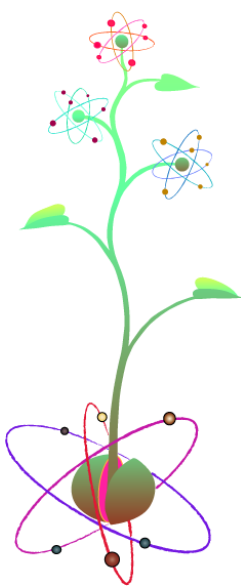


INTERAKCE MEZI TEORETICKÝMI, TECHNICKÝMI A SOCIÁLNÍMI VĚDNÍMI OBORY A JADERNOU ENERGETIKOU

Doc. Ing. Petr Otčenášek CSc.

Tato studie (úvaha) byla zpracována pro 6. konferenci o jaderné energetice NE•RS 2013 s podtitulem „PRIORITA BEZPEČNOSTI – INOVAČNÍ POTENCIÁL – KVALITA VZDĚLÁVÁNÍ. TŘI FENOMÉNY JADERNÉ ENERGETIKY POSOUVAJÍCÍ ROZVOJ SPOLEČNOSTI DOPŘEDU“ a byla volně inspirována jejími základními programovými tezemi



Anotace

Masivní podpora rozvoji využívání jaderné energie v období 1950 – 1990 vytvořila pro mírové a vojenské aplikace všestranně rozsáhlý prostor. V jeho rámci byly využity fyzikální i technické vědy, bez jejichž přispění by nebyla cesta ke zralosti jaderných technologií ani myslitelná natož proveditelná. Výzkumné a vývojové práce, experimentální, aplikační a provozní zkušenosti jaderných oborů zpětně ovlivnily vývoj nejaderných věd a technologií a byly tak jistou splátkou za poskytnuté podklady.

Předkládané úvahy jsou reflexí na zadání a rozsah stanovené vedením NERS. Volná forma stručného textu má přispět k pochopení symbiózy jaderných a nejaderných věd, poukázat na významné přínosy jaderných oborů k všeobecnému pokroku a vytvořit kritický pohled na minulý vývoj k upřesnění dalšího uplatnění jaderné fyzikálních aplikací.

Vedle vytváření vize rozvoje je právě tak případný kritický pohled zpět. Hodnotu mají i nepoužité a dnes zapomenuté teorie a řešení i opomenuté zkušenosti významných manažerů. Rozsah textu neumožňuje korektní komplexní pohled, ale jen dílčí úvahy vztažené k významným oborům a v nich k odkazům na některé faktory. Již prvním problémem je volba oborů označených jako významné, protože výčet využitých věd je extrémně rozsáhlý. Splnit zadání nelze formou obvyklou pro vědecké práce, tedy konkrétními odkazy. Cílem je přispět k dlouhodobé odpovědnosti za další bezpečný vývoj jaderných oborů.

Specifikum jaderných oborů

Základní jaderně fyzikální poznatky vznikaly ve třiceti letech od roku 1919, kdy Rutherford poprvé uměle rozštěpil jádro dusíku částicí alfa přes rok 1939, ve kterém pokusy Hahna, Strassmana a Meitnerové vytvořit bombardováním uranu neutronem transurany vedly k objevu štěpení. Pozoruhodný byl rozsah, hloubka i význam poznatků a aplikací vytvořených v projektu Manhattan. Rozvoj teoretické a jaderné fyziky a jaderných technologií, vytvořený v šesti válečných letech, umožnil i za těžkých podmínek druhé světové války vytvořit z hypotézy o štěpení první jaderný reaktor a také jaderné bomby využívající jak dělový tak implozivní systém, tedy soustav využívaných v civilním i zbrojním průmyslu dodnes.

Projekty výzkumných, experimentálních, demonstračních a později energetických jaderných reaktorů vytvořily lavinu technologicky orientovaného výzkumu. Z primitivních laboratorních experimentů a jednoduchých konstrukcí byly vypracovány moderní technologie a jejich hodnocení pro extrémní podmínky aplikací. Materiálový výzkum a vývoj umožnil konstrukci typicky jaderných komponent jako jaderné palivo, povlaky palivových článků, regulační tyče, detektory, tlakové nádoby, přestupní plochy parogenerátorů a měřicí i regulační technika a klasické komponenty mimořádně zatěžované nad obvyklé meze. Protože běžné průmyslové výrobky jako jsou čerpadla, výměníky tepla a potrubí nesplňovaly náročná kritéria na jadernou techniku, vyvíjely se pro jaderné elektrárny speciální „jaderné“ materiály, součásti i výrobní postupy. Poznaný vliv interakce záření s hmotou na materiály podloženy požadavky na dlouhodobý spolehlivý provoz i údržbu specifikoval nároky na ozařované materiály vlastnosti za provozních podmínek i na konstrukce. Aplikace využily široké spektrum z tehdejších znalostí přírodních a technických věd.

Následně byly rozvíjeny teoretické i experimentální poznatky v disciplínách, které dnes vytvářejí obory jaderné fyziky, aplikované jaderné fyziky a jaderných oborů i relevantních technických oborů. Ekonomika byla popelkou proto, že vývoj byl za studené války subvencován. Informovanost veřejnosti, ohled na přírodu a etika byly na nulové úrovni.

Jaderná energetika je systémem, který se rychle vyvinul z identifikace základních znalostí jaderné fyziky až do technologické zralosti, ekonomické přijatelnosti a společenské i bezpečnostní akceptovatelnosti. Zatímco téměř ve všech ostatních oblastech se jednalo o vývoj, ve kterém ke zdokonalování docházelo v rychlém sledu mnoha krátkých generací, například od kočáru hnaného spalovacím motorem k moderním automobilům s každoročními inovacemi, vyvinuly se dnešní jaderné elektrárny vzhledem ke své vysoké životnosti přesahující padesát roků v průběhu tří generací. Extrémně rychlý vývoj, při kterém byly uváděny do provozu jaderné elektrárny s kvalitou komponent a s úrovní vědeckého a technického poznání odpovídající dané době, se neobešel bez negativních jevů. Volba materiálů byla prováděna bez znalostí dlouhodobého působení v náročných provozních podmínkách. Teorie bezpečnosti a spolehlivosti byla v počátcích rozvoje jaderné energetiky v dětských plenkách. Nekomplexní odhady bezpečnosti a spolehlivosti, na základě kterých se určovala pravděpodobnost výskytu poruch, udávaly v etapě do roku 1980 optimistické údaje a skutečný počet mimořádných příhod byl vyšší. Optimisticky byl hodnocen potenciál odborně vyškolených specialistů. Nehody v jaderném průmyslu vznikaly zejména v důsledku vývojových problémů a dokonce i hrubých chyb a selhání lidského činitele, nejen v provozu, ale i v projektování a při konstrukci a stavbě. Tak tomu ostatně bylo a je v řadě dalších oborů. To prakticky znamenalo, že vědecké poznatky byly aplikovány do systémů vyprojektovaných na podkladech dostupných

v době přijímání volby se zpožděním. Žádná modernizace nemůže změnit projektové řešení stavební a technologické části. Moderní výrobky mají dnes jen málo prvků převzatých z prototypů, ale jaderné elektrárny jsou provozovány se stavební i technologickou částí odpovídající době akceptování projektu.

Významné obory

1. Fyzika - jaderná data

Matematický popis interakce částic a záření s hmotou v relevantním oboru energií (v neutronové fyzice pro reaktory do 10 MeV a ve stínění do 40 MeV) je základem, který podložil jaderný výzkum nezbytnými informacemi a současně poskytl data ostatním oborům, ve kterých se jaderné aplikace rozvinuly. Základním přístupem k popisu interakce neutronových polí s prostředím aktivní zóny, ve stínění a dalším okolí i mimo bylo grupování účinných průřezů z naměřených (statistických dat) energetických závislostí účinných průřezů převedením na funkce po částech konstantní. Druhou nezbytnou podmínkou dostupnosti matematických řešení byla prostorová homogenizace zavedená proto, že střední volné dráhy neutronů jsou srovnatelné s lineárními rozměry struktury heterogenního reaktoru. Pečlivě vytvářené rozsáhlé mnohagrupové knihovny dat byly jedním z prvních postupů od jinak obecného přechodu od analogového popisu k diskrétnímu. Propojení se znalostí spekter neutronů vytvořilo základnu, na které byly vyvinuty výpočetní metody neutronových polí, připraveny experimenty a obecně postupy k získání polí záření v mnohotvárných aplikacích moderní vědy a techniky.

2. Matematické modelování

Náhodný charakter jaderných interakcí vedl k uplatnění matematických modelů v oboru nízkých hustot toků záření v šumové analýze a v oboru vysokých hustot k omezeným pokusům nalézt deterministické řešení ve složitých strukturách aktivní zóny na základě Boltzmannovy rovnice. Méně teoreticky přijatelné difuzní přiblížení se ale stalo základem převážné většiny modelů. Vypracované výpočetní kódy verifikované experimenty poskytují nástroj k získání informací o směsných polích ve všech požadovaných aplikacích. Experimentální prověřování shody matematických modelů bylo prováděno na široké experimentální bázi tvořené podkritickými soubory s externími zdroji, výzkumnými a experimentálními reaktory a soustav s externími zdroji. V jaderné energetice jsou využívány téměř všechny matematické obory a jejich experimentální verifikace vytváří zpětnou vazbu s všeobecným významem. Zřetelnou linií vedoucí ke dnešku vytvořili vědci, kteří vytvářeli základy numerické matematiky. Pro moji generaci měly zásadní význam práce Tichonova a Samarského (kteří se osobně zúčastnili konference SIAN v Praze v roce 1985). Naléhavost získat co nejpřesnější výsledky matematických modelů vedla k tomu, že aplikovaná jaderná fyzika významně přispěla k rozvoji matematických metod v širokém spektru zadání všech vědních oborů. Raketový rozvoj výpočetní techniky našel přínos jaderných oborů nejvýše při formulaci zadání nároků na kvalitu softvéru i hardvéru. Explozivně se zdokonalující výpočetní technika umožnila přibližnými metodami i numericky řešit úlohy, bez jejichž spolehlivé analýzy by nebylo možné provozovat prostorově rozlehlé aktivní zóny velkých jaderných elektráren a jejich komponent. Extrémně rychle probíhal vývoj systémů řízení složitých soustav, mezi které jaderná elektrárna bezesporu patří.

Moderní matematické metody přispívají k řešení, ve kterých použití klasických metod narazilo na bariéry. Významným příkladem a úkolem pro budoucnost jaderné energetiky je hodnocení nadprojektových havárií

s řídkým výskytem a významnými důsledky. Se zřetelem na nízkou četnost poznatků udávalo klasické statistické hodnocení nepoužitelné řešení. Existuje obecnější metodologie aplikovatelná na problémy matematické gnostiky, která je schopná vytvořit robustní řešení s maximem informací získaných i při analýze malých vzorků s nejistými daty.

3. Detektory záření

Rozvoj dozimetrie byl nastartován procesem měření jaderných veličin a interakcemi záření s materiály i organizmy. Vývoj od laboratorního „primitivního“ typu a postupů vyhodnocování naměřených hodnot se rozvinul až k současným účelově aplikovaným, certifikovaným a uživatelsky přátelským postupům, které užívá řada vědních oborů, technických aplikací, lékařských diagnostických i terapeutických přístrojů i ekologicky orientovaných měření. Neustálá inovace dozimetrických aplikací usiluje o zdokonalování dosud široce využívaných technik a detekčních procesů v podmínkách prostředí aplikace. Je zahajována podrobnou rešerší dosavadních dozimetrů zahrnující účel měření, dostupné techniky, užití detekční procesy, legislativní a technické požadavky a analýzu prostředí, pro které jsou systémy měření radiačních polí vyvíjeny. Z poznání nároků na detekční procesy a technologie jsou odvozeny vlastní požadavky na systém dozimetrického měření. Z nich lze následně odvodit volbu metod hodnocení záření a kvalifikovaně vybrat zvolený postup návazných vývojových prací. V následných krocích jsou postupně řešeny problémy volba detektoru, matematické prověření schopnosti plnit zadaný účel, konstrukce dozimetru včetně jeho možné geometrie, elektrická a elektronická část dozimetru, stanovení příjmu energie záření detektorem, stanovení detekční účinnosti, laboratorní vyhodnocování, návrh designu dozimetru a představa o jeho používání. Na takto vytvořené základně jsou odvozeny vlastní zdůvodněné parametry provedení monitorovacího systému. Významnou součástí vývojových prací je náročné matematické modelování od procesu detekce až k hodnocení kvality detekce a zobrazení naměřených výsledků.

4. Umístění detektorů

Laboratorní měření a aplikace prováděné na experimentálních a výzkumných reaktorech vyvinuly v začátcích teorie aktivačních plošných, kulových a lineárních aktivačních detektorů a získání informací následným měřením jejich aktivity. Postupný vývoj kladl na umístění detektorů extrémní požadavky. Komplikací je a bude nutnost regulace výkonu reaktoru od toků z externího zdroje až k výkonovým hladinám, tedy od šumových detektorů až k mikrokalorimetrům. Významná byla nutnost umístit detektor a vyvedení signálu nejen do blízkosti aktivní zóny, ale přímo do extrémních toků energie, chladiva i mechanického namáhání. Detektor a vyvedení signálu nemá narušit konstrukci aktivní zóny a její okolí, geometrii paliva, proudění chladiva, odvod tepla a mechanickou odolnost palivové kazety. Dodnes vyvinuté detekční systémy jsou v technice reaktorů zcela běžné, bezpečné a spolehlivé. Přenos do ostatních oborů je evidentní.

Diagnostická měření vedla k zajímavým aplikacím aktivační analýzy. Rychlá a přiměřeně přesná informace o jaderných a termodynamických poměrech v jaderném reaktoru dává možnost optimalizovat jeho provoz se zřetelem k bezpečnosti a hospodárnosti. V aktivní zóně lze tento požadavek plnit vhodným uspořádáním paliva a absorbátorů, vhodnými algoritmy regulace a organizací změn poloh paliva při dalších výměnách.

Vnitroreaktorová měření poskytují podklady pro omezení provozních parametrů. V současné době jsou používány jako detektory termočlánky, mikrokalorimetry a samonapájecí detektory. Vznikly i unikátní systémy např. kuličkový měřicí systém (SIEMENS KWU), pracující na bázi aktivačních detektorů. V aktivní zóně je systém trubiček (16 až 32) do kterých se tlakovým dusíkem zavádějí ocelové kuličky obohacené vanadiem. Po aktivaci neutrony a vyvedení kuliček na měřicí stůl je změřena polovodičovými detektory lokální aktivita a s pomocí předem provedené kalibrace se určí rozdělení toku neutronů. Programové vybavení počítače oprostí naměřené hodnoty od systematických chyb, mezi nimiž je zejména vysoká ztráta počtu registrací při vysokých hustotách toku neutronů, rozpad ^{52}V mezi koncem aktivace a počátkem měření a pozadí. Takto korigované počty impulsů tvoří základ pro výpočet výkonové hustoty a rozdělení vyhoření jaderného paliva.

Zajímavá diagnostická metoda je založena na Fourierově transformaci libovolného signálu pocházejícího z identifikovaného prostředí ale měřeného mimo něj. Převod časové reprezentace na zobrazení závislosti frekvence – amplituda zjistí frekvence vydávané jednotlivými komponentami systému. Každý z těchto zdrojů vydává kmity s frekvencí danou vlastními hodnotami a vlastními funkcemi. Pokud porucha změni vlastnosti systému nebo okrajové podmínky, projeví se změna posuvem frekvence píku. Po informacích získaných v učití periodě lze lokalizovat poruchu bez zásahu do systému. Rozvoj šumové diagnostiky je dalším přínosem jaderných oborů, které je využívají právě pro možnost nezasahovat do měřeného prostředí, ale sběr dat (teplot, tlaků, výstupů z ionizačních komor, akustických signálů, atd.) mimo měřený prostor.

5. Materiály

Globálně lze konstatovat, že nároky na jaderné materiály pro soudobé jaderné elektrárny jsou odvozeny od vlastností chladiva, tj. vody. Výjimkou je oxid uranu – palivo. Vlastnosti vody určují teploty pokrytí, tím tlaky chladiva a následně dimenzování primárního okruhu včetně tlakové nádoby, teplotu páry, projekt parogenerátoru a celý sekundární okruh i odvod tepla z turbíny. Dosavadní úsilí vytvořit další generace jaderných reaktorů musí vystoupit z omezení daného vodou a zvolit jiná chladivo a teplotonosná média. Vlastnosti plyných chladiv jsou známé. Možností dosáhnout pokrok jsou významně omezené a mohou být aplikovány jen po náročném výzkumu, který usiluje o pokrok zejména v dosažení vyšší termické účinnosti.

Dominantní význam chladiva platí i pro jadernou fúzi. Dosažení kritické hodnoty Lawsonova kritéria je obtížným úkolem, ale neřeší odvod tepla a využívání energie uvolněné fúzí. To zůstává z hlediska naší generace v nedohlednu.

Pro jaderně energetické aplikace byly zkoumány vlastnosti plynoucími z pravděpodobnosti interakce s jaderným zářením včetně produktů těchto interakcí a schopnosti dlouhodobě a spolehlivě vykazovat radiační stabilitu a mít vhodné mechanické a teplofyzikální vlastnosti. Byly vyvinuty „jaderné“ materiály na bázi uranu, plutonia, hliníku, hořčíku, grafitu, berylia a zirkonia (ale také austenitických ocelí) pro tepelné reaktory a slitiny na bázi niklu, vanadu a niobu popř. grafitu pro rychlé reaktory. Možnost využít sodík nebo eutektikum sodík draslík vedly k dosažení významných výsledků volbou okruhů ze speciálních materiálů s účelově vyvinutými čerpadly, průtokoměry a parogenerátory. Přesto nepěkná představa interakce sodíku s vodou vede ke zdrženlivosti. V analogické poloze je možnost chlazení vysokoteplotních reaktorů plyny.

Pozitivní vývoj zaznamenala volba materiálu tlakové nádoby třetí generace, která nevyžaduje vnitřní ochranu nádoby problematickým návrhem nebo plátováním.

Materiály pro jakékoliv jaderně energetické technologie musí bez ohledu na znalostní bázi nauky o materiálu a oborů materiálového inženýrství projít vývojem, který prověří vedle jaderných vlastností a klasických požadavků jako je tuhost, pevnost, životnost, tvarovou stabilitu a korozní odolnost v pracovním prostředí, tj. jak za zvýšených teplot, tak v korozním prostředí a v poli jaderného záření.

Správný výběr materiálů má vliv na cenu zařízení, jeho Pro jaderné reaktory vyšších generací to vedle vyrobiteľnosti, zpracovatelnosti, spolehlivosti, bezpečnosti a životnosti budou: mechanické vlastnosti, dostatečná pevnost za tepla a pevnost při tečení za tepla, odolnost vůči tepelným prutím, cyklickému namáhání a křehkému porušení, korozní odolnost a tvarovou stabilitu zejména u pokrytí palivových článků, přímý a rychlý odvod tepla spojený s malými dilatacemi, nízká absorpce neutronů (s výjimkou paliv a absorbátorů), radiační stabilita, odolnost proti radiačnímu poškození, vysoká čistota, neboť i malé změny v koncentracích mohou vést k významným změnám vlastností, vyrobiteľnost, snadné mechanické opracování včetně svařování a rychlé a levné výroby, dostupnost a cena.

6. Konstrukce

Charakteristickým stavebním prvkem moderní jaderné elektrárny je ochranná obálka - kontejnment. Ta tvoří poslední bariéru proti úniku radioaktivních materiálů do životního prostředí. Podcenění kontejnmentu jako součásti multibariérového systému vyústilo po havárii v Černobylu v totální devastaci širokého okolí, zatímco ve Three Mile Island zůstal téměř všechen radioaktivní inventář lokalizován. Havárie ve Fukušimě ukazuje, že bez ochrany do hloubky (deep defense), zejména dostatečného chlazení je ochranná obálka omezeným řešením. Nádrže vody na vrcholu kontejnmentu (Westinghouse), nebo zásobníky vody uvnitř i vně ochranné obálky jsou řešením pro ochranu v počátečních fázích havárie. Odvod tepla je nezbytné zajistit již od prvního použití paliva až k době snížení zbytkového výkonu na zanedbatelné hodnoty. Konstrukce jaderné elektrárny je reflexí rovnováhy mezi vývinem a odvodem tepla. Z nedodržení rovnováhy plyne výskyt mimořádných stavů a havárií.

Stroje a zařízení byly vyvíjeny ke stále větším rozměrům a výkonům. Např. parní turbíny byly v padesátých letech dimenzovány na 100 MW v ohrnutí s dnešními až 1650 MW na jedné hřídeli.

7. Termomechanika

Experimentální výzkum a teoretické práce v oboru sdílení tepla byly rozvíjeny s vědomím klíčového významu mezi vývinem tepla a jeho odvodem pro zatížení materiálů a bezpečnost. Významným přínosem jaderné energetiky je extrapolace poznatků do extrémních hustot výkonu a to za situace, kdy překročení přípustných teplot paliva a dalších významných komponent znamená výskyt mimořádného stavu. Výkonové hustoty aktivní zóny až k hodnotám 90 MW/m³ s rychlostí proudu chladiva v husté palivové mříži aktivní zóně do 8 m/s jsou extrémní a obvyklé jen v nevelkém počtu oborů a to krátkodobě. Jistě jsou obory, ve kterých je využití extrémních hustot výkonu krátkodobě nutné. V jaderné energetice se však jedná dlouhodobé zatížení extrémními přenosy výkonu, vlivy radiace a toky chladiva v extrémní blízkosti ke kritickým hodnotám z hlediska spolehlivé ochrany materiálů s vlastnostmi degradovanými provozními

procesy (koroze, vyšlehávání, vibracemi...). Termomechanika aktivní zóny kompletovala teplofyzikální nároky na extrémně zatížené systémy o plnění podmínek:

1. Entalpie nebo teplota chladiva na výstupu z horkého kanálu musí být menší, než je přípustná hodnota (u tlakovodních reaktorů to bývá entalpie na mezi sytosti).
2. Dosažené výsledky diagnostických metod, prostředků a identifikace jsou běžně šířeny do vědy i techniky všude tam, kde je žádoucí. Teplota pokrytí palivového elementu horkého kanálu musí být menší, než je jeho přípustná teplota.
3. Teplota paliva v horkém kanále musí být nižší, než je maximální přípustná teplota.
4. Hustota tepelného toku nejvíce zatíženého palivového elementu musí být menší, než je přípustná hodnota (u lehkovodních reaktorů je to hodnota ještě bezpečná vzhledem ke kritické hustotě tepelného toku).

8. Diagnostika

Diagnostické systémy mají v jaderné energetice za sebou dlouhodobý vývoj. Jsou již po desítky let postupně nasazovány a zdokonalovány v jaderných elektrárnách. V současné době jsou jejich nezbytným vybavením. Při vyhodnocování signálů se účinně uplatňují moderní matematické metody i prostředky umělé inteligence. Do vývoje diagnostických systémů v jaderných elektrech byly se zřetelem na jejich význam pro bezpečnost investovány prostředky, které si může málokterý systém dovolit. Proto jsou přínosem pro světovou vědu a techniku.

Jejich přínos je evidentní jak pro provozní kontrolní měření dynamických veličin a stavových hodnot tak pro měření prováděná při odstavení reaktoru. Oba typy měření se orientují na kontinuální i časově vymezená měření dynamických veličin, měnících se s různou rychlostí od velmi vysoké až po kvazistacionární, porovnání naměřených hodnot se známými (vzorovými) průběhy a identifikací anomálií, získání informací o stavech zařízení, funkční spolehlivosti a integritě systému. Poskytují zdrojové informace prostředkům umělé inteligence.

Pro včasnou detekci anomálií a poruch významných systémů bylo na různých jaderných elektrárnách vytvořeno rozdílně kompletované vybavení. Veličiny vystupující z měřících tras ve formě složitých signálů jsou zpracovávány metodami statistické analýzy tak, aby byl získán jejich informační obsah. Volba metod a zpracování naměřených veličin jako celku musí splňovat tyto podmínky: integrální kontrola velkého rozsahu zařízení a dosažení jednoduchého zavedení snímačů i pro velmi nepříznivé pracovní podmínky.

Diagnostická měření využívají experimentální identifikaci jevů s rozmanitou podstatou. Podle původu informace vznikla řada diagnostických systémů. V první skupině takových systémů jsou ty, které se zaměřily na udržení tlaku v okruzích monitorujících vibrace, jevy vyvolané působením volných částí, teplotní jevy, vnější a vnitřní úniky, vznik a růst trhlin, únavové jevy úniky difuzního typu a také specifické jevy typu sippingu. Ve druhé skupině jsou systémy zaměřené na celou jadernou elektrárnu. V nich pracuje systém seizmické detekce, monitorování úniků, monitorování přítomností vodíku, kontrola vodního režimu, radiační kontrola, kontrola odpadů, kontrola výpustí a kontrola personálu. Třetí skupina je zaměřena na lokalitu a její okolí, obsahuje měření radiační situace v okolí a rozptylové podmínky. Všechny tři systémy jsou napojeny na počítačový systém zpracování informací a jejich uložení, který má vazbu k řízení jaderné elektrárny.

Ve vývoji i v provozním ověřování jsou ještě další systémy. Informace pocházejí z různých diagnostických systémů a nejen se doplňují, ale často i překrývají nebo si mohou i odporovat. Komplexní vyhodnocení však vede k analýze a ke zlepšení informačního obsahu.

Zpracování výsledků může být prováděno například pomocí vzájemně nezávislých modulárních systémů, které jsou napojeny na centrální počítač a tak vzniká integrální informační a kontrolní systém. Druhým extrémem je využití expertního systému, do kterého vstupují měřené hodnoty a znalostní báze počítačového systému umožní jejich vyhodnocení.

9. Robotika

Jaderná zařízení vyžadují periodické i účelové inspekce a servisní zákroky. Nasazení robotů výrazně snižuje kolektivní dávky, usnadňuje nebo vůbec principiálně umožňuje provedení oprav i v nepřístupném prostoru s vysokou kvalitou. Další výhodou je zkrácená doba kontroly a porovnatelnost výsledků při automatizované nasazení robotů (kvalita je definována a kontrolována). V první generaci robotů šlo o automatizované zavážecí stroje, automaty pro mechanickou manipulaci a pro mechanizaci inspekci i roboty pro automatickou údržbu, svařování a prohlídky komponent a k prohlídkám paliva. Ve druhé generaci se vyvíjely roboty pro práci na vnitřní inspekci zařízení, pro inteligentní údržbářské výkony a pro manipulaci se zařízením pro rozebírání paliva. Třetí generace znamená vývoj pokročilých robotů pro údržbářské práce. V návaznosti na rozvoj robotiky je perspektivní oblastí nasazení systémů umělé inteligence v oblasti hodnocení diagnostických měření a to v rozumném rozsahu. Při této činnosti nelze se obejít bez robotů pro standardní i nestandardní měřicí systémy. Robotika znamená dostupnost prostoru pro činnost, kterou v něm nemůže vykonávat člověk i prostředek pro získávání dobře definovaných údajů a dobře definovaných zákroků.

Robotizace má rovněž význam pro zkracování periodických odstávek, neboť umožňuje snadný přístup k provádění údržby a spolu se servisním vybavením usnadňuje kontroly, opravy a dokumentaci zákroků i jejich výsledků.

10. Stínění

Významným přínosem rozvoje jaderné energetiky jsou pokroky ve fyzice stínění. Široké spektrum neenergetických aplikací vyžaduje ochranu pracovníků před zářením. Vzhledem k tomu, že úloha na stínění zdrojů má nekonečně mnoho variant řešení v závislosti na prostorovém a materiálovém řešení, je možné při projektu stínění respektovat další požadavky například technologické, teplotnické, cenové, materiálové, nároky na hmotnost a prostor nebo jejich kombinace. Primární dopadající záření vyvolává sekundární záření, které je nutné rovněž stínit. Složitě situace při průchodu záření hmotou vede na mnohavrstevná stínění s lepšími účinky.

Matematické modelování přineslo pokrok ve volbě složitých matematických modelů stínění využívajících řešení Boltzmannovy rovnice a doložených širokou experimentální zkušeností. Podklady získané v jaderné energetice umožňují při návrhu libovolného stínění se vyjít ze zadaného prostorového rozložení zdrojů záření a z jejich fyzikálních charakteristik, jako je typ záření, energetické spektrum a úhlové rozdělení záření.

k porozumění definování pojmů, objasnění rizika jako měřitelné veličiny, poukaz na metody hodnocení rizika a na umění modelovat a ovlivňovat riziko a to nejen náhodně a intuitivně, ale vědecky odpovědně, komplexně a racionálně a při tom s vědomím vztahu mezi ekonomickou náročností a bezpečností, neboť ani bezpečnost není zadarmo.

Hovoříme-li o statistickém a pravděpodobnostním hodnocení, máme na mysli hodnocení náhodných jevů pro poznání té zvláštní příčinné souvislosti, která se vyskytuje u náhodných procesů a která vyjadřuje riziko ne jako předpověď jistého, ale jako možnost očekávaného. O riziku jsou známé zejména tři skutečnosti: neexistuje děj s nulovým rizikem, jakkoliv nízké riziko může přispět ke vzniku následků, osobní riziko se může významně lišit od průměrného

Hodnocení bezpečnosti závisí na délce období, které je hodnoceno. V jaderné technice není určující horizont naší generace ani mnoha generací dalších, ale z hlediska vyhořelého paliva dlouhodobý výhled s odpovědností za výsledek ještě po desítkách tisíc let. Odhad rizika má tři zásadní složky a to: zjištění rizika, tedy identifikaci a kvantifikaci rizika, vývoj rizika, tedy proces vážení a porovnávání různých aspektů bezpečnosti v průběhu času a řízení rizika, tedy formulaci a implementaci bezpečnostní politiky.

Moderní obory, jako je energetika včetně jaderné, letecká doprava, chemický průmysl nebo těžba surovin rozvinuly bezpečnostní analýzy do vysoké dokonalosti. V těchto rozborech řeší nejen klasické bezpečnostní problémy, ale na odhady spolehlivosti zařízení založené na testování malého počtu vzorků, spekulativní úvahy o jevech s extrémně nízkou pravděpodobností výskytu a s velkými následky, odhad vlivu technologického zařízení, systému ochrany a řízení i kvalifikace obsluhy na bezpečnost a spolehlivost, návrhy diagnostických systémů včetně metod hodnocení výsledků, odhady zbytkové životnosti, určení pravděpodobnosti poškození za degradace vlastností zařízení apod.

Nesleduje se jen výskyt jednotlivých jevů, ale zkoumá se pravděpodobnost výskytu řetězce událostí v sekvenční analýze rychlým vytvářením řad historií tak, jak to umožňuje soudobá teorie hloubkou modelů a výpočetní technika operační rychlostí samočinných počítačů. Tak se pravděpodobnostní přístup stává metodou k prognóze chování systémů technických, přírodních i společenských i návodem k racionálnímu opodstatnění budoucího lidského chování. Zejména vlastnosti počítačů umožňují řešit významné problémy: indikace historií, počítačové generování ohromného počtu generací a trendů, podmínek práce a stavu zařízení, detekce havarijních stavů a jejich signalizace, zobrazování poruchových stavů a jejich popis umožňující optimální zákroky, odvození významných poplachů pomocí varovné postupné kontroly a poruchové analýzy, přímé on-line rozhodnutí o rezervě bezpečnosti, automatické testování funkce a schopnosti řídit ochranné systémy ap.

Ani samotné statisticko - analytické hodnocení systémů zaměřené na bezpečnost a spolehlivost, ani diagnostika stavů a kompletace datovýchází nejsou konečným cílem. Tím je možnost kontrolovat, ovlivňovat a řídit míru rizika. Po identifikaci tedy musí dojít k rozhodnutí, kterým může být podloženo povolení, omezení nebo zamítnutí dané činnosti. Takové rozhodnutí lze ovšem provést jen na bázi, kterou tvoří vedle fyzikálního poznání a technického popisu i příslušné normy, pravidla a předpisy, které určují co a za jakých okolností je přijatelné, licencovatelné, průkazně spolehlivé a bezpečné a jak rozumět kvantifikaci

relevantních pojmů. Veličiny, které se měří za provozu zařízení, nemají všechny přímý vztah k bezpečnosti. Ty, které tento vztah mají, jsou předmětem zvláštní pozornosti. Tak například v jaderné elektrárně jsou specifikovány charakteristiky, které mají vztah k jaderné, technické i radiační bezpečnosti a ty jsou pak sledovány nejen provozovatelem, ale také dozorčími orgány, ustanovenými státem.

Ve druhé polovině dvacátého století byly stále precizněji na základě světové vědy definovány standardy bezpečnosti, i když dodnes nedošlo k vytvoření mezinárodně závazných řešení. Doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) energii vymezila dělicí rovinou mezi přijatelnými a nevhodnými přístupy a řešeními. V tomto rámci přední světoví výrobci i provozovatelé využívají vlastní, i když vzájemně odlišná řešení.

12. Spolehlivost

Spolehlivost je definována jako pravděpodobnost plnění dané funkce za daných podmínek a v čase. Pro jaderné elektrárny je průkazem spolehlivosti nejvyšší doby plného provozu na nejvyšším výkonu proto, aby byly využity vysoké měrné náklady. Takovou spolehlivost dosahují jaderné elektrárny již dlouho. Dokazuje to vyšší dodávka elektřiny z jaderných zdrojů v USA i po odstavení některých z nich. Druhým dokladem je jaderná elektrárna Dukovany nejen s vysokým ročním využitím, ale i se zvýšením původního výkonu.

Zvýšení výkonu a ročního využití není jen technickou a fyzikální záležitostí. Provozovatel musí přesvědčit dozorné orgány, že zvýšením využití se nesníží nároky na diagnostická měření a bezpečnost systému jako celku.

Zvyšování výkonu má své meze. V průběhu roční odstávky na dílčí výměnu paliva jsou prováděna požadovaná měření. Zkracování doby na jejich provedení může vyvolat stresové situace a tím ohrozit bezpečnost soustavy. V tomto smyslu je významný pokrok jak z hlediska možností lidského činitele, tak robotika a její využití pro manipulační práce. Na zvýšení spolehlivosti se podílí významná řada technických oborů.

13. Stress testy

Definice zátěžových testů (stress tests) byla formulována primárně v dokumentu WENRA (Western European Nuclear Regulatory Association) publikovaném 23. března 2011 s cílem posoudit (re-assessment) míru bezpečnosti jaderných elektráren ve světle událostí které se projeví v Fukušimě jako následku extrémních přírodních jevů vedoucích k těžkým nehodám. Očekávaným výsledkem měla být preventivní identifikace velkých nehod, analýza bezpečnostní funkce a opatření ke zvládnutí situací a informace o odezvě zařízení a účinnosti preventivních opatření, případně identifikace slabých míst a mezních jevů v extrémních situacích. Speciální pozornost měla být věnována nehodám s tavením paliva (Loss of Coolant Accident) a následků hromadění vodíku a rovněž bezpečnému odvodu tepla ze skladů vyhořelého jaderného paliva. Zadání vycházející z expertízy WENRA je zřejmou reakcí soustředěnou rámcově na poznané souvislosti havárie na Fukušimě Daiiči. Council of the European Union deklaruje, že „**bezpečnost všech jaderných zařízení má být znovu analyzována na bázi úplného (comprehensive) a transparentního hodnocení rizika**“. Držitelé licence měli dodat takto rámcově definované výsledky

v šestiměsíční lhůtě národním regulačním úřadům. Proces definovaný jako stress test měl identifikovat potenciál pro zvýšení bezpečnosti z technického a organizačního hlediska.

V obecném povědomí je stress test mostu. Ten sestává z teoretické analýzy vztahů mezi napětím a relativním prodloužením ve vybraných místech, klasicky testované tenzometricky po zatížení konstrukce a dalšími zkouškami v rozsahu překračujícím běžné namáhání (zatížení mostu tanky). Odezva zatěžované konstrukce je předem teoreticky vyhodnocena a výsledky testu, tedy přezkoušení jako experimentální prověření teoretické hypotézy. Z tohoto hlediska není použití termínu zátěžový test v souladu s běžným pojetím. Navíc evokuje proces (stress test jako nadměrná zátěž viz angl. slovníky) nového teoretického přezkoumání a následného zatěžování stavební a technologické části, hardvéru i softvéru a také provozovatelů a obyvatel nad povolené hodnoty s cílem zjistit odolnost systému proti takto chápaným přetížením. Ze zadání zátěžových testů plyne, že se nejedná o experimentální odezvu na překročení povolených parametrů, ale výhradně o nové teoretické posouzení a vyhodnocení. V této dikci se samozřejmě nejedná o zátěžový test, ale spíše o vypracování textu, který ve své podstatě i se zřetelem k době plnění nemůže přinést zásadně nové poznatky. Náklady na splnění takového zadání požadovaného na všech státech EU nebudou malé. Bohužel se vadný pojem stress test rozšířil i do bankovního sektoru do formy teoretických evaluací mimořádných stavů a procesů. I tam převzetí termínu pokulhává, protože jinak se pracuje na „stress testech“ v klidu kancelářů a jinak za okolností runu na bank nebo krachu IPB.

Pokud by jednorázová potenciální odhalení plynoucí ze „zátěžových testů“ odhalila slabiny jaderné elektrárny vedoucí k omezení nebo zastavení jejího provozu, byl by to opožděný důkaz dříve provedeného vadného povolovacího řízení a rozhodnutí o provozu. Vědomosti z relevantních fyzikálních, technických a společenských věd a z nich vyplývající provozní zkušenosti, směry vývoje a racionálně odvozené strategické vize jsou tak obsáhlé a oborově rozsáhlé, že jejich krátkodobá revize není ani myslitelná. Kontinuita dosavadního vývoje a jeho hodnocení je hodnotou, kterou nelze krátkodobě a formálně přehlédnout. Proto lze jen s nepatrnou pravděpodobností očekávat významný přínos akce „zátěžové testy“. Technologie a nároky na lokality jsou již odborně specifikovány. Očekávání velkého skoku z analýz testů není na místě. Zaujetí „dokonalejšího“ přístupu k hodnocení nadprojektových havárií je zřejmou účelovou reakcí na japonskou havárii.

Mimo dosah racionálních úvah zůstávají nadprojektové havárie, jejich iniciaci, rozvoj a následky lze určit jen expertním odhadem, tedy ne zkušeností nebo prověřením. K jejich vzniku a následků z nich plynoucích může dojít z příčin, jejichž mnohotvarost a extrémně nízká pravděpodobnost je mimo dosah racionálního myšlení z něho plynoucího jednání. V analogické poloze je řada dalších rizikových činností prováděných ve světovém měřítku pod povrchem Země, na jejím povrchu i nad ním. Nadprojektové riziko je fenoménem, který plyne z možnosti výskytu jevů, které ať již samotné nebo ve spolupůsobení s jinými **nelze úplně ani odhadnout ani technologicky zohlednit a zejména ne financovat**. Nadprojektové riziko je součástí odpovědnosti, kterou bere ať již vědomě nebo ne lidský druh za činnosti, které mu přinášejí prospěch.

Vztah mezi přínosy jaderné energie vztažené k riziku nemá charakter přesně specifikovaného problému. Je úlohou řešenou za nejistých podmínek. Rizika využívání nebo zamítnutí nejsou řešitelná v horizontu neznámého rozvoje Země a jsou i zůstanou „rozhodnutím bez záruk“.

Deklarovaný výsledek zátěžových testů, který požaduje Council of the European Union ve formulaci „bezpečnost všech jaderných zařízení má být znovu analyzována na bázi úplného (comprehensive) a transparentního hodnocení“ je z principu nedosažitelný.

Dodatek ke stress testům na téma Fukušima – chlazení - sanace

Přes neúplné informace, které jsou k dispozici lze k Fukušimě a k postoji TEPCO konstatovat několik zjevných selhání:

- ✓ Projekt vyžadoval splnit v Japonsku požadavky na umístění jaderné elektrárny a prověřit bezpečnost proti tsunami zjištěním, zda v poslední periodě jednoho sta let nebyly v lokalitě tsunami převyšující 15 m. To bylo splněno. Z literatury lze ale zjistit, že v roce 1896 byly v dotčené lokalitě vlny až do výše 18 m. Pokud by dozor nesplnil své povinnosti jen formálně, ale se širším rozhledem, potom umístění elektrárny a skladu vyhořelého paliva o několik metrů výše, které by stálo jen cenu delšího potrubí pro chlazení mořskou vodou, by tak vyloučilo souběžné působení vln a zemětřesení.
- ✓ Zásobní nádrže odolné proti zemětřesení a situované nad elektrárnou by znamenaly sice další investici, ale vyloučily by úděsnou krajní možnost nouzového chlazení mořskou vodou.

Současně deklarované opatření proti úniku radioaktivní vody s náklady půl miliardy dolarů je kapkou v odhadu nákladů na sanaci ve výši 800 miliard dolarů. Zpracování paliva poškozeného tavením, působením mořské vody a zřejmě dalšími faktory neumožňujícími bezpečnou manipulaci při sanačních pracích, je zadáním, pro které bude nutné vypracovat a dozorem schválit projekt i postupy. Zpracování zasoleného a spečeného paliva v dosud neidentifikované stavu je bez zkušeností. Dosavadní práce jsou zřejmě omezeny na zabránění únikům další bariérou a nemají charakter sanace.

Mementem a rizikem zůstává fakt, že např. jaderná elektrárna Onagava byla v době havárie ve Fukušimě zcela bez ochranných hrází proti tsunami.

14. Uzavření palivového cyklu

Povolení provozu jaderných elektráren je v současné době ve vyspělých zemích vázáno na průkaz schopnosti bezpečně uzavřít jaderný palivový cyklus. Podmínkou dalšího využívání jaderné energie je tedy vypracování a realizace moderně pojeté strategie nakládání s vyhořelým palivem, které musí uspokojit nejen odborníky, ale i veřejnost. Významný podíl na vyvedení radioaktivního inventáře z biosféry mají geofyziky a geotechnika.

Strategické rozhodnutí zaměřené na ukončení palivového cyklu musí být přijatelné z mnoha hledisek a respektovat fyzikální složení vyhořelého paliva, chemické vlastnosti štěpných produktů a z nich plynoucí retenční vlastnosti, technologické provedení konce části cyklu a vytvoření dlouhodobých bariér a nakonec charakteristiky radioaktivního inventáře po jejich definitivním uložení.

Analýza podle jednotlivých štěpných produktů ukazuje, že hlavními přispěvateli k celkové radioaktivitě po jednom roce od ukončení provozu jsou čtyři rozpadové řetězce:

^{90}Sr - ^{90}Y , ^{106}Ru - ^{106}Rh , ^{137}Cs - ^{137}Ba , ^{144}Cs - ^{144}Pr a to s izotopem ^{134}Cs a aktinidem ^{241}Pu . Po 100 letech se totální radioaktivita sníží na jednu čtyřicetinu původní hodnoty s tím, že štěpné produkty ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{137}Cs a ^{137m}Ba

přispívají 80% celkové aktivity. Dlouhodobé aktinidy mají dominující podíl na aktivitě po 1000 letech (98%) a po 10 000 letech (94%). Převažující radioizotopy v této době jsou ^{239}Pu , ^{240}Pu a ^{241}Am (po 100 letech) a ^{237}Np , ^{239}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu a ^{241}Am (po 10 000 letech). Sledování extrémně dlouhých časů (100 000 let) ukazuje, že hlavním štěpným produktem je ^{99}Tc a aktinidem ^{239}Pu , které spolu s těmi členy rozpadové řady uranu, které se vyskytují v přírodě, vytvářejí hlavní podíl radioaktivity. Radioizotopy vznikající z konstrukčních materiálů tvoří menší podíl radioaktivity v porovnání se štěpnými produkty a aktinidy.

Teplo generované ozářeným palivem významně ovlivňuje manipulaci, skladování a zpracování vyhořelého paliva. Počáteční tepelný výkon pochází převážně ze štěpných produktů, asi po 60 - 70 letech dojde k vyrovnání tepelného výkonu štěpných produktů a aktinidů. Příspěvek produktů aktivace je jen malý a jen mírně převyšuje v první dekádě 2 % celkového množství. V průběhu střední periody (100 - 1000 let) jsou z hlediska vývinu tepla významné izotopy aktinidů ^{238}Pu , ^{239}Pu a ^{241}Am , zatímco ^{239}Pu a ^{240}Pu jsou dominantní pro 100 000 let. Aktinid ^{239}Pu je hlavním zdrojem tepla po stu tisíci letech.

Data o radioaktivním inventáři a) ukazují na současnou detailní znalost složení radioaktivních materiálů v jejich časovém průběhu. V porovnání s dříve užívanými vztahy, které počítaly totální zbytkový výkon a střední hodnoty emisních hustot záření alfa, beta a gama, dnešní znalosti orientované ne jednotlivé radionuklidy jsou kvalitním zdrojem poznání až do časových intervalů řádově milionů let, jsou zdrojem informací pro následné výpočty transportních a technologických procesů spojených s přímým uložením i s přepracováním, c) jsou zdrojem informací pro určení retenčních charakteristik dočasných i trvalých úložišť. Retenční vlastnosti vztažené k sorbčním vlastnostem hostících hornin a k rozpustnosti ve vodě mohou určit transportní trajektorie a tím ohrožení životního prostředí. Matematické modely retence jsou dnes provázeny velkoobjemovými experimenty v horninách podobného složení, jaké bude mít očekávané trvalé úložiště, jsou podkladem pro výpočty vývinu tepla v dočasných i trvalých úložištích, jsou zdrojem poznání pro navazující odhady rizika z konce palivového cyklu.

Ponecháme-li stranou nepravděpodobná řešení konce jaderného palivového cyklu, jako je na příklad vyvezení raketou z dosahu zemské přitažlivosti, jsou reálné pouze dvě varianty a to přímé uložení nebo přepracování s následným využitím uranu a plutonia a s uložením odpadů z přepracování. Obě vyžadují v koncové fázi spolehlivé uložení mimo biosféru.

Koncepce trvalého uložení radioaktivních materiálů je založena na systému několika relativně nezávislých bariér navržených tak, aby toxické nuklidy přítomné ve vyhořelém palivu, a rovněž tak HLW zůstaly izolované trvale od člověka a přírody. Vyhořelé palivo a radioaktivní materiály je nutné skladovat tak dlouho, pokud se jejich radioaktivita nesníží na míru, která by neohrozila ani vzdálené generace a to se zřetelem ke všem možným scénářům úniku. Bariérový systém je vytvořen ze subsystémů tří základních bariér: blízkého pole, geosféry a biosféry. Zkušenosti s vyvedením HLW z biosféry mají význam i pro další obory pracující s rizikovými materiály charakterizovanými vysokou životností.

15. Alternativní zdroje

„Obnovitelné zdroje s výjimkou vody nejsou konkurenceschopné. Využití obnovitelných zdrojů energie souvisí s celkovou ekonomickou situací a legislativou daného státu. Obnovitelné zdroje jsou obvykle chápány jako ekologické. Na ekologickou politiku vyčleňuje stát jen tolik prostředků, kolik umožní státní rozpočet. Pokud společenská objednávka preferuje některé oblasti, např. čistotu ovzduší nebo nezávislost na dovozu paliv, potom lze počítat s dotační politikou. Teprve potom se mohou doplňkové zdroje stát součástí systému využívajícího různé zdroje tedy i doplňkové“ (Čs. časopis pro fyziku, 2.2002).

Postavení obnovitelných zdrojů energie tedy bylo známé již před více než deseti lety. V současné době, kdy sdělovací prostředky poukazují na energii generovanou mimo jiným i generátory, ale prodávanou jako ze solárních elektráren je na místě následující poznámka:

Současná podpora obnovitelných zdrojů ve výši 44 miliard Kč ročně umožňuje konstatovat, že za období šesti let dosáhne souhrnná podpora výše investičních nákladů na dostavbu Temelína, s životností 80 let.

16. Lidský činitel

Tím, že člověk zavádí nové technologie podložené novými vědeckými poznatky, vstupuje do programů, pro které nemá úplný systém pravidel, praktik a znalostí, neboť provozní zkušenosti a reálná bezpečnost, spolehlivost a úspěšnost projektu mohou být hodnoceny až na základě dlouhodobého užívání. Změnám ve výrobním procesu vždy bylo nutné přizpůsobit nejen technologii, ale také člověka. Dlouhodobý vývoj se neobešel bez kroků do neznámých typů procesů, do neočekávaného selhání, do adaptivního poznávání a epochy zrání projektů až ke společenské přijatelnosti. Tak vznikly nároky na novou kvalitu technického poznání a z něho odvozené nové technologie i na adekvátní kvalifikaci pracovníků všech úrovní a profesí. Problém kvalifikace pro nové technologie je komplikován proto, že nové technologie jsou zaváděny ve velmi krátké době se zřetelem k očekávanému přínosu nebo k dosažení priority na světových trzích, aniž by byl identifikován problém zralosti člověka pro ně.

Přes pokroky dosažené při nahrazování lidské práce mechanizací, automatizací, zaváděním robotiky, využíváním počítačů a prostředků umělé inteligence včetně budování expertních systémů zůstává člověk nedílnou součástí výrobních procesů v osvědčených i nově zaváděných technologiích. To se týká zejména jaderné elektrárny, která je složitým systémem z definice.

Závažnými výsledky přispěla k jaderné bezpečnosti a radiační ochraně analýza spolehlivosti. Pohledy vpřed na třetí a další generaci jaderných elektráren ukazují mimořádné nároky na širší angažovaných oborů. Žádná škola nemůže dát vzdělání v energetice, ale může dát vzdělání budoucím odborníkům v oborech, které kompetenci společnosti podporují. Vlastní zaměření na výkon profese je pak na systémech, do kterých absolventi škol vstupují, tedy ve vědě, výzkumu, projektování, výstavbě, provozu, dozoru nad bezpečností, v odpadovém hospodářství.

Postavení lidského činitele v jaderné energetice se vyvíjelo paralelně s jadernými technologiemi a neobešlo se bez vad v přístupu. Vývoj komponent „za pochodu“ vedl k nasazení prvků a systémů, které nebyly dlouhodobě spolehlivě prověřeny. Od rozšiřování znalostí již osvědčených odborníků, kteří přecházeli z

„klasické“ energetiky, přes využívání simulátorů v kvalifikačním procesu až po moderní pochopení lidského rizikového potenciálu se rozvíjely metody a prostředky využívané v procesu přípravy a zvyšování kvalifikace.

Mechanické porovnání spolehlivosti „stroje“ a člověka bylo doplněno poznatky o vlivu fyziologických a psychologických stresorů, populačních stereotypů a životních rytmů. Poznání chybového potenciálu člověka zaměřilo projektanty blokových dozoren na vytvoření systémů, jejichž spolehlivost nezávisí na okamžitém zásahu obsluhy. Kromě systému blokování nežádoucích a chybných činností a instalace ochran byl zaváděn automatizovaný systém řízení, ve kterém rozhodování po nehodě neprovádí lidská obsluha, ale programově strukturovaný počítačový systém.

Do havárie na TMI se vycházelo z toho, že správně připravený specialista je schopen doplnit bezpečnost zařízení na 100%. Havárie TMI nebyla první havárií jaderného zařízení, ale její vliv na veřejnost byl tak hluboký, že se stala impulsem pro skutečně vědecké komplexní hodnocení vlivu lidského činitele na provoz jaderných elektráren (Kémeny Report). Ze selhání lidí byly vyvozeny důsledky pro další nároky na člověka v jaderném programu.

Nově se přistupuje k hodnocení chyb, vzniklých selháním člověka. Chybový potenciál člověk není nulový. Poznávány jsou vlivy fyziologických a psychických stresorů a populačních stereotypů. Každá chyba je v současné době objektem zkoumání a předmětem analýzy i poznání. Vzhledem k objektivní nemožnosti dosáhnout stoprocentní spolehlivosti člověka je nutné, aby v této analýze nebyl člověk chápán jako viník, ale jako zdroj pravděpodobných příčin chybných zásahů. Tak při hodnocení spolehlivosti systému vystává úkol odhalit typické chyby operátorů, určit jejich relativní váhu ve výsledné poruše systému a odstraňovat nebezpečí vzniku chyb a jejich rozvoje.

Příčinami poškozování přírody jsou zejména lidská neznalost a selhání člověka při plánování a uskutečňování jeho výrobních činností, explozivní rozvoj hospodářských činností a růst počtu obyvatel planety. Člověk by měl být schopen dlouhodobě řídit procesy včetně svého bytí na planetě Země. Dílčí úspěchy jsou při tom významné, ale nepředstavují frontální útok na problémy a tím na snížení energeticky orientovaného napětí mezi technikou.

17. Sociální problémy

Každý velký objev, který lze využít ve prospěch společnosti, má svou jedinečnou historii a své jedinečné charakteristické rysy. Jeho objevitelé i uživatelé mají své sny, starosti a obavy. A ve stejném postavení jsou i další skupiny lidí tak, jak je vtahuje sféra zájmů tvořená vývojem objevu a jeho využitím. Protesty proti novým technologiím nejsou výlučným problémem jaderné techniky. Své příznivce i odpůrce má každý změna ve společnosti a zavedení nových výrobních postupů a zavedení nových paliv takovou změnou bezesporu je. U jaderného programu je obava z projeveného rizika opodstatněná a vývoj nehodovosti v jaderném programu ji přesvědčivě nevyvrací. Jisté stále hraje významnou roli fakt, že prvním velkým využitím objevu štěpení byl vývoj a použití jaderných zbraní.

Původně byl hlavní oblastí zájmu vliv ionizujícího záření na lidský organizmus, poté reaktorová bezpečnost, zejména rozsah následků havárií s únikem radioaktivních materiálů do životního prostředí. Dnes se

argumentace protijaderného hnutí soustřeďuje zejména na problém dlouhodobých radionuklidů a na otázku nešíření jaderných zbraní. V této souvislosti je potřebné připomenout, že převážná většina radioaktivních odpadů vznikla v souvislosti s vývojem jaderných zbraní, proti kterému nikdo neprotestoval, protože o něm ani nebyl informován. Představa, že šíření jaderných zbraní lze zabránit zákazem jaderné energetiky, je ovšem mylná. Je všeobecně známo, že žádná jaderná velmoc nezískala štěpné materiály, potřebné k výrobě jaderných zbraní z jaderných elektráren a to proto, že obohacení pro oba tyto účely je z fyzikálních důvodů velmi odlišné a plutonium z jaderných elektráren pro vysoký obsah ^{240}Pu není vhodným materiálem pro jaderné zbraně.

Důležitým prvkem protijaderného hnutí je veřejný zájem, tj. zájem občanů o kvalitu životního prostředí. Je to kombinace sociálních a ekonomických motivů, z nichž významné jsou zejména: obavy ze stále se zhoršujícího životního prostředí, strach vyplývající z neznalosti a špatné informovanosti, nechuť nebo odpor k technicky pokročilé společnosti a snaha o návrat do minulých idealizovaných století, nedůvěra ke státnímu aparátu, pocit bezmocnosti při prosazování názorů a požadavků veřejnosti v rámci schvalovacího řízení a skutečný nebo domnělý nezáměr státní byrokracie.

18. Politikum

Současná světová hospodářská krize, sociální problémy, ohrožení přírody, celosvětový boj o zdroje energie, očekávaný nedostatek vody a potravin v kontextu s explozivně rostoucí populací nemají daleko (po studené třetí) k označení „4. světová válka“. Úhrada nákladů na tuto válku nemá v historii obdoby. Již dnes poznání souvislosti ekonomiky a energetiky vytvářejí zásadní problémy pro dosažení a udržení „energetické bezpečnosti“ světa v dlouhodobém pohledu. Nedávné přetrvávající a dosud neřešené finanční otřesy nebyly ani zdaleka předvídané hloubkou a globalitou působení, nejistotou v délce trvání a vlivem na světovou populaci. Absence strategické vize prokazuje zjevnou je bezradnost, se kterou nejsou světově proslulí ekonomové a vlády schopni a tedy kompetentní vědecky fundovaně rozhodnout ani v elementární otázce tj. „investovat a tím dále zvyšovat zadluženost států nebo šetřit a tím krizi prohlubovat“. Růst světové populace o 1,9 % ročně, přírůstek spotřeby elektrické energie 4,1 % a spotřeby energie o 1,8 % ročně spolu se spotřebou vody, která se zdvojnásobí za čtrnáct let, s potravinovou krizí a devastací přírody nenaznačují ve 21. století známé obrysy řešení. Výdaje na energetické hospodářství bude zřejmě problematické dlouhodobě získávat. Pro porovnání: samotný vývoj atomové bomby v projektu Manhattan stál dvě miliardy tehdejších USD, optimistické odhady na udržení a rozvoj dodávky energie a hmot ve viditelném horizontu naznačují nároky na sta až tisíce bilionů. Otřesení důvěry v instituce vymezující stabilitu bankovního systému, hrubé chyby odpovědných osob vykládané post festum jako upadnutí do světových mýtů a současně poznání i dosud neznámé hrozby ohrožují i energetickou budoucnost.

Rizika strategického získávání zdrojů energie, udržení a rozvoje přenosových soustav energie a hmot s časem vzrůstají. Snižování spotřeby pomocí úspor energie je zřetelnou iluzí: demokratická askeze jako omezení vlastní spotřeby ve prospěch budoucích generací není v tržním hospodářství reálným očekáváním. Progressivní projekty, na příklad využívání solární energie v afrických pouštích, výstavba celoevropské

železniční síť pro přepravu kamionů, která by zvýšila bezpečnost dopravy a ušetřila výrazný podíl ropy, využívání solární energie v kosmu, zalesnění Středomoří jako odezva na klimatické změny nebudou právě se zřetelem k celosvětovým finančním problémům zřejmě urychleny.

19. Veřejnost

Problém bezpečnosti nepatří jen do grémií expertů, ale také občanům. Smysluplná diskuze je v nedohlednu. Etická komise SRN má za to, že většině občanů šlo v předchozích jednáních o téma „jaderná energie ano či ne“ ale „dříve nebo později“. Nejde jen o jadernou energii, ale o odpovědnost člověka k přírodě a k příštím generacím.

Opomíjení veřejnosti je jejím pohrdáním.

Francouzský text „Énergies, comprendre pour choisir“ jako podklad k celonárodní diskuzi je výzvou připravit analogický text pro Českou republiku. Jeho cílem je informovat občany o stavu a možnostech energetiky, působit proti dezinformacím, které ovlivňují myšlení obyvatel a tím zabraňují přijímání racionálních řešení a zejména naznačit technicky, hospodárně a společensky přijatelná řešení pro naši republiku ve 21. století.

Rozsah textu pro Francii je evidentně výsledkem odborných diskuzí odborníků energetiků, manažerů, psychologů a politiků. Není proto důvod jím vytvořený rámec zpochybňovat a je spíše na místě vytvořit analogický text pro Českou republiku.

Bezpečná budoucnost Německa spočívá podle etické komise nadále na třech pilířích: nedotčené prostředí, sociální spravedlnost a zdravé životní prostředí. V souvislosti s nimi má vzniknout společné dílo zaměřené na téma „Energetická budoucnost Německa“. Jeho provedení musí plně respektovat finanční a časové možnosti státu. Jedná se proces, který zasahuje společnost do hloubky. Zásadní jsou požadavky na přestavbu struktury energetického hospodářství. Se zřetelem na celospolečenské provedení navržených záměrů deklaruje EK nezbytnost participace všech složek společnosti. Zřejmě jsou obavy lidí spojené s negativními vlivy navrženého řešení na hospodářský rozvoj a pracovní místa. A v nich je účast veřejnosti nezastupitelná.

20. Kompetence pro jaderný program

Vývojové problémy první generace jaderných elektráren vedly již před významnými nehodami ve Three Mile a na Černobyli k růstu kritických hlasů proti jaderným elektrárnám. Teprve po havárii v jaderné elektrárně Three Mile Island byla věnována systémová analýza spolehlivosti lidského činitele. Poznání chybového potenciálu člověka zaměřilo projektanty blokových dozoren na vytvoření systémů, jejichž spolehlivost nezávisí na okamžitém zásahu obsluhy. Kromě systému blokování nežádoucích a chybných činností a instalace ochran byl zaváděn automatizovaný systém řízení, ve kterém rozhodování bezprostředně po nehodě neprovádí lidská obsluha, ale počítačový systém. Malá operační rychlost počítačů v 60. a 70. letech a nízký rozsah paměti počítačů neumožňoval provádění komplexních výpočtů jaderné elektrárny, ale jen nepříliš detailní matematické modelování jednotlivých komponent. Ze stejného důvodu

trpěl počítačovou slabostí i systém řízení. Vývoj komponent „za pochodu“ vedl k nasazení prvků a systémů, které nebyly dlouhodobě spolehlivě prověřeny.

Světový energetický kongres (WEC) akcentoval v roce 2004 tři „a“. **Accesability**, tj. dostupnost energetických zdrojů pro každého, **availability** jako pohotovost energetických služeb zejména z hlediska spolehlivého zásobování a **acceptability**, tedy přijatelnost širokou veřejností. Energetické hospodářství není podle WEC bez splnění tří „A“ ani udržitelné, ani přijatelné. Římský kongres WEC přidal další „A“ tím je **accountability**, tj. odpovědnost politiků, ale také odborníků a veřejnosti za dlouhodobé důsledky rozhodování i váhání. Lidstvo jako celek by mělo projevit svoji kompetenci a vědomě řídit vlastní osudy (pokud to je uskutečnitelné) k méně rizikové budoucnosti.

Kompetence pro kvalifikovaný výkon profese sestává z fyzické, psychické (a morální) způsobilosti, z dosaženého vzdělání včetně celoživotního, z odborného růstu a výkonu odborného působení spojeného s vývojem kariéry. V energetice se nejedná jen o odborníky pro vývoj, výstavbu a provoz elektráren, rozvodných sítí a spotřebičů, ale o spektrum odborností komplexně zahrnující technické a přírodní vědy, ekonomické a právní systémy a politiku jako nástroj rozumného řízení očekávané budoucnosti. Zřetelně také vystupuje kompetence veřejnosti pro „energetickou volbu“. Všechny tyto úrovně mají slabiny, které je nezbytné poznat, pochopit a řešit.

Objem spalovacích technologií v nejbližších desetiletích trvale poroste z dnešních 80 milionů barelů denně. Homo sapiens spálí všechna fosilní paliva, která se mu podaří vytěžit. Zřejmě se nesníží ani poměrný únik zemního plynu při jeho těžbě a přenosu. Metan takto uvolněný do životního prostředí je řádově horším skleníkovým plynem než oxid uhlíku. Nebylo by vhodné dosáhnout politickou shodu a např. pro vybudování transevropské železniční přepravní sítě pro kamiony, která by výrazně snížila spotřebu ropy a bezpečnost dopravy jako celku, zalesňování Středomoří nebo urychlení projektu na využití solární energie v afrických pouštích a tím finanční prostředky směřovat na zaručeně správnou stranu?

Evropský referenční rámec české volby energetiky je vytvářen za dramatické situace se zřetelem k nejasnostem ve vývoji životního prostředí a zásahů člověka do něj, nejistot v investicích do „velké energetiky“ i v otevírání trhu s energií pro obor, u kterého je schopnost tržních mechanismů řešit známé i dosud nedefinované problémy výrazně omezena.

Problém veřejného mínění zůstává v neřešené podobě přesto, že přijatelnost zdrojů energie, přenosových kapacit a soustav spotřeby je se zřetelem na dopad politických rozhodnutí a legitimnímu právu obyvatel podílet se na rozhodovacím procesu klíčové. Takový stav by se měl změnit. Kompetentní veřejnost musí mít přístup ke srozumitelně formulovaným informacím. Měla by být seznámena s úsilím o udržení setrvalého rámce české energetiky a s jeho vývojem, který dodrží technologická, geopolitická, ekologická a bezpečnostní pravidla společná všem státům Unie.

K diskuzi o budoucnosti jaderné energie pro Českou republiku by proto přispěla informace zaměřená jak na veřejnost, tak na ty z rozhodujících činitelů, kteří nejsou specialisty, ale přesto by nepovažovali informace v ní obsažené za nadbytečné.

21. Státní energetická koncepce

Usnesením vlády České republiky č. 211 ze dne 10. března 2004 byla schválena Státní energetická koncepce, která měla být aktualizována v tříletých intervalech. Více než pětileté překročení této lhůty ukazuje, že formulace základních tezí vymezujících taktické i strategické postupy usilující o minimalizaci

rizik při dlouhodobém spolehlivém zabezpečení přiměřené nákladné energie naráží na bariéry, z nichž zřejmě nejzávažnější je politická neschopnost dosáhnout shody v úpravách přijatého textu SEK v průřezu politických stran. Projednání koncepce vládou je jen dílčím pokrokem. O tom bude možné hovořit až po

získání významného souhlasu poslanců. Zástupci průmyslu k textu zaujmou svá stanoviska. Pokud ale nebude SEK zveřejněna ve srozumitelné verzi ve sdělovacích prostředcích, potom se jedná o přijetí jen na dvou oporách: politické a průmyslové, tedy bez veřejnosti. Tak by mohla být SEK, jako dříve, potenciálně nestabilní. Teprve tři body určují rovinu, která vytvoří pevnější základ. Tak energetický problém pochopila odborná i politická veřejnost v SRN při rozhodování o změně struktury zdrojů energie opouštěním jaderné energetiky.

V nejasné poloze jsou postoje Evropské Unie. Třetí balíček k energetice zřejmě ztratil svoji platnost a jeho nezbytná inovace, která by byla přínosem v době rozhodování o dostavbě JE Temelín, není ani anoncována.

22. Jaderná energie a změna klimatu

Přes dohodu dosaženou na FCCC (The Central Climate Change Agreement) redukovat emise na úroveň 1990 k roku 2000, více než polovina průmyslových zemí zvýšila emise z roku 1990 nejméně o 10%. I v Evropské unii po přechodném snížení produkce skleníkových plynů jejich tvorba poroste, podle odhadu Zelené knihy EU do roku 2030 o 30% proti roku 2000. Nedávné studie DOE USA poukázaly, že globální emise k roku 2020 budou o 70% nad hranicí roku 1990, se čtyř až pěti násobkem navýšení vyvolanému v rozvojových zemích. Oxid uhlíku není jediným skleníkovým plynem. Přesto se o ostatních nejedná. Metan unikající při těžbě a přepravě zemního plynu je mimo zájem ekologů.

V rozporu se závazkem EU z Kjóta snížit emise skleníkových plynů do roků 2008 – 2012 o 8% dosáhlo 15 členských zemí EU snížení pouze o 2,9%. Evropská Komise konstatovala, že v Evropě nelze dosáhnout významné snížení emisí CO₂ bez využití jaderné energie. Při tom neočekáváme, že země jako Indie a Čína přijmou stejný závazek jako např. EU. Nebudou-li na základě přezkumu energetické strategie EU přijata opatření, potom emise skleníkových plynů dále porostou.

Podpora výroby energie z jaderných zdrojů představuje možnost snižování emisí CO₂. Tato skutečnost by mohla být významným aspektem v rámci jednání o budoucích systémech pro obchodování s emisemi.

Celosvětově jaderné elektrárny pokryly 38 % zvýšení spotřeby elektřiny od roku 1973. Za předpokladu, že tato kapacita by jinak byla vybudována v elektrárnách na fosilní paliva, přispěla jaderná energie významně ke snížení emisí CO₂. Při výrobě jednoho milionu kWh elektřiny z uhlí se do atmosféry uvolní 230 t uhlíku, při výrobě z ropy 190 t a ze zemního plynu 150 t. Za normálních podmínek vyrobí jaderná elektrárna stejně

množství elektřiny v podstatě bez emisí sloučenin uhlíku. Ponechání jaderné alternativy otevřené by podpořilo nejen snížení emisí, ale i další rozvoj aplikací jako je výroba tepla, pitné vody a vodíku.

Jaderná energie je proto jednou z dostupných možností snížení emisí CO₂. Zpráva IEA (2006) uvádí k prodloužení životnosti jaderných elektráren v EU úspory na 148 Mt CO₂ odstraněných emisí. I proto by mělo zůstat využívání jaderné energie i nadále otevřené. Využívání uhlíkových a uhlovodíkových paliv ohrožuje světové klima. Základním rozporem v ohraně klimatu je fakt, že fosilní paliva zůstávají hlavní základnou světové energetiky.

23. Vyřazování z provozu

Vyřazování z provozu je závěrečnou fází životního cyklu jaderného zařízení. Do roku 2025 bude nutné v EU vyřadit z provozu asi jednu třetinu ze 152 jaderných elektráren. Vyřazování z provozu je technicky složitá operace, na jejíž provedení je nutné vynaložit 10 až 15 % prvotní investice každého vyřazovaného reaktoru.

V prvních desetiletích rozvoje jaderné energetiky byl důraz kladen na získání experimentálních a technologických znalostí. Výzkumné ústavy zabývající se experimentální činností produkovaly nebývale velký radioaktivní inventář a nakládaly s ním nejvýše v souladu s tehdy velmi měkkými předpisy. Těžba uranu transportovala na zemský povrch uran, který rozpadovými produkty kontaminoval životní prostředí. Těžba uranu byla zvláště riziková, pokud byly využity jiné metody, než hornická hlubinná těžba. Pokusy s jadernými zbraněmi v ovzduší vytvářely zdroj, který počal měřitelně ovlivňovat zdraví populace.

Výsledkem rozvoje jaderných technologií byla hrozba kontaminace životního prostředí. Ta nabyla rozměr významného problému. Vyřazování jaderných elektráren z provozu bude dalším problémem, který nastolí nutnost využití chemických věd, geofyziky a geotechniky.

Jaderná energetika netvoří až dosud významný podíl nároků na odpadové hospodářství. Dosavadní zkušenosti s likvidací experimentálních zařízení a jaderných elektráren nižšího výkonu prokazují, že problém je řešitelný. Sanační metody využívají zkušenosti získané při likvidaci experimentálních reaktorů a jaderných zařízení. Klíčovými slovy jsou průzkum distribuce radioaktivního materiálu a jeho složení, uvolňování do životního prostředí, poznání koncentrace radioaktivního materiálu, vývoj obalových souborů pro radioaktivní odpady všech úrovní, nakládání s nimi a ekologická přijatelnost úložišť.

24. Vývoj jaderných elektráren, legislativa, výzkum, projekty

Světový i evropský výzkum v jaderné oblasti je soustředěn na klíčové problémy politického a společenského významu, jako jsou inovativní cykly. Výzkumné a vývojové práce rozšiřují světový výzkumný prostor v oblasti jaderného štěpení a tím pokládají základy k vývoji nových jaderných technologií. Věda a výzkum využívají zkušenosti nabyté dlouhodobým provozem jaderných elektráren při vývoji pokročilých typů lehkovodních, rychlých a také fúzních reaktorů.

Při rozhodování o dalším rozvoji jaderné energetiky jen nutné odpovědět na otázky:

1. Lze uspokojit energetické potřeby lidstva bez jaderné energie?

2. Je riziko jaderné energetiky přijatelné v porovnání s jejím přínosem?

Současná věda a technika nezná kromě rychlých štěpných reaktorů (a později snad fúzních reaktorů) žádný jiný zdroj, který by mohl svým potenciálem dlouhodobě, tj. s výhledem na tisíce roků, vyřešit hrozbu vyčerpávání paliv. Slučování lehkých jader je ovšem také jadernou technologií včetně nakládání s radioaktivními odpady. Alternativní zdroje nelze postavit kdekoliv.

Na nové jaderné elektrárny jsou kladeny požadavky, které respektují současní výrobci, vyvíjející nové typy jaderných elektráren. Jsou to zejména: životnost až 60 let, roční využití větší než 90%, zavážení paliva v cyklu od 12 do 24 měsíců, pravděpodobnost poškození aktivní zóny nižší než jedna miliontina za rok, pravděpodobnost úniku velkého množství štěpných produktů nižší než desetimilióntina ročně, velmi nízké dávky z povolání, krátká doba výstavby. Dále jsou na nové projekty kladeny požadavky: zjednodušení inženýrských systémů, redukci jevů v chybové analýze, nízký vliv selhání lidského činitele, nízké náklady na inspekci a údržbu, zdokonalenou havarijní analýzu s minimem externích souvislostí.

Vyvíjené reaktory navazují na provozní zkušenosti získané dlouhodobým provozem. Projekty jaderných elektráren nové generace jsou vyvíjeny dvěma směry. Evoluční cesta je extrapolací vývoje zdokonalováním jaderných elektráren s využitím dlouhodobých zkušeností cílená na vysoce bezpečné jaderné elektrárny konkurenceschopné s uhelnými. Dalším směrem je vývoj projektů jaderných elektráren s inherentní bezpečností, orientovaných na pasivní bezpečnost. Cílem je vyvinout jadernou elektrárnu, která by dosáhla nové kvality využitím jednoduché koncepce bezpečnosti. Zvláštní kapitolou jaderné energetiky je vývoj reaktorů s rychlými neutrony. Vhodným uspořádáním aktivní zóny lze dosáhnout toho, že rychlý reaktor vyrobí více štěpitelného materiálu, než sám spotřebuje. Taková zařízení vyvíjela Francie, Velká Británie, Japonsko a USA. Jadernou energii lze využít nejen k výrobě elektrické energie, ale také jako zdroje procesního tepla v průmyslu. Teplota chladiva v reaktoru není omezena jaderně fyzikálními vlastnostmi, ale materiálovými a termohydraulickými požadavky. Proto lze získat výstupní teploty až tisíců kelvinů.

Má-li jaderná technologie přispět k vyřešení problému pokrytí budoucích potřeb energie a pomoci potlačit závažné důsledky jiných, dosud používaných zdrojů energie na životní prostředí, potom je nutné, aby se jí dostalo podpory veřejnosti. To lze provést pravdivým informováním o všech souvislostech, které jsou ve vztahu k jaderné energii vysloveny.

Infrastruktura pro konverzi uranu a obohacování i výroby je v EU dostatečná. Evropská jaderná technologie a průmysl mají robustní a dostatečné kapacity pro dodávky, modernizované technologie i jaderného paliva. Dobře zvládnutá je konverze, obohacování a výrobu MOX a přepracování jsou dobře zvládnuté.

Společné studie IAEA a OECD Nuclear Energy Agency ukázaly, že nové jaderné elektrárny v zemích OECD mohou být konkurenceschopné s ostatními elektrárnami za podmínek jako je financování, doba výstavby, regulující pravidla, cena a dostupnost paliv. Charakteristickým rysem nově a vysoce perspektivně vyvíjených jaderných technologií je skutečnost, že vědecká a technická základna jak v poznání, tak pro vývoj a výrobu těchto zařízení využije dosavadní zkušenosti z jaderné energetiky. Odezvu našly požadavky na různé velikosti reaktorů podle velikosti populace, podle potřeb a podle kapacit přenosové sítě.

Po dosažení zralosti jaderných elektráren s lehkovodními reaktory vývoj jaderných elektráren pokračuje se zaměřením na reaktory rychlé a vysokoteplotní. Vývoj dalších generací jaderných elektráren s inherentní bezpečností řadu dnešních námitek odstraní. Při plánování výstavby nových jaderných bloků není však možné nyní čekat a spoléhat se na brzkou dostupnost nových generací, neboť tyto evidentně nebudou na trhu v dohledné době a nemohou uspokojit energetické potřeby příštích desetiletí.

25. Etika energetiky

Dravost rozvoje průmyslu, na kterém má energetika svůj lví podíl, rozvrátila harmonii dřívějšího pomalého vývoje světa. Účelově využití všeho, co je dostupné, bez znalostí a bez zřetele na následky a zejména bez ohledu na příští generace přinesly již své trpké ovoce. Humanizace technických věd má v budoucnosti respektovat etické principy technického myšlení a jednání. Východiskem je porozumění mezi jednotlivými disciplinami přírodních, technických i sociálních věd. Z minulosti existuje bezpočet příkladů, kdy technici pracovali na zásadních problémech bez přírodovědců. Negativní výsledky takových činností nacházíme všude. Proto velké projekty budoucnosti, mezi něž energetika a zvláště jaderná energetika bezesporu patří, budou vedle plnění obchodních cílů zahrnovat i dobře definované etické cíle. Nelze popřít, že průmysl plní své poslání dobře, neboť umožňuje žít většímu počtu lidí a to dobře a dostatek energie je podmínkou jeho úspěšného fungování.

Dnes však již nemůžeme přehlédnout rizika komplexu možných příčin a následků s katastrofickým koncem ve vztahu k energetice. Absolutistické tendence se vždy ukázaly v minulosti pro lidstvo zhoubné. Studium historie může napomoci při hledání správných cest. Dnes již víme, že člověk byl v celé své historii největším škůdcem lesa. Také víme, že člověk má dostatek energie k tomu, aby zničil celou biosféru. Budoucí očekávaný růst lidské moci musí být provázen růstem poznání a růstem odpovědnosti. Při rozhodování nemůže stát stranou etika: Žádná dobrá strategie se neobejde bez respektování systému hodnot, neobejde se však ani bez její petrifikace tak, aby zákonná moc měla dost prostředků pro řešení.

Význam společenských věd se zřejmě projeví ve vzdálenější budoucnosti, ve které je možný vývoj v jedné ze čtyř variant:

1. intenzivní rozvoj populace současného typu technologicky podporovaný a neomezující nároky jednotlivce a bez zásadního ohledu na přírodu (globální neoliberální vize)
2. extenzivní rozvoj s omezením populace na míru odpovídající technologickému pokroku a ochraně přírody a aplikující demokratickou askezi jako omezení vlastních potřeb se zřetelem k příštím generacím (liberální představy)
3. ustálení populace na míře, která umožní relativně bezkonfliktní přežívání lidstva a uplatnění věd ve prospěch lidstva i přírody (humanistický přístup)
4. pád civilizace (apokalypsa).

Aplikace jaderné fyziky vznikaly za vzájemné interakce s významným rozsahem vědních, technických a méně sociálních věd. Inovativní potenciál jaderných oborů byl a zřejmě i nadále bude využíván v širokém spektru oborů. Problémy jaderné, radiační a technické bezpečnosti jsou průběžně zvládnuty. Řešení sporných problémů má charakter kompromisu. V budoucím vývoji budou řešeny s větší vahou společenské problémy. Jaderná energie dala lidstvu vizi dostatku energie i hrozbu jaderných zbraní.