těsnější“ (obr. 2 a 3). U jiných typů reaktorů na dispozičním uspořádání tolik nezáleží, protože příčiny zvýšené hodnoty kolektivní efektivní dávky jsou jiné než u tlakovodních reaktorů, které jsou srovnatelné. To znamená, že pracovníci pracující a pohybující se v primární části jaderné elektrárny VVER nejsou v době odstávek a provozu v bezprostředním dotyku se zařízeními, na kterých nepracují, a která jsou samozřejmě v době provozu kontaminována radionuklidy a představují tak radioaktivní zářič. Oba obrázky ukazují typické rozdíly mezi primárními částmi výrobních bloků jaderných elektráren s vodně-vodním energetickým reaktorem druhé generace (VVER440, V213) ruského projektu a tlakovodním reaktorem PWR západní koncepce s vertikálními parogenerátory.

Vysvětlivky některých pojmů uvedených na obr. 2 a 3

accumulator	hydroakumulátor – součást pasivního bezpečnostního systému
biological shielding	biologické stínění
cold leg of primary circuit	studená větev primárního okruhu
containment	část ochranné obálky, která se skládá ze zádržného systému, kontejnmentu, filtrace vzdušnin a chladicí vody, spalování vodíku a chlazení
core	aktivní zóna reaktoru, novinářsky chybně „jádro“, vnitřní část reaktoru, kde probíhají aktivační, štěpné a rozpadové reakce (přeměny)
hot leg of primary circuit	horká větev primárního okruhu
main closing valve	hlavní uzavírací armatura
main coolant pump	hlavní cirkulační čerpadlo
main steam line	parovody
pressurizer system	kompenzátor objemu, novinářsky chybně „tlakovač“
reactor pressure vessel	tlaková nádoba reaktoru
steam generator	parní generátor
upper block	horní blok reaktoru

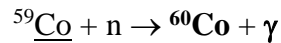


Obr. 2 – Detail vertikálního řezu primární části výrobního bloku jaderné elektrárny VVER440 V213 (typicky např. JE Dukovany), obrázek byl převzat z veřejně dostupné publikace [4]



Obr. 3 – Vertikální řez primární části výrobního bloku jaderné elektrárny PWR 1400 (typicky např. Neckarwestheim, Siemens Konvoi, KWU), obrázek byl převzat z publikace [5]

Dalším příznivým faktorem pozitivně ovlivňujícím ozáření osob v KP je nízký obsah kobaltu v konstrukčních materiálech zařízení a komponent primárního okruhu a technologií souvisejících. Nízký obsah kobaltu v konstrukčních ocelích a slitinách pro jadernou energetiku je důležitý z toho důvodu, že kobalt, který je přirozeným průvodcem železa v rudách a se železem tak přechází obvykle i do ocelí a slitin, normálně nepřekáží ani z mechanických a ani z chemických důvodů. Kobalt je monoizotopický prvek, který se ze 100 % skládá pouze z izotopu ^{59}Co . A v tom spočívá nebezpečnost kobaltu. V aktivní zóně jaderných elektráren se totiž aktivuje podle schématu:



přítom ^{60}Co je tvrdý zářič γ . S korozními produkty je pak ^{60}Co roznášen po celém primárním okruhu, kde se usazuje po zařízeních primárního okruhu (I.O.).

Již od počátku výstavby jaderných zařízení v bývalém Československu byl kladen důraz na dodržení požadavku dosáhnout koncentraci kobaltu v konstrukčních materiálech zařízení a komponent pro I.O. tak nízko, jak je to rozumně dosažitelné. V technických podmínkách dodávek hutních polotovarů, stejně jako v případě dodávek finálních provozních souborů byla zakotvena povinnost dodavatelů dodržovat limitní koncentrace kobaltu (a jiných legur ocelí). Srovnávací studie ukazují, že v českých a slovenských jaderných elektrárnách se koncentrace kobaltu v austenitických nerezových ocelích komponent a zařízení I.O. pohybují významně pod 0,012 hm. %, přičemž jinde ve světě se používají obdobné materiály s koncentrací okolo 0,05 hm. % a výše. Tato okolnost je důvodem velmi nízkých koncentrací kobaltu ^{60}Co ve sloučeninách korozních povlaků na vnitřních površích I.O. českých a slovenských jaderných elektráren s VVER. Vzhledem k absenci tohoto velmi tvrdého zářiče jsou vytvořeny takové podmínky, že pracovníci, kteří pracují v primární části jaderných elektráren s VVER, jsou méně ozařováni nežli pracovníci pracující na obdobných činnostech na blocích PWR, PHWR a BWR [6].

Posledním zde zmiňovaným faktorem přispívajícím k dosažení neuvěřitelně nízké hodnoty kolektivní efektivní dávky na (průměrný) český reaktor a rok, ne však nejméně významným, který zásadně ovlivňuje ozáření osob v KP je těsné pokrytí jaderného paliva. Jaderné palivo je pro případ zamezení nekontrolovaného šíření štěpných a aktivačních produktů a pro zabránění jeho poškození při provozu opatřeno pokrytím, které je provedeno jako tenkostěnná trubka vyrobená z různých materiálů pro různé reaktory a různé typy paliva. Pro potřeby paliva pro tlakovodní reaktory to bývají slitiny zirkonia. Těsnost pokrytí jaderného paliva je na jaderných elektrárnách kontrolována jednak v nepřetržitém provozním režimu přes tzv. FRI faktor (Fuel Reliability Indicator), jednak při podezření na netěsnost v průběhu odstávky k výměně paliva, kdy hodnota FRI faktoru se zvyšuje (normální hodnota je $\text{FRI} < 19 \text{ Bq/g}$, při těchto normálních hodnotách není na pokrytí paliva defekt), a kontroluje se při skladování vyhořelého paliva v bazénu skladování vyhořelého jaderného paliva. Přes veškeré výrobní a povýrobní kontroly nelze u pokrytí jaderného paliva vyloučit porézní netěsnosti, které se projevují nenulovou hodnotou FRI faktoru, avšak menší než oněch 19 Bq/g . Také kontaminace palivem na vnějších površích pokrytí paliva zvyšuje hodnotu FRI faktoru, aniž by tato vyšší hodnota znamenala porušení pokrytí. Pokrytí jaderného paliva je věnována jak ze strany firmy ČEZ, a s., tak i ze strany SÚJB, značná pozornost, neboť netěsnosti na palivu znamenají ve svém důsledku

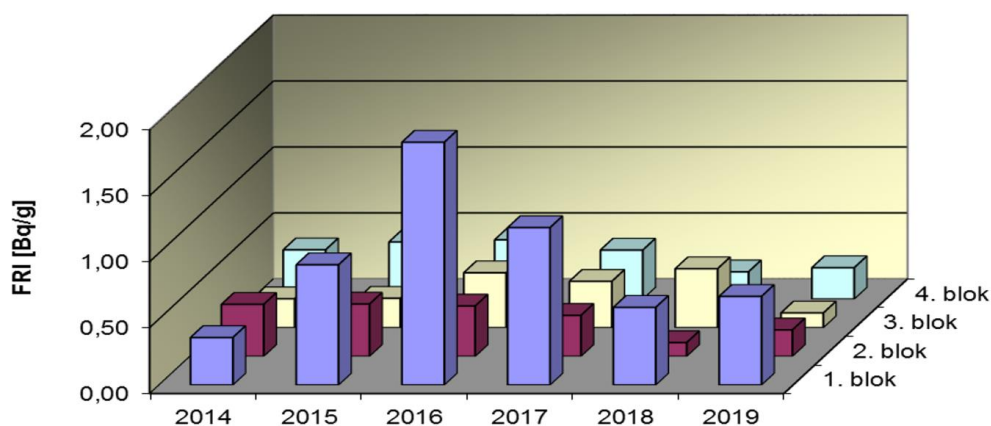
- větší ozařování pracovníků na jaderných elektrárnách a tím tak i větší hodnoty CED,
- větší radioaktivní výpusti a odpady, z toho opět plyne větší ozařování pracovníků a ještě navíc

- větší ozařování obyvatel v okolí jaderných elektráren.

Hodnoty pokrytí paliva jsou na českých jaderných elektrárnách trvale nízké, palivo s poškozeným pokrytím je nekompromisně vyřazováno z provozu a o této praxi kultury bezpečnosti nejlépe vypovídá graf na obr. 1. a údaje uveřejněné na webu [7].

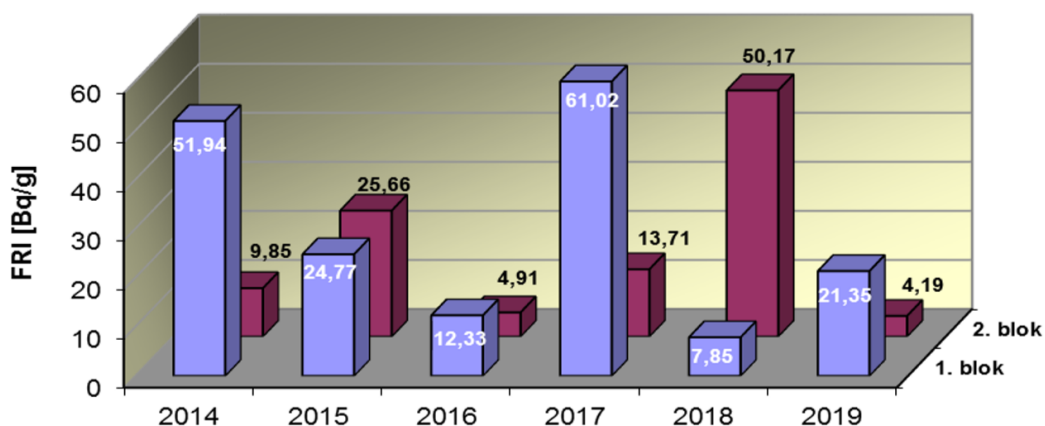
Z těchto údajů vyplývají následující hodnoty pro FRI faktory na českých jaderných elektrárnách:

3.A.1 Spolehlivost paliva



Obr. 4 – Spolehlivost paliva vyjádřená jako těsnost palivového pokrytí veličinou FRI faktor na Jaderné elektrárně Dukovany

3.A.1 Spolehlivost paliva



Obr. 5 – Spolehlivost paliva vyjádřená jako těsnost palivového pokrytí veličinou FRI faktor na Jaderné elektrárně Temelín

Z obr. 4 a 5 je zřejmé, že situace na Jaderné elektrárně Temelín je horší než na Jaderné elektrárně Dukovany, která má hodnoty FRI faktoru hluboce pod číslem 19 Bq/g. Netěsnosti na palivu byly na Jaderné elektrárně Temelín problémem i v minulosti, a lze se k tomuto tématu vrátit v příštím článku.

Subjektivní důvody

Subjektivními důvody nízkých hodnot kolektivních efektivních dávek na českých jaderných elektrárnách jsou:

1. Subjektivní důvody obecné, které jsou dané způsobem konkrétní jaderné legislativy a způsobem její aplikace na jaderných zařízeních. Tyto důvody jsou plně ovlivnitelné státem, tedy přes státní orgán a tím jsou vládní regulátoři, v případě České republiky to je SÚJB.
 - Neustálé zvyšování bezpečnosti na jaderných elektrárnách systémem důsledných zpětných vazeb řešení událostí ze strany ČEZu.
 - Zásada beztrestnosti a nepostižitelnosti pachatele nehod včetně radiačních událostí ze strany ČEZu (pokud pachatel nehodu ohlásí a spolupracuje při jejím vyšetření).
 - Kontrolní činnosti SÚJB v oblasti fyzické bezpečnosti, jaderné bezpečnosti, technické bezpečnosti a radiační ochrany, důsledná kontrola správné a úplné aplikace české jaderné legislativy.
 - Zajištění kultury bezpečnosti na českých jaderných elektrárnách.
 - Monitorování radiační situace na jaderných elektrárnách k zajištění radiační ochrany, jak ze strany provozovatele (ČEZ), tak i ze strany státu (SÚJB, SÚRO)
 - Periodické školení a výcvik dovedností radiační ochrany na českých jaderných elektrárnách
2. Subjektivní důvody zvláštní dané přístupem provozovatele jaderné elektrárny k bezpečnostní politice na jaderném zařízení. Také tyto důvody jsou jen málo ovlivnitelné státem (SÚJB), avšak z důvodů technické přesnosti a z důvodu, že je SÚJB podporuje, jsou zde zmíněny.
 - Modifikovaný chemický vodní režim I.O., úprava vysokoteplotního pH
 - Rozbor radiačních činností v kontrolovaných pásmech všemi držiteli povolení vstupů a činností v KP českých jaderných elektráren [8].

Literatura:

1. Zákon č. 263/2016 Sb., ve znění zákona č. 183/2017 Sb., atomový zákon; <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263-2016.pdf>
2. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 422/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů, vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje; <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/sb0172-2016.pdf>
3. Occupational Exposures at Nuclear Power Plants, Annual Reports of the ISOE Programme, ročníky 1990-2018, OECD, NEA, Boulogne-Billancourt, France
4. Kratochvíl, Zdeněk: Úprava obráběcího procesu rozměrné součásti z čerpadla. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2015, s. 11

5. Jung P.: Electronic Dosemeters for Monitoring Neutron Personal Dose in Radiation Fields in a Nuclear Power Plant. In Proceedings of 2008 ISOE European Symposium on Occupational Exposures at Nuclear Facilities, Turku, Finland, 25-27 June 2008, s. 254
6. <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>
7. https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/hodnoceni/PBU_Hodnoceni_2019_final.pdf
8. Urbančík, Libor: Jaderná a radiační bezpečnost provozu českých jaderných elektráren, Učební tety vysokých škol, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Akademické nakladatelství CERM[®], s. r. o., Brno, 2015