

M. Najžer
 Institut "Jožef Stefan"
 Jamova 39, Ljubljana

PREVERJANJE VPLIVA NEVTRONSKEGA SEVANJA NA
 POVEČANJE KRHKOSTI TLAČNE POSODE JEDRSKIH
 REAKTORJEV

SURVEILLANCE OF IRRADIATION EMBRITTLEMENT
 OF NUCLEAR REACTOR PRESSURE VESSELS

VSEBINA - Nakazana je problematika preverjanja povečanja krhkosti tlačne posode jedrskih reaktorjev pod vplivom nevtronskega sevanja in njen vpliv na obratovanje jedrskih elektrarn. Opisane so eksperimentalne metode in računalniški programi s katerimi lahko Institut "Jožef Stefan" opravi to delo.

ABSTRACT - Surveillance of Irradiation Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel is briefly discussed. The experimental techniques and computer programmes available for this work at the J. Stefan Institute are described.

1. UVOD

Nevtronsko sevanje iz reaktorske sredice povzroča v steni tlačne posode radiacijske poškodbe⁽¹⁾, zaradi česar se slabšajo mehanske lastnosti posode. Kritično je povečanje krhkosti, kar zmanjša odpornost posode na krhki lom. Zviša se temperatura prehoda iz krškega v žilavi lom (ΔT_{NDT}) kar zožuje obratovalne tolerance. S tem trpi fleksibilnost obratovanja, kar v končni konsekvenci vpliva negativno na razpoložljivost in proizvodno ceno energije. Vpliv sevanja na povečanje krhkosti zavisi od cele vrste parametrov, ki še niso dovolj natančno in zanesljivo poznani. Enako velja tudi za računsko oceno nevtronskega spektra in fluensa na najbolj obremenjenem delu tlačne posode. Zato zahtevajo ameriški zakoni, upravna navodila in standardi^(2,3,4) eksperimentalno preverjanje povečanja krhkosti v predpisanih časovnih intervalih tekom življenjske dobe jedrskih elektrarn. V ta namen

obsevajo v reži med termičnim ščitom in steno reaktorske posode vzorce jekla izrezane iz materiala uporabljenega pri izdelavi tlačne posode. Po vnaprej določenem programu⁽³⁾ te vzorce izvlečejo in z mehanskimi preizkusi ugotovijo kolikšno je povečanje krhkosti. Hkrati z vzorci obsevajo tudi detektorje nevtronskega sevanja s katerimi izmerijo nevtronski spekter in fluens, ki so mu bili izpostavljeni vzorci. Rezultate mehanskih preizkusov in podatke o nevtronski dozi moramo nato še računsko ekstrapolirati z mesta obsevanja v steno tlačne posode. Najpomembnejši so podatki na prvi četrtini debeline, ker so osnova za izračun trdnosti.

Preverjanju krhkosti reaktorskih tlačnih posod posvečajo v zadnjem času vedno več pozornosti. Reaktorski kotli najstarejših jedrskih elektrarn so namreč dobili že tako visoke doze nevtronskega sevanja, da obstoji možnost znatnega povišanja temperature prehoda iz krškega v žilavi lom in znižanja gornje meje žilavosti. Pri analizi eksperimentalnih podatkov se je pokazalo, da so rezultati zelo nenatančni. Izvor napak je v pomanjkljivih meritvah na eni strani, po drugi pa v pomanjkljivih predpisih, standardih in navodilih. Tako eksperimentalna tehnika kot tudi regulativa sta zaostali za rezultati raziskav na področju reaktorske dozimetrije in radiacijskih poškodb, ki so bile zelo intenzivne v zvezi s programom razvoja hitrih reaktorjev.

Rezultati meritev se vrednotijo na osnovi 99% verjetnosti (3δ) zato že razmeroma majhna napaka znatno vpliva na rezultate. Standardna napaka 33 % v nevtronski ekspoziciji, kar je pri sedanjem stanju preverjanja soliden rezultat, pomeni potentakem, da moramo računati z ekspozicijo, ki je dvakrat večja od dejanske. Efekti so izredno pomembni, če pomislimo, da bodo že pri polovici življenjske dobe elektrarne nastopile obratovalne omejitve kot ob koncu življenjske dobe. Celotna napaka pri določanju ΔT_{NDT} pa znaša danes od ± 60 do 160 % /5/ od česar prispevajo dozimetrija 20 do 40 %, merjenje temperature med obsevanjem 30 do 40 % in metalurške variable 50 do 90 %.

Zaradi pomanjkljivega preverjanja krhkosti in zastarelih predpisov pričakujejo, da bo imelo v prihodnjih petih letih okoli 20 jedrskih elektrarn v ZDA težave s podaljšanjem obratovalnega dovoljenja, ker bodo tlačne posode prekoračile dovoljeno po-

večanje krhkosti. Podobne težave lahko pričakujemo tudi za Nuklearno elektrarno Krško v kolikor ne bomo posvetili potrebne pozornosti preverjanju krhkosti in spremljanju tovrstne regulative.

V Institutu "Jožef Stefan" se že več let pripravljamo, da bomo v sodelovanju z Institutom za metalne konstrukcije prevzeli meritve in analizo rezultatov za našo prvo jedrsko elektrarno. V tem prispevku bomo opisali rezultate našega dela.

2. Preverjanje povečanja krhkosti v Nuklearni elektrarni Krško

V Nuklearni elektrarni Krško je montiranih 6 sond za preverjanje povečanja krhkosti⁽⁶⁾. V vsaki sondi je 48 Charpy, 9 nateznih in 9 WOL vzorcev izdelanih iz materialov tlačne posode ter nevtronski dozimetri baker, železo, nikel, aluminij-0,15% kobalt, neptunij 237 in uran 238. Program preverjanja obsega:

2.1. Obsevanje vzorcev

Dimenzije sond so 30 x 30 x 1600 mm. Vstavljene so v cevi pritrjene na steno termičnega ščita reaktorja. Po programu je predvideno, da se prva izvleče na koncu prvega gorivnega cikla, ter po 9,16 in 30 letih po ena sonda, dve sta pa rezervni. Ob menjavi goriva sonde izvlečemo in jih razmontiramo v vroči celici.

2.2. Meritve nevtronske doze

Merimo aktivnost nevtronskih detektorjev. Iz reakcijske hitrosti izračunamo nevtronski spekter in dozo.

2.3. Preizkušanje jeklenih vzorcev

Charpy vzorce preizkušamo s Charpy kladivom po standardnem postopku. Merimo celotno krivuljo prehoda iz krhkega v žilavi lom.

Natezne vzorce preizkušamo na natezni napravi po standardnem postopku, pri treh različnih temperaturah. Merimo končno natezno napetost in napetost pri razteku 0,2 %, zmanjšanje preseka, celoten raztezek in linearni raztezek.

WOL vzorec preizkušamo po dinamičnem postopku.

2.4. Ekstrapolacija rezultatov

Za proračun trdnosti tlačne posode moramo poznati mehanske lastnosti materiala na četrtini debeline stene, šteto od ngranje strani. Vzorca so obsevani v drugačnem nevtronskem polju, zato moramo izmerjene vrednosti ekstrapolirati na to mesto. Ekstra-

polacijo opravimo preko transportnega računa nevtronske doze v vzorcih in doze v najmočnejše obsevanem delu tlačne posode na četrtini debeline. Pri tem moramo upoštevati spremembo nevtronskega spektra in doze v sondi zaradi prisotnosti sonde in gradient nevtronske doze od termičnega ščita do zunanje strani tlačne posode. Upoštevati je treba tudi spremembe porazdelitve nevtronskega fluksa in spektra tekom gorivnega cikla.

3.5. Analiza rezultatov

Eksperimentalno dobljeno povečanje krhkosti primerjamo s projektnimi vrednostmi. V kolikor so eksperimentalne vrednosti višje moramo v tehničnih specifikacijah postaviti ustrezno ostrejšo obratovalno omejitev.

4. Pregled metod, ki jih uporablja IJS

Zanesljivost preverjanja krhkosti zavisi v največji meri od kvalitete meritev in analize rezultatov. Pri tem je treba upoštevati, da nova upravná navodila zahtevajo že zelo izpopolnjeno eksperimentalno in programsko opremo. V IJS se že več let ukvarjamo s problematiko nevtronske dozimetrije in transportnih proračunov. V tem času smo razvili vse metode potrebne za ugotavljanje nevtronske doze. Za mehanske preizkuse smo se povezali z Institutom za Metalne konstrukcije, Ljubljana, tako da lahko izpolnimo vse zahteve. V nadaljevanju bomo kratko opisali metode, ki jih uporabljamo in navedli nekaj novejših referenc.

4.1. Meritev nevtronske doze

Nevtronski dozimetri uporabljeni v Nuklearni elektrarni Krško so vsi sevalci gama. Aktivnost torej merimo s spektrometrom gama žarkov. V IJS uporabljamo Ge-Li spektrometer. Ves postopek je preverjen na meritvah nevtronske doze in spektra⁽⁷⁾ ter meritvah presekov povprečenih po fisijskem spektru⁽⁸⁾.

Za izračun nevtronskega spektra in doze izmerjenih reakcijskih hitrosti uporabljamo doma razvit programski paket ITER⁽⁹⁾, ki je verificiran tudi v mednarodnem primerjalnem preizkusu⁽¹⁰⁾.

4.2. Meritve mehanskih lastnosti vzorcev

Te meritve potekajo na standardnih preizkusnih strojih. Težave povzročajo le znatna aktivnost obsevanih preizkušancev. Za Charpy vzorce, ki jih je največ, bomo montirali Charpy preizkusno napravo v vročo celico pri reaktorju TRIGA. Natezne in kO₁ vzorce bomo preizkušali na ustrezno modificiranih napravah v Institutu za metalne konstrukcije v Ljubljani.

4.3. Ekstrapolacija rezultatov

Za transportne račune nevtronske doze, smo usposobili za računalnik CYBER72 transportna programa ANISN⁽¹¹⁾ in DOT⁽¹²⁾. Prvi je enodimenzionalen, drugi pa dvodimenzionalen. Oba računata nevtronski fluks in spekter v potrebnem številu energijskih grup po vsem reaktorskem kotlu. Fisijsko gostoto v sredici, ki je vhodni podatek za ANISN ali DOT, izračunamo s programom FASVER. Rezultat računa je nevtronski fluks, nevtronski spekter in nevtronska doza. Nevtronsko dozo izračunamo, kot to zahteva ameriško upravno navodilo, v treh enotah fluens nevtronov z energijo večjo od 1 MeV in 0,1 MeV in kot število dislokacij na atom železa.

5. Zaključek

V uvodu je obrazložena vloga preverjanja povečanja krhkosti tlačne posode na obratovanje jedrskih elektrarn. Natančnost in zanesljivost preverjanja je velikega pomena za nemoteno obratovanje v drugi polovici življenjske dobe elektrarne. Na osnovi rezultatov dosedanjega dela smo pokazali, da je Institut "Jožef Stefan" v sodelovanju z Institutom za metalne konstrukcije usposobljen, da prevzame vse potrebne meritve in analize za Nuklearno elektrarno Krško in bodoče jedrske elektrarne v Jugoslaviji.

Reference

1. L.L.Steele and C.Z.Serpan Jr., Analysis of Reactor Vessel Radiation Effects Surveillance Programs, American Society for Testing and Materials, 1970.
2. United States code of federal regulations, App. H to 10 CFR, part 50.
3. Ameriški standardi ASTM E185
4. Regulatory Guide 1.99, US Nuclear Regulatory Commission
5. G.R. Odette, A Quantitative Analysis of the Implications of the Accuracy of Dosimetry to Embrittlement Predictions, Third ASTM - EURATOM Symposium on Reactor Dosimetry, ISFRA 1-5 Oct.1979.
6. J.A.Davidson, Krško Nuclear Power Station Reactor Vessel Radiation Surveillance Program, WCAP-9441
7. B.Glumac, Karakteristike nevtronskega polja fisijske plošče, XXIII Konf. ETAN, Maribor 11-15. junij 1979, IV.27-33
8. I.N.Acquah in drugi, Spectral Indices of Some Threshold Reactions measured in Uranium 235 Fission Spectrum, IAEA Advisory Group Meeting on Nuclear Data for Radiation Damage Assessment and Reactor Safety Aspects, Dunaj 12-16.Okt. 1981.
9. M.Najžer in drugi, Many Channel Spectrum Unfolding, Proc. Third ASTM- EURATOM Symp. on Reactor Dosimerty, Ispra 1980, vol. 2 str. 1.
10. M.Najžer and B.Glumac, Unfolding of REAK-80 Sample Problems by ITER-3 and STAYSL Codes, Fourth ASTM - EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry 22-26. marec 1982, National Bureau of Standards, Gaithersburg.
11. I.Remec, M.Najžer, Nevtronski spekter in radiacijske poškodbe v tlačni posodi PWR reaktorjev, IJS-DP-2214, (dec.1980).
12. I.Remec, Proračun transporta nevtronov znotraj reaktorske posode s programom DOT3, IJS-DP-2611 (dec.1981).