



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Nukleáris Technikai Intézet

Üregeffektus mérése

Dr. Zsolnay Éva

Hallgatói gyakorlat mérési útmutatója

Budapest, 2007. február

1. Bevezetés

Ha egy kritikus állapotban levő reaktor aktív zónájában valamilyen módon üreget hozunk létre, akkor a reaktor szub-, vagy szuperkritikussá válik. Ezt a hatást, vagyis az üregnek a reaktivitásra gyakorolt hatását nevezzük üreg-effektusnak. Az effektust számszerűen az adott üreg hatására fellépő $\Delta\rho$ reaktivitás-változással jellemezzük. A megváltozás lehet pozitív és negatív előjelű is (lásd alább). A reaktivitás *üreg-együtthatójának* (v_k) az egységnyi térfogatú üreg hatására fellépő reaktivitás-változás előjeles nagyságát nevezzük. Egy V térfogatú üreg esetében:

$$v_k = \frac{\Delta\rho}{V} \left[\frac{\rho}{\text{cm}^3} \right] \quad (1)$$

Könnyű belátni, hogy az üregeffektus és a moderáltság között szoros kapcsolat van. Üreg jelentkezésekor ugyanis tulajdonképpen a moderáltság változik meg az üreg környezetében. Ennek alapján nyilvánvaló az is, hogy az üreg-együttható előjele és nagysága döntően függ attól, hogy a reaktor az adott környezetben üreg nélkül alá-, illetve fölmoderált volt-e [1,2].

Alámoderált zóna esetében az üreg-együttható negatív, fölmoderáltnál pedig pozitív előjelű. Megjegyezzük azonban, hogy e kérdés kezelése nem egyszerű, elsősorban a következő okok miatt:

- az üreg-együttható nagysága és előjele is változik attól függően, hogy (1)-ben mekkora V térfogattól határozzuk meg, és hogy a zóna mennyire alá-, illetve fölmoderált. Pl. kismértékű fölmoderáltság és nagy térfogatú üreg esetében az üreg-együttható a várttal szemben negatív előjelű is lehet.
- a moderáltság esetleges helyfüggése miatt az üreg-együttható előjele függhet attól is, hogy az üreg a zóna mely részében jelentkezett.

Az üreg-együttható helyfüggő ismerete biztonsági szempontokból igen lényeges. Különösen fontos ez az ún. „víz-vizes” (vízmoderátoros és vízűtésű, pl. nyomottvízes, illetve forralóvízes) reaktorok tervezésénél és üzemeltetésénél, de egyéb típusú reaktorok esetében is jelentős lehet az üzemvitel során fellépő veszélyek elemzése szempontjából. Az aktív zónában, vagy annak közvetlen közelében különböző csatornák, csövek, vezetékek kerülnek elhelyezésre (pl. besugárzó csatornák, csőpostavezetékek elemei, stb.). Attól függően, hogy ezek gázzal, levegővel, vagy vízzel vannak megtöltve, különböző mértékben befolyásolják a reaktor reaktivitását. Gázzal vagy levegővel töltött üregeket, vezetékeket esetleges meghibásodásnál elárasztja a cseppfolyós moderátor, pl. a mi reaktorunknál a víz. Biztonságvédelmi szempontból nagyon fontos az ilyen esetekben bekövetkező reaktivitás-változás figyelembe vétele.

2. Elméleti összefoglalás

Avégett, hogy az üregnek a reaktivitásra gyakorolt hatását részletesebben elemezni tudjuk, induljunk ki a reaktor kritikussági feltételeként levezetett alábbi egyenletből, és vizsgáljuk meg az üreg hatását az egyenlet egyes paramétereire:

$$k_{\text{eff}} = \frac{\eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \cdot e^{-\tau B_g^2}}{1 + L^2 B_g^2} = 1 \quad (2)$$

Az egyenletben szereplő mennyiségek a következők:

- k_{eff} - az effektív sokszorozási tényező,
- η - termikus neutronhozam,
- ε - gyorsasítási tényező,
- p - rezonancia tényező (a rezonancia-befogás kikerülésének valószínűsége),
- f - termikus hasznosítási tényező,
- τ - az átlagos Fermi-féle kor (cm^2),
- L - diffúziós hossz (cm),
- B_g - a reaktor geometriai görbületi paramétere (cm^{-1}).

A (2) kifejezésből a

$$p = \frac{e^{-\tau B_g^2}}{1 + L^2 B_g^2} \quad (3)$$

rész az ún. kilépési tényező, amiből a

$$P_f = e^{-\tau B_g^2} \quad (4)$$

a gyors neutronokra,

$$P_t = \frac{1}{1 + L^2 B_g^2} \quad (5)$$

pedig a termikus neutronokra nézve adja meg a kiszökés kikerülésének a valószínűségét.

Vizsgáljuk most meg az üreg hatását a (2) egyenletben szereplő mennyiségekre!

2.1. Az üreg hatására csökken a kiszökés kikerülésének a valószínűsége. Csökken ugyanis a moderátor átlagos sűrűsége, ezáltal csökken a makroszkopikus szórás és abszorpciós hatáskeresztmetszet, ami τ és L^2 növekedéséhez vezet.

2.2. A termikus hasznosítási tényező – csak üzemanyagot és moderátort feltételezve – felírható az alábbi egyszerű formában

$$f = \frac{\Sigma_{a0}}{\Sigma_{a0} + \left(\frac{\bar{\phi}_m}{\bar{\phi}_0}\right) \cdot \Sigma_{am} (V_m / V_0)} \quad (6)$$

ahol $\bar{\phi}_m / \bar{\phi}_0$ az előnytelenégi tényező, a képletben szereplő Σ_a -k makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszeteket jelentenek.

V - a térfogat, az „m” index a moderátorra, a „0” index pedig az üzemanyagra vonatkozik.

Üreg hatására csökken a moderátorban a termikus neutronfluxus, így csökken az előnytelenégi tényező. Ugyanakkor csökken a moderátor átlagos sűrűsége, és ezáltal csökken a Σ_{am} is. A két effektus együttesen az f tényező növekedését eredményezi.

2.3. Üreg hatására csökken az adott üzemanyagra eső moderátor-mennyiség, következésképpen csökken a lassító hatás. Ennek következtében a termikus és epitermikus

neutronok spektruma nagyobb energiák felé tolódik el, így a neutronok nagyobb valószínűséggel fogódnak be a rezonancia energiatartományban. Ez a p rezonancia tényező értékének csökkenéséhez vezet.

2.4. Az ϵ gyorsítási tényező értéke kissé növekedni fog, u.i. a moderátor egy része helyén levő üreg megnöveli annak a valószínűségét, hogy a moderátorba kijutott neutronok még a küszöbenergia fölött visszalépve a fűtőelembe, ^{238}U magokkal ütközzenek és azokat hasítsák.

2.5. Az üregnek az η -ra gyakorolt hatása elhanyagolhatóan kicsiny.

Végül is az adódik, hogy az üreg teljes hatása az effektív sokszorozási tényezőre attól függ, hogy az adott konkrét elrendezésben mely tényezők dominálnak. A legtöbb esetben k_{eff} értéke csökken az üreg hatására, ami azzal függ össze, hogy a reaktorok döntő része alulmoderált. Biztonsági okokból ma már nem engedélyeznek felülmoderált reaktort építeni.

3. A mérési feladat

Egy adott V térfogatú üreget a reaktor aktív zónájának különböző pozícióiba helyezve határozzuk meg az üreg-együttható helyfüggését. Ezután összehasonlítjuk a kapott eredményeket az aktív zóna azonos helyén mért termikus neutronfluxus-eloszlással.

4. A méréshez szükséges eszközök, anyagok

4.1. Reaktor

Az oktatóreaktor aktív zónájának vízszintes metszetrajza az 1. ábrán látható. Az aktív zónában lévő fűtőelem-kötegekben vannak elhelyezve az EK-10 típusú üzemanyag pálcák, a közöttük lévő teret a moderátor és hűtőközeg szerepét betöltő könnyűvíz foglalja el.

4.2. Üreg

A méréshez üregeként egy 13 mm külső átmérőjű, hengeres plexi rudat használunk, amely egy 10 cm hosszú, kb. 1 cm^2 keresztmetszetű, hermetikusan lezárt, henger alakú, levegővel telt üreget foglal magában. Az üreg térfogata kb. 10 cm^3 . A plexi rúd kiképzése olyan, hogy függőlegesen mozgatható a fűtőelem-kötegeken belül, a fűtőelem pálcák közötti víztérben.

5. A mérés menete

Az üreg reaktivitás-értékességének mérését a fűtőelemek közötti víztérben, egy olyan zónapozícióban végezzük, ahol ismerjük a termikus neutronfluxus függőleges irányú eloszlását. Az üreget különböző magasságokba helyezzük, és meghatározzuk valamilyen referencia-értékhez képest a reaktivitás változását. Referencia-értéknek a zónából kivett üreg esetében mért reaktivitás értékét vesszük (ρ_r).

Legyen a zóna reaktivitása ρ_z , ha az üreg a zóna középsíkjától z távolságban van. Ekkor az üreg behelyezése révén okozott reaktivitás-változás:

$$\Delta\rho_z = \rho_z - \rho_r \quad (7)$$

A reaktivitás mérésére többféle módszer ismeretes. Leggyakrabban az alábbiak használatosak:

- a) valamelyik szabályozórúd reaktivitás-értékességi görbéje alapján,
- b) a reaktor periódusidejének, ill. a reaktorteljesítmény kétszerezési idejének mérése alapján,
- c) szubkritikus rendszer erősítési tényezőjének mérése alapján,
- d) oszcillációs módszerrel, és
- e) pulzált neutrontechnika segítségével

történő reaktivitás mérés.

Jelen gyakorlat keretében az automata szabályozórúd reaktivitás-értékességi görbéjének felhasználásával határozzuk meg a reaktor aktív zónájába helyezett üreg által okozott reaktivitás-változást. A módszer alkalmazásának előfeltétele, hogy az automata szabályozórúd az üregtől elég távol helyezkedjen el ahhoz, hogy annak behelyezése esetén a rúd értékességi görbéje ne változzék. A szükséges adatokat az operátor bocsátja rendelkezésre. A reaktort kritikussá tesszük abszorbens nélkül, majd kb. 10 W teljesítményen automata üzemmódba kapcsolunk. Leolvassuk az automata szabályozórúd állását, majd (minden egyebet változatlanul hagyva) behelyezzük az üreget egy adott pozícióba, és a tranziensek lecsengése után ismét feljegyezzük a rúdhelyzetet. Az üreg pozícióját változtatva, ismételjük meg a fenti eljárást annyiszor, ahány üreg-pozíció vizsgálata elő van írva.

A reaktivitás-változtatás után elegendő időt kell várni, hogy a reaktor állandósult állapotba jusson. Az üreget a zónában ugyanazon függőleges egyenes mentén kell mozgatni, ahol az előzőek során a termikus neutronfluxus-eloszlást mértük. Az automata szabályozórúd reaktivitás-értékességi görbéje alapján, az egyes rúdhelyzetekhez tartozó reaktivitás értékekből meghatározzuk az üreg reaktivitás-értékességének függőleges irányú ($\Delta\rho_z$) eloszlását.

6. A mérési adatok kiértékelése

1. A hallgatók a mérések során a mérési jegyzőkönyvben pontosan rögzítsék a mért adatokat: az üreg helyzetét a zónában (az üreg középpontjának helyét kell megadni az aktív zóna középmagasságához viszonyítva) a kézi és automata szabályozó rudak állását, a rúdgörbéről leolvasott reaktivitás-értékeket és a $\Delta\rho_z$ reaktivitás-változásokat.
2. Számítsák ki az egyes üreg-helyzetekben az üreg-együtthatók nagyságát és ábrázolják azt grafikusan a zóna középpontjától mért távolság függvényében!
3. Ábrázolják ugyanazon ábrán és hasonlítsák össze az üregegyütthatók függőleges irányú eloszlását az ugyanezen függőleges menti relatív termikus neutronfluxus-eloszlással.
4. A kapott eredmények alapján vonjanak le következtetéseket!

Fontosabb ellenőrző kérdések

1. Mi az effektív sokszorozási tényező és a reaktivitás?

2. Hogyan lehet átszámítani a β -ban (ill. β -ben) mért reaktivitást %-os reaktivitásértékre?
3. Mi az üreg-együttható és miért fontos a reaktivitás üreg-együtthatójának ismerete?
4. Elemezze az üreg hatását a gyorsasítási tényezőre, a rezonancia tényezőre és a termikus hasznosítási tényezőre!
5. Milyen az üreg hatása a neutronoknak a reaktorból való kiszökésére?
6. Ismertesse az üreg-együttható és a moderáltság közötti kapcsolatot!
7. Az üregeffektusnak milyen nukleáris biztonsági következményei vannak?
8. Automata üzemmódban az üreg behelyezésekor az automata szabályozórúd elmozdul. Hogyan állapítja meg az elmozdulásból a reaktivitás-változás előjelét?
9. Hasonlítsa össze az eredményül kapott üreg-együttható helyfüggését az ugyanott mért termikus neutronfluxus-eloszlással! Véleménye szerint milyen kapcsolat van a kétféle eloszlás között?
10. A jelen mérésnél leírt módszeren kívül milyen lehetőségeket ismer a reaktivitás meghatározására?

7. Irodalom

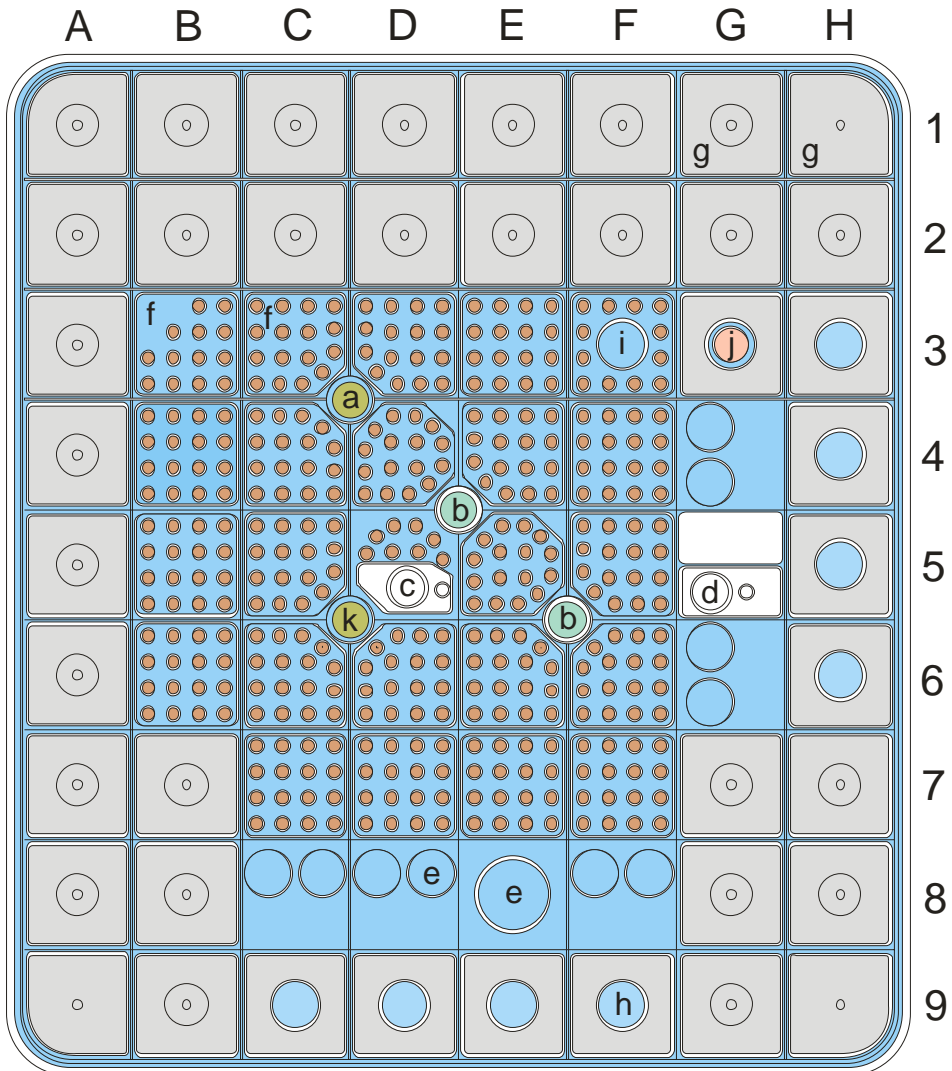
- [1] Szatmáry Zoltán: Bevezetés a reaktorfizikába. Akadémiai Kiadó, Budapest 2000.
 [2] Duderstadt – Hamilton: Nuclear Reactor Analysis. Wiley, New York, 1976.

8. Jelölések

v_k	üreg együttható [β/cm^3]
ρ	reaktivitás [β], [%]
k_{eff}	effektív sokszorozási tényező
η	termikus neutronhozam
ε	gyorsasítási tényező
p	rezonanciatényező (vagy rezonancia kikerülés valószínűsége)
f	termikus hasznosítási tényező
P	kilépési tényező (vagy kiszökés kikerülésének a valószínűsége)
τ	Fermi kor (állandó) [cm^2]
L	termikus neutron diffúziós hossz [cm]
B_g	geometriai görbületi paraméter [cm^{-1}]

Σ_a makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszet [cm^{-1}]

V térfogat [cm^3]



1. ábra. Az aktív zóna keresztmetszete

a - automata szabályozórúd; b_1 , b_2 - biztonságvédelmi rudak; c - gyors csőposta; d - termikus csőposta; e - függőleges besugárzó csatornák vízben; f - fűtőelem-kazetták; g - grafit reflektorelemek; h - függőleges besugárzó csatornák grafitban; i - függőleges besugárzó csatorna fűtőelem-kazettában; j - Pu-Be neutronforrás; k - kézi szabályozórúd.