

Hodnocení těsnosti pokrytí paliva na jaderné elektrárně Temelín

Andrlík Michal, Pávková Zdeňka, Martykán Miroslav

Jaderná elektrárna Temelín, Skupina laboratoře, 373 05 Temelín 2

Na jaderné elektrárně Temelín jsou v současné době provozovány dva bloky s lehkovodními reaktory typu VVER 1000-312. Aktivní zónu reaktoru tvoří celkem 163 palivových souborů. Každý z palivových souborů obsahuje 312 palivových proutků. Vlastním palivem je nízcce obohacený uran ve formě keramických pelet UO_2 . Pokrytí těchto proutků tvoří slitina zirkonia - Zirkaloy. Zirkonium je vhodné pro jeho uspokojivé mechanické vlastnosti a zejména nízký účinný průřez absorpce neutronů. Palivové soubory jsou opravitelné, to znamená, že v případě poškození palivového proutku jej lze z palivového souboru vyjmout a nahradit proutkem z nerez oceli.

Dodavatelem paliva je firma Westinghouse. V letošním roce byla na 1. bloku zavezena celá aktivní zóna prvního bloku ruským palivem firmy TVEL. Na druhém bloku je záměna plánována na příští rok. V této práci se popisují zkušenosti s palivovými soubory firmy Westinghouse a to VVANTAGE 6¹, viz obrázek 1.

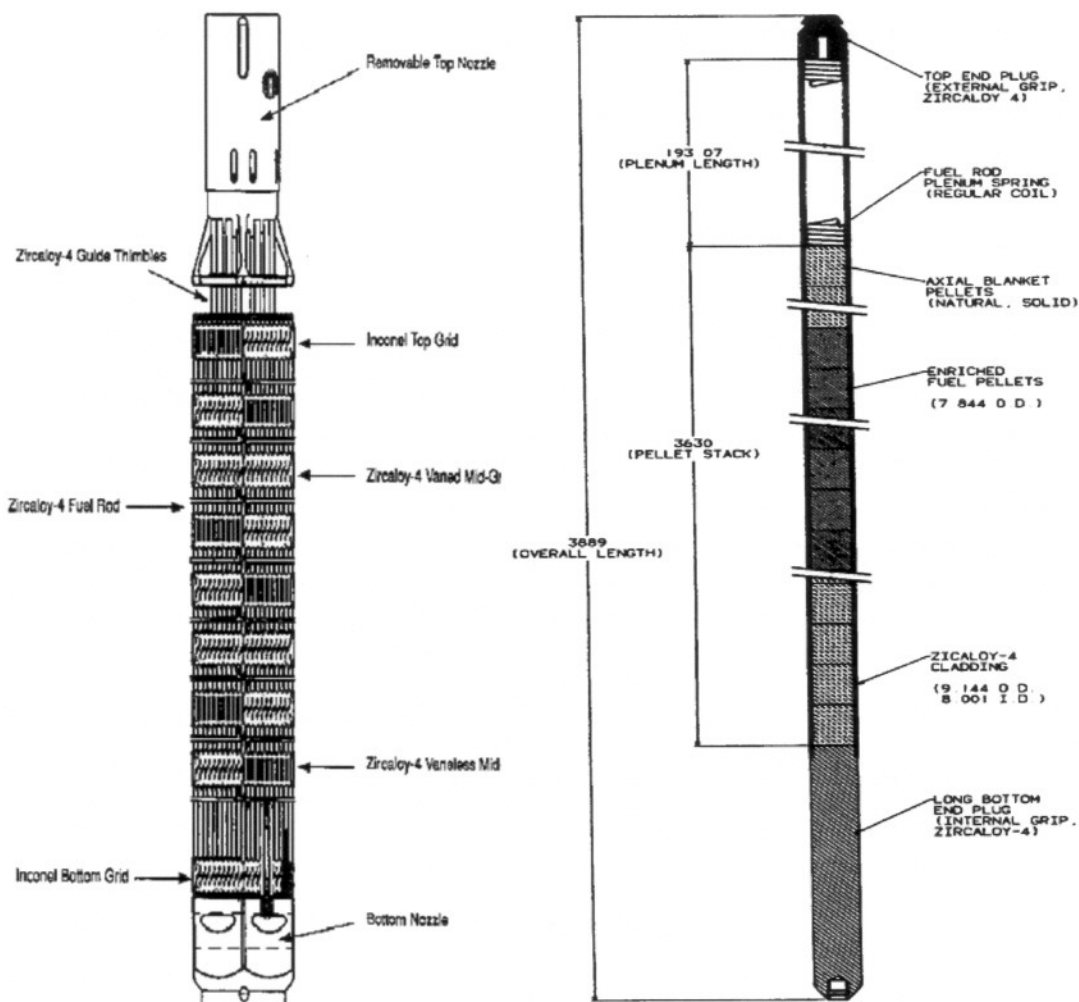
Pro zabezpečení jaderné a radiační bezpečnosti se v průběhu kampaně monitoruje a vyhodnocuje těsnost pokrytí palivových proutků, během odstávky reaktoru pro výměnu jaderného paliva se provádí kontrola těsnosti palivových proutků. Těmto provozním a laboratorním činnostem předcházela:

- rozsáhlá projektová činnost zahrnující i zajištění instrumentálního vybavení s vazbou na technologické systémy a informační systémy chemie i jaderné elektrárny,
- dodávka instrumentálního i technologického zařízení včetně výpočetních programů a informačního systému chemie, jejich uvedení do provozu, předprovozní a provozní vyzkoušení,
- vytvoření hodnotících parametrů včetně jejich kritérií a výpočetních kódů,
- vytvoření řídicí a provozní dokumentace.

Hodnocení těsnosti palivových proutků

Konzervativní přístup k jaderné a radiační bezpečnosti zvolený na jaderné elektrárně Temelín znamená, že se nezavazí palivové soubory s netěsnými palivovými proutky zpět do aktivní zóny. Tento přístup vede k výraznému snižování radiační zátěže personálu při práci na technologii primárního okruhu a velmi pozitivně ovlivňuje množství celkové aktivity vypouštěné do životního prostředí.

Zatímco činnosti za provozu reaktoru se zaměřují na detekci vzniku netěsností na palivovém proutku a predikci jejich počtu tak činnosti během odstávky reaktoru jsou zaměřeny na nalezení poškozeného souboru, nalezení konkrétního poškozeného palivového proutku případně na opravení palivového souboru.



Obr. 1 Palivový soubor a palivový proutek VVANTAGE 6¹

Činnosti prováděné za provozu

Sledování hodnot a trendů naměřených aktivit vybraných štěpných produktů v chladivu primárního okruhu umožňuje detekovat vznik netěsnosti na palivových proutcích.

Palivo firmy Westinghouse uvolňuje při vzniku netěsnosti velmi malé množství štěpných produktů a dokonce i při částečném obnažení paliva nedochází k masivnímu uvolnění aktivity do chladiiva primárního okruhu. Tento fakt velmi příznivě ovlivňuje příkon dávkového ekvivalentu v prostorách technologie primárního okruhu a spolu s konzervativním přístupem, přispívá k nízké úrovni radiační zátěže obyvatelstva v okolí elektrárny. Nicméně pro detekci vzniku netěsnosti je to nespornou nevýhodou.

Základní informaci o těsnosti paliva poskytují aktivity těkavých štěpných produktů, izotopy jódu a vzácných plynů, v chladivu primárního okruhu. Zcela nezastupitelným parametrem je, díky jeho vhodným vlastnostem, jako je dostatečně dlouhý poločas, snadná těkavost z paliva a na rozdíl od vzácných plynů, stálost v kapalném vzorku aktivity ^{131}I . Již vyhodnocením grafické závislosti aktivity ^{131}I na čase lze snadno odhadnout okamžik vzniku netěsnosti. Obdobně lze použít izotopy vzácných plynů ^{133}Xe a ^{135}Xe , avšak jejich aktivity ve vzorcích chladiiva primárního okruhu jsou díky jejich povaze rozkolísané.

Hodnocení pokrytí těsnosti palivových proutků je komplikováno povrchovou kontaminací palivových souborů jemným prachem UO_2 pocházející z výrobního závodu. Jelikož tento materiál také podléhá štěpné reakci, dochází k vytváření konstantního pozadí aktivity štěpných produktů a transuranů v primárním okruhu a to i v případě těsného paliva. Informaci o množství povrchové kontaminace lze získat sledováním aktivity krátkodobých štěpných produktů, jako je ^{134}I . Prakticky ihned po najetí reaktoru na výkon se vytvoří rovnovážná aktivita ^{134}I , která nás informuje o množství štěpného materiálu v bezprostředním kontaktu s chladivem primárního okruhu. Dojde-li k jejímu nárůstu a ustálení na vyšší rovnovážné hodnotě, znamená to vznik netěsnosti s částečným obnažením paliva. Lze říci, že přibýlo množství štěpného materiálu, který je v bezprostředním kontaktu s chladivem primárního okruhu.

Účinnými nástroji popisující stav pokrytí paliva jsou hodnoticí parametry založené na aktivitách izotopů jodu a cesia. V tabulce 1 jsou shrnuty základní hodnocené parametry popisující stav pokrytí paliva za provozu bloku.

Nadstavbovou částí pro hodnocení stavu pokrytí paliva jsou pak různé výpočetní kódy. Na jaderné elektrárně Temelín se podařilo úspěšně uvést do běžné praxe výpočetní kód PEPA-CFM.

Další hodnocení stavu pokrytí palivových proutků poskytuje dodavatel paliva.

Další, informace o stavu paliva poskytuje sledování aktivity korozních produktů, zejména ^{95}Zr , neboť se jedná o konstrukční materiál pokrytí paliva.

Podpůrné informace o těsnosti palivových proutků poskytují aktivity netěkavých štěpných produktů a transuranů. Nárůst jejich aktivity v chladivu primárního okruhu indikuje již obnažené palivové pelety.

Tab. 1 Základní hodnoticí parametry popisující stav pokrytí paliva

Parametr	Vypovídá o	Sledované radio-nuklidy	Podmínky výpočtu/stanovení parametru			
			Podmínky detekce (výpočtu)	Výkon reaktoru	Změna výkonu reaktoru	Jiné podmínky
FRI	Vzniku (počtu) netěsností	$^{131}I, ^{134}I$	Oba izotopy	> 75%	Pod 10% v posledních 3 dnech	Průtok přes ionexové filtry min 15 m ³ /hod
EPRI	Kvantifikování netěsnosti	$^{131}I, ^{134}I, ^{133}I$	Všechny izotopy	> 80%	Pod 5% v posledních 5 dnech	
$^{134}Cs/^{137}Cs$	Integrální vyhoření	$^{134}Cs, ^{137}Cs$	Oba izotopy			(těsné palivo pro povrchovou kontaminaci)
Výpočetní kód PEPA CFM	Povrchová kontaminace UO_2	$^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{89}Kr, ^{133}Xe, ^{133m}Xe, ^{135}Xe, ^{135m}Xe, ^{137}Xe, ^{138}Xe$ $^{131}I, ^{132}I, ^{133}I, ^{134}I, ^{135}I$	Kterýkoliv z nich	> 80%	Pod 5% v posledních 5 dnech	
	Počet a velikost netěsností	$^{131}I, ^{132}I, ^{133}I, ^{134}I, ^{135}I$	Všechny izotopy	> 80%		

Nástroje pro hodnocení těsnosti palivových proutků

1 Základní hodnoticí parametry

– WANO FRI (World Asociation of Nuclear Operators; Fuel Reliably Indicator)

Tento indikátor slouží k porovnávání hermetičnosti paliva mezi různými typy reaktorů světovým společenstvím provozovatelů jaderných elektráren WANO. Jedná se o aktivitu ^{131}I za stacionárního výkonu reaktoru korigovanou na povrchovou kontaminaci paliva, kontinuální čištění chladiva, výkon reaktoru a hustotu výkonu palivových souborů¹.

$$FRI = \frac{A_{131_I} \left(\lambda_{131_I} + \frac{Q_p}{V_p} \right)}{(\lambda_{131_I} + B_n)} - k \frac{A_{134_I} \left(\lambda_{134_I} + \frac{Q_p}{V_p} \right)}{(\lambda_{134_I} + B_n)} \left(\frac{L_n * 100}{LHGR * P_0} \right)^{1,5} [Bq \cdot g^{-1}],$$

kde:

A_{131_I} aktivita ^{131}I [kBq/g],

A_{134_I} aktivita ^{134}I [kBq/g],

L_n referenční lineární výkon [18 kW.m⁻¹],

LHGR průměrný lineární výkon při nominálním výkonu [kW.m⁻¹],

$k=0,0318$ koeficient korekce povrchové kontaminace,

P_0 střední výkon ve sledovaném období [%],

λ_{131_I} rozpadová konstanta ^{131}I [s⁻¹],

λ_{134_I} rozpadová konstanta ^{134}I [s⁻¹],

Q_p průtok chladiva přes iontové filtry kontinuálního čištění [m³s⁻¹],

V_p objem primárního okruhu [m³],

B_n referenční rychlost čištění [2.10⁻⁵ s⁻¹].

Palivové soubory od jednotlivých světových výrobců se výrazně liší hodnotou FRI pro přítomnost netěsnosti v aktivní zóně reaktoru.

– Hodnocení dle EPRI (Elektrik Power Research Institut)

EPRI indikátor popisuje velikost defektu, který je dán rovnicí:¹

$$EPRI = \frac{A_{131_I} - k_{131_I} A_{134_I}}{A_{133_I} - k_{133_I} A_{134_I}},$$

kde:

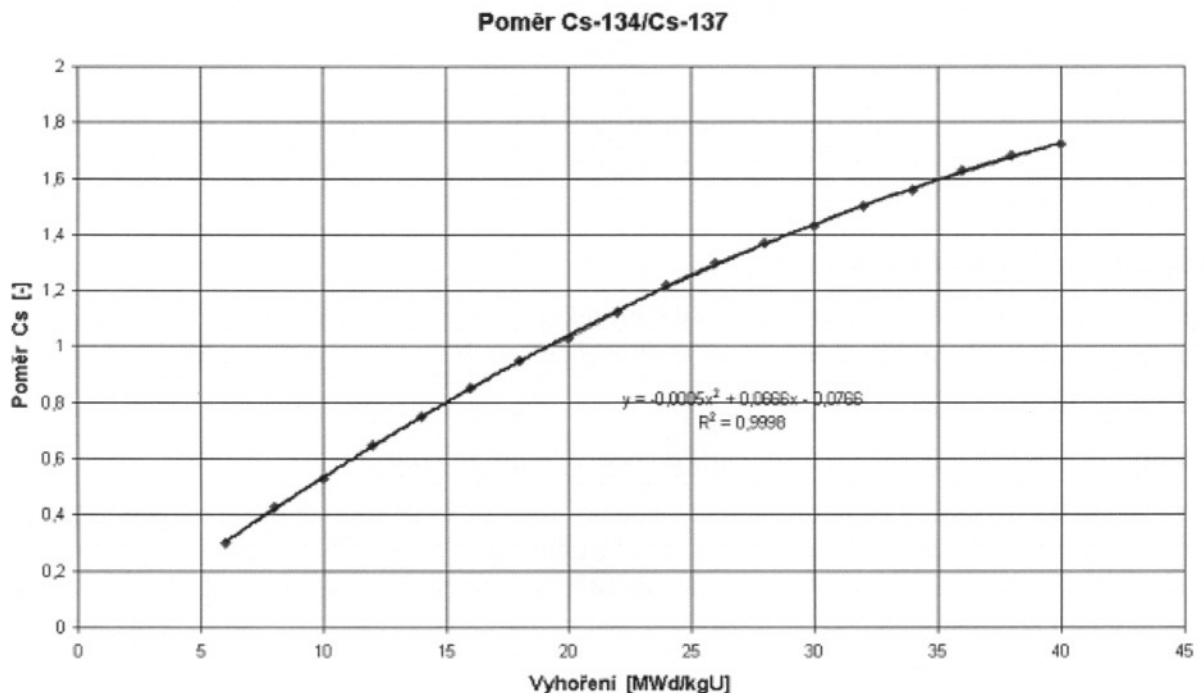
$$k_{x_I} = \frac{\frac{\lambda_{x_I} y_{x_I}}{\lambda_{x_I} - q}}{\frac{\lambda_{134_I} y_{134_I}}{\lambda_{134_I} - q}},$$

q - rychlost čištění chladiva primárního okruhu,
 y - kumulativní výtěžek štěpení,
 λ - rozpadová konstanta,

Při hodnotě EPRI $\geq 0,7$ hovoříme o tzv. mikrodefektu a při hodnotě $0,2 \leq \text{EPRI} \leq 0,5$ lze říct, že v aktivní zóně existuje makrodefekt¹. Pod pojmem mikro/makrodefekt si nelze představit geometrickou velikost poškození pokrytí palivového proutku. Přesněji ji lze specifikovat jako množství inventáře poškozeného palivového proutku, ze kterého unikají štěpné produkty do chladiva primárního okruhu s dostatečně rychlou kinetikou. Toto je výrazně ovlivněno kompaktností pelet a zatěsněním volného prostoru uvnitř proutku způsobené růstem pelet v důsledku narušení krystalové mřížky hromadícími se štěpnými produkty.

– Poměr $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$

Je-li v aktivní zóně přítomen netěsný palivový proutek, pak, během výkonové změny reaktoru, dochází k výraznějšímu uvolňování štěpných produktů. Z poměru cesií, $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, během tohoto spiku, lze poměrně snadno odhadnout stupeň integrálního vyhoření poškozených palivových proutků¹. Je-li v aktivní zóně přítomen pouze jeden netěsný palivový proutek, lze ho považovat za absolutní vyhoření tohoto poškozeného proutku, viz Obrázek 3.



Obr. 3 Stanovení integrálního vyhoření

2 Výpočetní kód PEPA-CFM

PEPA CFM je výpočetní kód, jehož výstupem je, za provozu reaktoru, odhad počtu netěsných palivových proutků, typ netěsností (malá, střední, velká) a úroveň povrchové kontaminace palivových souborů UO_2 . Kód je založen na řešení bilančních rovnic popisujících interakci všech procesů vstupujících do přenosu hmoty v primárním okruhu¹. Při výpočtu jsou započteny tyto děje:

- štěpení atomů ^{235}U ,
- samoabsorpce štěpných produktů v palivovém sloupci,
- uvolnění štěpných produktů z palivového sloupce.
- koncentrování štěpných produktů ve volném prostoru palivového proutku,
- chemické interakce štěpných produktů ve volném prostoru palivového proutku,
- jaderné interakce štěpných produktů ve volném prostoru palivového proutku,
- přenos hmoty mezi expanzním volným prostorem palivového proutku a chladičem primárního okruhu,
- přenos hmoty s chemické interakce štěpných produktů v chladiči primárního okruhu,
- přímý únik štěpných produktů odpouštěním chladiča primárního okruhu,
- únik kontinuálním čištěním chladiča primárního okruhu,
- doplňování kyseliny borité,
- radioaktivní přeměna štěpného produktu.

Pro výpočet pomocí tohoto výpočetního kódu se užívají aktivity izotopů jodu a vzácných plynů, jejichž rozpadová konstanta λ je v rozmezí 10^{-7} - $10^{-3} s^{-1}$.¹

3 Hodnocení dodavatelem paliva

Dodavatel paliva poskytuje na základě doručených dat hodnotící zprávu o stavu pokrytí paliva. Součástí hodnotící zprávy je odhad počtu a velikostí netěsností a odhad integrálního vyhoření poškozených palivových proutků.

Činnosti prováděné za odstávky

K nalezení souboru s netěsným palivovým proutkem se používá metoda sipping, vizuální kontrola a kontrola ultrazvukem. K opravě poškozeného souboru slouží zařízení MSIO (Mobilní Stend Inspekce a Oprav).

Nalezení netěsných palivových souborů pomocí metody sipping

Na jaderné elektrárně Temelín jsou k dispozici dvě zařízení umožňující provedení sipping testu. **Sipping on-line**, který je součástí zavážecího stroje a **sipping off-line**, což je samostatné zařízení, skládající se z ovládacího kabinetu a uzavíratelného pouzdra v bazénu skladování vyhořelého jaderného paliva.

Sipping on-line

Jedná se velmi jednoduchý a časově nenáročný test, který je schopen s vysokou pravděpodobností, nalézt soubory s netěsným palivovým proutkem. Výhoda tohoto testu spočívá

v tom, že probíhá přímo při překládce paliva v pracovní tyči zavážecího stroje a není zapotřebí dalších manipulací s palivovým souborem.²

Změnou hydrostatického tlaku při zvedání palivového souboru dochází k uvolňování aktivního depozitu do vnějšího okolí. Po zasunutí palivového souboru do tubusu pracovní tyče se začne se pod palivový soubor vhnět tlakový vzduch. Drobné bublinky vzduchu strhávají uvolněný ¹³³Xe. Tato směs je kontinuálně nasávána a vedena přes měřicí komoru měření gamma aktivity pomocí scintilačního detektoru NaI(Tl)².

Tento test vyžaduje 2 minuty navíc oproti běžné manipulaci s palivovým souborem. V tomto časovém intervalu je palivový soubor zasunut v horní poloze pracovní tyče a probíhá měření. Během těchto dvou minut je zakázán pohyb zavážecího stroje, aby nedošlo k náhodnému přerušení měření.

Vyhodnocením četnosti pulzů na energii 81 KeV, při totální absorpci ¹³³Xe, je palivový soubor vyhodnocen jako **těsný / podezřele netěsný / netěsný**, viz obrázek 4. Kritéria pro jednotlivé prahy se počítají podle následujících vztahů:

- podezřele netěsný

$$Bi = Mni + KBi \sqrt{Mni} \quad [\text{imp/s}], \quad 2,4$$

- netěsný

$$Ci = Mni + KCi \sqrt{Mni} \quad [\text{imp/s}], \quad 2,4$$

kde:

Mni - průměrná hodnota četnosti při testování 10 těsných palivových souborů [imp/s],

$KBi = 6$ (empiricky stanovený parametr pro **podezřele netěsný** palivový soubor),

$KCi = 10$ (empiricky stanovený parametr pro **netěsný** palivový soubor).



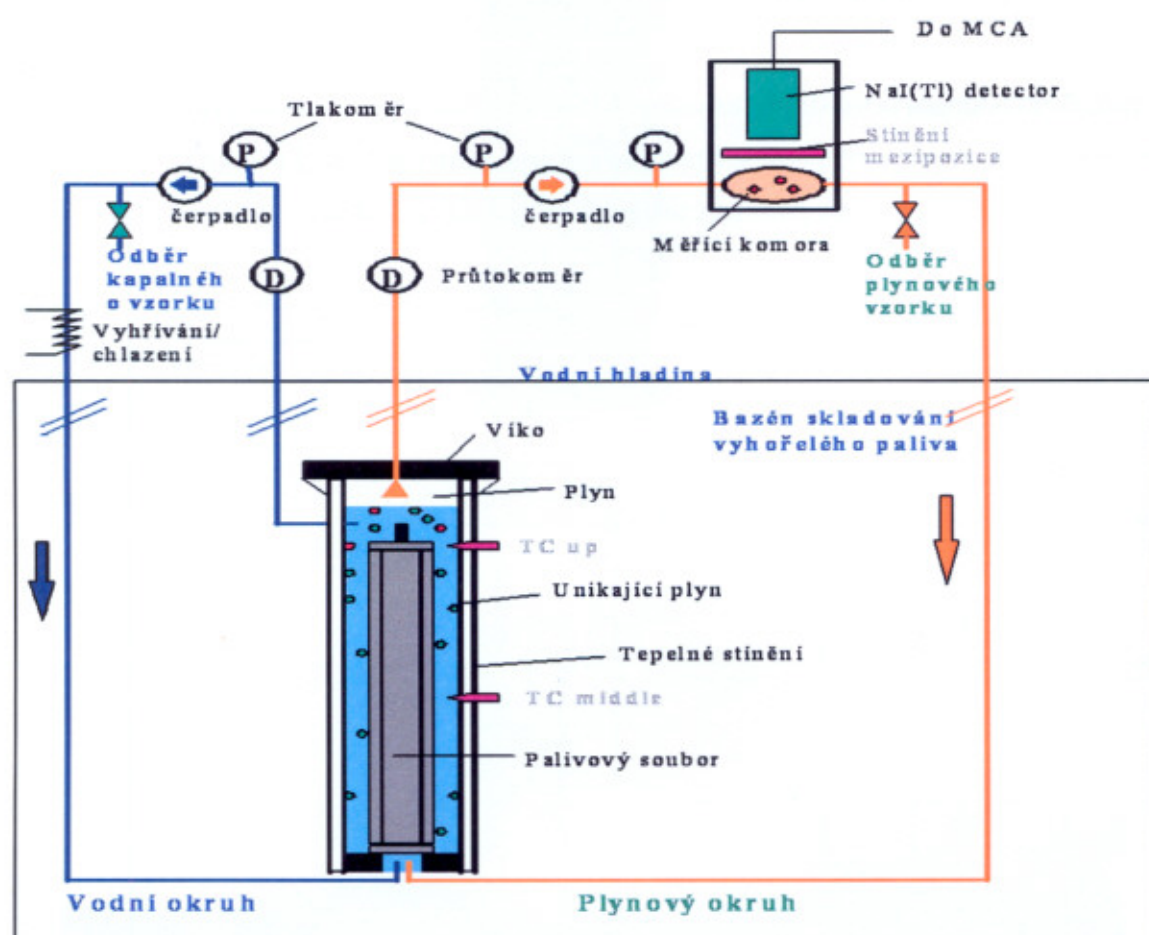
Obr. 4 Záznam on-line sipping testu⁵

Sipping off-line

Tento test, kromě nalezení netěsného palivového souboru, umožňuje i stanovení vlastnosti netěsnosti na palivovém proutku. Rozlišujeme dvě varianty tohoto testu, kvalitativní a kvantitativní off line sipping test.

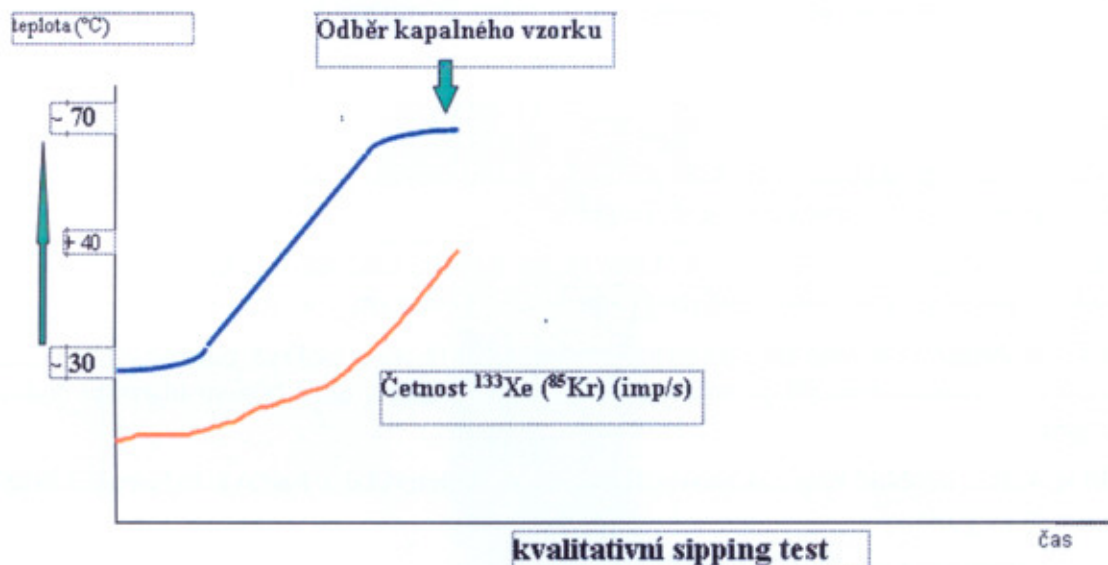
Při obou testech se zaveze testovaný soubor do uzavíratelného pouzdra v bazénu vyhořelého paliva. Palivový soubor se v průběhu testů řízeně zahřívá na určené teplotní plato. K tomu je spolu se zbytkovým výkonem souboru využíváno přídavných ohříváků. Pouzdrem je probubláván vzduch z uzavřeného plynového okruhu a protéká jím voda z uzavřeného vodního okruhu. Změnou teploty dochází k uvolňování radionuklidů z netěsného palivového proutku do pouzdra a postupnému ustálení rovnovážné aktivity v uzavřeném plynovém a vodním okruhu. Zařízení umožňuje kontinuální měření aktivity v plynovém okruhu pomocí scintilačního detektoru NaI(Tl) pro detekci ^{133}Xe respektive β -plastik pro ^{87}Kr . Navíc je možný odběr kapalného a plynového vzorku, které lze analyzovat pomocí laboratorní gamaspektrometrie. Schéma zařízení je zobrazeno na obrázku 5.

Při **kvalitativním testu** je soubor nahříván pouze na jedno teplotní plato a rozhoduje se pouze, je-li soubor těsný nebo netěsný. Jeho časová náročnost je přibližně 2 hodiny. Dojde-li během tohoto testu k nárůstu aktivity, je soubor prohlášen za netěsný. V závěru testu se odebrá kapalný vzorek pro vyhodnocení pomocí laboratorní gamaspektrometrie, viz obrázek 6.

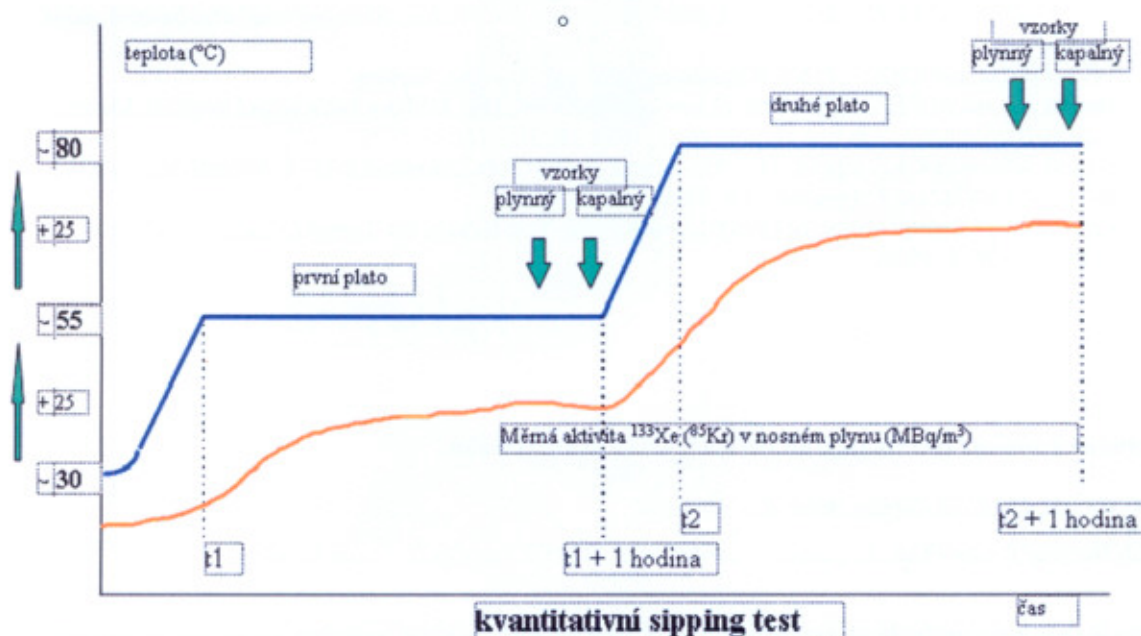


Obr. 5 Schéma zařízení off-line sipping⁶

Při **kvantitativním testu** dochází opět k nahřívání palivového souboru, nejprve na první teplotní plato. Po zastavení nárůstu aktivity v plynové smyčce se odebere plyný a kapalný vzorek a pokračuje se s ohřevem na druhé teplotní plato. Zde se opět čeká na zastavení nárůstu aktivity a odebírají se opět oba vzorky pro laboratorní gamaspektrometrii, viz obrázek 7. Na základě kinetiky ustavování rovnovážného stavu aktivity v plynové smyčce lze stanovit ekvivalentní velikost netěsnosti.



Obr. 6 Kvalitativní off-line sipping test⁶



Obr. 7 Kvantitativní off-line sipping test⁶

Oprava poškozeného palivového souboru pomocí MSIO

Palivové soubory prohlášené na základě výsledků z on/off-line sipping testu za netěsné je možno opravovat pomocí zařízení pro kontrolu klastrů MSIO3. Toto zařízení bylo dodáno v souvislosti s přechodem na rozebíratelné palivo firmy Westinghouse. Zařízení umožňuje pomocí vizuální kontroly a ultrazvuku a nalézt poškozený palivový proutek a ten, případně nahradit plným proutkem z nerezové oceli.

Opravený palivový soubor lze zavézt zpět do aktivní zóny. Dochází tak k šetření finančních prostředků, neboť jinak by se tento soubor musel nahradit novým palivovým souborem, případně již použitým.

Závěr

Cílem příspěvku je poskytnout základní přehled o monitorování a hodnocení těsnosti pokrytí palivových proutků na jaderné elektrárně Temelín.

Jsou zde popsány nejdůležitější nástroje, které slouží k hodnocení stavu pokrytí paliva za provozu bloku a metody vyhledávání palivových proutků s netěsným pokrytím během odstávky.

Takto již v počátku nastavené monitorování a hodnocení těsnosti pokrytí palivových proutků je úspěšně ověřováno nejen při provozu a odstávkách reaktoru, ale i během inspekci dozorných orgánů.

Podařilo se velmi úspěšně implementovat francouzskou metodiku a nastavit vyhovující kritéria pro americké palivo^{2,4}.

Tato práce představuje zdařilou aplikaci radioanalytických metod v provozu jaderné elektrárny.

1. Interní dokument ČEZ_1,2TC013/8 Celoblokový provozní předpis, Monitorování a hodnocení stavu pokrytí paliva
2. Interní dokument ČEZ_1,2TS169 Systémový provozní předpis, Sipping
3. Interní dokument ČEZ_0TS168 Systémový provozní předpis, MSIO a zařízení pro kontrolu klastrů
4. Uživatelský manuál - On line sipping test systém, OLSSES 1.0
5. Interní dokument ČEZ, Zpráva chemie - Miroslav Martykán, Zdenka Pávková, Vyhodnocení stavu pokrytí paliva HVB2 po 7. kampani, 4.6. 2010.
6. Parrat Daniel, Interpretation of Quantitative Sipping Test Results for Temelin Operators, seminář Grenoble, 19.-23. 4. 1999.

Evaluation of nuclear fuel leakage on nuclear power plant Temelín

Andrlík Michal, Pávková Zdeňka, Martykán Miroslav

Temelin Nuclear Power Plant, Department Laboratories, 373 05 Temelin 2, Czech Republic

The article describes methods of monitoring and evaluation fuel cladding including prediction of leakage fuel rod during the unit operation in Temelin NPP. It describes procedures to inspect fuel assemblies by sipping test and their repair during the outage.