



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Nukleáris Technikai Intézet

Neutronabszorbens minták reaktivitás-értékességének meghatározása

Dr. Zsolnay Éva

Hallgatói gyakorlat mérési útmutatója

Budapest, 2007. február

1. Bevezetés

Különböző neutronabszorbens anyagoknak az atomreaktor reaktivására gyakorolt hatása fizikai paramétereiken kívül a reaktorban elfoglalt helyüktől is függ. E helyfüggést leíró függvényt az adott anyag reaktivitás-értékességi függvényének nevezzük. Utóbbinak ismerete a reaktor működtetése szempontjából nagyon lényeges.

Teljesítményreaktorok esetében elsősorban a reaktorszabályozás és a beépített többletreaktivitás kompenzálása miatt, kísérleti reaktorok esetében pedig fentiekén túl a zónába bevitt különféle minták okozta reaktivitás-zavarok megbecslése érdekében szükséges a neutronabszorbensek hatékonyságát ismerni.

A reaktivitás-változás természetesen egyaránt bekövetkezik, ha az aktív zónába akár neutron elnyelő, akár hasadó anyagot juttatunk (vagy eltávolítunk onnan), mivel ezáltal megváltozik a keletkező és elnyelt neutronok számának aránya. Jelen gyakorlat keretében neutronabszorbens minták reaktivitás-értékességét vizsgáljuk.

2. Elméleti összefoglalás

Ha egy neutronabszorbeáló mintát kritikus reaktorba helyezünk, akkor a reaktivitás-változásra a reaktorelmélet alapján [1-3] homogenizált zóna feltételezése mellett első közelítésben az alábbi összefüggés érvényes:

$$\Delta\rho = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\int_{\text{minta}} \phi \Sigma_a \phi^* dV}{k \int_{\text{reaktor}} \phi \bar{\Sigma}_f \phi^* dV} = \frac{\int_{\text{minta}} \phi \Sigma_a \phi^* dV}{\int_{\text{reaktor}} \phi v \bar{\Sigma}_f \phi^* dV} \quad (1)$$

ahol

$\Delta\rho$ - a reaktivitás-változás;

$k \cong k_\infty = \frac{v \bar{\Sigma}_f}{\Sigma_a}$ a végtelen reaktor sokszorozási tényezője (helyesen $k = k_{\text{eff}}$ lenne,

de a $k_{\text{eff}} \cong k_\infty$ közelítést alkalmazzuk);

Σ_a - a minta makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszete;

$\bar{\Sigma}_a$ - a reaktorzóna átlagos, makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszete;

ϕ^* - a neutronértékesség a reaktor adott helyén, ami azt adja meg, hogy ott egy neutron mennyire értékes a reaktor sokszorozási tényezője szempontjából;

v - a hasadásonként keletkező neutronok száma;

$\bar{\Sigma}_f$ - a zóna átlagos makroszkopikus hasadási hatáskeresztmetszete;

ϕ - a termikus neutronfluxus a reaktor adott helyén;

$\phi \bar{\Sigma}_f V$ - a neutronok átlagos keletkezési sebessége a reaktor egységnyi térfogatában.

Ha a neutronértékességet állandónak tekintjük a reaktor teljes térfogatában, akkor a reaktivitás-változásra vonatkozó fenti kifejezés a reaktorban történő teljes neutronabszorpciónak a mintára eső hányada lesz.

A reaktorban azonban a neutronértékesség erősen helyfüggő; rendszerint az aktív zóna centrumának közelében maximuma van, a szélekhez közeli pontokban pedig minimálissá válik. Ezt a fluxuseloszlás alakja és a reaktorból való neutron kiszökés magyarázza: a szélek közelében lévő neutronoknak nagyobb esélyük van a rendszerből való megszökésre, következésképpen a rendszer szempontjából értékességük kisebb, mint a középén lévőké.

Ha a zónához képest elhanyagolható méretű mintát használunk, a neutronfluxus és a neutron-értékesség a minta minden részében állandónak tekinthető, és kiemelhető az egyenlet számlálójában az integrál elé. Ha feltételezzük továbbá, hogy a mintának k -ra gyakorolt hatása kicsi, és a neutronfluxus-eloszlás az abszorbensnek a reaktorzónába való behelyezése után közelítően változatlan marad, akkor az (1) egyenlet nevezője is állandónak (K') tekinthető, és az egyenlet az alábbi alakban írható:

$$\Delta\rho = \frac{\phi_s \cdot \phi_s^* \int \Sigma_a dV}{K'} \quad (2)$$

ahol az "s" index a minta helyére vonatkozó értékeket jelöli, és K' az előzőeknek megfelelő állandó.

Az $\int \Sigma_a dV$ az adott minta anyagára jellemző, a reaktorban elfoglalt helytől független, állandó érték. Ezért a mintának tulajdonítható reaktivitás-változás, az abszorbens ún. reaktivitás-értékességi függvénye:

$$\Delta\rho = C \cdot \phi_s \cdot \phi_s^* \quad (3)$$

ahol C - adott reaktor és minta esetén állandó.

A minta reaktivításra gyakorolt hatása tehát arányos a minta helyén lévő neutronfluxus és neutronértékesség szorzatával.

A (3) összefüggés helyessége szemléletesen is könnyen belátható. Az abszorbens által elnyelt neutronok száma arányos az adott helyen uralkodó ϕ neutronfluxussal, ϕ^* pedig azt adja meg, hogy az elnyelt neutronokból egyetlen neutron mennyire értékes a reaktivitás szempontjából. Mindezek miatt a reaktivitás-értékesség a ϕ és ϕ^* szorzatával arányos.

A (3) összefüggés alapján arra a következtetésre juthatnánk, mintha a reaktivitás-értékesség a neutronfluxus abszolút értékétől függne, s így pl. a reaktor teljesítményének is függvénye lenne. Az (1) egyenletből azonban látható, hogy amikor a teljesítmény megváltozik, a számláló és a nevező azonos arányban nő (vagy csökken), mivel a fluxuseloszlás alakja független a teljesítményszinttől. (Nyilvánvalóan ez azt jelenti, hogy (3)-ban a C szorzó nem állandó, hanem a teljesítménytől függ, éspedig úgy, hogy ezáltal biztosítja a reaktivitásértékesség teljesítményfüggetlenségét). Ez utóbbiaknál figyelmen kívül hagytuk a teljesítmény-változással járó egyéb hatásokat, amelyek miatt a reaktivitás-értékesség végül is szekunder módon kissé függ a reaktor teljesítményétől.

Utóbbiakból – a hivatkozott közelítéssel – következik, hogy a reaktivitás-értékesség a neutronfluxusnak nem az abszolút, hanem a reaktorzóna adott helyére jellemző, relatív értékétől és a neutronértékességtől függ, így a (3) összefüggésben is ezt kell ϕ és ϕ^* alatt érteni.

A perturbációs elmélet szerint a neutronértékesség (ϕ^*) az adjungált fluxust jelenti, amelyet úgy nyerünk, hogy a neutronfluxus operátor mátrixában felcseréljük a sorokat és az oszlopokat, majd megoldjuk azt. A nyert megoldás ortogonális a fluxusra. Az egy-csoport perturbációs elmélet közelítésben a neutronfluxus önadjungált, vagyis a neutronértékesség ugyanúgy változik a hellyel, mint a fluxus: $\phi^* \cong \phi$. Ez utóbbit a (3) egyenletben figyelembe véve, kapjuk:

$$\Delta\rho \cong C' \cdot \phi_s^2 \quad (4)$$

ahol C' a reaktorteljesítménytől függő szorzófaktor. Eszerint egy abszorbens reaktivitás-értékessége az adott helyen lévő relatív neutronfluxus négyzetével arányos.

Ez a közelítés gyakran használatos, mivel ennek alapján egyszerűen lehet becslést kapni a reaktor különböző helyein elhelyezett neutronabszorbens reaktivitás-értékességére, minthogy a neutronfluxus alakja rendszerint jól ismert.

A nagy neutron-abszorpciós hatáskeresztmetszettel rendelkező abszorbensek esetében azonban az abszorbens reaktivitás-értékességének megbecslésénél figyelembe kell venni a neutron-önárnyékolás jelenségét. Ha ugyanis az abszorbens minta vastagsága nem elhanyagolható – és a gyakorlatban általában ez az eset teljesül – akkor a neutronfluxus értéke az abszorpció miatt a mintán való áthaladás során jelentősen csökken. Következésképpen, az abszorbens minta belsejében kisebb az átlagos neutronfluxus ($\bar{\phi}$) mint a felszínen (ϕ^0). A kettő aránya a neutron-önárnyékolási tényező:

$$G = \frac{\bar{\phi}}{\phi^0}, \quad (5)$$

és értéke az abszorbens vastagságától (d) és totális makroszkópikus hatáskeresztmetszetétől (Σ_t) függ: $G = G(d, \Sigma_t)$.

Azon anyagok esetében, amelyekre nézve a neutron-önárnyékolás nagy (G értéke kicsi), neutronabszorpció szempontjából csak a felülethez közeli rétegek hatásosak, így a neutronabszorpció mértéke (és jó közelítéssel a minta reaktivitás-értékessége is) az abszorbens felületével arányos. Ezeket az anyagokat „felületi abszorbensek”-nek nevezzük.

3. A mérési feladat

Jelen kísérletben egy neutronabszorbens anyag (Cd) reaktivitás-, ill. neutron-értékességét határozzuk meg a hely függvényében, és a kísérleti eredményeket összehasonlítjuk a perturbációs elmélet alapján kapott értékekkel.

Másrészt, különböző geometriai méretű Cd abszorbens minták reaktivitás-értékességét hasonlítjuk össze egymással, a reaktorzóna egy adott helyén.

4. A méréshez szükséges eszközök, anyagok

Reaktor és a hozzátartozó neutronszámláló berendezések; plexi tartórúd az abszorbensek számára; sugárvédelmi felszerelés (gumikesztyű, szemüveg, csipesz); neutronabszorbens anyagok.

5. A mérés menete

Az abszorbens nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkező anyagból (pl. Cd) készült kisméretű cső vagy tableta, amelyet a tartórúddal együtt a zónába helyezünk el a fűtőelemek között, egy olyan helyen, ahol ismerjük a termikus neutronfluxus függőleges irányú eloszlását. Az abszorbenst különböző magasságokba helyezzük, és meghatározzuk valamilyen referencia-értékhez képest a reaktivitás változását. Referencia-értéknek a zónából kivett abszorbens esetében mért reaktivitásértéket tekintjük (ρ_r).

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

$$\Delta\rho_z = \rho_z - \rho_r \quad (6)$$

A gyakorlat második felében különböző geometriai méretű (felület és vastagság változtatva) Cd hengerpalástokat juttatunk a minta-szállító csőposta segítségével a reaktorzóna D5 vagy G5 pozíciójában elhelyezett függőleges besugárzó csatornába. A minták minden esetben azonos pozícióba, a zóna középpontjával megegyező magasságba kerülnek. Az abszorbensek által okozott reaktivitás-változást az alábbiakban ismertetett módszerek valamelyikével mérjük.

Az abszorbens minták jellemző adatait a méréshez mellékeljük.

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

- a) valamelyik szabályzó rúd 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 első két módszert ismertetjük, amelyeknek alkalmazhatósága részben a rendelkezésre álló időtől, részben a reaktorzóna előéletétől függ.

a) Reaktivitásmérés a szabályzó rúd értékességi görbéje alapján

Ha a zóna hosszabb ideig nagy teljesítményen üzemelt, általában olyan nagy háttér γ -sugárzása marad, hogy az impulzusláncok nem működnek helyesen. Ekkor a most ismertetett módszert alkalmazzuk, amelynek előfeltétele, hogy az automata szabályzó rúd a mintától 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. Kb. 10 W teljesítményen automata üzemmódba kapcsolunk.

Leolvassuk az automata szabályozó rúd állását, majd (minden egyebet változatlanul hagyva) behelyezzük az abszorbenst, és a tranziensek lecsengése után ismét feljegyezzük a rúdhelyzetet. A reaktivitás-változtatás után elegendő időt kell várni, hogy a reaktor állandósult állapotba jusson. Az abszorbenst 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 a $\Delta\rho_z$ eloszlást.

b) Reaktivitásmérés a reaktor teljesítményének kétszerezési ideje alapján

Ez a módszer az előzőnél pontosabb, de hosszadalmasabb. A mérés menete: valamelyik (vizsgálni kívánt) zónapozícióba helyezett abszorbenssel enyhén szuperkritikussá (kétszerezési idő min. 30 s legyen) tesszük a reaktort, majd meghatározzuk a reaktorteljesítmény kétszerezési idejének értékét (azaz azt az időt, ami alatt a reaktor teljesítménye megduplázódik). Legyen egy adott referencia időponthoz képesti t időpontban az impulzuslánc egységnyi időre eső beütésszáma $B(t)$. Ekkor

$$B(t) = B_0 e^{\lambda t} = B_0 \exp\left(0,693 \frac{t}{T_{2x}}\right) \quad (7)$$

ahol T_{2x} a kétszerezési idő.

Adott t_i időpontban kezdődő, Δt_m ideig tartó mérés alatt kapott beütésszám:

$$B_i = B_0 \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_m} e^{\lambda t} dt = const \cdot e^{\lambda t_i} \quad (8)$$

azaz a t_i időpontban levő pillanatnyi teljesítménnyel arányos.

A mérést követően Δt_n ideig nyomtat a számláló, majd nullázás után újrakezdődik a mérés. Δt_n értékét adatlapon mellékeljük.

Előzőek alapján

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_m + \Delta t_n.$$

A beütésszámokat féllogaritmikus papíron, a t_i függvényében ábrázolva, egy, a reaktor teljesítményfelfutásával azonos meredekségű egyenest kapunk, amelyből meghatározható a kétszerezési idő. A mérési adatokat úgy is kiértékelhetjük, hogy a mért pontokra exponenciális görbét illesztünk, és a görbe paramétereinek ismeretében határozzuk meg a kétszerezési időt. A kétszerezési idő ismeretében a reciprok-óra formula alapján számolt táblázat segítségével meghatározzuk a megfelelő reaktivitásokat. A táblázat az egyes kétszerezési időkhöz tartozó reaktivitás értékeket tartalmazza.

6. A mérési adatok kiértékelése

Minden egyes reaktivitás-mérés után meghatározzuk a ρ_z értékeket, majd a (6) összefüggés segítségével a $\Delta\rho_z$ függőleges menti eloszlását.

A neutronfluxus-eloszlást a maximális értéknél 1-re normáljuk, és az egyes $\Delta\rho_z$ reaktivitás értékeket is osszuk el a maximális reaktivitásváltozás ($\Delta\rho_0$) értékével. Ez utóbbi eloszlás az abszorbens relatív értékességét adja meg a reaktor különböző pontjaiban. Végül a neutron-értékesség eloszlását megkapjuk, ha az abszorbens relatív értékességi görbéjének és a relatív termikus neutronfluxus-eloszlásnak a hányadosát képezzük (lásd a (3) egyenletet).

Feladatok: Ábrázoljuk ugyanazon ábrán

a) a relatív termikus neutronfluxus-eloszlás $(\phi_z)/(\phi_0)$ és a

b) neutron értékesség $\left(\frac{\Delta\rho_z}{\Delta\rho_0} / \frac{\phi_z}{\phi_0}\right)$ görbékét,

majd ugyancsak azonos ábrán

c) az abszorbens relatív reaktivitás-értékességi görbéjét $(\Delta\rho_z/\Delta\rho_0)$ és a relatív termikus neutronfluxus-eloszlás négyzetét $(\phi_z/\phi_0)^2$!

d) Végül ábrázoljuk a $\frac{\Delta\rho_z}{\Delta\rho_0} / \left(\frac{\phi_z}{\phi_0}\right)^2$ görbét is!

e) Vonjuk le a következtetéseket az ábrák alapján!

f) Elemezzük a különböző geometriai méretű Cd-abszorbensek reaktivitás-értékességére kapott eredményeket!

Fontosabb ellenőrző kérdések

1) Mit értünk egy abszorbens minta reaktivitás-értékességén?

2) Mitől függ egy abszorbens reaktivitás-értékessége?

3) Mi a neutron-értékesség?

4) Ismertessen néhány reaktivitás mérési módszert!

5) Mi a neutron-önárnyékolás?

6) Mit értünk „felületi abszorbens”-en?

7) Mi a reciprok-óra formula?

7. Irodalom

[1] Szatmáry Zoltán: Bevezetés a reaktorfizikába. Akadémiai Kiadó, Budapest 2000.

[2] Duderstadt – Hamilton: Nuclear Reactor Analysis. Wiley, New York, 1976.

[3] Zsolnay Éva: Neutron-értékesség meghatározása. Hallgatói mérési útmutató. Kézirat. Budapesti Műszaki Egyetem Tanreaktora. Budapest, 1985.

8. Jelölések

ϕ	termikus neutronfluxus
ϕ^*	neutron-értékesség
ρ	reaktivitás
k	sokszorozási tényező
Σ_a	a minta makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszete
$\bar{\Sigma}_a$	a reaktor zóna átlagos makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszete
ν	a hasadásonként keletkező neutronok száma
$\bar{\Sigma}_f$	a zóna átlagos makroszkopikus hasadási hatáskeresztmetszete
Σ_t	a minta totális makroszkopikus hatáskeresztmetszete
G	neutron önárnyékolási tényező
λ	bomlási állandó