

# Kritikussági kísérlet

Horváth András

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*

*Nukleáris Technikai Intézet*

## Bevezetés

Egy atomreaktort több módszerrel is kritikussá tehetünk. Egyik lehetőség a fűtőelemek zónába való fokozatos betöltése, vagy a moderátor szint emelése. További lehetőség a reaktivitás-lekötő elemek (szabályzórudak, bórsav) több lépésben történő eltávolítása.

A kritikus állapot biztonságos megközelítésének érdekében fontos ismernünk a szubkritikus rendszer, mint neutronerősítő viselkedését a kritikus állapottól való „távolság” függvényében.

A mérés során szabályzórud fokozatos mozgatásával közelítjük meg a kritikus állapotot, majd a kritikus állapot elérése után a reaktort enyhén szuperkritikussá téve megbecsüljük az Oktatóreaktor többlet reaktivitását.

## Elméleti alapok

Egy neutronsokszorozó rendszerben a kritikusságot az alábbi összefüggés definiálja:

$$k_{\text{eff}} = 1,$$

ahol:

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} P_{\text{NL}} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f P_{\text{NL}}. \quad (1)$$

Az (1) összefüggésben  $k_{\infty}$ ,  $\eta$ ,  $\epsilon$ ,  $p$  és  $f$  a négyfaktor-formula tényezői,  $P_{\text{NL}}$  pedig a neutronok ki nem szökési valószínűsége.

Ahhoz, hogy megértsük az (1) definícióban a tagok jelentését, tekintsük az egy energia-csoportban felírt, stacionárius, külső forrás-mentes diffúzióegyenletet:

$$0 = D\Delta\phi - \Sigma_a\phi + \frac{V}{k_{\text{eff}}} \Sigma_f\phi \quad (2)$$

A kifolyást leíró tagot a Helmholtz-egyenlettel kifejezve (2)-t az alábbi alakba írhatjuk:

$$0 = -DB^2\phi - \Sigma_a\phi + \frac{V}{k_{\text{eff}}} \Sigma_f\phi \quad (3)$$

Vegyük észre, hogy a (3) egyenletből a fluxus kiesik! A (3) egyenletet a  $k_{\text{eff}}$ -re rendezve kapjuk, hogy:

$$k_{\text{eff}} = \frac{\nu \Sigma_f}{DB^2 + \Sigma_a} = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} \frac{1}{1 + B^2 L^2}, \quad (4)$$

ahol:

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}, \text{ továbbá } \Sigma_a = \Sigma_{a,\text{üa.}} + \Sigma_{a,\text{mod.}}$$

Triviális átalakítás után a (4) összefüggést felírhatjuk az alábbi alakban:

$$k_{\text{eff}} = \left( \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_{a,\text{ü}}} \right) \left( \frac{\Sigma_{a,\text{ü}}}{\Sigma_a} \right) \left( \frac{1}{1 + B^2 L^2} \right) \quad (5)$$

Ezzel visszakaptuk az (1) összefüggésben felírt definíciót, ugyanis az (5) egyenletben a zárójelekben lévő tagok rendre a termikus neutronhozam ( $\eta$ ), a termikus hasznosítási tényező ( $f$ ) és a ki nem szökési valószínűség ( $P_{\text{NL}}$ ) definíciói. A gyorsasítási tényező ( $\epsilon$ ) és a rezonancia-kikerülési valószínűség ( $p$ ) egycsoport-modellben nem értelmezhető.

A termikus neutronhozam ( $\eta$ ) és a gyorsasítási tényező ( $\epsilon$ ) értékét az üzemanyag összetétele és mérete meghatározza.

A termikus hasznosítási tényező ( $f$ ) és a rezonancia kikerülési valószínűség ( $p$ ) függ a különböző reaktoranyagok relatív koncentrációjától.

A ki nem szökési valószínűség ( $P_{\text{NL}}$ ) azon neutronok részarányát fejezi ki, amelyek bent maradnak a reaktorban, ezért értéke függ az aktív zóna méretétől, és összetételétől, valamint a reflektor tulajdonságaitól.

Szubkritikus állapotban  $k_{\text{eff}} < 1$ , ekkor az aktív zóna egy külső neutronforrás erősségének sokszorozására alkalmas. Ha egy szubkritikus rendszerben nincs külső neutronforrás, akkor benne a neutronfluxus zéró, függetlenül attól, hogy a  $k_{\text{eff}}$  milyen mértékben tér el az egységtől.

Helyezzünk egy ilyen rendszerbe egy  $S_0$  erősségű (neutron/s) külső neutronforrást! Az első neutrongeneráció végén  $S_0 k_{\text{eff}}$  új neutron lesz a rendszerben. A második neutrongeneráció végén  $(S_0 k_{\text{eff}}) k_{\text{eff}} = S_0 k_{\text{eff}}^2$ , és így tovább.

Tehát, ha a külső neutronforrás behelyezésétől számítva elegendő idő telt el, akkor az adott időpillanatban az időegység alatt az egész reaktorban keletkező neutronok száma ( $S$ ) a

következő módon alakul. Az adott időegységben a forrásból kibocsátott neutronok ( $S_0$ ) + egy neutronciklussal előbb a forrásból kibocsátott neutronok hatására a reaktorban keletkező neutronok ( $S_0 k_{eff}$ ) + két neutronciklussal előbb a forrásból kibocsátott neutronok hatására a reaktorban keletkező neutronok ( $(S_0 k_{eff}) k_{eff}$ ) száma, és így tovább.

Sok ( $n \rightarrow \infty$ ) neutronciklus eltelte után:

$$S = S_0 + S_0 k_{eff} + S_0 k_{eff}^2 + \dots + S_0 k_{eff}^n + \dots \quad (6)$$

Ezen végtelen mértani sor összege:

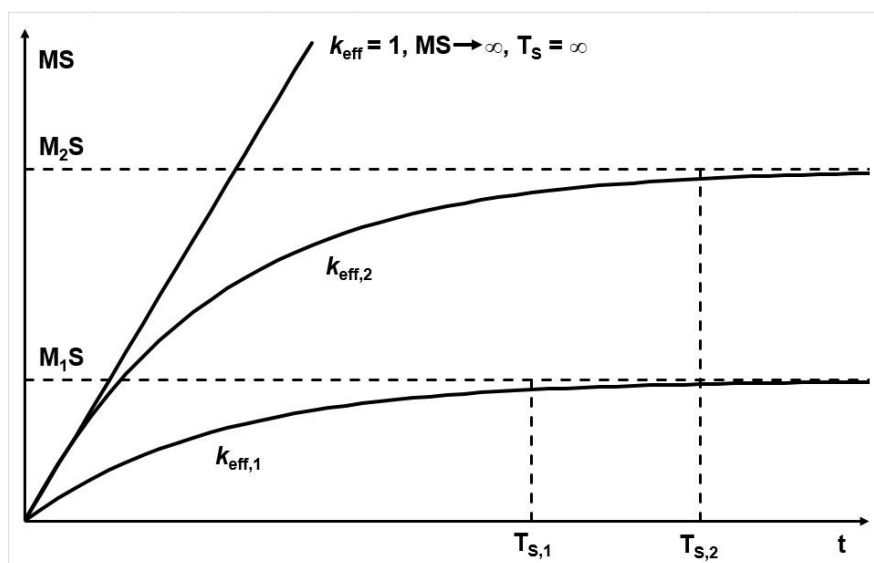
$$S = \frac{S_0}{1 - k_{eff}} \quad (7)$$

A teljes forrásereőséget ( $S$ ) a külső neutronforrás erősségével ( $S_0$ ) elosztva a rendszer erősítési tényezőjét ( $M$ ) kapjuk:

$$M = \frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 - k_{eff}} \quad (8)$$

Mivel szubkritikus rendszerben a  $k_{eff}$  értéke 0 és 1 közötti érték, így a (8) összefüggés nevezője mindig egynél kisebb, tehát  $M > 1$ . Ez azt jelenti, hogy a zónán belüli teljes neutronszám mindig nagyobb, mint a külső neutronforrás erőssége. Emiatt nevezzük a szubkritikus rendszert neutronerősítőnek. A (8) egyenletből látható, hogy minél közelebb vagyunk a kritikussághoz, annál nagyobb az erősítési tényező, mígnem kritikus esetben végtelenné válik.

A leírtakból az következik, hogy a (7) szerinti teljes neutronszám a reaktorban elvileg csak végtelen számú neutronciklus után, azaz végtelen hosszú idő múlva alakul ki, amelyet a tényleges neutronszám aszimptotikusan közelít meg. (Lásd az 1. ábrát!)



1. ábra: A forrásereőség időfüggése

A gyakorlatban jó közelítéssel vehetjük, hogy egy bizonyos véges idő ( $T_S$ ) eltelte után elértük az aszimptotikus értéket. A  $T_S$  értéke attól függ, hogy a (6) összefüggésben hányadik tagtól kezdve hanyagolhatjuk el a további tagokat. Látható, hogy minél kisebb  $k_{eff}$  értéke, annál erősebben csökkennek az egymást követő tagok, tehát annál kevesebb tagot elegendő megtartani az adott hibakorlát esetén. Ez azt jelenti, hogy minél kisebb a  $k_{eff}$ , azaz minél messzebb van a reaktor a kritikus állapottól, annál kevesebb időt kell kivárni ahhoz, hogy a (7) összefüggés szerinti teljes forráserősséget elérjük. Ezt szemlélteti az 1. ábra, ahol jól látható, hogy  $k_{eff,1} < k_{eff,2}$ -höz  $T_{S,1} < T_{S,2}$  tartozik.

A (7)-ben felírt neutronszám az egész reaktorban keletkezik, ami így meghatározza a reaktor térfogatában egy neutronfluxus-eloszlást. Ha behelyezünk egy neutrondetektort a reaktor valamely pontjára, akkor abban az ott uralkodó neutronfluxussal arányos beütésszámot ( $B$ ) kapunk. Ha a neutronfluxus térbeli eloszlása nem függ az  $S$  teljes forráserősségtől – ami nagyon jó közelítéssel teljesül is – akkor a  $B$  beütésszám arányos lesz  $S$ -sel. Tehát az adott helyen a neutronfluxust így írhatjuk:

$$\phi = C_1 \cdot \frac{S_0}{1 - k_{eff}}.$$

Az ezzel arányos beütésszám pedig:

$$B = C_2 \cdot \frac{S_0}{1 - k_{eff}},$$

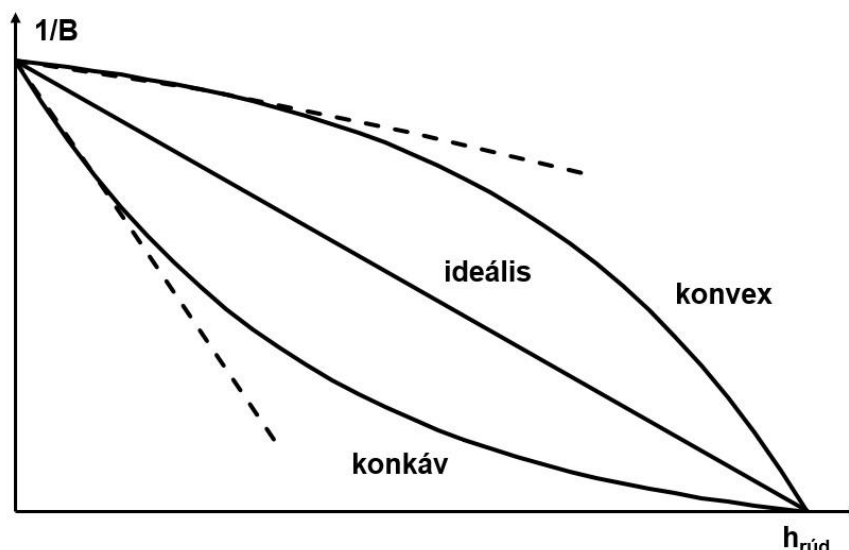
ahol  $C_1$  és  $C_2$  konstansok. A  $C_1$  a zóna anyagi, és geometriai jellemzőitől függ, míg  $C_2$  ezeken kívül magába foglalja a neutrondetektor határfokát is. Ha ismerjük  $C_2$  és  $S_0$  értékét, valamint mérjük  $B$ -t, akkor az alábbi módon meg tudjuk határozni  $k_{eff}$  értékét:

$$k_{eff} = 1 - C_2 \cdot \frac{S_0}{B},$$

ebből pedig a kritikus állapottól való eltérést:

$$\Delta k_{eff} = k_{eff} - 1 = -C_2 \cdot \frac{S_0}{B}$$

A kritikussági kísérlet során az aktív zónába helyezett fűtőelemek számának (vagy esetünkben a szabályzórod pozíciójának) függvényében felrajzolt reciprok beütésszámok ( $1/B$ ) görbéjének sorozatos extrapolációjával határozzuk meg a kritikus állapothoz szükséges üzemanyag-mennyiséget (vagy szabályzórod-pozíciót). Annál az üzemanyag mennyiségnél (vagy szabályzórod-pozíciónál) lesz kritikus a rendszer, ahol  $1/B = 0$ .



2. ábra: A kritikusság megközelítésére használt extrapolációs görbék

A 2. ábra szemlélteti azt a három extrapolációs görbét, amelyekkel a kritikussághoz eljuthatunk. Ideális esetben egyenest kapnánk, hiszen ekkor két pontból a kritikus rúdpozíció (vagy a kritikus tömeg) meghatározható lenne. Ha az üzemanyag (illetve a szabályzórudak) reaktivitás-értékessége független lenne a zónabeli pozíciójuktól, akkor a reciproknak beütésszám arányos lenne a rúdpozícióval, vagy éppen a zónába töltött üzemanyag mennyiségével. Ha továbbá a neutrondetektorok is optimálisan lennének elhelyezve és a reaktorban a neutronfluxus-eloszlás nem változna a zónában, akkor az ideális görbét, egyenest kapnánk.

Viszont az abszorberek, illetve az üzemanyag reaktivitás-értékessége is az adott helyen levő neutronfluxus relatív nagyságával arányos.

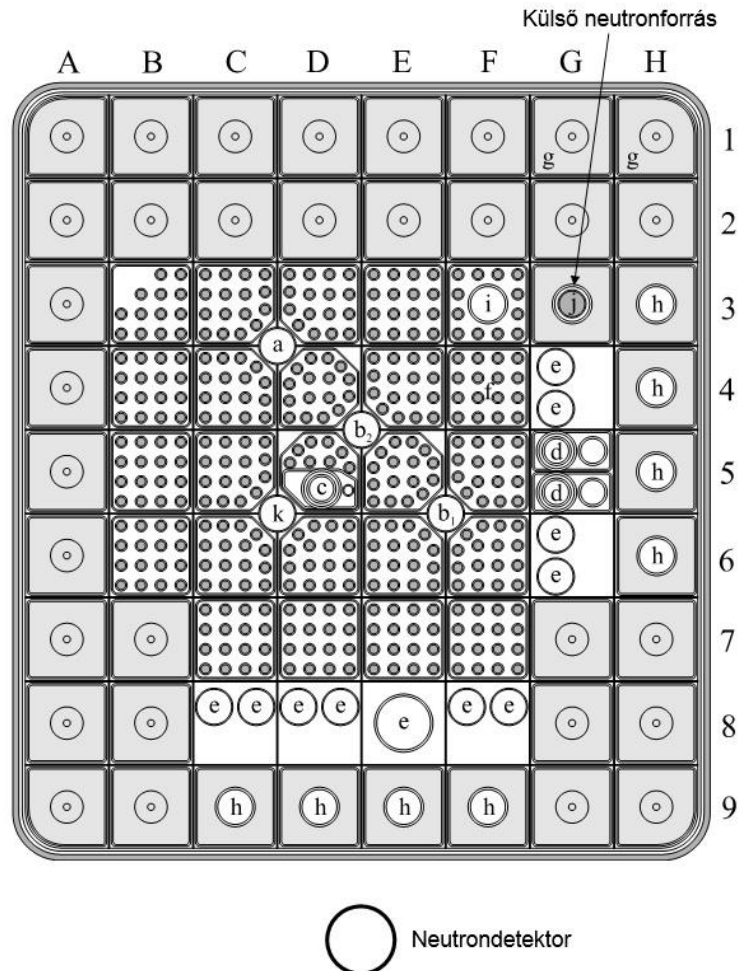
Ha a neutrondetektor a külső neutronforráshoz, és a zónához képest úgy van elhelyezve, hogy közvetlenül a forrás-neutronokat detektálja, nagy valószínűséggel a konvex görbét kapjuk.

A konvex görbén haladni veszélyes dolog, ugyanis lényegesen felülbecsülhetjük a kritikus rúdpozíciót (vagy adott esetben a kritikus tömeget)!

Amennyiben a neutrondetektor(ok) megfelelően vannak elhelyezve, konkáv görbét kapunk, ami a biztonság irányába mutat, mivel konzervatív becslést ad a kritikus rúdpozícióra, vagy a kritikus tömegre.

## A mérés előkészületei

A kritikussági kísérlet során a korábbi gyakorlattal ellentétben nem mozgatunk fűtőelem-kazettákat – hogy kiküszöböljük az üzemanyag mozgatásával járó kockázatokat (pl. mechanikai sérülés) – hanem a kézi szabályzórúd fokozatos kihúzásával hozzuk kritikus állapotba az Oktatóreaktort. A kézi szabályzórúd fokozatos kihúzása a zónából is megfelelően prezentálja a kísérlet célját. Az Oktatóreaktor zónatérképe a 3. ábrán látható.



3. ábra: Az Oktatóreaktor zónatérképe a kísérlethez szükséges eszközök feltüntetésével

Az Oktatóreaktor 24 fűtőelem-kazettát (összesen 369 fűtőelem-pálcát) tartalmaz. Ennyi üzemanyag elegendő a reaktor kritikussá tételéhez. A zóna reaktivitását a zónába helyezett két biztonságvédelmi rúddal ( $b_1$  és  $b_2$ ), valamint az automata (a) és a kézi (k) szabályzó rudakkal kötjük le. A kézi szabályzórúd reaktivitás-értékessége 1,88 \$, az automata szabályzórúd reaktivitás-értékessége 85 ¢. A kísérlethez hagyományosan egyetlen neutron-detektort használunk. A bór-bevonatú, argon töltőgázú LND 23210 típusú proporcionális számláló falán a hivatalos dokumentáció szerint 96% dúsítás  $^{10}\text{B}$  bevonat van, 0,5 mg/cm<sup>2</sup> felületi sűrűséggel.

## **A mérés menete**

### **1. A reaktor ellenőrzése**

Minden üzemnap előtt az ügyeletes szolgálat ellenőrzi, hogy a nukleáris mérőláncok, illetve a reaktorvédelmi rendszer (LOGIKA) megfelelően működik-e. Ennek részleteit lásd a „Reaktorüzemeltetési gyakorlat” mérésleírásában. Amennyiben minden rendeltetésszerűen üzemel, a kísérlet elkezdhető.

### **2. A neutrondetektor tesztelése**

Mielőtt a reaktoron bármilyen műveletet végeznénk, meg kell győződnünk arról, hogy a mérőberendezés helyesen működik. A neutrondetektor vizsgálatához a reaktorfedélen a detektor érzékeny térfogata mellé helyezünk egy paraffin gömbben elhelyezkedő PuBe neutronforrást. Ezek után a GENIE mérőprogramot elindítva néhány percig mérést végzünk. A kapott görbét elemezve megállapítható, hogy a detektor helyesen működik-e. Amennyiben a neutrondetektor helyesen működik, az ügyeletes szolgálat segítségével lehelyezzük azt a besugárzó alagúthoz csatlakozó, reaktortartályban elhelyezkedő függőleges besugárzó csatornába. Ekkor a detektor érzékeny térfogatának közepe az aktív zóna közepénél helyezkedik el, attól mindössze néhány centiméterre.

### **3. A $\gamma$ -háttér kiszűrése**

Miután a detektor lekerült a függőleges besugárzó csatornába, ki kell szűrni a  $\gamma$ -háttértől eredő járulékot. E mérés esetében a reaktor még mélyen szubkritikus, minden szabályzó- és biztonságvédelmi rúd alsó véghelyzetben van, továbbá a külső neutronforrás sincs még a zónában, tehát a neutronoktól származó járulékok elhanyagolhatóak. E mérés kezdetén szintén a GENIE program segítségével néhány percig mérünk, majd a diszkriminációs szintet (LLD – low level discriminator) addig állítjuk felfele, amíg a mérés során nem tapasztalunk beütésszámot. Természetesen minden egyes LLD-szint állításkor újra kell indítani a mérést.

Amikor elértük azt az LLD értéket, amikor már nincs a  $\gamma$ -háttértől eredő beütés a programban, a mérést le kell állítani, a végső LLD értéket fel kell jegyezni. (A tapasztalatok szerint ez néhány százalék, ami természetesen függ a reaktor előéletétől is.) Ezek után a programot át kell állítani „multi-channel” üzemmódba, ahol egy csatorna szélessége 4 másodperc.

A kísérlet során minden egyes lépést követően annyi időt kell várni, hogy az aszimptotikus állapot beálljon.

#### 4. A „kezdeti reaktorállapot” kialakítása

Minden eszköz ellenőrzése, valamint a  $\gamma$ -hátter járulékanak kiszűrése után a kritikussági kísérlet elkezdhető. Első lépéseként a mérésvezető oktató minden esetben kéri a szolgálattól az impulzusüzemű mérőláncok periódusvédelmének bénítását. Ezzel elkerülhető, hogy gyakorlatilag zéró reaktorteljesítményen a nagy fluktuációk okozta periódusvédelmi veszély miatt a reaktor leálljon, és ezzel a kísérlet félbeszakadjon.

A kritikussági kísérlet kezdetén a mélyen szubkritikus reaktorba bejuttatjuk a külső neutronforrást. Az aszimptotikus állapot beállása után a biztonságvédelmi rudak kihúzása, majd az automata rúd középállásba ( $h = 300$  mm) hozása következik. Ezen állapot elérését tekintjük a kezdeti zónakonfigurációnak, ugyanis a kísérlet során ezen elemeket nem mozgatjuk tovább. A teljesen felhúzott BV rudak, valamint a fél-állásban lévő automata rúd mellett mért aszimptotikus beütésszámokat (hagyományosan 20 csatornát veszünk figyelembe) tekintjük kiinduló állapotnak. ( $N_0$ )

#### 5. A kritikus állapot megközelítése

A kritikus állapot megközelítésnek első lépésében a kézi szabályzórudat alsó véghelyzetből felhúzzuk 200 mm-re. Ez esetben is kivárjuk az aszimptotikus állapotot, majd feljegyezzük a 20 csatornára érkezett beütésszámot, ez az első mérési pont. ( $N_1$ ) Minden mérési pont esetében képezni kell az aktuálisan mért beütésszám előtti és az aktuális beütésszám hányadosát. Ez első esetben  $N_0/N_1$ . Minden új rúdpozíciónál extrapolálunk a következő rúdpozícióra. Ehhez a rúdpozíció függvényében ábrázoljuk a számított beütésszám arányokat ( $N_{i-1}/N_i$ ), és a pontokra egyenest illesztünk. (A  $h = 0$  mm-es kézi rúd pozícióhoz az  $N_0/N_0 = 1$  értéket használjuk.) Az illesztett egyenes egyenletéből meghatározható a „kritikusnak vélt” rúdpozíció. Fontos megjegyezni, hogy, mivel nem tudhatjuk, hogy a konvex vagy a konkáv görbén haladva közelítjük meg a kritikus állapotot (lásd 2. ábra), a következő lépésben nem az extrapolált pozícióba húzzuk a kézi rudat. Ahhoz, hogy a biztonság irányába mutasson a mérés, a kézi rudat minden esetben az aktuális és az extrapolált pozíció különbségének harmadával, vagy negyedével mozdítjuk el:

$$h_{új} = h_{aktuális} + \frac{h_{extrapolált} - h_{aktuális}}{3}$$

Ezt a metódust addig folytatjuk, amíg az utolsó két extrapoláció ugyanazt az eredményt nem adja. Ekkor a számított pozícióba húzzuk a kézi rudat, immár bekapcsolt periódusvédelem mellett. **Fontos, hogy a reaktor bénított periódusvédelem mellett nem kerülhet kritikus állapotba!**



Arról, hogy a reaktor kritikus-e, úgy győződünk meg, hogy az utolsó rúdpozícióba mozdításakor az aszimptotikus állapot „viszonylag hosszú” várakozási idő után sem alakul ki. (Ez összhangban van a pontkinetikából levezethető azon összefüggéssel, miszerint egy külső neutronforrást helyezve kritikus reaktorba a neutronfluxus lineárisan nő, és nem áll be aszimptotikus értékre!)

Ekkor a külső neutronforrást kihúzzuk a zónából. Amikor ez megtörtént, a beütésszámoknak (kritikus állapotban) be kell állni egy konstans értékre. Ez esetben két dologra kell figyelni: a forrás kihúzása miatti tranziensek lecsengéséhez el kell telnie egy kis időnek, valamint a külső neutronforrásnak pozitív reaktivitás-értékessége van ( $\rho_{\text{forrás}} = 1,6 \text{ } \phi$ ), amit a kézi rúd elmozdításával kompenzálni kell. (Ennek mértékét a vezénylőteremben rendelkezésre álló differenciális reaktivitás-értékesség táblázatokból kell megállapítani.)

### **6. A többlet reaktivitás meghatározása**

A kísérlet utolsó lépéseként a reaktort a kézi rúd feljebb húzásával enyhén szuperkritikussá tesszük. Nagy kétszerezési időt beállítva ( $T_{2x} \gg 15 \text{ s}$ ) regisztráljuk a beütésszámokat. A mért adatokra exponenciális függvényt illesztve meghatározható a reaktor periódusideje. Ezt átszámítva kétszerezési időre a vezénylőben található „Reaktivitás – kétszerezési idő” táblázatokat felhasználva meghatározható a bevitt reaktivitás mértéke. Az átszámítás a periódusidő és a kétszerezési idő között:

$$T = \frac{T_{2x}}{\ln 2}$$

### **Fontosabb ellenőrző kérdések**

1. Írja fel az effektív sokszorozási tényező definícióját, és értelmezze a benne szereplő tagokat!
2. Ismertesse a szubkritikus rendszer erősítési tényezőjét leíró összefüggést!
3. Mitől függ a szubkritikus erősítés aszimptotikus értékének eléréséhez szükséges időtartam nagysága?
4. Ismertesse a kritikus állapot becsléséhez használt lineáris extrapoláció alapját!
5. Mi határozza meg az extrapolációs görbe alakját?
6. Hogyan határozhatjuk meg egy szuperkritikus zóna reaktivitását?
7. \* Miért az utolsó két mérési pontból számolt értékeket használjuk az extrapolációhoz?
8. \* A  $k_{\text{eff}}$  mely tényezőit változtatjuk ezen, és az üzemanyag betöltésén alapuló módszerben?