


# BEZPEČNOST – IMPERATIV JADERNÉ ENERGETIKY

The background is a solid light orange color. On the right side, there is a stylized tree branch with several leaves. Two atomic models are depicted: one at the top right with a central white nucleus and three blue electrons, and another at the bottom right with a central white nucleus and three electrons (one blue, one green, one yellow). The text is arranged in two main sections: a Czech title at the top and an English title in the middle.

# SAFETY – IMPERATIVE OF NUCLEAR ENERGY

©2013 JMM consulting

Dana DRÁBOVÁ  
Frank CARRÉ  
František HEZOUČKÝ  
Jiří HŮLKA  
Jan JOHN  
Jukka LAAKSONEN  
John C.LEE  
Jozef MIŠÁK  
Martin RUŠČÁK



# BEZPEČNOST – IMPERATIV JADERNÉ ENERGETIKY

## SAFETY – IMPERATIVE OF NUCLEAR ENERGY

Dana DRÁBOVÁ  
Frank CARRÉ  
František HEZOUČKÝ  
Jiří HŮLKA  
Jan JOHN  
Jukka LAAKSONEN  
John C.LEE  
Jozef MIŠÁK  
Martin RUŠČÁK

## Editorial:

Každý, kdo žije jadernou energetikou, kdo se s ní i jen letmo potkal, registruje mimořádný důraz, kladený na bezpečnost jejího provozování a všech s tím souvisejících činností. Ta téměř až obsedantní potřeba, aby vše bylo bezpečné, nastartovala intenzivní výzkum a vývoj vedoucí k tomu, že na hranici poznatelného vědění je možné v jaderné energetice aplikovat ty nejpřísnější požadavky na bezpečnost. Proč byl tento důraz na bezpečnost přijat, zda se na tom podepsalo vědomí o prvních známých projevech účinků energie štěpení těžkých jader, není až tak podstatné, důležité je, že tomu tak je.

Jaderná energetika je fenomén. Bezpečnost v jaderné energetice je fenomén. Zřejmě žádný jiný průmyslový obor není vystaven tak kontroverzní diskuzi, jako jaderná energetika. Důvodem je pravděpodobně nedůvěra v cosi nepoznané a nepoznatelné normálním člověkem, což jádro atomu v neviditelnosti svého projevu – ionizujícího záření a obrovské energie kumulované v nicotném rozměru – bezesporu je. Takto fenomén jádra umí uchopit média, díky tomu lze manipulovat veřejným míněním a vymezovat se proti jaderné energetice.

Nelze však zpochybnit, že důraz na bezpečnost je zakódován do jaderné energetiky již od počátku jejího vývoje i když vnější veřejný tlak má svou roli.

Ve své podstatě jde o pochopení, že jaderná energetika svým lpěním na bezpečnosti dává lidské společnosti více, než jen jistotu maximální péče a kvality při jejím provozování a rozvoji – zdokonaluje také řadu jiných oborů a činností. Tento přesah a transfer znalostí a výsledků je obecně akceptován například v oblasti kosmického výzkumu – vědomí o tom má prakticky každý člověk již trvale pod kůží. Je zřejmé, že přesah jaderné energetiky není tak rozsáhlý – ale přece se něco povedlo... Důležitost tohoto vědomí v době, kdy ve světě dochází i k jadernému phase-outu, je mimořádná. Bylo by velkou škodou odejít od jaderné energetiky a opustit obrovský inovativní potenciál, který sebou nese.

Everyone living and breathing nuclear energy as well as those who have a mere passing acquaintance with it have noticed the extremely strong emphasis placed on the safety of its operation and all related activities. This almost obsessive need for everything to be safe has been a driving force behind intensive research and development at the cutting edge of our current knowledge that has led to the application of the strictest safety requirements in nuclear energy. The reason why this emphasis on safety was adopted, whether it was informed by the first known effects of the energy released through fission of heavy nuclei, is not that important; the crucial thing is that it happened.

Nuclear energy is a phenomenon. Safety in nuclear energy is a phenomenon. There is probably no other field of industry that would have to face as much controversy as nuclear energy. The reason is most likely prejudice against the unknown and the unknowable – which is a very apt description of the general public's perception of the nucleus of an atom, its invisible effect of ionizing radiation or the enormous amounts of energy concentrated in something negligibly small. This is how the nuclear phenomenon is often covered by the media, manipulating public opinion against nuclear energy.

On the other hand, it is beyond any doubt that the emphasis on safety has been a key part of nuclear energy since its very beginnings, even though external pressure has also played its part.

The core is the understanding that through its emphasis on safety, nuclear power gives society as a whole more than just a guarantee of maximum levels of care and quality in its operation and development – it also improves many other fields and activities. This transfer of knowledge and results is generally accepted for example in the field of space research, which is something almost everyone is now very well aware of. It's clear that the overlaps of nuclear energy aren't as wide, but it has still achieved a lot... This is of course particularly important at this time when the world is going through a nuclear phase-out. It would be a terrible shame to abandon nuclear energy and the enormous innovative potential hidden in it.

Jiří Marek – Editor & NERS 2013 Conference Chairman



Vydáno u příležitosti 6. výroční konference o jaderné energii NE•RS 2013 a za podpory projektu „Efektivní přenos poznatků v rámci energetického sektoru“, který je spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky. Velký dík patří také všem partnerům NE•RS 2013, kteří se svým dílem na vydání této publikace – jako nedílné součásti konference – podíleli.

Published on the occasion of the 6<sup>th</sup> Annual Conference on Nuclear Energy NE•RS 2013 with the support of the project “Effective knowledge transfer in the energy sector”, co-financed from the European Social Fund and the state budget of the Czech Republic. The publisher also wishes to thank all partners of NE•RS 2013 who have helped to make this brochure – an integral part of the conference – possible with their support.



# BEZPEČNOST BYLA, JE A BUDE PRIORITYOU

Dana DRÁBOVÁ

Výroba elektrické energie z energie jaderné má své kořeny ve vědeckých objevech v období mezi dvěma světovými válkami. V té době byli lidé fascinováni vědou a možnostmi, které nabízela, a do vědeckého pokroku vkládali obrovská očekávání. Byla to doba průbojných a odvážných pionýrů, kteří si byli vědomi, že každý krok vpřed je doprovázen rizikem a byli ochotni toto riziko přijímat. Historie komerčního využití jaderné energetiky sestává ze dvou odlišných období. Dvě desetiletí rychlého rozvoje s takřka exponenciálním nárůstem počtu provozovaných bloků byla následována dnes již více než třiceti lety jen pomalého dalšího nárůstu instalovaného výkonu, s klesajícím počtem zahajovaných staveb v daném roce a řadou definitivně odstavených bloků. Sedmdesátá léta minulého století byla dobou prvních ropných šoků, což podnítilo rozvoj jaderné energetiky. Byla to však zároveň doba, kdy si veřejnost stále více uvědomovala přítomnost jaderných elektráren, začala se o ně intenzivně zajímat a projevovala své obavy. Řada lidí si jadernou energetiku spojovala a stále spojuje s bombami dopadnutšími na Hirošimu a Nagasaki. Počátky mírového využívání jaderné energie byly ve znamení široce publikovaných a značně přehnaných očekávání. Taková očekávání vycházela z nízké ceny paliva, ale bez znalosti skutečně potřebných investic. Následovaly i příklady jisté nepoctivosti a zastírání potíží jak ze strany průmyslu, tak vlád. Výkonnost a spolehlivost jaderných elektráren v období výstavby a provozu dlouho zůstávala za očekáváním. Neexistoval vědecký či technický důvod pro okřídlená tvrzení, že jaderná energie bude tak levná, že nebude třeba mít doma elektroměr. Nebylo proč očekávat éru míru a blahobytu, ke které mělo využívání jaderné energie vést. Explosivní vývoj, při kterém byly uváděny do provozu jaderné elektrárny s komponentami a s úrovní vědeckého a technického poznání odpovídající době, se neobešel bez negativních jevů. Nehody v jaderném průmyslu vznikaly zejména v důsledku vývojových problémů a dokonce i hrubých chyb a selhání lidí, nejen v provozu, ale i v projektování a při konstrukci a stavbě. Tak tomu ostatně bylo a je v řadě dalších oborů, například v silniční a letecké dopravě. Od samého počátku výzkumu a vývoje v průmyslové oblasti, který směřoval k mírovému využívání jaderné energie, však byla za jednu z priorit považována bezpečnost, a neúčinnějším nástrojem pro její dosažení pak prevence. V dějinách vědy a průmyslového rozvoje je to jeden z prvních, ne-li vůbec první příklad, kdy lidé zodpovědní za vývoj a průmyslovou realizaci si nejen byli vědomi rizik, která nový zdroj energie přinášel, ale zdůrazňovali nezbytnost zajištění adekvátní bezpečnosti jako podmínku uvedení nové technologie do praxe. Rychlý a trvalý růst vědeckého a inženýrského poznání, navazující vývoj konceptů bezpečnosti a zvyšující se odborné znalosti a zkušenosti získané z provozu jaderných elektráren v normálních a abnormálních podmínkách, vedly ke stále komplexnějšímu a systematictějšímu přístupu k zajištění bezpečnosti.

Pro zajištění bezpečnosti je zásadním principem ochrana do hloubky. Tato původně vojenská strategie spočívá ve snaze různými prostředky zpomalit a oslabit akce útočníka a získat čas pro nasazení dalších sil k obraně pozic. S ochranou do hloubky se však můžeme setkat i v řadě nevojenských oblastí, kde je třeba pomoci prevence a zmiřování následků nehod a havárií regulovat riziko ohrožení zdraví, životů a majetku. Typickým příkladem je požární inženýrství. Průkopníkem systematického využití tohoto principu v průmyslu ovšem byla jaderná energetika.

Ochranou do hloubky zde rozumíme přístup k navrhování a provozování jaderných zařízení, který minimalizuje pravděpodobnost vzniku nehod a zmiřuje jejich následky, pokud nastanou. Klíčem k úspěchu je vytvoření více nezávislých a zmožených bariér kompenzujících možná selhání techniky a lidské chyby.

S postupným rozšiřováním počtu provozovaných bloků se jaderná energetika stávala a stále stává bezpečnější a spolehlivější. Hlavním hybatelem jejího dospívání byla a je provozní zkušenost, včetně té z nehod a havárií. Velké úniky radioaktivních látek, ke kterým došlo v Černobylu a nedávno ve Fukušimě přinesly i nutný nový pohled zaměřený nejen na technická řešení, ale také na společensko-politický a ekonomický dopad situace, kdy se technologie vymkne kontrole.

Během více než sedmdesáti let využívání jaderné energie, včetně pohonu lodí, jaderných elektráren, zařízení palivového cyklu a výroby zbraní, došlo k řadě nehod, ale pouze k několika haváriím, které vedly k úniku radiace do životního prostředí. Jistým paradoxem tedy je, že toto průmyslové odvětví mělo relativně málo příležitostí čerpat z nejintenzivnějšího zdroje poučení, tedy z havárií. Jaderná energetika totiž je právem vnímána jako odvětví, které si havárie nemůže dovolit. Usílí se tedy soustředěvalo na každodenní péči o pro-

vozní bezpečnost, zlepšování spolehlivosti zařízení a s tím související zvyšování efektivity provozu.

Každá velká havárie způsobila odstranění celých tříd zdrojových příčin: Three Mile Island ukázal důležitost důkladného pochopení chování reaktoru a souvisejících systémů při přechodových jevech a nutnost lépe pochopit otázky integrity jednotlivých konstrukcí a bariér. Černobylská havárie vedla k úsilí o eliminaci nebezpečných snah o komerční využití jistého typu reaktorů a otevřela požadavky na kulturu bezpečnosti. A to nejen provozovatele, ale celé jaderné infrastruktury. Pochopení příčin fukušimské havárie pravděpodobně odstraní další zdroj – nedostatečně dimenzovaný a prověřený projekt elektrárny ve vztahu k možným být velmi málo pravděpodobným vnějším vlivům.

Jak se z nehod a havárií poučují jiná průmyslová odvětví? Tragédie v Bhopálu (Union Carbide, 1984) a neštěstí v Seveso (1976) vedly k přijetí evropské regulace známé jako Seveso II. Od Sevesa nedošlo k masivnímu ohrožení lidí v okolí petrochemického provozu. Ovšem musíme brát v úvahu, že chemickému průmyslu trvalo kolem 100 let, než odstranil nejpodstatnější zdroje selhání.

Poslední desetiletí jsou poznamenána stále menší ochotou lidí přijímat oficiální ujištění, že využívání jaderné energie a zdrojů ionizujícího záření nepředstavuje nepřijatelné riziko. Obavy ze spadu po testech jaderných zbraní, havárie v Černobylu i současná debata o místě jaderné energetiky v zajišťování našich energetických potřeb a o řešení problematiky radioaktivních odpadů, byly a jsou úrodnou půdou pro skeptický postoj řady lidí ke schopnostem vlády vypořádat se uspokojivě s regulací rizik záření.

Rozhodování ve věcech jaderné bezpečnosti je dlouhý a náročný proces. Vyžaduje vztlé úsilí o vysokou úroveň. Nejen v naší odbornosti, ale i v lidských vztazích. Musíme své znalosti stále obnovovat, rozšiřovat, přizpůsobovat změnám a novým vizím. Musíme brát na vědomí kvalitu našeho okolí, napodobovat ji, zdokonalovat a překonávat ji. Jen to nám umožní být respektovanými partnery. Příslušná dávka pokory, obezřetnosti, a na druhé straně úcty k lidským znalostem a dovednostem pak umožňuje rozhodovat kvalifikovaně a s dostatečnou mírou sebedůvěry.

## SAFETY WAS, IS AND WILL BE A PRIORITY

Dana DRÁBOVÁ

Generation of electricity from nuclear energy has its origins in scientific discoveries made between the two world wars. It was a time when people were fascinated by science and the opportunities it offered, and had great expectations from scientific progress. A time of pioneers, energetic and courageous, who knew that every step forward carried its risks which they were willing to accept. The history of commercial utilization of nuclear energy can be divided into two distinct periods. Two decades of quick development with an almost exponential increase in the number of operated units were followed by now more than thirty years of much slower growth in installed output, with fewer new construction projects each year and many units permanently decommissioned. The seventies were a time of the first oil troubles, boosting the development of nuclear energy. But they were also a period when general public awareness of the presence of nuclear power plants was spreading, raising interest as well as causing worries. Many people then and now associate nuclear energy with the bombs that fell on Hiroshima and Nagasaki. The beginnings of peaceful utilization of nuclear power were welcomed with widely published and greatly exaggerated expectations. They were based on the low price of fuel, but did not take into account the necessary investments. Both the industry and governments have occasionally been dishonest and denied the problems they were having. In the early years of construction and operation, both the output and reliability of nuclear power plants remained behind expectations for a very long time. There was no scientific or technical reason for popular claims that nuclear power would become so cheap there would be no need for electricity meters, no real cause for the expectations of an era of peace and welfare that nuclear power was supposed to lead to. This explosive development, in which nuclear power plants were commissioned with components and levels of scientific and technical progress corresponding to their time, had its negatives. Accidents in the nuclear industry were primarily caused by developmental problems as well as gross failures and errors made by people in operation, design or construction. This is after all not dissimilar to many other fields, such as road or air transport. Nevertheless, safety has been considered a priority from the very beginnings of research and development in the industry of utilizing nuclear power for peaceful purposes; the most efficient tool for achieving safety was

prevention. In the history of science and industrial development, nuclear power may have been one of the first, if not the first, examples in which those responsible for development and industrial deployment not only were aware of the risks of this new source of energy, but also emphasised the necessity of guaranteeing sufficient safety as a key prerequisite for its practical use. Swift and constant broadening of scientific and engineering know-how, subsequent development of the concepts of safety and the increases of professional knowledge and experience gained from the operation of nuclear power plants in standard and exceptional conditions have all led to an increasingly more complex and systematic approach to safety.

The key principle of safety is defence in depth. This originally military strategy means utilising various means to delay attackers and weaken their assaults, buying the time for deploying additional forces to defend the current position. Defence in depth is now found in many other fields where prevention and mitigation of the impacts of incidents and accidents is required to reduce the risk of threatening health, lives and property. A typical example is fire prevention. The true pioneer of a systematic use of this principle in industry, however, is nuclear energy.

In our field, defence in depth refers to an approach to the design and operation of nuclear units that minimises the risk of incidents and mitigates their consequences in case they do happen. The key to success is creating multiple independent and redundant barriers compensating for potential faults of equipment and human error.

With this gradual increase in the number of operated units, nuclear energy is becoming safer and more reliable. The main factor in this maturation of the industry was and still is operating experience, including lessons learned from incidents and accidents. Major leaks of radioactive substances in Chernobyl and recently also in Fukushima have brought a necessary new perspective, focused not only on technical solutions, but also on the socio-political and economic impact of situations in which technology gets out of control.

In the more than seventy years in which nuclear energy has been used in ships, nuclear power plants and equipment of the fuel cycle or to make weapons, there have been numerous incidents, but only a few accidents that resulted in a release of radiation to the environment. This causes something of a paradox: this industry had relatively few opportunities to learn from the most concentrated source of knowledge there is, that is accidents. The reason is that nuclear power is justly seen as an industry that cannot afford accidents. Major effort is concentrated on everyday care for operational safety, increasing the reliability of equipment and with it also operating efficiency.

Each major accident led to an elimination of entire classes of root causes: Three Mile Island showed the importance of perfectly understanding the behaviour of the reactor and related systems in transitional states and the need for better analyses of the integrity of individual constructions and barriers. The Chernobyl accident led to an effort to eliminate dangerous attempts to commercially utilize a certain type of reactors and increased the focus on a culture of safety, aimed not only at operators, but nuclear infrastructure as a whole. Understanding the causes of the Fukushima accident will probably remove another source – projects that are insufficiently prepared and verified for potential external influences of a very low probability.

What are the other fields of industry learning from incidents and accidents? The tragedy at Bhopal (Union Carbide, 1984) and the Seveso disaster (1976) led to the adoption of a European regulation known as Seveso II. Since Seveso II, there has been no massive threat to population near petrochemical industrial plants. It should be noted, however, that it took the chemical industry about 100 years to remove key sources of failure.

The last decades are characterised by an ever lower willingness to accept official assurances that the utilization of nuclear energy and sources of ionizing radiation does not present an unacceptable risk. The fears of fallout from nuclear weapons testing, the Chernobyl accident and the current debate on the role of nuclear power in satisfying our energy needs and the issues of radioactive waste handling have been fertile grounds for scepticism felt by many towards the abilities of governments to adequately deal with the regulation of radiation hazards.

Decision making in nuclear safety is a long and complex process. It requires constant efforts striving for perfection. Not only in terms of professional knowledge, but also human relationships. We have to keep renewing and extending our knowledge, adapting to changes and new visions. We must be aware of the quality of the environment we work in and try to replicate, perfect and exceed its levels. Only that will allow us to become respected partners. Adequate humility, diligence and respect of human knowledge and skills enables making qualified decisions with due confidence.

**Dana DRÁBOVÁ**

**předsedkyně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost  
Chairwoman of the State Office for Nuclear Safety**

■ **Po ukončení studia na FJFI** ČVUT se zabývala řadou témat v oblasti radiční ochrany. Od května 1996 vedla jako ředitelka Státního ústavu radiční ochrany, v listopadu 1999 byla jmenována předsedkyní Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. V souvislosti s tím se zúčastnila řady expertních misí IAEA a působila ve vysokých pozicích v Radě guvernérů IAEA (místopředsedkyně) a WENRA (předsedkyně). V současnosti předsedá Komisi pro bezpečnostní standardy IAEA, účastní se práce Poradního výboru pro jadernou bezpečnost generálního ředitele IAEA a je členkou vědeckých rad několika technických univerzit a výzkumných institucí.



Engineering of the Czech Technical University, she has worked in several different positions in the field of radiation protection. From May 1996, she managed the National Radiation Protection Institute as its director, and on November 1999 was appointed Chairwoman of the State Office for Nuclear Safety. In this function, she participated in a number of IAEA expert missions and held various positions in the IAEA Board of Governors (Vice-President) and WENRA (President). Currently she acts as Chairperson of the IAEA Safety Standards Committee, participates in the work of the Advisory Committee for Nuclear Safety to the IAEA Director General and is a member of scientific councils of several technical universities and research bodies.

■ **Since graduating from the Faculty of Nuclear Science and Physical**



## JADERNÁ BEZPEČNOST: VÝZNAMNÝ ZDROJ OSVĚDČENÝCH POSTUPŮ A INOVACE VE VŠECH OBLASTECH LIDSKÉ A EKONOMICKÉ ČINNOSTI

Frank CARRÉ

Už v samých začátcích jaderného výzkumu byla rychle rozpoznána rizika jaderných havárií a šíření jaderných zbraní. To vedlo v letech 1956 – 57 k založení Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) s cílem „urychlit a rozšířit přínos jaderné energie pro mír, zdraví a prosperitu na celém světě“.

Později vzniklo podobných mezinárodních agentur ještě více, nicméně IAEA si i nadále udržela nejvýznamnější roli v rozvoji bezpečnostních standardů s tím, jak se systémy využívání jaderné energie stávaly stále složitějšími. Agentura výrazně přispěla k šíření klíčového principu ochrany do hloubky, jenž spočívá ve vytvoření více nezávislých, redundantních a diverzifikovaných bariér, které omezují dopady případných selhání zařízení i lidských chyb. Bezpečnostní standardy IAEA v tomto ohledu představují systém základních bezpečnostních principů, požadavků a pokynů sloužících k ochraně lidí i životního prostředí před škodlivými dopady ionizujícího záření.

Zároveň pak IAEA rozvíjela bezpečnostní standardy a metody hodnocení bezpečnosti; cíle a technologie bezpečnostních systémů jako takové také procházely výrazným vývojem. „The Reactor Safety Study“ (zpráva WASH-1400), která byla vypracována v roce 1975 pro americkou NRC (komise pro regulaci v jaderné oblasti), byla prvním pokusem aplikovat pravděpodobnostní hodnocení rizik, techniku přejatou z aeronautiky, na abnormální a přechodně havarijní stavy lehkovýchodních reaktorů. Po období intenzivního výzkumu a diskuze, jež částečně inspirovala havárie v Three Mile Island, byla v roce 1991 studie WASH-1400 nahrazena studií „Závažná rizika nehod: hodnocení pěti amerických jaderných elektráren“ (NUREG-1150) a v roce 2007 pak novou studií realizovanou americkou regulační komisí pod názvem *Aktuální stav konsekvenci analýzy reaktorů (SOARCA)*. Studie NUREG-1150 byla významným předělem ve využívání konceptů založených na riziku v regulačních procesech, zatímco studie SOARCA se zaměřila na korigování nerealistického konzervativismu předchozích studií, jenž vedl k nesprávné kvantifikaci důsledků závažných havárií s velmi nízkou pravděpodobností.

Zkušenost nabytá při provozu jaderných elektráren a poučení z velkých havárií vedly k postupnému zlepšování přístupu k jaderné bezpečnosti a jejich analýzám. Havárie v Three Mile Island v roce 1979 ukázala, že pro provozovatele je nezbytné přesně znát stav jaderné elektrárny a neuchylovat se k urychlenému jednání, které snižuje spolehlivost dalších korektivních zásahů. Tento poznatek vedl k vizi zlepšených lehkodvodních reaktorů podporovanou EPRI, institutem, který je zastáncem jednoduššího designu reaktorů s pasivními bezpečnostními prvky, který mají lepší schopnosti samostatně zvládat nehody v chladicím systému. Černobylská katastrofa v roce 1986 prokázala nedostatky bezpečnostních systémů reaktorů RBMK, jež byly od té doby napraveny, a zdůraznila, že bezpečný provoz jaderných elektráren vyžaduje od všech zúčastněných stran nepolevující kulturu bezpečnosti. Evropa reagovala na černobylskou havárii zlepšováním kvality kontejnmentu jaderných elektráren tak, aby případná nehoda a možnost úniku radioaktivního materiálu neznamenala dlouhodobé omezení ekonomických aktivit mimo elektrárnu samotnou. Havárie ve Fukušimě Daiiči v roce 2011, kterou způsobila přírodní katastrofa, zdůraznila význam věnování větší pozornosti externím vlivům při hodnocení bezpečnosti a potřebu věnovat čas analýze velmi nepravděpodobných, ale přesto realisticky možných situací, jež by mohly mít závažné důsledky. Také se zde ukázalo, že v jedné elektrárně může dojít k několika poruchám zároveň a že příprava na nouzové situace by měla zahrnovat i záložní zdroje energie a chladicí systémy lokalizované mimo samotné zařízení.

Postupné zlepšování bezpečnostních standardů a účinnosti bezpečnostních systémů je zcela zásadní pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu jaderných elektráren a udržení si důvěry široké veřejnosti. Snahy směřující k mezinárodnímu sladění bezpečnostních požadavků na lehkodvodní reaktory třetí generace jsou dalším klíčovým faktorem pro výstavbu pokročilých jaderných elektráren, u nichž byla jednou z priorit nových projektů různá zlepšení bezpečnostních systémů vycházející ze znalosti dřívějších havárií. Mezinárodní program hodnocení projektů, na němž spolupracuje celá řada regulačních úřadů, se na tuto oblast zaměřuje od roku 2006.

Význam bezpečnosti v jaderné energetice spolu s jejími jedinečnými technickými charakteristikami vedl k pokroku v oblastech bezpečnostních metodologií, systémů i technologií, jež se pak šířily i do dalších sektorů, jako je například nakládání s nebezpečnými látkami (chemikálie, výbušniny, plyn...) nebo různá průmyslová odvětví (těžba, distribuce a využívání plynu, tlakové nádoby, podzemní skladování...), což vedlo ke specifickým regulacím u zařízení vyhodnocených jako potenciální hrozba pro životní prostředí v chemickém průmyslu, při transportu nebezpečných látek a jiných činnostech s vyšší mírou rizika.

Jaderná energetika tvoří předvoj jiných průmyslových sektorů také ve svém využívání bezpečnostních modelů založených na vědeckém výzkumu a simulacích. Podmínky v situacích po závažné havárii nebo dlouhodobé chování radioaktivních odpadů jsou skutečně něčím, co nelze plnohodnotně testovat a u čeho je nezbytné se spolehnout na nejlepší možné fyzikální modelování a matematické simulace. To pak vede k rozvoji konkrétních odvětví vědy zaměřených na spolehlivou simulaci vlastností stárnoucích materiálů, základní fenomenologii závažných jaderných nehod, koroze a dalších degračních mechanismů při zpracování radioaktivních odpadů nebo uvolňování a migraci radionuklidů v různých geologických podmínkách skladování. Mnohé z těchto vědeckých poznatků budou jistě uplatnitelné i v jiných průmyslových oborech (stárnutí, šíření znečišťujících látek atd.). Specifickým úkolem jaderné bezpečnosti je nutnost vypořádat se s bezpečnostními otázkami, které jsou svou povahou jedinečné, jako jsou závažné havárie, zacházení s radioaktivními odpady nebo adaptování bezpečnostních požadavků jak pro pokročilé lehkodvodní reaktory, tak i pro rychlé reaktory, založené na jiné fyzice aktivní zóny a jiných primárních chladicích médiích. Dalším klíčovým problémem je integrování narušených sociopolitických a ekonomických efektů, které mohou doprovázet závažné nehody jaderných elektráren.

Stejně jako se ve svých začátcích jaderná bezpečnost učila z pravděpodobnostních analýz používaných v aeronautice a později se stala iniciátorem dalšího vývoje, jenž nalezl uplatnění i v jiných oborech, tak i zkušenosti ze standardního provozu i nestandardních situací v jaderných elektrárnách společně s poučením z nehod v jiných průmyslových odvětvích povedou k dalšímu technickému rozvoji této bezpečnosti, jež bude lépe chápána i šířena, a získá tak i důvěru veřejnosti, kterou jaderná energetika potřebuje pro své úspěšné fungování na celém světě.

## NUCLEAR SAFETY: A KEY DRIVER OF BEST PRACTICES AND INNOVATION FOR ALL AREAS OF HUMAN AND ECONOMIC ENDEAVOURS

Frank CARRÉ

During pioneering times of nuclear research and development risks of nuclear accidents and nuclear proliferation were identified very early, thus leading to the creation of the *International Agency for Atomic Energy (IAEA)* in 1956 - 57 to "accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world".

Among other international agencies that were created afterwards, the IAEA was the most instrumental in developing safety standards as nuclear systems were becoming more complex. It contributed to institutionalize the key principle of defense in depth that consists in building in the design a number of independent, redundant and diversified barriers that limit consequences of equipment failures and human errors. Along these lines, the IAEA safety standards provide a system of fundamental safety principles, safety requirements, and safety guides for protecting people and the environment from harmful effects of ionizing radiation.

At the same time the IAEA was advancing safety standards, safety assessment methods together with goals and technologies for safety systems have radically evolved. "The Reactor Safety Study" (WASH-1400 Report) that was produced in 1975 for the U.S. Nuclear Regulatory Commission was the first to apply Probabilistic Risk Assessment, derived from the aeronautical sector, to abnormal operation and accidental transients of light water reactors. Following a period of intensive research and discussion, inspired in part by the Three Mile Island accident, WASH-1400 was replaced in 1991 first by a study of "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants" (NUREG-1150) and in 2007 by a new study being performed by the U.S. NRC called the *State of the Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA)*. NUREG-1150 study was a significant turning point in the use of risk-based concepts in the regulatory process and the SOARCA study aimed at correcting unrealistic conservatism of prior studies that generated invalid quantification of consequences of very unlikely severe accidents.

The experience gained in operating nuclear power plants and lessons from major nuclear accidents led to progressive improvements of nuclear safety approach and analyses. Three Mile Island accident in 1979 demonstrated the importance for the operator to exactly know the state of the nuclear power plant and to not be solicited for urgent actions for a greater reliability of corrective actions. This led to a vision of improved light water reactors supported by EPRI that calls for reactor designs with passive safety features and more simple designs that have a greater capacity for an autonomous management of cooling accidents. The Chernobyl disaster in 1986 evidenced shortcomings in safety features of RBMK reactors designs that have been corrected since then, and emphasized the fact that the safe operation of nuclear power plants calls for a strong safety culture from all stakeholders. European vendors responded to Chernobyl disaster while reinforcing the containment of nuclear power plants so that in the event of any severe accident possible radioactive releases would not durably prevent economic activities beyond the nuclear site. The accident of Fukushima Daiichi in 2011 that resulted from a natural disaster emphasized the greater importance to be given to external aggressions in safety assessments and calls for better accounting for very unlikely yet credible events with severe consequences. It also revealed that multiple accidents may occur at the same time on a given site and that emergency preparedness should be reinforced with off-site power supply and cooling capabilities.

Steadily improving safety standards and safety systems' efficiency is of utmost importance for ensuring the safe and reliable operation of nuclear power plants and maintaining public confidence. Progressing towards internationally harmonized safety requirements for Generation III light water reactors is another important issue for confidently commercializing advanced nuclear power plants that feature varied improvements in safety depending on lessons from past accidents that were given priority for advancing new designs. The Multinational Design Evaluation Program that is a network of Safety Authorities is progressing along this line since 2006.

The prominence of safety for nuclear power together with unique technical aspects prompted advances in methodologies, systems and

technologies for safety that have expanded to other sectors such as for the management of hazardous products (chemicals, explosives, gas...) and industrial activities (mining, distribution and utilization of gas, pressure vessel, underground storage...) that led to specific regulations for facilities classified for environmental protection chemical industry, transportation of dangerous substances, high risk industrial activities...

Nuclear power is also a forerunner to other industrial sectors as it calls for science – and simulation-based safety demonstrations. Indeed, severe accident conditions or long term behavior of radioactive waste packages cannot be tested a full scale and have to rely on best available physical modeling and numerical simulation. This leads to develop specific sciences for confidently simulating the evolution of ageing materials properties, the basic phenomenology of severe nuclear accidents, the corrosion and other degradation mechanisms of radioactive waste conditioning, as well as the release and migration of radio-nuclides in varied geological storage conditions... Many of these scientific developments may well apply to other sectors of the industry (ageing, spread of pollutants...)

Challenges for nuclear safety lie in dealing with safety demonstrations that are unique in nature such as severe accidents, radioactive waste management or transposing safety requirements from advanced light water reactors to fast neutron reactors that have different core physics and primary coolant. Other challenges include integrating socio-political and economic disruptions that may result from severe accidents at nuclear power plants.

In the same way as nuclear safety initially learned Probabilistic Safety Assessments from practices in aeronautics and prompted further developments that had spin-offs in other fields of activities, the experience of normal operation and accidental behavior of nuclear power plants together with lessons of accidents in other industrial sectors will make nuclear safety progress technically, will make it more widely understood and shared, and will enhance the necessary public confidence for nuclear power to successfully deploy worldwide.

## Frank CARRÉ

Scientific Director of CEA – Nuclear Energy Division

■ **Frank Carré v roce 1976** nastoupil do CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), kde pracoval v různých manažerských pozicích v oblasti studií pokročilých jaderných systémů. V letech 2001 – 2009 působil jako ředitel programu nových jaderných energetických systémů a přispěl k formování národních programů výzkumu a vývoje a mezinárodní spolupráce v oblasti rychlých reaktorů s pokročilým palivovým cyklem a vysokoteplotních reaktorů pro kombinovanou výrobu tepla a vodíku. Od srpna 2009 je vědeckým ředitelem jaderné energetické divize CEA a profesorem na Ecole Polytechnique.



■ **Frank Carré joined CEA** (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) in 1976 and contributed through varied managerial positions to studies on advanced nuclear systems. From 2001 to 2009 he acted as Program Director for Future Nuclear Energy Systems and contributed to shape national R&D programs and international collaborations on fast neutron reactors with advanced fuel cycles and high temperature reactors for the cogeneration of process heat and hydrogen. Since August 2009 he is Scientific Director of CEA's Nuclear Energy Division and lecturing professor at the Ecole Polytechnique.



# POTŘEBA KULTURY BEZPEČNOSTI V JADERNÝCH ZAŘÍZENÍCH

František HEZOUČKÝ

Pojem **kultury bezpečnosti** (Safety Culture) vznikl po černobylské tragédii jako nástroj proti rutině, sebeuspokojení i hazardérství v provozu JE.

Přes významná zlepšení se po jisté době na jaderných zařízeních opět projevují nedobré skutečnosti. Je zřetelné, že existují jiné, silné faktory působící proti.

Z období po Černobylu stojí za pozornost zmínit tři události spojené s významným únikem radiace: 1999 Přeracovatelský závod Tokaimura, 2003 JE Pakš, 2011 Fukušima Daiiči.

O čem to svědčí? Navzdory existenci vydaných zákonů, mezinárodně uznávaných pravidel a doporučení dochází k jejich porušování. Jde o bariéry, které měly bránit nezodpovědnému jednání v oblasti jaderné bezpečnosti. Dokonce ani šířené povědomí „kultury bezpečnosti“ nezabránilo haváriím. Problémem kultury bezpečnosti je, že ji nelze budovat zdola a že vyžaduje vysokou kvalifikaci, která často v horních patrech elektrárenských společností chybí. Vrcholoví vedoucí pracovníci nemající příslušné chápání technických souvislostí trvale vyvíjejí tlak na snižování nákladů nebo jinak zanedbávají udržování kvalifikace svých specialistů. Chybí tam vědomí, k jakým následkům může vést nevládnutí vysoké koncentrace energie obsažené v jaderném palivu. Havárie v Three Mile Island a Černobylu, zanedbání základních principů bezpečnosti v Ontario Hydro, Millstone nebo David Bessie, vedoucí k dočasnému či trvalému odebrání povolení k provozování ukazují, kam může vést podcenění kvalifikace pracovníků v oboru a tlaky na zvyšování zisku šetřením na nesprávných místech. Těch událostí je více, ale některé se příliš neuvadějí, protože patří mezi „near miss events“ – tedy „se vlastně nic nestalo“.

Snižování počtu pracovníků bez příslušných analýz, nákup levných náhradních dílů bez ohledu na kvalitu, „autosórování“ údržbařské a servisní činnosti do firem, které pak nemají povinnost udržovat kvalifikaci svých pracovníků na potřebné úrovni. Podíváme-li se blíže na obecné příčiny, často zjistíme, že ve vedení firem provozujících jaderné elektrárny začíná převládat vědomí, že „už se to přece umí“, a že je proto možné soustředit se jen a hlavně na ekonomiku.

Asi lze těžko očekávat, že akcionář bude někým, kdo si nebude prát co nejvyšší dividendu. A rovněž je nemožné od něho očekávat nezbytnou míru jaderné kvalifikace. Je ale snad možné ho na příkladech upozornit na to, že může o svou dividendu přijít zcela, bude-li uvažovat pouze z hlediska krátkodobých spekulativních ekonomických zájmů. Jak ukazují reálné příklady, nevhodné vedení společnosti, které se snaží pouze o největší zisky a dividendu, může způsobit vyřazení bloku z provozu dočasně nebo natrvalo. Pro akcionáře to pak znamená mnohonásobně větší negativní ekonomické dopady, i když nemusí jít přímo o havárii. Vždyť postačuje ztráta provozní licence, aby se škody počítaly do milionů.

To, že samotné jaderné elektrárny jsou pod ekonomickým tlakem svého vedení, je dostatečně známo; v některých zemích (např. Kanada, USA, Švédsko, Japonsko...) ale byly zaznamenány případy tlaku i na dozorné orgány právě z ekonomicky-politických kruhů, které, pokud převáží, mohou vést k problémům v celém oboru. Je tedy nezbytné, aby se vnímání kultury bezpečnosti dostalo do všeobecného povědomí hospodářského i politického. A i když o kultuře bezpečnosti hovoříme v souvislosti s jadernými zařízeními, jde o přístup, který, bude-li uplatňován i v jiných oborech lidské činnosti, může i tam chránit jak hodnoty, tak i lidské zdraví.

Co to je ta „kultura bezpečnosti“, o níž se stále hovoří? Pro mnohé, bohužel, zas jenom jeden módní pojem, který lze opakovat bez pochopení smyslu.

*Kultura jaderné bezpečnosti je definována jako zásadní hodnoty a chování, které jsou výsledkem společného závazku vedoucích i jednotlivých osob nadřazovat bezpečnost nad jiné konkurenční cíle, aby byla zajištěna ochrana lidí a životního prostředí. (INPO 12-012).*

Z této nikoli jediné a ne zcela dokonalé definice je zřetelné, že musí jít o závazek společný pro vedoucí i ostatní pracovníky jaderných zařízení. Jde jak o chování k zařízení, tak i o vzájemné vztahy, o vzájemné sdílení hodnot. Můj přítel z Británie mi řekl, že po prvních rozhovorech s pracovníky libovolné jaderné elektrárny zjistí, zda tam je skutečná, nebo jen deklarovaná kultura bezpečnosti. Ve většině společností provozujících jaderné elektrárny není na členy vrcholového vedení kladen stejný kvalifikační nárok, jaký je považován za nezbytný pro úroveň pracovníků jaderné elektrárny. V takovém prostředí je budování a udržování kultury bezpečnosti nemožné. Zato je možné ji shora během krátké doby zničit. Vstoupíme-li do jaderné elektrárny a nástěnka či světelné noviny hlásí, že „Naším nejvyšším společným cílem je vysoká hodnota akcií společnosti a výška dividend“, můžeme si být jisti, že tam budeme kulturu bezpečnosti těžko hledat.

Zde je tedy zřejmě jedna ze zásadních příčin, která brání naplňování smyslu kultury bezpečnosti v organizacích.

Jak této skutečnosti čelit? Jedna z cest je zřejmě taková, že ve vedení společností provozujících jaderné elektrárny budou zkušené osobnosti kvalifikované jak v jaderném inženýrství, tak zároveň i v ekonomii. Přitom vycházím z přesvědčení, že jaderného inženýra je možné ekonomii doučit snáze, než ekonomu jadernému inženýrství.

# THE NEED OF SAFETY CULTURE IN NUCLEAR INSTALLATIONS

František HEZOUČKÝ

The concept of **Safety Culture** was coined after the Chernobyl disaster as a tool (instrument) to counter complacency, self-satisfaction and risk taking in the operation of Nuclear Power Plants (NPPs). Yet despite significant improvements, with the passage of time some unpleasant developments have again begun to appear / emerge in nuclear facilities. It is evident that there are other and strong influences turning the tide.

In the post-Chernobyl period, three events with significant release of radiation are worth mentioning – Tokaimura reprocessing facility in 1999, Paks NPP in 2003 and Fukushima Daiichi in 2011.

So what does this prove? That the existence of laws, internationally recognised rules and recommendations does not prevent their violation. These safeguards were meant to stop irresponsible behaviour in nuclear safety. But not even a raised awareness of Safety Culture has stopped accidents. The difficulty with Safety Culture is that it cannot be built from the bottom up and that it requires high levels of qualification that is often missing in higher management of utility companies. Top managers who do not have an adequate understanding of technical contingencies continually increase pressure on lowering costs or in other ways neglect the need to keep updating the qualifications of their specialists. They also lack knowledge of the consequences that can result from a failure to control the high concentration of energy in nuclear fuel. The Three Mile Island and Chernobyl accidents or the failure to comply with basic safety principles in Ontario Hydro, Millstone and David Bessie, which led to temporary or permanent revocations of their operating licence, show the potential consequences of underestimating the qualification of those working in the field and of pressure to increase profit by saving costs in the wrong areas. There have been other such incidents, but these are not mentioned very often, as they are counted among 'near miss events' – in other words that 'nothing in fact happened'.

Reducing staff without necessary analyses, purchasing cheap spare parts without regard for quality, outsourcing maintenance and servicing tasks to companies that are not required to keep their employees adequately qualified. When we look at general causes more carefully, we often see that the prevailing attitude in the management of companies operating nuclear power plants is that 'we've already mastered this' and so it is possible to concentrate only and mostly on economics.

We can hardly expect shareholders to want anything but the highest possible dividend. And it is equally unthinkable to assume they have the necessary level of nuclear qualification. But it should be possible to convince them by citing examples that they can lose their profit entirely if they only focus on short-term speculative economic interests. Real examples show that the improper management of a company, focusing only on highest profits and dividends, may lead to a unit being temporarily or permanently removed from operation. For shareholders, this means much greater negative economic consequences, even though no real incident needs to occur. The loss of an operating licence alone can cause millions in damages.

Experience from some countries, such as Canada, USA, Sweden or Japan shows that the regulatory body may have known of weaknesses, but did not have the capacity to exact improvement from company management. In numerous cases, the regulatory body simply did not exert adequate pressure on management and actually caused worsening of the situation. Utility companies are often far too strong an opponent to regulatory bodies and have extensive political connections. What is this Safety Culture we keep hearing about then? For many, unfortunately, it is just another buzzword that is simply repeated without understanding its meaning.

*Nuclear Safety Culture is defined as the core values and behaviours resulting from a collective commitment by leaders and individuals to emphasize safety over competing goals to ensure protection of people and the environment. (INPO 12-012).*

From this definition, which is not the only one and is far from perfect, it is clear that it must be a commitment of both the management and employees of nuclear facilities. It involves respect for infrastructure, as well as mutual good relationships and shared values. A friend from the UK told me that it takes just a few exchanges with employees of any power plant to know if they share a real or merely a declared Safety Culture. In most companies operating nuclear power plants, top managers do not need to meet the same qualification requirements that are considered vital for NPP employees. In such an environment, building and maintaining a 'culture of safety' is impossible. What is possible, however, is to very quickly destroy it from top down. When you

enter a nuclear power plant and see a bulletin board or display proclaiming: "Our highest common goal is to increase the value of company shares and dividends", you can be sure that Safety Culture will be hard to find.

This seems to be one of the key causes preventing the fulfilment of Safety Culture in organisations.

What can be done to fight this? One possibility is to only appoint managers of companies operating NPPs who have experience and qualifications in nuclear engineering and economics alike. And I say this with the conviction that it is easier to teach a nuclear engineer economics than it is to teach an economist nuclear engineering.

## František HEZOUČKÝ

**konzultant  
consultant**

■ **Po absolvování studií v oborech tepelná a energetická zařízení a jaderných technologií na ČVUT a STU spojil svoji profesní kariéru se spouštěním jaderných**



**on the Czech Technical University and the Slovak Technical University he joined his career with commissioning of the nuclear power plants - gradually in Jaslovské Bohunice, Dukovany and Temelín where he held number of various positions including Managing Director. Meanwhile he also worked as an advisor for Westinghouse and Colenco. After the Temelín NPP completion in April 2003 he left ČEZ (where he was Member of the Board of Directors, too) to work for IAEA in Vienna. Since the end of this mission he provides consulting services and holds lectures at several technical universities.**

■ **After graduation in mechanical engineering and nuclear technology**





# PŘÍNOS FILOSOFIE RADIČNÍ OCHRANY K JINÝM OBORŮM LIDSKÉ ČINNOSTI

Jiří HŮLKA

Myšlenkový vývoj a postupné ujasňování filosofie radiační ochrany, kterým prošla za více než sto let své existence a kterým mohla inspirovat další obory lidské činnosti, stojí jistě za připomenutí. Začínal představou o neškodné toleranční (prahové) dávce podporované vírou v pozitivní přínos ionizujícího ozáření na zdraví. Následovalo postupné zpochybnění existence bezpečné prahové dávky, poprvé v 30-tých definitivně v 50-tých letech 20. století po prokázání stochastických účinků. Myšlenka, že zřejmě „každé ozáření je spojené s rizikem“ posléze formulované pracovním do lineární bezprahové hypotézy, otevřela otázku, jak v situaci bez bezpečné prahové hodnoty stanovit „bezpečný“ limit. Zakladatelé konceptu ochrany museli proto průkopnický promyšlet samo pojetí rizika a přístupu k němu, a to při neúplné informaci o účincích nízkých dávek. Etické otázky typu: co je přijatelné riziko, za jakých okolností může být toto riziko podstatně no, kdo o tom má/může rozhodnout a na základě jakých údajů, dále jaké prostředky na odvrácení rizika mají být vynaloženy i jakou roli má v rozhodování samo vnímání rizika atd., takové otázky se vynořovaly postupně a některé z nich jsou otevřené stále. Odpovědi (i pokusy o odpovědi) byly a jsou inspirující i pro další obory lidské činnosti, kde se s rizikem pracuje.

Počáteční stanovení limitů (založené na poznání toleranční prahové dávky škodliviny) je výhradně vědeckým problémem. Po zjištění možné bezprahovosti účinku se však rozhodování o přípustném limitu stává rozhodnutím o přijatelnosti rizika a tím se vymyká pouhému vědeckému úkolu. Takové rozhodnutí přesahuje rámec kompetence vědecké komunity, která si má položit otázku, kdo je oprávněn o míře rizika rozhodnout. Pouze pokud společnost definuje vztahovou míru akceptovatelného rizika, je úkolem vědců objasnit jeho obsah a dávku ozáření. Raná poválečná doba však zdaleka nebyla připravena na úvahy tohoto typu.

Proto si radiační odborná komunita (representovaná především ICRP) přisvojila de facto sama pravomoc řešit, jak se k této otázce postavit. Vědomí, že riziku spojenému se zářením se zřejmě nejde vyhnout, vedlo k triviální myšlence minimalizace rizika. Tento intuitivně přijatelný avšak těžko kvantifikovatelný požadavek musel být postupně doplněn o kompromisnější semi-quantitativní vyjádření k jakému až snížení rizika má dojít, objevily se další opět spíše intuitivní formulace „proveditelnost, snadná dosažitelnost snížení rizika“. Teprve poté se objevuje koncept, který má „hlavu a patu“ (ICRP no.9/1966). Šlo o zařazení radiačních rizik do širšího společensko-ekonomického kontextu hledáním OPTIMA – nejlepšího rozumného kompromisního řešení mezi množstvím konfliktních zájmů, s uvážením sociálních a ekonomických hledisek (princip ALARA). Přitom významným pomocným nástrojem se stala cost-benefit analýza a objevila se potřeba ocenit (pro finanční vyjádření zdravotní újmy z ozáření) cenu lidského života ve statistickém smyslu. Tento koncept radiační ochrany byl ovšem usnadněn i díky znalosti vztahu rizika a dávky a jednotné kvantifikaci rizika.

Tvůrci konceptu radiační ochrany nebyli samozřejmě první, kdo takový přístup, tj. de facto evaluaci veřejného programu, použili. Za první doložený praktický příklad uplatnění je považován americký zákon upravující vyhodnocování nákladů a užitek v říčních a přístavních zařízeních (1902), a podobně v rámci New Deal (1936) byla v zákoně pro monitoring povodní použita formulace, „vláda by se měla účastnit zlepšování splavnosti vod (...) pro účely kontroly povodní, pokud přínosy těch, kterých se toto opatření může týkat, překročí předpokládané náklady.“ Tyto myšlenky pronikly do filosofie radiační ochrany patrně z USA, novinkou bylo, že tvůrci nové filosofie je použili na širokou oblast různorodých činností, kdy člověk může být vystaven riziku z ionizujícího záření v různých oblastech průmyslu i zdravotnictví, při plánování nové činnosti nebo při nápravě existujících situací. Vznikl ucelený myšlenkový koncept vybudovaný na známých pilířích (justification, optimisation, limitation). Tento koncept se stal zřejmě prvním uceleným systémem použitelným obecněji i ukázkou uplatnění korporátní etiky v oblasti regulace lidské činnosti, která má dopad na zdraví.

Podnes je regulační (radiační) autorita tím, kdo formuluje a posuzuje společenský zájem ve vztahu k původci rizika (tj. stanovení limitů, posouzení, zda činnost je ospravedlněna a zda ochrana je optimální). Vývoj myšlení v radiační ochraně tím ovšem neskončil. Od 90-tých let s dalším rozvojem svobodné společnosti je nastolena otázka, kdo je oprávněn rozhodnout o přiměřenosti rizik. Do rozhodování se chtějí zapojovat i ti, jichž se riziko může jakkoliv týkat („stakeholders“). Ob-

jevují se otázky jak pracovat s vahami subjektivních parametrů vstupujících do rozhodování a jak rozhodnutí objektivizovat, dále otázky, kde lze v rozhodování o referenčních úrovních užít korporátní etiky a kde se jedná již o etiku individuální (např. v otázce stanovení mezí obsahu radonu v domě).

Nicméně přes nově se objevující myšlenky je vypracovaný koncept radiační ochrany patrně prvním uceleným pokusem zavést logicky přijatelný a srozumitelný systém, který je možné aplikovat i v dalších oblastech společenského rozhodování o přijatelnosti rizik a rozumně vynakládaných nákladech a v širších souvislostech překračujících hranici radiační ochrany. Užitečnost aplikace takového přístupu v obecnější rovině ukazuje např. americká studie „Five-Hundred Life-Saving Interventions and Their Cost Effectiveness“ (1994). Tato kompilace a analýza efektivnosti nákladů více než 500 různých programů snižujících rizika úmrtí ukázala, jak obrovské je rozmezí (téměř 8 řádů) v nákladech vynakládaných na záchranu života a jak je vynakládání prostředků na snížení rizik, bez promyšlení společného konceptu, nahodilá a neefektivní.

## CONTRIBUTION OF RADIATION PROTECTION PHILOSOPHY TO OTHER FIELDS OF HUMAN ACTIVITY

Jiří HŮLKA

The evolution of radiation protection philosophy over the last hundred years of its existence is worth remembering. At the beginning was the concept of safe tolerance dose based on the belief in the positive benefits of radiation. This was followed by doubting the existence of a safe threshold dose (first in the 30's and definitively in the 50's of the 20th century) when the stochastic effects have been proven. The idea that “any exposure is associated with the risk” (formulated later in a linear non-threshold hypothesis) opened the issue of how establish “safe” limit in the absence of safe threshold value. Founders of the concept of radiation protection had to be innovative in thinking about the concept of risk. Ethical questions such as: what is an (un)acceptable risk, under what circumstances, who can decide on it, what resources should be spent to avert risks, what is the role of risk perception in decision-making etc. gradually emerged and some of them are still opened. Answers are inspiring to other fields of human activity, where they deal with risk.

The introduction of limits (based on the knowledge of the tolerance threshold dose) is exclusively scientific problem. After finding possible no-threshold effect, however, introduction of the limit becomes a decision about the acceptability of risk. In such case it is beyond the merely scientific community competence, which has put the question: who is authorized to introduce the limit? The early post-war period, however, was far from being prepared to considerations of this kind.

Therefore, a radiation expert community (represented by ICRP) assumed (de facto) itself competent to decide how to address this issue. Thought, that the risk associated with radiation is apparently unavoidable, lead to a trivial idea “minimizing the risk”. This intuitively acceptable claim (but hardly quantifiable) had to be expanded by a compromise semi-quantitative terms as “lowest practicable level or readily achievable level”. Only then emerged the concept having a “head and tail” (ICRP no.9/1966). It was the inclusion of radiation risks into the broader socio-economic context of thinking, to find the best (OPTIMAL) compromise among several often conflicting requirements, taking into account social and economic factors (ALARA principle). Cost-benefit analysis (CBA) has become an important tool. It was also necessary to evaluate the financial equivalent of detriment caused by radiation. The concept of radiation protection was facilitated also thanks to the knowledge of quantification of the risk.

Founders of the concept of radiation protection were not the first who used such approach (de facto evaluation of a public program). The first documented example of practical application of CBA is considered a U.S. law regulating evaluation of costs and benefits in the river and port facilities (1902) and similarly in the law for monitoring floods (1936). These ideas have penetrated into the philosophy of radiation protection probably from United States. A novelty was that the new philosophy is applied to a wide range of diverse activities, where a person can be exposed to the ionizing radiation in various areas of industry and medicine, in case of planning new activities or to remedy existing situations. In such way was established the complex system of ideas based on well-known principles (justification, optimisation, limitation). The concept became probably the first comprehensive system generally applicable. It became an example of application

the corporate ethics in the regulation of the human activities impact on the human health. The regulatory (radiation) authority formulates and assesses the common interest in relation to the risk from radiation (whether the activity is justified and whether the protection is optimal), up to now.

The evolution of thinking in radiation protection however is not finished. Since the 90's, the development of a free society raised the issue who is authorized to decide on the adequacy of risk. Those who could be under the risk demand to be involved in decision making process ("stakeholders"). Other questions arise: how to work with weights of subjective parameters entering into the decision-making, in which cases corporate ethics should be used in decision on reference levels and which belong to individual ethics (e.g. the limits of radon in the house). The concept of radiation protection, despite the emerging ideas, is probably the first comprehensive attempt to establish logically acceptable and understandable system that may be incorporated into other areas of decision-making on the acceptability of the risks in society. The usefulness of such approach more generally was shown by American study "Five-Hundred Life-Saving Interventions and Their Cost Effectiveness" (1994). This analysis and compilation of cost effectiveness of more than 500 different programs that reduce the risk of death showed the huge range (nearly 8 orders of magnitude) of life-saving interventions costs. The study showed also how investing resources at risk reduction, without thinking of the concept of common, is arbitrary and inefficient.

## Jiří HŮLKA

**náměstek ředitele pro výzkum a vývoj, Státní ústav  
radiační ochrany  
Deputy Director for R&D, National Radiation Protection  
Institute**

■ **Je absolventem ČVUT Praha –** Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze. Ve Státním ústavu radiální ochrany v Praze se postupně zabýval monitorováním jaderných zařízení, zvýšenou přírodní radioaktivitou v budovách a koordinací Radonového programu České republiky. Od roku 2000 je v SURO odpovědný za výzkum a vývoj v oblasti radiální ochrany, zabývá se obecnými otázkami ochrany před ionizujícím zářením, moderními metodami monitorování dopadu havárií jaderných elektráren na životní prostředí, včetně dopadu havárie černobylské. Je členem skupiny expertů EU k článku 31 Euratom (oblast radiální ochrany).

■ **He received his M.Sc. in nuclear sciences and physical engineering**

from the Czech Technical University. His whole professional carrier is connected within the National Radiation Protection Institute in Prague (NRPI) – he gradually engaged in monitoring of nuclear power plants, monitoring of high natural radioactivity in the buildings and coordinating the Radon Programme of the Czech Republic. Since the year 2000 he is responsible for research and development in the field of radiation protection.

He focuses mainly on general issues of protection against ionizing radiation, modern methods of NPP monitoring and the impact of accidents (including Chernobyl) on the environment. He is a member of Group of Experts referred to in Article 31 of the Euratom Treaty.



## RADIOAKTIVNÍ ODPADY OD 'A' DO 'Z' – INSPIRACE PRO OSTATNÍ

Jan JOHN a kolektiv

S nástupem jaderné energetiky se objevila potřeba naplnit očekávání, že tento způsob získávání energie a výroby elektřiny je nejen bezpečný, ale dokonce velmi bezpečný. Důvodem pro tento požadavek byla významná nedůvěra způsobená znalostí účinků atomové bomby – prvního veřejného poznání síly a intenzity projevu energie skryté v jádře atomu. Hodnocení bezpečnosti se upnulo na hodnocení možnosti vzniku jevů, stavů, událostí, nehod či havárií, které mohou přinášet radiální riziko a riziko poškození životního prostředí, na hledání ochranných opatření, vytváření ochrany bariér proti šíření následků vad, poškození, nehod a jiných jevů a procesů spojených s možným uvolňováním radioaktivních látek mimo kontrolované prostory jaderných zařízení. To umožnilo mimořádný rozvoj jak technic-

kých aktivních i pasivních opatření, tak i výpočtového hodnocení a modelování.

Cílem všech činností týkajících se bezpečnosti ovlivňující vývoj, konstrukci a provoz je předcházet haváriím (problémům), eliminovat je (pokud vzniknou) a omezit následky - jak krátkodobé, tak dlouhodobé. Toto vše se trochu liší od jiné kategorie problémů, s nimiž je jaderná energetika spjata. Tím problémem jsou radioaktivní odpady – nechtěné produkty potřebné činnosti. Nicméně i pro ně platí výše uvedené postupy. Jejich vznik a množství, včetně množství obsažených radionuklidů, je v podstatě úměrný množství energie uvolněné štěpením. Výzkum a vývoj v oblasti jejich následného zneškodnění směřuje k jejich kvalitnímu „zabalení“ a následnému uložení, které je dlouhodobě oddělí od životního prostředí.

Za provozu jaderných elektráren vznikají odpady v plynné, kapalné i pevné formě zejména jako produkty různých čistících procesů médií, která se požívají pro odvod tepla z reaktoru i pro řízení štěpné reakce a samozřejmě i při činnostech pracovníků v aktivních prostorách elektrárny. Tyto odpady jsou charakterizovány jako nízká a středně aktivní a pro jejich zneškodnění se používá inkorporace do stabilní matrice a následné uložení v úložistištech, jejichž ochranné bariéry po dobu stovek let zabraňují možnému úniku do okolního životního prostředí. Prakticky všude, kde se tyto provozní odpady ukládají, je používán koncept tří bariér - první je matrice (beton, různé polymery, sklo apod.), v níž jsou radionuklidy kvalitně zařizovány, druhou inženýrské bariéry (konstrukce obalu a úložistiště) a třetí okolní geologické prostředí, které je vybráno tak, aby migrace případně uvolněných radionuklidů v něm byla co nejpomalejší. Významným „by-produktem“ výzkumu a vývoje jsou fixační materiály i metodiky ochrany životního prostředí využitelné například v chemickém průmyslu a při likvidaci nebezpečných odpadů.

Největší pozornost je v současnosti věnována vyhořelému palivu. Uran je do reaktoru vkládán s jedním cílem - uvolnit energii a tu dále využít. Poté, co palivo přestane být z provozních a fyzikálních důvodů dále použitelné, je z reaktoru vyjmut, je možno jej (a v keramické matrici paliva zadržené radioaktivní produkty štěpení) považovat za odpad, za vysoce aktivní odpad. V použitém (ozářeném, či „vyhořelém“) palivu zůstává ale převážná většina štěpitelného uranu nespotebována, spolu s vzniklým využitelným plutoniem. Proto byly vyvinuty metody recyklace ozářeného paliva založené na separaci těchto prvků z vyhořelého paliva a jejich využití v nově připraveném směsném palivu. Z hlediska dlouhodobé bezpečnosti a ochrany životního prostředí je nyní věnována velká pozornost vývoji metod pro snížení nebezpečnosti vysoce aktivních odpadů z takového přepracování (reprocessingu), tzv. metody „Partitioning & Transmutation (P&T)“. Principem metody je řadou uměle vyvolaných jaderných reakcí přeměnit v těchto odpadech radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu na radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu tak, aby se o několik řádů zkrátila nutná doba monitorování úložistiště vysoce radioaktivních odpadů.

Ne vždy dostatečně doceněným přínosem pro ostatní nejaderné obory, je zde technická vyspělost přepravního závodu. Je fascinující vidět dálková ovládní a řízení všech procesů a uvědomit si jejich spolehlivost - v silně radiačním prostředí musí být jejich funkčnost zajištěna po desítky let. Tento obrovský technický výkon je srovnatelný snad jen s „prací“ zařízení na kosmických sondách. Bez ohledu na pokračující vývoj jsou současně sofistikované postupy zneškodnění vysoce aktivních odpadů (tedy jak vyhořelého paliva, tak odpadů po jeho přepracování) dovedeny téměř k dokonalosti. I v této oblasti se využívá třibariérový přístup, současnou hlavní preferencí je výběr typu horniny pro hlubinné úložistiště.

Velmi důležitou součástí řešení problematiky radioaktivních odpadů je zvládnutí komunikace s veřejností. Snad nikde jinde se neprojeví specifická a psychologická strachu vyvolaná nedůvěra tak intenzivně, jako v případě komunikace o radioaktivních odpadech. To, že v řadě států se již podařilo iracionální strach veřejnosti prolomit a získat podporu pro sofistikovaná řešení zpracování a ukládání radioaktivních odpadů, je velkým a možná ještě nedoceněným úspěchem. Poučení z takto obtížné cesty získávání příznivé veřejnosti jsou všeobecně platná a jsou dalším z přínosů, který jistě nalezneme uplatnění i v jiných oborech mezilidské komunikace.

## RADIOACTIVE WASTE FROM 'A' TO 'Z' – AN INSPIRATION TO OTHERS

Jan JOHN et al.

The rise of nuclear energy prompted a need to meet the expectations that this method of generating energy and electricity is not just safe, but very safe. The reason for this was a strong feeling of mistrust

caused by the knowledge of the effects of the atom bomb, the first public display of the power and intensity of energy hidden in the nucleus of an atom. Security assessment started focusing on evaluating the possibility of effects, states, events, incidents or accidents that could pose a radiation or environmental hazard, the search for protective measures, construction of protecting layers and barriers preventing the spread of faults, damage, incidents and other phenomena and processes related to potential release of radioactive substances outside the controlled zones of nuclear facilities. This enabled extraordinary development of both technical active and passive measures as well as mathematical evaluation and modelling.

The objective of all safety-related activities influencing development, construction and operation is to prevent accidents (problems), eliminate them (if they occur) and mitigate their impact, both in the short-term and long-term horizon. All of these issues are somewhat different than those encountered in another aspect of nuclear energy. This aspect is radioactive waste, the unwanted product of the beneficial activities. Yet the procedures described above apply here as well. Their generation and amount, including the amount of contained radionuclides, is essentially proportional to the volume of energy released through fission. Research and development in their subsequent processing is aimed towards creating high quality "packaging" and then disposal it in a way that will separate the waste from the environment for a long time.

The operation of nuclear power plants creates gaseous, liquid and solid waste, primarily as products of various decontamination processes of the media used to conduct heat from the reactor and control the fission reaction, and of course also the activities of people working in controlled areas of the power plant. This waste is classified as having low to medium activity and is being rendered harmless through incorporation in a stable matrix and disposal in repository featuring protective barriers that can prevent their release into the environment for hundreds of years. Virtually all sites where this waste from operation is disposed utilise a concept of three barriers: the first is a matrix (concrete, various polymers, glass etc.) which provides good fixation of the radionuclides, the second engineering barriers (construction of the containers and repository) and the third the geological environment, selected to ensure that migration of any potentially released radionuclides will be as slow as possible. A significant by-product of research and development become fixation materials and methodologies of environmental protection that are applicable for example also in the chemical industry and handling of hazardous waste.

The greatest attention today is paid to spent fuel. Uranium is placed into reactors with a single objective - to release energy and utilise it further. When the fuel is no longer usable for this purpose for operating and physical reasons, it is removed and may be considered (together with radioactive products of fission captured in the ceramic fuel matrix) highly active waste. In spent ("irradiated" or "burnt-out") fuel, however, most of fissionable uranium remains unconsumed together with produced usable plutonium. For this reason, methods of recycling irradiated fuel have been developed, based on a separation of these elements from spent fuel and their re-use in newly prepared mixed fuel. In terms of long-term safety and protection of the environment, significant attention currently focuses on the development of methods for reducing the risks of highly active waste from such reprocessing, the "Partitioning & Transmutation (P&T)" process. Its principle is to employ artificially induced nuclear reactions to transform radionuclides with a long half-life to radionuclides with a short half-life in order to shorten the time required for the monitoring of disposal sites of highly radioactive waste by several orders of magnitude.

These processes provide significant, yet not always adequately appreciated, benefits to other, non-nuclear fields in the technically advanced concept of the reprocessing facility. It is fascinating to watch all processes being remotely controlled and managed and to realise their reliability - in a strong radiation field, their functions need to be guaranteed for decades. This enormous technical achievement is comparable perhaps only to the "work" of the equipment of space probes. Regardless of current developments, the existing sophisticated methods for highly radioactive waste disposal (meaning both spent fuel and waste after reprocessing) have been developed almost to perfection. This field also utilises a three-barrier approach; its main preference is currently the selection of suitable rock host for deep repositories. A very important part of the issues of radioactive waste management is communication with the public. There is probably no other field where specific levels of distrust based on the psychology of fear are as strong as in the communication about radioactive waste. The fact that many countries have managed to conquer irrational fears of the public and gain support for sophisticated solutions of processing and disposing of radioactive waste is a major and perhaps underestimated success. Lessons learned in this difficult journey of winning the support of the public remain valid and are another of many benefits that can certainly be applied also in other fields of communication between people.

Jan JOHN

**profesor a vedoucí Katedry jaderné chemie Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze**  
**Professor, Head of the Department of Nuclear Chemistry, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague**

■ **Po absolvování oboru jaderné chemie na FFI ČVUT v Praze nastoupil na mateřskou katedru, kde postupně získal své vědecké a universitní hodnosti a kde působí dodnes. Mezi hlavní oblasti jeho odborného zájmu patří zpracování radioaktivních odpadů, separační metody, radioanalytické metody, jaderná spektroskopie a monitorování a speciace radionuklidů v životním prostředí, podílí se na řešení řady mezinárodních vědeckých projektů. Absolvoval několik pracovních pobytů na špičkových mezinárodních pracovištích, je autorem nebo spoluautorem více než sta publikací v odborných časopisech nebo sbornících z konferencí a členem několika odborných společností a rad mezinárodních vědeckých časopisů.**



■ **After graduating in nuclear chemistry from Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences, he joined the maternity department, where he is today, and where he received his scientific and academic degrees. His main research interest includes the treatment of radioactive waste, separation methods, radio-analytical methods, nuclear spectroscopy, and monitoring and speciation of radionuclides in the environment, and co-operates on number of international scientific projects. He is the author or coauthor of more than one hundred publications in scientific journals or conference proceedings and member of several scientific societies and boards of international scientific journals.**



## UDRŽITELNÁ BEZPEČNOST NENÍ MOŽNÁ BEZ KULTURY BEZPEČNOSTI

Jukka LAAKSONEN

Už na samém začátku, kdy byly představovány první vize jádra jako nového zdroje energie, bylo zřejmé, že rizika spojená s nekontrolovatelným unikem radiace musí být extrémně nízká. V raných letech vývoje reaktorů byly snahy tohoto cíle dosáhnout vedeny prostřednictvím technických inovací. Panovala představa, že dostatečnou bezpečnost zajistí inherentní bezpečnostní mechanismy, ochrana do hloubky a systémy, které zajistí bezpečnost v případě projektových havárií, modelovaných na všechny uvěřitelné scénáře rozvoje havárie. Méně pozornosti se věnovalo roli provozovatelů, kteří měli zajistit bezpečnost jaderných elektráren v časovém horizontu pokrývajícím celé pracovní kariéry několika generací zaměstnanců.

Tento technologický přístup k jaderné bezpečnosti fungoval zhruba dvě desetiletí, až do havárie v TMI v roce 1979. Až tehdy byla pochopena zásadní role provozního personálu, kterou v zajištění bezpečnosti má. Ukázalo se, že sepsané postupy pro zvládnání předvídaného průběhu rozvoje poruch nejsou k ničemu v situaci, v níž dochází k malým, ale nepropokládaným odchylkám. Toto poučení zvýšilo zaměření výzkumu na výkon operátorů a vývoj nových symptomatických postupů, jejichž cílem bylo zajistit základní bezpečnostní funkce: řízení reaktivity, odvádění zbytkového tepla a zamezení úniku radioaktivního materiálu. Pár let na to ale přišla ještě důležitější lekce. Skupina INSAG při IAEA došla při svém hodnocení příčin černobylské havárie v roce 1986 k jednomu zásadnímu závěru. Rozhodla se zavést termín „kultura bezpečnosti“. INSAG také tento termín důkladně rozpracovala a ve svých dalších zprávách navrhla nový koncept a mechanismy pro zajištění jaderné bezpečnosti. Od té doby získal termín kultura bezpečnosti mnoho nových definic a byl zdůrazňován jako klíčová složka řízení rizik souvisejících s jadernými elektrárnami.

Po černobylské tragédii bylo zjevné, že ti lidé, kteří jsou za jadernou bezpečnost přímo zodpovědní, by měli chápat bezpečnostní rizika a vědět, jak je při své práci minimalizovat. Všechny zúčastněné strany by se měly poučit ze zkušeností a snažit se odstranit všechny rizikové faktory, které dříve nebyly známy. Nikdo by neměl tolerovat riziková rozhodnutí, jednání nebo podmínky. Ti, kdo v jaderných

elektrárnách pracují, by měli být plně zavázáni tomu, aby je udržovali v dokonalém stavu a přísně dodržovali bezpečnostní pokyny. Měli by být připraveni zastavit veškeré procesy, které by vedly k postupné degradaci bezpečnosti a být schopni přerušit i složitější komplexy malých událostí, které by společně mohly způsobit nehodu. To vše jsou prvky dobré kultury bezpečnosti.

Význam propagace kultury bezpečnosti se projevuje i v jiných oblastech, v nichž jsou výhody zvýšené bezpečnosti snadněji měřitelné než v jaderném průmyslu. Při šetření závažných nehod v nákladní nebo letecké dopravě, těžbě ropy či ve vesmírných programech jsou obvykle jako významný faktor, ne-li přímo hlavní příčina, identifikovány nedostatky v kultuře bezpečnosti. Většina nejzávažnějších havárií v těchto oborech byla sice nečekaná, ale nikoliv náhlá. Situace, v níž se příležitost pro havárii naskytla, se vyvinula postupně, aniž by si jí organizace, která příslušný složitý technický systém provozuje, všimla. Na začátku nehod nestojí jedna událost, ale kombinace specifických faktorů.

Obvyklé zjištění je takové, že nehody v komplikovaných technických systémech jsou důsledkem řady menších událostí, které by samy o sobě velkou škodu nepůsobily. Efektivní ochranu před těmito haváriemi by poskytla rozvinutá kultura bezpečnosti. To je důležité zjištění, protože nehody způsobené jednou velkou chybou nebo hrubým selháním jsou dnes velmi vzácné. Tomuto typu havárií dokážou efektivně předcházet všechna moderní zařízení, která jsou vybavena patřičnými bezpečnostními systémy.

Složitá souhra a vzájemné interakce mnoha různých faktorů se v bezpečnostní analýze sledují obtížně. Systémy, které bezpečnost zajišťují tak potenciální havárie více komplikují – nehody již nemohou být způsobeny jednorázovým selháním a sama existence bezpečnostních systémů znamená vyšší komplexnost.

Pokud je cílem zajistit udržitelnou bezpečnost v průběhu celého životního cyklu jaderné elektrárny, mělo by být nejprve jasně řečeno, co budeme považovat za vysokou úroveň jaderné bezpečnosti. Bezpečnost nelze prokázat statistikami, jež ukazují spolehlivou míru eliminace nehod. Ty totiž nezahrnují nehody, jimž se podařilo zabránit jen těsně nebo s vynaložením obrovského úsilí. Bezpečnost by měla být vnímána jako něco, co je přítomno, spíše než něco, co chybí.

Bezpečnost zaměstnanců jaderné elektrárny lze přímo měřit standardními indikátory, ale pouhým zaznamenáním těchto indikátorů nikdy nezískáme informace o pravděpodobnosti jiných typů nehod, jež mohou být velmi vzácné, ale o to závažnější. Bezpečnost není něco stabilního, čeho jednoduše dosáhnete a pak už s tím můžete být spokojeni. Je nutné ji realizovat každý den.

Bezpečnost by měla být viditelnou složkou všech činností. Proto je nezbytné, aby jednotlivci i organizace bezpečnost chápali a dokázali naplňovat. Organizace musí pro bezpečnost poskytnout předpoklady, ale jsou to jednotlivci, kdo vytvářejí bezpečnost i riziko. Komplexní přístup k bezpečnosti by se měl zaměřovat jak na její „negativní“, tak i „pozitivní“ aspekty. Zaměření na negativní stránku znamená systematickou analýzu mířící k maximálnímu možnému odhalení potenciálních rizik a eliminaci chyb jednotlivců i selhání nejdůležitějších zařízení. Důraz na pozitivní stránku znamená zlepšování schopnosti organizace a jednotlivců uspět v dílčích úkolech a situacích, které se vyskytnou. Toho lze dosáhnout soustavným monitorováním a předvídáním rizik i vyhýbáním se nebezpečným situacím např. udržováním a posilováním rozvinuté kultury bezpečnosti.

Udržování rozvinuté kultury bezpečnosti vyžaduje neustálou pozornost zejména ze strany vedení, protože organizace provozující zařízení s vysokou mírou rizika jsou jak sociálně, tak technicky komplikované. Existují v nich interakce, které se těžko předvídatelně a často latentní nedostatky. Organizace si nemusejí uvědomovat všechna rizika ani silné či slabé stránky svých aktivit. Často mají několik různých cílů a rozpor mezi těmito cíli může bezpečnost ohrožovat. Kromě toho se organizace neustále mění. Sociotechnické systémy mají dobře známé sklony se postupně dostat do stavu, v němž ztrácejí povědomí o vlastních nedostacích. Jednotlivci si na rizika a nebezpečí mohou zvyknout a je těžké povšimnout si řady malých postupných změn. Organizace definují, co je považované za normální – tedy jinými slovy tvoří kulturu. Kultura ovlivňuje vnímání toho, jaké jednání se považuje za správné, jak se odhaluje riziko a jakým způsobem lze mluvit o riziku, bezpečnosti a nejistotách. Organizace si může o sobě udělat obrázek, který nemusí odpovídat realitě. To vše jsou potenciální pasty, kterých si vedení společnosti musí být vědomé. U všech organizací, které zodpovídají za bezpečnost vysoce rizikových technických systémů, je proto nezbytné provádět externí audity.

## THERE IS NO SUSTAINABLE SAFETY WITHOUT SAFETY CULTURE

Jukka LAAKSONEN

When the first visions on nuclear energy as a new power source were presented it was already understood that the risks caused by uncontrolled radioactive releases must be made extremely small. In the early years of developing power reactors this objective was pursued by means of technical innovations. It was thought that adequate safety can be provided by inherent safety features, defense-in-depth, and systems that provide protection against design basis accidents expected to envelop all credible accidents. Less attention was given to the role of the operating organisations that should ensure safety of the nuclear power plants for a time span covering work careers of several staff generations.

The technology based approach to nuclear safety worked well for about two decades, until the accident at TMI in 1979. It was only then that the crucial role of operators in ensuring safety was understood. It was noticed that the procedures written for managing pre-determined accidents were of no use in the event of an accident scenario consisting of small but unpredicted steps. This lesson led to major research of operator performance and development of new symptom based procedures that focused on maintaining the fundamental safety functions: reactivity control, decay heat removal and confinement of radioactive materials. But another even more important lesson was coming.

A conclusion of fundamental significance was made by the INSAG group of the IAEA when it evaluated the causes of Chernobyl accident in 1986. The group decided to introduce the term "Safety Culture". INSAG also elaborated the term thoroughly and suggested in its subsequent reports a new concept and guidance for ensuring nuclear safety. Since then many different definitions have been given to safety culture and it has been emphasized as a crucial element for managing risks related to nuclear power plants.

After Chernobyl accident it was admitted that the persons with direct responsibility for nuclear safety should understand the safety hazards and how to conduct their own work to minimize those hazards. All stakeholders should learn lessons from experiences and be anxious to remove any risk factors not recognized before. No one should tolerate risky decisions, actions or conditions. Those working at nuclear plants should be dedicated to keep their plant in faultless condition and strictly follow the safety instructions. They should be alert to stop any processes leading to gradual degradation in safety and be able to cut complicated scenarios of smaller events that could lead to an accident. All of these are elements of good safety culture.

The importance of promoting safety culture has been noted also in other safety critical areas where benefits of improved safety are more easily measurable than in the nuclear field. When investigating severe accidents in shipping, aviation, oil drilling, and in space programs, the shortcomings in safety culture have generally been identified as an important factor, if not the main root cause of the accident. Most of the major accidents in those fields have been surprising but not sudden. A situation opportune for an accident has developed gradually and without being noticed by the organization operating a complicated technical system. Accidents have not been initiated by a unique event but have been caused by a combination of customary factors.

A general observation is that accidents in complicated technical systems have been a consequence of a series of many small events that alone would not cause big harms. A high safety culture would have provided an effective protection against these accidents. This is an important observation because accidents caused by one big mistake or grave neglect are nowadays very infrequent. Such accidents are effectively prevented in all type of modern facilities that are equipped with proper safety systems.

Complicated connections and interactions between several different factors are difficult to find in safety analysis. The systems used to ensure safety make the potential accidents even more complicated because single failures can no more cause accidents and the safety systems by themselves increase the complexity.

When one wants to achieve sustainable safety over the entire lifetime of a nuclear power plant, it should first be made clear what is meant by high level of nuclear safety. Safety cannot be demonstrated by statistics that shows reliable elimination of accidents. An accident may have been avoided just narrowly or by extreme efforts. Safety must be seen as something that is present, not as what is missing or absent.

Worker safety at a nuclear power plant can be directly measured with standard indicators but only by recording those indicators one can never get information on probability of other type of accidents, which can be very rare but more serious. Safety is not a stable thing that you can achieve and be satisfied with. You must provide it day by day.

Safety should be visible in all activities. Therefore the individuals and organizations are in key position to understand it and to manage it. Organization has to provide pre-requisites for safety but it is the individuals who are creating the safety and the risks.

Comprehensive approach to safety should have a focus both on the “negative” and the “positive” sides of safety. Focus on the negative side means systematic analysis to identify potential hazards and to eliminate mistakes by individuals and failures of vital equipment as far as possible. The focus on positive side means improving the ability of the organization and individuals to succeed in various tasks and situations they are facing. This can be achieved by continuously monitoring and forecasting the risks and by avoiding hazardous situations, i.e. by maintaining and enhancing advanced safety culture.

Maintaining advanced safety culture requires alertness especially from the management because organizations operating high risk facilities are complicated both socially and technically. There are interactions that are difficult to predict and often there are latent weaknesses. Organization may not be aware of all risks or strengths and weaknesses of its activities. Organizations have often several different goals and conflicts between goals may threaten the safety. Furthermore, organizations keep changing all the time.

Socio-technical systems are known to have a tendency to drift to a state where they do not recognize their weaknesses. Individuals can get used to risks and hazards and it is difficult to notice a sequence of small gradual changes. Organizations define what is considered normal – they create the culture. Culture influences on perceptions on what is considered right way of action, how risks are detected and how one can speak about risks, safety, and uncertainties. An organization can make a picture of itself that may not be close to reality. All of these are traps that the management must be aware. Therefore it is necessary to have external audits in all organizations that have responsibility for safety of high risk technical systems.

## Jukka LAAKSONEN

*Vice-President, Rusatom Overseas and Vice Chair of International Nuclear Safety Group (INSAG)*

■ **Po absolvování Helsinky Technical University** zahájil svou kariéru ve VTT. V roce 1974 nastoupil do finského jaderného regulačního orgánu STUK, kde prošel řadou funkcí a od dubna 1997 do ledna 2012 byl generálním ředitelem. Během celé své kariéry se aktivně podílel na mezinárodních aktivitách v oblasti jaderné bezpečnosti a záruk v řadě týmů a pozic (např. OECD / NEA, WENRA, IAEA Committee on Safety Standards...), působil jako expert v IAEA OSART týmech, dále jako hostující expert v US NRC a vedl řadu expertních misí pro IAEA a Světovou banku. Od dubna 2012 pracuje jako viceprezident Rusatom Overseas se zaměřením na podporu rozvoje jaderné bezpečnosti v Rusku a licencování exportovaných ruských jaderných elektráren.

■ **After graduation from Helsinki Technical University**, he started his

career at the Technical Research Centre of Finland. In 1974 he joined the Finnish nuclear regulatory body STUK where he took up various posts and served as Director General from April 1997 to January 2012. During his whole career, he actively participated in international activities in the area of nuclear safety and safeguards in various teams and positions (e.g. OECD/NEA, WENRA, IAEA Committee on Safety Standards...), acted as senior officer in the IAEA's OSART team or as visiting expert at US NRC and conducted numerous Expert Service missions for the IAEA and the World Bank. Since April 2012, he has been employed as Vice President of Rusatom Overseas in tasks related to the promotion of nuclear safety development in Russia and licensing of exported Russian NPPs.



# PRINCIPY SYSTÉMŮ JADERNÉ BEZPEČNOSTI A JEJICH UPLATNĚNÍ VE SPOJENÝCH STÁTECH

John C. LEE

## 1. Základní princip bezpečnosti

Základem systémové jaderné bezpečnosti je princip ochrany do hloubky (DID) odvozený od různých bezpečnostních opatření, které Enrico Fermi a jeho kolegové zapracovali do plánování a realizace první řízené řetězové reakce na univerzitě v Chicagu v roce 1942. DID princip tak byl uplatněn v každé fázi návrhu, výstavby a provozu každého jaderného reaktoru na celém světě s cílem chránit zdraví a životy veřejnosti. V praxi se tento princip uplatňuje v podobě rozmanitého a zmnoženého zařízení, senzorů i spouštěcích signálů stejně jako ve školení a v provozu. Tento bezpečnostní princip může být také realizován v podobě několika vrstev radiačních bariér, mezi něž patří matrice a pokrytí paliva, tlaková nádoba reaktoru a konečně i kontejnment celého reaktoru. Z hlediska bezpečnostních funkcí lze rozlišit tři základní úrovně: (a) prevence poškození aktivní zóny, (b) zmírnění dopadů nehod udržením integrity tlakové nádoby reaktoru a (c) ochrana veřejnosti zachováním integrity kontejnmentu. Princip ochrany do hloubky je součástí General Design Criteria (GDC) v podobě přílohy A k článku 10 Code of Federal Regulations, oddíl 50.

Požadavky kodifikované v GDC zohledňují dvě klíčová specifikace jaderných elektráren: (a) při vyváženém provozu jsou na každý watt tepelného výkonu generovány zhruba 2 curie (74 BBq) aktivity, tedy 6 BCI aktivity pro elektrárnu s lehkovodním reaktorem o výkonu 1000 MWe, a (b) 6–7 % celkového výkonu reaktoru tvoří radioaktivní rozpad štěpných produktů, jehož intenzita povolna klesá v období mezi několika dny a stovkami let. Tyto dvě charakteristiky vedou k nutnosti zabránit úniku v reaktoru obsažených radionuklidů do atmosféry a poskytovat reaktoru nepřetržitě chlazení i po ukončení samotného štěpení.

## 2. Kvantitativní hodnocení rizik

Vnímání rizika jakékoliv lidské činnosti, včetně rizik využívání lidmi vybudovaných systémů, je značně subjektivní. To lze ilustrovat na příkladu toho, jak média obvykle podávají zprávy o leteckých nehodách, v nichž je zraněn a zahyne relativně malý počet cestujících nebo posádky, zatímco každoroční úmrtí 40 000 lidí v důsledku automobilových nehod ve Spojených státech se zmiňuje jen zřídka. Rozdíl mezi typy rizik lze charakterizovat dvěma způsoby: (a) vědomě přijatá oproti nevyhnutelným rizikům a (b) rozložená oproti akutním či katastrofickým rizikům. Riziko jízdy osobním automobilem je vědomě přijatým rizikem, které máme osobně pod kontrolou, na rozdíl od nevyhnutelného rizika komerčních letů, nad nimiž kontrolu nemáme. Podobně pak jedna automobilová nehoda obvykle nezpůsobí zranění většího počtu osob, takže její riziko je rozložené, zatímco letecká katastrofa si může vyžádat mnoho životů najednou.

Kvantitativní hodnocení rizika provozování jaderných elektráren se obvykle provádí prostřednictvím technik pravděpodobnostního hodnocení rizik, které byly rozvinuty ve studii dvou lehkovodních elektráren WASH-1400 (1975). V této studii i následných hodnoceních se celkové riziko počítá jako součin odhadované frekvence nehod a jejich následků. Protože přijatelnost rizika je často nepřímo úměrná jeho následkům, je tento způsob kvantitativního hodnocení rizik veřejností vnímán skepticky, a to i navzdory rozsáhlým snahám zavést vědecké principy do designu, výstavby i provozu jaderných zařízení.

Výrazným omezením pravděpodobnostních hodnocení rizik (PRA) je inherentní nejistota společná analýzám tohoto typu. Pravděpodobnostní analýzy dopadů jakéhokoliv teoretické havárie jaderných nebo jiných uměle vytvořených systémů, stejně jako přírodních katastrof, často pracují s nejistotami v rozsahu několika řádů. Dalším omezením PRA metodologie je obtížné modelování lidských chyb způsobených činnostmi či nečinnostmi nebo společných příčin a častých zdrojů nehod. Dobrým příkladem v jaderné energetice je nehoda v jaderné elektrárně Salem v roce 1983, kde nedbalá údržba způsobila selhání automatického systému havarijního odstavení reaktoru, a to navzdory mnoha pravděpodobnostním analýzám, které mu připisovaly vysokou spolehlivost. V nedávné době se pozornost soustředila především na techniky, které dokážou toto omezení kompenzovat, stejně jako na odhalení vzájemných souvislostí u selhání způsobených interakcemi hardwaru / softwaru / firmwaru / procesů / lidských operátorů.

## 3. Rozhodování na základě znalosti rizik

Kvantitativní analýza rizik je navzdory svým omezením velmi cenným

nástrojem pro odhalování slabých míst a vyhodnocování potenciálních příležitostí pro snížení rizik v inženýrských systémech a lidských aktivitách obecně. Pravděpodobnostní metody tak byly mnohokrát nasazeny v aeronautickém, chemickém i stavebním průmyslu nebo při předvídaní zemětřesení, tsunami, záplav nebo požárů a přípravách na ně. Ve Spojených státech byly PRA techniky v nedávné době aplikovány v přístupu k regulaci jaderného průmyslu a dalších rozhodovacích procesech založených na znalosti rizik, u nichž jsou pravděpodobnostní odhady klíčovou informací při zavádění principu ochrany do hloubky, i když ne jeho samotným základem. Další nově se rozvíjející oblastí aplikace PRA je analýza spolehlivosti elektrické sítě vycházející z toho, že teroristický útok nebo přírodní pohroma mohou v dnešní moderní vysoce elektrifikované společnosti způsobit rozsáhlé škody.

#### 4. Pasivní bezpečnost a prevence nehod

Je zjevné, že havárie ve Fukušimě v roce 2011 ukázala nutnost mnohem lepší přípravy na závažné nehody, které by mohly poškodit aktivní zónu a uvolnit radionuklidy do biosféry. To znamená mimo jiné efektivní využívání hodnocení rizik při zvládání vážné havárie a při přípravách na situace ztráty hlavního chladičového média nebo dlouhodobého výpadku napájení elektrárny, což ve výsledku způsobilo tavení aktivní zóny ve Fukušimě. Americký jaderný průmysl zavedl flexibilní a diverzní iniciativu FLEX, jejímž cílem je zajistit přenosné vybavení, jako jsou zdroje elektriny, odolné větrací průchodky pro kontejnment, čerpadla, hadice a komunikační zařízení.

Význam prevence poškození aktivní zóny na rozdíl od zrušení a zmírnování následků dle principu ochrany do hloubky se znovu ukázal ve Fukušimě. To bylo i jedním z hlavních ponaučení z havárie elektrárny Three Mile Island v roce 1979, které přímo přispělo k návrhu pasivních bezpečnostních prvků pro AP1000 a ESBWR reaktory. Například několik elektráren typu AP1000, které se v současnosti staví ve Spojených státech a v Číně, mají velkou akumulaci nádrží na vodu pro chlazení přímo zabudovanou v kontejnmentu tak, že díky gravitaci dokáže poskytovat dostatek vody pro chlazení aktivní zóny po dobu alespoň 72 hodin.

Dalším významným poučením z incidentu v TMI byla nutnost zlepšit školení operátorů reaktoru. To vedlo k založení „Institute of Nuclear Power Operations“ a sdílení osvědčených postupů stejně jako informování o nesprávných postupech v provozu jaderných elektráren ve Spojených státech. Prostřednictvím dalších světových organizací, jako je Agentura pro atomovou energii OECD a Světová asociace provozovatelů jaderných zařízení (WANO), byly zavedeny i další podobné iniciativy. Pro další rozvoj jaderné energetiky, který bude přínosem pro celý svět, je nezbytná lepší spolupráce mezi jednotlivými státy, beroucí v potaz, že „jaderná nehoda kdekoliv na světě je jadernou nehodou všude“.

## NUCLEAR SYSTEM SAFETY PRINCIPLES AND APPLICATIONS IN THE UNITED STATES

John C. LEE

### 1. Fundamental safety principle

A cornerstone of nuclear system safety is the principle of defense in depth (DID), originating from various safety measures that Enrico Fermi and his colleagues incorporated into the planning and execution of the first self-sustaining chain reaction at the University of Chicago in 1942. Thus, the DID principle has been implemented at every stage of design, construction, and operation of every nuclear reactor around the world, with an ultimate objective of protecting the health and life of the population at large. The principle may be accomplished through the diversity and redundancy of equipment, sensors, and actuation signals as well as in training and operation. The safety principle may also be represented in terms of multiple layers of radiation barriers, including the fuel matrix, fuel cladding, reactor pressure vessel, and ultimately the reactor containment building. In terms of safety functions, three basic levels may be considered: (a) prevention of core damage, (b) mitigation of accidents through maintaining the integrity of the reactor pressure vessel, and (c) protection of the public by maintaining the integrity of the containment building. The DID principle is duly reflected in the General Design Criteria (GDC), promulgated as Appendix A to Title 10, Code of Federal Regulations, Part 50.

The guidelines codified in the GDC reflect two key distinguishing features of nuclear power plants: (a) at equilibrium power operation approximately 2 curies (74 Bq) of radioactivity are generated

for each watt of thermal power, resulting in 6 Bq of radioactivity for a 1000-MWe light water reactor (LWR) plant, and (b) 6–7 % of total power produced in a reactor core comes from the radioactive decay of fission products, which decreases slowly over a period of days to hundreds of years. These two features point to the need to prevent the release of the inventory of radionuclides into the atmosphere and to provide continuous cooling of the reactor core even after the fission events are terminated.

### 2. Quantitative risk assessment

Perception of the risk associated with any human activity, including those associated with the utilization of man-made systems, is quite subjective. This can be illustrated by the way the news media typically report on airplane crashes involving the injury or death of even a few passengers and crew, while the annual casualties of 40,000 individuals due to automobile accidents in the United States do not receive special coverage. The distinction between the types of risk may be characterized in two ways: (a) voluntary versus involuntary risks and (b) distributed versus acute or catastrophic risks. We consider the risk associated with traveling in private automobiles a voluntary one that is under our personal control, in contrast to the involuntary risk involved with commercial airline flights in which we do not have control. Similarly, an automobile-related accident typically does not result in a large number of casualties so the risk is distributed, while a catastrophic airline crash could result in a large number of casualties.

Quantitative evaluation of the risk of operating nuclear power plants is typically performed through probabilistic risk assessment (PRA) techniques developed in the 1975 WASH-1400 study of two LWR plants. In WASH-1400, as well as in subsequent risk evaluations, risk is calculated as the product of postulated accident frequencies and consequences of the accidents. Since the acceptability of risk is often inversely proportional to the consequences, this method of quantitative risk evaluation is subject to public skepticism, despite extensive efforts made in implementing scientific principles in the design, construction, and operation of nuclear systems.

A major limitation of the PRA techniques is the inherent uncertainty in all probabilistic analyses. Indeed PRA estimates of consequence measures of any postulated accidents in nuclear systems as well as in other engineered systems and natural disasters are often subject to uncertainties covering many orders of magnitude. Another limitation of the PRA is the difficulty in representing human errors, due to both commission and omission, and common cause or common mode failures. One illustrative example in the nuclear industry is the 1983 incident at the Salem nuclear plant where poor maintenance practices resulted in the failure of the automatic SCRAM system to shut down the reactor, despite extensive PRA calculations suggesting high reliability for the SCRAM system. Recently, techniques that can address this limitation as well as possible dependencies among failure events that may arise from hardware / software / firmware / process / human interactions have been receiving attention.

### 3. Risk-informed decision making

Quantitative risk analysis, despite its limitations, is valuable in identifying vulnerabilities and evaluating potential risk reductions in engineered systems and human activities in general. Thus, PRA techniques have been employed extensively in aerospace, chemical, and civil engineering and in predicting and preparing for probable earthquakes, tsunamis, floods, and fires. In the United States, recent PRA applications include risk-informed approaches for nuclear regulations and other decision making processes, where the probabilistic risk estimates serve as key information, albeit not a basis, for implementing the DID principle. Another emerging PRA application is for the reliability analysis of the electric grid, where a terrorist attack or natural disaster could wreak havoc in the highly electrified modern society.

### 4. Passive safety and accident prevention

It goes without saying that the 2011 Fukushima accident demonstrated the need for much better preparation for severe accidents that could result in core damage and release of radionuclides into the biosphere. This includes an effective use of risk assessment for the management of severe accidents and preparations for the loss of ultimate heat sink and long-term station blackout events, which were the eventual causes for the core meltdown in the Fukushima plants. In the United States, the nuclear industry has implemented a diverse and flexible (FLEX) initiative to acquire portable equipment including power sources, hardened containment vents, pumps, hoses, and communication devices.

The importance of core damage prevention, as contrasted to mitigation and protection, in the DID principle was demonstrated again in the Fukushima accident. This was one of the key lessons learned in the 1979 Three Mile Island (TMI) accident and was incorporated into the passive safety features of the AP1000 and ESBWR. For example, several AP1000 plants currently under construction in the

United States and China feature a large reservoir of coolant water in the in-containment refueling water storage tank, which will provide via gravity sufficient water to keep the core cooled for at least 72 hours.

Another important lesson of the TMI accident was the need for improved training of the reactor operators. This facilitated the establishment of the Institute of Nuclear Power Operations and sharing both desirable and undesirable practices in the operation of nuclear plants in the United States. Through other world organizations, including the OECD Nuclear Energy Agency and World Association of Nuclear Operators, similar initiatives have been implemented. For further development of nuclear energy for the benefits of the world, we need enhanced cooperation among the nations, remembering "a nuclear accident anywhere is a nuclear accident everywhere."

## John C. LEE

*Professor at the Department of Nuclear Engineering at the University of Michigan, and Chair of the Nuclear Installations Safety Division of the American Nuclear Society*

■ **John C. Lee je v oboru fyziky a inžinýrství jaderných reaktorů aktivní od roku 1969, kdy poprvé začal pracovat v jaderném průmyslu. Od roku 1974 působí na University of Michigan, kde byl vedoucím Katedry jaderného inženýrství a radiologických věd. Publikoval 190 odborných materiálů a článků včetně učebnice Analýza bezpečnosti a rizik jaderných systémů, Wiley (2011). Je držitelem titulů B.S. z univerzity v Soulu a PhD z University of California, Berkeley, a také členem Americké nukleární společnosti. V současnosti je ředitelem divize bezpečnosti jaderných zařízení (NISD) Americké nukleární společnosti. Tento článek vznikl s přispěním konzultujících kolegů z NISD.**



■ **John C. Lee has been active in nuclear reactor physics and engineering, beginning with appointments in the nuclear industry in 1969. He has been on the faculty of the University of Michigan since 1974 and served as the Chair of the Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences. He has written for 190 publications, including a textbook Risk and Safety Analysis of Nuclear Systems, Wiley (2011). He received his B.S. and PhD from Seoul National University and the University of California, Berkeley, respectively, and is a Fellow of the American Nuclear Society. He currently serves as the Chair of the ANS Nuclear Installations Safety Division and the brochure article has been prepared in consultation with his NISD colleagues.**



# VÝZNAM BEZPEČNOSTNÝCH ŠTANDARDOV PRE HODNOTENIE ÚROVNE BEZPEČNOSTI

Jozef MIŠÁK

Pre hodnotenie jadrovej bezpečnosti majú zásadný význam bezpečnostné štandardy v ich najobecnejšom význame, od národných zákonných noriem cez medzinárodne uznávané bezpečnostné požiadavky a návody IAEA až po systém technických noriem používaných dodávateľmi elektrární. Bezpečnostné štandardy sú meradlom bezpečnosti. Štandardy sa neustále zdokonaľujú a vyjadrujú, čo je v danej etape vývoja považované za „dobré“ a postačujúce. Bezpečnostné štandardy sú koncentrovaným vyjadrením skúseností z tisícok prevádzkových reaktor-rokov, rozšíreným o požiadavky na zvládanie aj takých (postulovaných) udalostí, ktoré sa v skutočnej prevádzke nikdy nestali.

Bezpečnostné hodnotenie má dva základné komponenty: kvalitatívne hodnotenie tzv. inžinierskych pravidiel dôležitých pre bezpečnosť (napr. použitie vhodných materiálov, dodržiavanie princípov radiačnej ochrany, rešpektovanie princípov hĺbkovej ochrany, atď.) a kvantitatívne overenie kritérií prijateľnosti pomocou deterministických a pravdepodobnostných analýz. Naplnenie bezpečnostných požiadaviek má v jadrovej energetike prioritu pred akýmkoľvek inými požiadavkami, predovšetkým požiadavkami na minimalizáciu nákladov.

Bezpečnostné hodnotenie je predovšetkým overovaním súladu so štandardami. Je vhodné pripomenúť, že nedávne európske záťažové testy vybočili z tohto rámca, keďže jedným z ich hlavných cieľov bolo

stanoviť, do akej miery je možné stupňovať vonkajšiu záťaž (zemetrasenia, záplavy, atď.), kým nedôjde k zničeniu elektrárne. Obrovské investície vyplývajúce zo záťažových testov (odhad za EÚ predstavuje 10 – 25 miliárd EUR) neboli vyvolané potrebou vylepšenia elektrární na dostatočnú bezpečnostnú úroveň, ale boli ústretovým krokom prevádzkovateľov a jadrových dozorov ďalej zvýšiť rezervy nad úrovňou požadovanú štandardami.

Dôležitým faktorom pre zvýšenie kvality a dôveryhodnosti bezpečnostných štandardov je ich medzinárodná harmonizácia ako aj partnerské overovania súladu stavu dosiahnutého na jadrových elektrárnach so štandardami. Ťažké je nájsť ďalšie odvetvie, v ktorom by sa vzájomné partnerské overovanie uplatňovalo v podobnom rozsahu.

Používanie bezpečnostných štandardov je dôležité pre realizáciu jedného zo základných bezpečnostných princípov jadrovej energetiky, ktorým je prednostné využívanie overených inžinierskych riešení. Výrazné inovácie jadrových zariadení sa uplatňujú len v špeciálne zdôvodnených prípadoch a po predchádzajúcom dôkladnom analyticky a experimentálne preukázaní funkčnosti a spoľahlivosti. Tento princíp je charakteristický pre jadrové technológie na rozdiel od iných priemyselných odvetví, v ktorých je naopak stupeň inovácie výraznou marketingovou prednosťou.

Pre jadrovú bezpečnosť je dôležitým princípom mať pre každú situáciu v zálohe plán B, teda pripravený postup v prípade, ak zlyhá hlavný plán. V jadrovej bezpečnosti sa tento prístup volá hĺbkovou ochranou, ktorá však okrem plánu B počíta ešte aj s plánmi C, D a E. Uplatňovanie hĺbkovej ochrany je vhodným odporúčaním pre mnohé iné priemyselné oblasti i pre každodenné situácie ľudského života.

Súčasná štandardy nie sú súborom minimálnych požiadaviek, ale reprezentujú veľmi dobré medzinárodne akceptované postupy. Ako náznak požadovanej úrovne bezpečnosti je možné uviesť, že ani v prípade najväčších projektových havárií nesmie byť od obyvateľstva vyžadované prijímanie žiadnych ochranných opatrení. Dokonca aj pri vzniku tých najťažších havárií s úplným zničením reaktora musia k tomu určené systémy obmedziť následky tak z hľadiska zasiahnutého územia ako aj doby ohrozenia.

Opodstatnená potreba prísnej kontroly úrovne bezpečnosti urobili z jadrovej energetiky výnimočne regulované odvetvie. Určite by bolo prínosom – aj sa realizuje – preberanie vysokých požiadaviek na úroveň bezpečnosti vrátane vypracovaných metód a nástrojov aj do iných priemyselných oblastí.

Jadrová energetika je pravdepodobne jediným odvetvím, v ktorom sa v pravidelných intervaloch pri tzv. periodickom hodnotení bezpečnosti úroveň bezpečnosti prevádzkovaných jadrových blokov prispôbuje sprísneným novo definovaným požiadavkám. Je ťažké si predstaviť, že by sa podobné nároky začali uplatňovať napríklad v automobilovej doprave, ktorá je z hľadiska rizika pre ľudský život a zdravie o niekoľko rádo nebezpečnejšia, ako jadrová elektrárňa. Pri analogickom prístupe by sa dnes autá pohybovali v tuneloch dokonale oddelene od človeka maximálnou rýchlosťou pár kilometrov za hodinu.

Verejnosť má často tendenciu stotožňovať kvalitu bezpečnostných štandardov s požiadavkou na úplné vylúčenie akýchkoľvek havárií a opodstatnene sa pýta, ako je možné, že napriek náročným štandardom k haváriám dochádza. Tu je treba priznať, že vo väčšine prípadov je príčinou havárie porušenie štandardov obvykle z dôvodu nevedomenia si alebo podcenenia rizika. Okrem toho je treba jasne povedať, že kvalitné štandardy môžu síce znížiť riziko na ľubovoľne nízku úroveň (pri odpovedajúcich vysokých nákladoch), ale znížiť toto riziko na nulu nie je možné. Neexistuje žiadny spôsob výroby elektriny, ktorý by vylúčil riziko zdravotných účinkov, ba štatisticky z pohľadu evidovaných skutočných následkov je jadrová energetika ďaleko najbezpečnejším spôsobom. Úlohou politickej reprezentácie by malo byť rozhodnúť o spoločensky prijateľnej miere rizika a komunikovať ju presvedčivým spôsobom verejnosti.

Celoživotná práca v jadrovej bezpečnosti ma naučila, že v tejto oblasti rovnako ako v živote sa nevyplatí prekrúcať fakty, falšovať výsledky a vyhýbať sa zodpovednosti. Spôsob informovania verejnosti o jadrovej energetike v prostriedkoch masovej komunikácie je pre mňa meradlom serióznosti daného média. Nedôverujem politikom, ktorí svoju neschopnosť vyargumentovať národné záujmy pri bezpečnom využívaní jadrovej energie schovávajú za „nutné“ politické rozhodnutia. Ako sa médiá a politici chovajú v iných, odborne mi vzdialených situáciách, ak klamú alebo zlyhávajú v situáciách, ktoré sú mi dôverne známe? Čo si myslieť o ekologických aktivistoch, ktorí sa bez akéhokoľvek relevantného vzdelania označia za expertov a chcú bez akejkolvek osobnej zodpovednosti prijímať celospoločenské rozhodnutia, ako je možné veriť, že rovnakým spôsobom nekalifikovane neprístupujú aj ku všetkým ostatným otázkam kvality životného prostredia?

# IMPORTANCE OF SAFETY STANDARDS FOR EVALUATING SAFETY

Jozef MIŠÁK

In assessing nuclear safety, a crucial role have safety standards in the broadest sense, ranging from national legal documents, internationally recognised IAEA safety requirements and guides up to a system of technical norms used by power plant suppliers. Safety standards are a measure of safety. Standards keep improving and serve as a record of what is considered "good" and adequate in the given stage of development. Safety standards are a concentrated accumulation of experience gained from thousands of reactor-years of operation extended with the requirements for managing (postulated) situations that never occurred in real operation.

Safety assessment has two core components: qualitative assessment of engineering factors important for safety (such as the use of proper materials, complying with the principles of radiation protection, respecting the concept of defence in depth etc.) and quantitative verification of acceptance criteria through deterministic and probabilistic analyses. In nuclear power area, meeting all safety requirements has the priority over all other demands, in particular those to minimise costs.

Safety assessment primarily means verifying compliance with the standards. It should be noted that recent European stress tests have deviated from this framework, since one of their primary objectives was to determine the extent to which external loads (due to earthquakes, floods etc.) can be gradually increased until the power plant is destroyed. Enormous investments resulting from these stress tests (the EU estimate being 10–25 billion EUR) were not reflecting a need to improve power plants to achieve an adequate level of safety, but were instead a gesture made by nuclear operators and regulators who committed to increasing the safety margins even further above levels required by the standards.

An important factor in increasing the quality and trustworthiness of safety standards is their international harmonisation as well as peer verifications of compliance of the current state of nuclear power plants with the standards. It would be difficult to find another industry in which mutual peer reviews would be employed in such scope.

Use of the safety standards is important for the implementation of one of the fundamental safety principles of nuclear power: priority of using proven engineering solutions. Major innovations in nuclear installations are deployed only in specially justified cases and only after thorough analytical and experimental verification of the functionality and reliability of the novel solutions. This principle, so characteristic for nuclear technologies, is in contrast with many other fields of industry in which innovation is an important marketing advantage.

An important principle in nuclear safety is to always have a backup plan B for cases when the main plan fails. In nuclear safety, this principle is called defence in depth, which however doesn't rely only on plan B, but also plans C, D and E. Application of the principles of defence in depth can be recommended to many other fields of industry as well as everyday situations in human life.

Current standards are not a collection of minimal requirements, but a representation of very good and internationally accepted practice. An indicator of the required level of safety is the demand that even in the case of the most serious design basis accidents the public must not be required to adopt any emergency measures. Even in case of the most severe accidents in which the reactor is completely destroyed, there must be dedicated systems that mitigate consequences so that they are limited regarding the impacted area as well as the duration of the emergency.

The justified need for strict control of safety level resulted in the fact that nuclear power is an exceptionally regulated industry. It would certainly be beneficial to adopt its high requirements for safety as well as its already developed methods and tools in other fields of industry, as is after all already happening.

Nuclear power is probably the only field in which regular reassessments, so called periodic safety reviews are used to increase the safety levels of operated nuclear units by adopting stricter, newly defined requirements. It's hard to imagine similar demands being applied for example in car transport which is in terms of risk to human life and health several orders of magnitude more dangerous than a nuclear power plant. If the automotive industry worked analogically, cars would today drive in tunnels completely separated from humans at a maximum speed of a few kilometres per hour.

The public often tends to equate quality of safety standards with the requirement to completely eliminate the possibility of any ac-

cident, and justifiably asks how is it possible that despite demanding standards, accidents still do occur. Here it is necessary to admit that in most cases, the cause of an accident is a failure to comply with standards, typically due to underestimating or not realising a risk. Apart from that, it needs to be said that while high quality standards may reduce risk to an arbitrarily low level (at a correspondingly high cost), it can never be cut to zero. There is no means of generating electricity that would be entirely without the risk of impacts on health; statistically speaking with regard to actually recorded consequences, nuclear energy is in fact the by far safest option. The role of politicians should be to decide what a socially acceptable level of risk is and convincingly communicate the message to the public.

A lifetime of work in nuclear safety taught me that in this field as well as in life, it does not pay off to twist the facts, falsify results and shirk responsibility. The approach to informing the public on nuclear energy in mass communication media is for me an indicator of the medium's trustworthiness. I do not trust politicians who hide their inability to defend national interests in safe use of nuclear energy behind "necessary" political decisions. What can be the media and politicians doing in other areas I have no expertise on when I see them deceive the public or fail in their decisions in the areas which I am familiar with? What should I think about environmental activists who call themselves experts even without any relevant education and who want to adopt society-wide decisions without any personal responsibility? How can I believe that they are not using the same unqualified approaches to other environmental issues?

Jozef MIŠÁK

ředitel strategie ÚJV Řež  
Director for Strategy of NRI Řež

■ Je absolventem Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Má více než 40 let zkušeností v oborech zaměřených na výzkumnou a inženýrskou podporu zavádění principů bezpečnosti při projektování a provozu jaderných elektráren v různých řídicích funkcích. V letech 1993 – 1997 byl prvním předsedou Úradu jadrového dozoru SR. V letech 1997 – 2004



pracoval v IAEA ve Vídni v oblasti přípravy bezpečnostních standardů a směrnic pro havarijní analýzy jaderných elektráren. Návazně na to a na jeho současné postavení působí jako vysoce respektovaný člen řady mezinárodních misí, týmů a rad v oblasti jaderné bezpečnosti.

■ Graduated in nuclear sciences from the Czech Technical University in Prague. He has more than 40 years of experience in the nuclear power

industry focused on research and engineering support of the implementation of safety principles during the design and operation of NPPs. Between 1993 – 1997, he was the first Chairman of the Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic.

Between 1997 and 2004 he was with IAEA in Vienna where he worked in the field of elaboration of safety standards and guidelines for NPP accident analysis. On the basis of this work and his current position, he is today a highly respected member of various international missions, teams and boards acting in the field of nuclear safety.





## MATERIÁLY A ENERGIE

Martin RUŠČÁK

Rozvoj technologií v průběhu historie lidstva probíhá společně s rozvojem způsobů, jak tyto technologie zásobovat energií. Jak se díky koncentraci výroby zvyšovala její efektivita, docházelo postupně ke zvyšování koncentrace zpracovávané a využívané energie.

Od vodních mlýnů přes parní stroje až po moderní těžbu plynu a ropy nebo elektrárny, všude postupně docházelo ke zvyšování rizik spojených s využitím energie. S tím, jak rostly teploty a tlaky médií, rostly také požadavky na materiály, ze kterých byla energetická zařízení vyrobena. Aby byli lidé v blízkosti zařízení chráněni, technologové každé epochy se snažili nalézt co nejlepší materiály pro stavbu účinnějších a bezpečnějších bariér.

Není proto překvapením, že právě jaderná energetika jako odvětví pracující s takto koncentrovanou energií, definuje hraniční požadavky na celistvost komponent a systémů, na vlastnosti konstrukčních materiálů a na způsoby jejich hodnocení. Přináší tak do petrochemického průmyslu, dopravy, a energetiky nové materiály a technologie jejich výroby a navazuje na 150 let, ve kterých zase tyto průmysly iniciovaly bouřlivý rozvoj materiálů. Technologie se tak dostávají k hraničním parametrům výroby, které ještě před několika generacemi nebyly myslitelné.

Rozvoj komerční jaderné energetiky v šedesátých letech přinesl do rozvoje materiálů a materiálových technologií nový impuls a jaderná energetika se stala technologickým inkubátorem pro řešení materiálových a pevnostních problémů využitelných v jiných průmyslech. Technologické inovace vyvinuté pro materiály používané v jaderných elektrárnách tak například zlepšily spolehlivost svařovacích postupů pro klasickou energetiku a petrochemii. Stejně to bylo s požadavky na zajištění jakosti při výrobě materiálů pro tlaková zařízení. Během pár desetiletí se v zemích s ambicemi stavět a provozovat jaderné elektrárny rozvinul intelektuální potenciál a rozsáhlá infrastruktura v oblasti výzkumu a vývoje materiálů. Postupy hodnocení křehkého lomu se pak dostaly do standardního použití v jiných technologiích.

Příklady můžeme najít také v rozvoji svařovacích technologií pro kovové materiály či ve výrobě geometricky přesných komponent z titanu nebo zirkonia. Velký rozmach vývoje a výroby kvalitních heterogenních svarů se z jaderné energetiky přenesl do petrochemie a klasické energetiky a byl doplněn principy jakosti vedoucími k novým postupům svařování a hodnocení svarů, stejně jako k vyšším nárokům na kvalifikaci lidí.

Nejenom konstrukční materiály byly ovlivněny jadernými technologiemi. Neutronové záření dokáže změnit strukturu materiálů a plánovaně připravovat materiály s novými vlastnostmi. Například ozařování monokrystalů křemíku vytváří pro potřeby elektronického průmyslu ideální homogenní polovodič, nedosažitelný jinými způsoby. Tady se už dostáváme za hranice materiálového výzkumu pro energetiku, do oblasti vývoje nových materiálů. Kontrolovaným způsobem nám pomáhá ionizující záření vytvářet nové materiály, pochopit jak fungují a zlepšovat tak materiály pro množství často nejaderných aplikací.

## MATERIALS AND ENERGY

Martin RUŠČÁK

During the history of modern society, any technology development has been closely bound to the development of power supply. As the efficiency of production grew, it was accompanied by increasing concentration of produced and utilized energy. From water mills through steam power up to the modern ways of oil and gas drilling and processing or electricity production, in all areas of power related technologies the risks linked to energy utilization burst out. Together with temperatures and pressures of working media escalation, new requirements appeared for materials used for designing of power facilities. Engineers and designers tried to find out the best possible materials to build more efficient and safer barriers to fulfill the main purpose – to protect people in the vicinity of high energy and to protect the technology itself.

No surprise that the nuclear power generation which is working with concentrated power is defining extreme requirements to be put on integrity of components, on properties of structural materials as well as on the ways how these materials are evaluated. It brings new materials and material production and testing technologies to other industries – like process industry, transportation or power generation. One may appreciate a continuation of last 150 years when these technological areas initiated a breathtaking development of materials. The

technologies are approaching parameters, which would have been unthinkable a few generations ago.

The development of nuclear power generation in the 60's brought a new impulse into materials and material technologies and the industry became a technology incubator for material and strength related issues for other industries. Innovations, which were developed for materials in power plants, did improve reliability of welding procedures for fossil power generation and for the process industry. The same happened for quality requirements for pressurized components.

During a few decades there happened an enormous development of intellectual potential and infrastructure in material research and development in most countries seriously planning to build and operate nuclear power. New approaches like evaluation of brittle fracture or statistical fracture mechanics became a standard also in other industries.

Another example can be found in welding technologies for metallic materials or in production of precise components made of titanium or zirconium. Enormous extension of development and production of heterogeneous welds was transferred from nuclear power generation to the process industry and fossil power generation and it was completed by quality principles which then led to new welding procedures and evaluations as well as to much higher requirements put on people qualifications.

Not only structural materials have been influenced by nuclear technologies. Neutron radiation is capable to change internal structure of materials and to prepare materials with new properties in well-defined way. For example irradiation of silicon crystals creates ideally homogeneous semiconductor for electronic industry, which is unreachable by other means. Here we are moving beyond material research for power generation, into the new materials development. Ionizing radiation helps us to create new materials in very controlled way as well as to understand how they work and to improve materials for the cutting edge non-nuclear applications.

### Martin RUŠČÁK

ředitel, Centrum výzkumu Řež  
Director, Research Centre Řež

■ **Absolvent Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT, dále získal vědeckou hodnost a titul MBA. V ÚJV Řež pracoval v řadě funkcí na problematikách koroze, stárnutí komponent jaderných elektráren a hodnocení reaktorových vestaveb. Od roku 2000 působil deset let ve společnosti Det Norske Veritas, nejdříve jako ředitel českého a slovenského zastoupení, později v Norsku a Velké Británii řídil projekty v jaderné a klasické energetice. Od roku 2011 jako ředitel Centra výzkumu Řež mimo jiné rozvíjí EU dotovaný projekt SUSEN (Sustainable Energy).**



■ **Graduate in nuclear sciences from Czech Technical University and holder of PhD and MBA degrees. Worked at NRI Řež in various positions where he focused on topics related to corrosion, ageing of NPP components and evaluation of reactor internals. After 2000, he spent 10 years in Det Norske Veritas where he was responsible for the Czech and Slovak units and later worked in Norway and the UK as manager of projects in the nuclear and fossil power industry. As the director of Research Centre Řež, a position he has held since 2011, he is among other activities developing the SUSEN (Sustainable Energy) project subsidized by the EU.**





## BEZPEČNOST – IMPERATIV JADERNÉ ENERGETIKY SAFETY – IMPERATIVE OF NUCLEAR ENERGY

text | text: Dana DRÁBOVÁ, Frank CARRÉ, František HEZOUČKÝ,  
Jiří HŮLKA, Jan JOHN, Jukka LAAKSONEN, John C. LEE,  
Jozef MIŠÁK, Martin RUŠČÁK

design a grafika | design and graphic layout: JMM consulting  
editor | editor: Jiří Marek

tisk | print: TISKÁRNA DOBEL s.r.o., Dolní Čermná

JMM CS spol. s r.o. ©2013



... důležité téma, kvalitní a respektovaní autoři, zajímavé myšlenky a souvislosti. To vše představuje hodnotnou publikaci, která by se měla dostat do rukou každého, kdo chce kvalifikovaně hodnotit jadernou energetiku a její bezpečnost ...

... excellent theme, outstanding and respected authors, interesting ideas and contexts. All that together forms a valuable source of information that should get into the hands of everyone who wants to competently evaluate nuclear energy and its safety ...

**Jiří Drahoš**, předseda Akademie věd České republiky  
President of the Academy of Sciences of the Czech Republic

... připomínání toho, že bezpečnost je v jaderné energetice na prvním místě, není nikdy dost. Připomínání toho, že bezpečnost jaderné energetiky je zajištěna nejvyšším rozumně dosažitelným způsobem také není nikdy dost. A že se z toho mohou poučit jiní – to už je taková třešnička na dortu ...

... the fact that safety is the highest priority in nuclear power cannot be repeated often enough, and neither can the assurance that the safety of nuclear power is being provided with the best reasonably achievable methods. And that it can serve as a lesson to others – that's icing on the cake ...

**Miroslav Lipár**, Head of the Operational Safety Section at International Atomic Energy Agency

**BEZPEČNOST – IMPERATIV JADERNÉ ENERGETIKY**  
**SAFETY – IMPERATIVE OF NUCLEAR ENERGY**

text | text: Dana DRÁBOVÁ, Frank CARRÉ, František HEZOUČKÝ,  
Jiří HŮLKA, Jan JOHN, Jukka LAAKSONEN, John C. LEE,  
Jozef MIŠÁK, Martin RUŠČÁK

design a grafika | design and graphic layout: JMM consulting  
editor | editor: Jiří Marek

tisk | print: TISKÁRNA DOBEL s.r.o., Dolní Čermná

JMM CS spol. s r.o. ©2013