REAKTOR ÜZEMELTETÉSI GYAKORLAT

1. Bevezetés

Az üzemeltetési gyakorlat célja az atomreaktorban lejátszódó fizikai folyamatoknak, a reaktor felépítésének, nukleáris és technológiai berendezéseinek, valamint irányító rendszerének megismerése. A gyakorlat elvégzésének legfontosabb feltétele: alapvető magfizikai ismeretek.

2. Elméleti összefoglalás, alapfogalmak

2.1 Termikus reaktorok felépítése

Az atomreaktor olyan műszaki létesítmény, amelyben az önfenntartó láncreakció külső neutronforrás nélkül szabályozott formában megvalósítható. Azokat a reaktorokat, amelyekben a maghasadások döntő részét termikus neutronok hozzák létre, termikus reaktoroknak nevezzük.

Az atomreaktor legfontosabb része a hasadóanyagot (esetünkben ^{235}U-öt) tartalmazó üzemanyag. Ismeretes, hogy a természetes urán kereken 0,7% ^{235}U-öt tartalmaz. A legtöbb reaktorban dúsított uránt használnak üzemanyagként, általában urándioxid (UO_2) formában.

A maghasadáskor nagy energiájú neutronok keletkeznek (átlagenergia: ≈2 MeV). A nagy energiájú neutronok azonban csak nagyon kis valószínűséggel hoznak létre maghasadást, ezért ezekkel önfenntartó láncreakciót nagyon nehéz megvalósítani. Ezért termikus reaktorban az önfenntartó láncreakció megvalósításához a nagyenergiájú neutronokat termikus energiákra (≈0,025 eV) lelassítják. A gyorsneutronok lelassítására szolgál az ún. moderátor. Moderátornak azokat az anyagokat használják, amelyekben nagy mennyiségben találhatók könnyű atommagok (pl. H, D, C, Be stb.). Nagy tömegű atommagok azért nem felelnek meg erre a célra, mert rugalmas ütközéskor a kis tömegű neutronoktól csak kis energiát tudnak átvenni, s így a neutronok energiája csak nagyon sok ütközés után csökkenne számottevően. A leggyakrabban H_2O, D_2O, grafit moderátor anyagok használatosak.

Az atomreaktorban a hasadások során keletkezett hőenergiát a hűtőközeg szállítja el. Használnak folyadékot (H_2O, D_2O stb), vagy gázt (CO_2, He stb.) hűtési célokra, és sok esetben a moderátor és hűtőközeg ugyanaz az anyag, pl. könnyűvíz.

Végül megemlítjük, hogy egy reaktor működtetéséhez, a szabályozott önfenntartó láncreakció megvalósításához szükség van egy komplex irányító rendszerre a reaktor szabályozás és biztonság feltételeinek megteremtéséhez.

2.2 A kritikusság fogalma

Kritikus állapotban van az a reaktor, amelyben az önfenntartó láncreakció külső neutronforrás nélkül éppen megvalósul. Az atomreaktor egyik legfontosabb reaktorfizikai jellemzője az ún. sokszorozási tényező (k) , mely az egy neutronciklus alatt bekövetkező neutronszám - sokszorozódás értékét adja meg. A sokszorozási tényező értékének meghatározására szolgál a négyfaktor-formula, ami végigköveti a neutronok számának változását egy neutronciklus alatt.

$$k_\infty = \epsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \qquad (1)$$

A négyfaktor-formula végtelen méretű reaktorra vonatkozik, ahol nem tételezünk fel neutron kiszökést a reaktorból. Véges méretű reaktor esetén van egy ötödik tényező is, így kapjuk meg az effektív sokszorozási tényezőt (k_{eff}):

$$k_{eff} = \epsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \cdot P \qquad (2)$$

A tényezők jelentése a következő:

ε - a gyorshasítási tényező: a gyors neutronok által okozott ^{238}U hasadások járuléka. Tipikus értéke kicsivel 1 fölött van.

p - a rezonancia tényező: annak a valószínűsége, hogy egy neutron lelassul anélkül, hogy közben hasadás nélkül rezonanciabefogást szenved el egy ^{238}U magban. Értéke kisebb, mint 1.

f - a termikus hasznosítási tényező: a lelassult és termalizálódott neutronok mekkora hányada lép hasadóanyag maggal reakcióba (ahelyett, hogy szerkezeti anyagban vagy moderátorban befogódna). Értéke kisebb, mint 1.

η - a termikus neutronhozam: egy termalizálódott, és hasadóanyag magban befogódott neutron által kiváltott magreakcióban hány új neutron keletkezik. Értéke nagyobb, mint 1.

P - a kilépési tényező: annak a valószínűsége, hogy egy neutron nem lép ki a reaktorból. Értéke kisebb, mint 1.

Ha $k_{eff} < 1$, akkor a reaktor szubkritikus: le van állítva vagy teljesítménye csökken.
Ha $k_{eff} = 1$, akkor a reaktor kritikus, teljesítménye időben állandó.
Ha $k_{eff} > 1$, akkor a reaktor szuperkritikus, teljesítménye exponenciálisan nő.

2.3 A reaktivitás fogalma

Reaktivitás alatt az effektív sokszorozási tényező 1-től való relatív eltérését értjük:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \qquad (3)$$

Minthogy $k_{eff} = 1$ jelenti a kritikusságot, $\rho=0$ esetében a reaktor kritikus, $\rho < 0$-nál szubkritikus, $\rho > 0$-nál szuperkritikus. Ha $\rho > 0$, akkor a neutronfluxus – illetve az azzal arányos reaktorteljesítmény – nő az idő függvényében. A változás sebessége annál nagyobb, minél nagyobb a reaktivitás. E sebesség változása – a folyamat dinamikája – azonban nem sima függvénye a reaktivitásnak! Ez a késő neutronok miatt van így. A maghasadáskor keletkező neutronok egy kis százaléka ugyanis csak a hasadványok β^- bomlása után létrejött magból lép ki, s ezért kilépésük idejét a β^- bomlás felezési ideje határozza meg. Ezek az ún. késő neutronok. Jelöljük a késő neutronok részarányát β_{eff}-el.

A reaktorteljesítmény változásának sebessége $\rho = \beta_{eff}$ környezetében szinte ugrásszerűen megnő, majd $\rho > \beta_{eff}$ esetében sokkal meredekebben nő a ρ-val, mint a $0 < \rho < \beta_{eff}$ tartományban.

Ennek magyarázata a következő:

A k_{eff}-ben a prompt neutronok mellett a késő neutronokat is figyelembe vesszük. Minthogy β_{eff} a késő neutronok részaránya, ha $\rho = \beta_{eff}$, akkor a prompt neutronok egyedül is kritikussá teszik a reaktort. Ezt a reaktort nevezzük promptkritikusnak. Ha $\rho > \beta_{eff}$, akkor a reaktor nemcsak szuperkritikus, hanem promptkritikus fölötti is.

Tehát:

a) ha $\rho = \beta_{eff}$, azaz $\frac{\rho}{\beta_{eff}} = 1$, akkor a reaktor promptkritikus,

b) ha $0 < \rho < \beta_{eff}$, azaz $0 < \frac{\rho}{\beta_{eff}} < 1$, akkor a reaktor szuperkritikus, de promptkritikus alatti,

c) ha $\rho > \beta_{eff}$, azaz $\frac{\rho}{\beta_{eff}} > 1$, akkor a reaktor promptkritikus fölötti.

A b) esetben a neutronfluxus nő az idő függvényében, de mivel a reaktort ebben az esetben a prompt neutronok önmagukban nem teszik kritikussá, a változás sebességét – a folyamat dinamikáját – a hosszú ciklusidejű (generációs idejű) késő neutronok szabják meg. A teljesítményváltozás viszonylag lassú.

A c) esetben a reaktort prompt neutronok önmagukban is szuperkritikussá teszik, ezért a változás sebességét – a folyamat dinamikáját – a késő neutronokénál több nagyságrenddel rövidebb ciklusidejű prompt neutronok szabják meg. A folyamat emiatt igen gyors, és annál gyorsabb, minél nagyobb a ρ a β_{eff} -hez képest. A reaktor ez esetben szabályozhatatlanná válna, ha nem lennének negatív visszacsatolások.

A b) és c) esetet az a) eset választja el egymástól, következésképpen ennek környezetében növekszik meg ugrásszerűen a változás sebessége.

A leírtakból látható, hogy a folyamat dinamikáját nem annyira a ρ önmagában, hanem annak β_{eff}–hez viszonyított értéke, azaz a $\frac{\rho}{\beta_{eff}}$ hányados szabja meg. Ez indokolja a reaktivitás „dollár” egységének bevezetését: 1 $ reaktivitás $\rho = \beta_{eff}$,-nek felel meg, azaz 1 $ a prompt kritikus reaktor reaktivitása. A BME Oktatóreaktor zónájára β_{eff}=0.00798, a maximális reaktivitás 0,8$ körül van, tehát a prompt kritikus állapot kizárt.

2.4. A késő neutronok és anyamagjaik

A magfizikusok eddig 66 különböző későneutron-anyamagot azonosítottak. Felezési időik 0,12 s és 78 s között változnak, emiatt az általuk keltett késő neutronok jelentősen különböző késleltetési időkkel jelennek meg. Reaktorkinetikai számításokban a késő neutronok korrekt kezelése ennek megfelelően az lenne, ha valamennyi anyamagot a saját felezési idejével és hozamával vennénk figyelembe, de ez túlságosan elbonyolítaná a számításokat. A számításokhoz a késő neutron anyamagokat általában 6 csoportba sorolják be, minden csoporthoz egyetlen bomlásállandót (λ_i, i=1..6) és késő neutron hányadot (β_i, i=1..6) rendelve.

Csoport	Felezési idő [s]	Bomlásállandó [1/s]	Későneutron hányad
1	55,72	0,0124	0,000215
2	22,72	0,0305	0,001424
3	6,22	0,111	0,001274
4	2,30	0,301	0,002568
5	0,614	1,14	0,000748
6	0,230	3,01	0,000273

1. táblázat: ^{235}U magfizikai késő neutron állandói

A késő neutronok alacsonyabb energiával keletkeznek, mint a hasadási neutronok, ezért termikus reaktorokban a láncreakció szempontjából értékesebbek, mivel kevesebb ütközésre van szükség a termalizálódásukhoz, így kisebb valószínűséggel nyelődnek el hasadás kiváltása nélkül. Ezt is figyelembe veszi az effektív későneutron hányad (β_{eff}), ami az adott reaktorra jellemző érték, és termikus reaktorokban magasabb az izotópra jellemző magfizikai későneutron hányadnál (β).

2.5 A periódusidő és a kétszerezési idő

Egy termikus reaktorban az átlagos neutronsűrűség ($\bar{n}$) időegység alatti változását az alábbi pontkinetikai egyenletrendszer írja le:

$$\frac{d\bar{n}(t)}{dt}=\frac{\beta_{eff}}{l}[\rho-1]\cdot\bar{n}(t)+\sum_{i=i}^{6}\lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt}=\frac{\beta_i}{l_i}\bar{n}(t)-\lambda_i C_i(t)$$

Ahol

$\bar{n}$: átlagos neutronsűrűség [1/cm^3]

t: idő [s]

β_{eff}: effektív későneutron-hányad [1]

l: átlagos promptneutron-élettartam [s]

ρ: reaktivitás [$]

λ_i: az i-dik csoportba sorolt késő neutron anyamagok bomlási állandója [1/s]

C_i: az i-dik csoportba sorolt késő neutron anyamagok átlagos sűrűsége [1/cm^3]

β_i: az i-dik csoportba sorolt késő neutronok effektív hányada [1]

Az egyenletrendszer aszimptotikus megoldása konstans pozitív reaktivitás esetén egy exponenciális függvény, ami jellemezhető a periódusidővel: az az idő, amely alatt a neutronsűrűség (vagy neutronfluxus) az e-szeresére változik. A gyakorlatban használatos még a – könnyebben mérhető – kétszerezési idő, amely alatt a neutronsűrűség a kétszeresére változik. Kritikus állapotú reaktorban ($n = n_0$ = konst.) a periódusidő végtelen.

Reaktivitás [$]	Kétszerezési idő [s]	Periódusidő [s]
0,1	68,55	98,90
0,2	25,65	37,01
0,4	6,97	10,06
0,6	2,36	3,40
0,8	0,725	1,05
1	0,162	0,234
1,2	0,0529	0,0763
1,4	0,029	0,0418
1,6	0,0197	0,0284

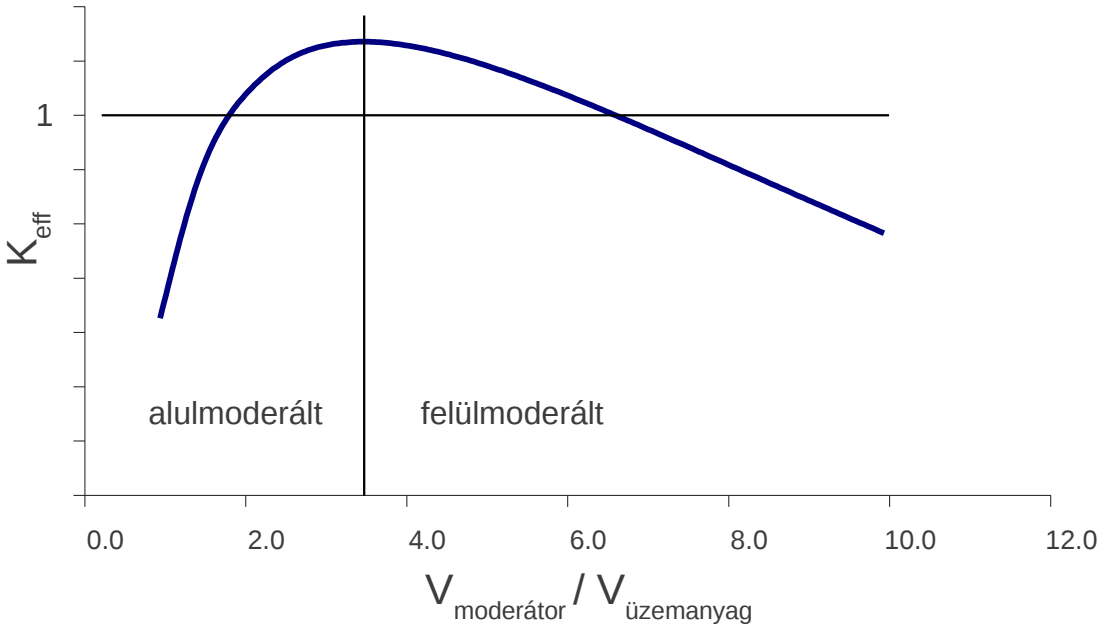
2. táblázat: néhány reaktivitás értékhez tartozó kétszerezési idő a BME Oktatóreaktor zónájára (számított értékek)

A periódusidő az atomreaktor egyik legfontosabb biztonsági paramétere, melynek üzemi értékét – a reaktor biztonságos működtetését figyelembe véve – szigorú előírások, és műszaki retesz feltételek korlátozzák.

2.6 Alulmoderált, felülmoderált reaktor, visszacsatolások

Az előzőekben láttuk, hogy a moderátor a neutronok lelassításával teszi lehetővé a láncreakció létrejöttét. A moderátor anyaga azonban - mint minden egyéb anyag is - több-kevesebb mértékben elnyeli a

termikus neutronokat, s ez a láncreakció szempontjából káros. Túl kevés moderátor azért rossz, mert a neutronok nem lassulnak le eléggé, túl sok moderátor pedig azért, mert a már termalizálódott neutronokat nem lehet tovább lassítani, de a moderátor mennyiségének további növelésével a neutronelnyelés növekszik. Ezért nyilvánvaló, hogy a moderátor/hasadóanyag aránynak van egy optimuma. Azokat a reaktorokat, amelyekben a moderátor/hasadóanyag arány az optimum alatt van, alulmoderált, amelyekben az optimum fölött van, felülmoderált reaktoroknak nevezzük.



1. ábra: az Oktatóreaktor üzemanyagára számított moderáltsági görbe

Biztonsági szempontból alapvető különbség van az alul- és a felülmoderált reaktorok között. Ha a reaktivitás valamilyen – szándékos vagy véletlen – külső behatásra pozitívvá válik, akkor a teljesítmény nőni kezd. A növekvő teljesítmény előbb-utóbb hőmérséklet-növekedéshez vezet, ami víz moderátoros reaktorokban a moderátor sűrűségének, és ezáltal a $V_{moderátor} / V_{üzemanyag}$ aránynak a csökkenéséhez vezet. Felülmoderált reaktorban ez közelíti a rendszert az optimális moderáltsághoz, azaz nő a reaktivitás: pozitív visszacsatolás lép fel, a teljesítmény öngerjesztő módon nőni kezd. Alulmoderált zónákban a moderátor sűrűségének csökkenése csökkenti a reaktivitást: amint az nullára csökken, a teljesítménynövekedés megáll, a rendszer önnmagától egy új egyensúlyi állapotba kerül.

Tovább növeli a reaktor stabilitását a Doppler-visszacsatolás. Ha növekszik az üzemanyag hőmérséklete, az intenzívebb hőmozgás miatt „kiszélesednek” a ^{238}U rezonanciacsúcsai, nő a valószínűsége annak, hogy egy lassuló neutron rezonanciabefogást szenved el. A csökkenő rezonancia-kikerülési valószínűség csökkenti a reaktivitást.

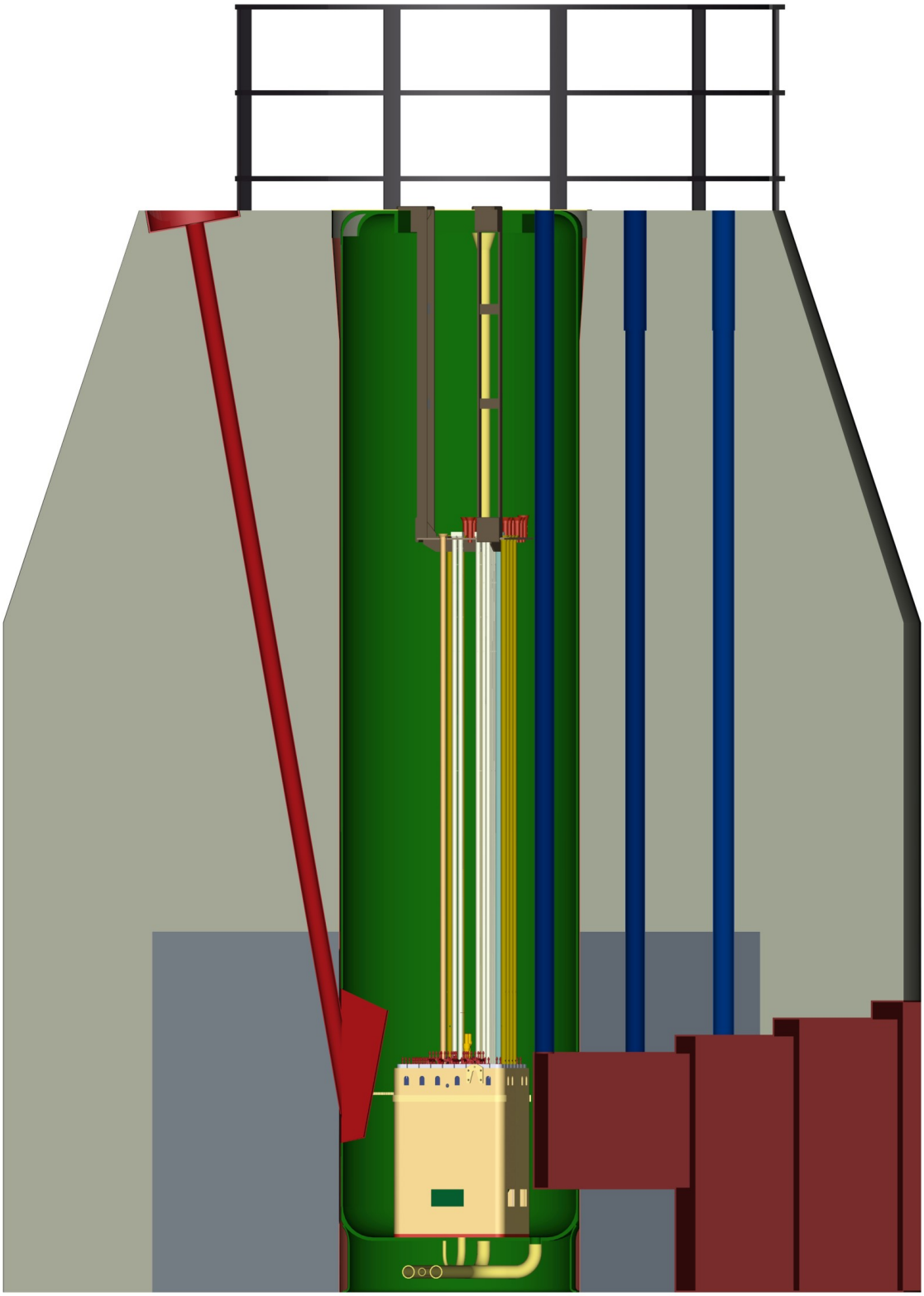
A BME atomreaktora - amelyen a méréseket végezzük, – szobahőmérséklet fölött mindig alulmoderált. Emiatt a reaktor önszabályozó tulajdonsággal rendelkezik, azaz belső – inherens – biztonságú.

3. A BME atomreaktor főbb jellemzői, paraméterei

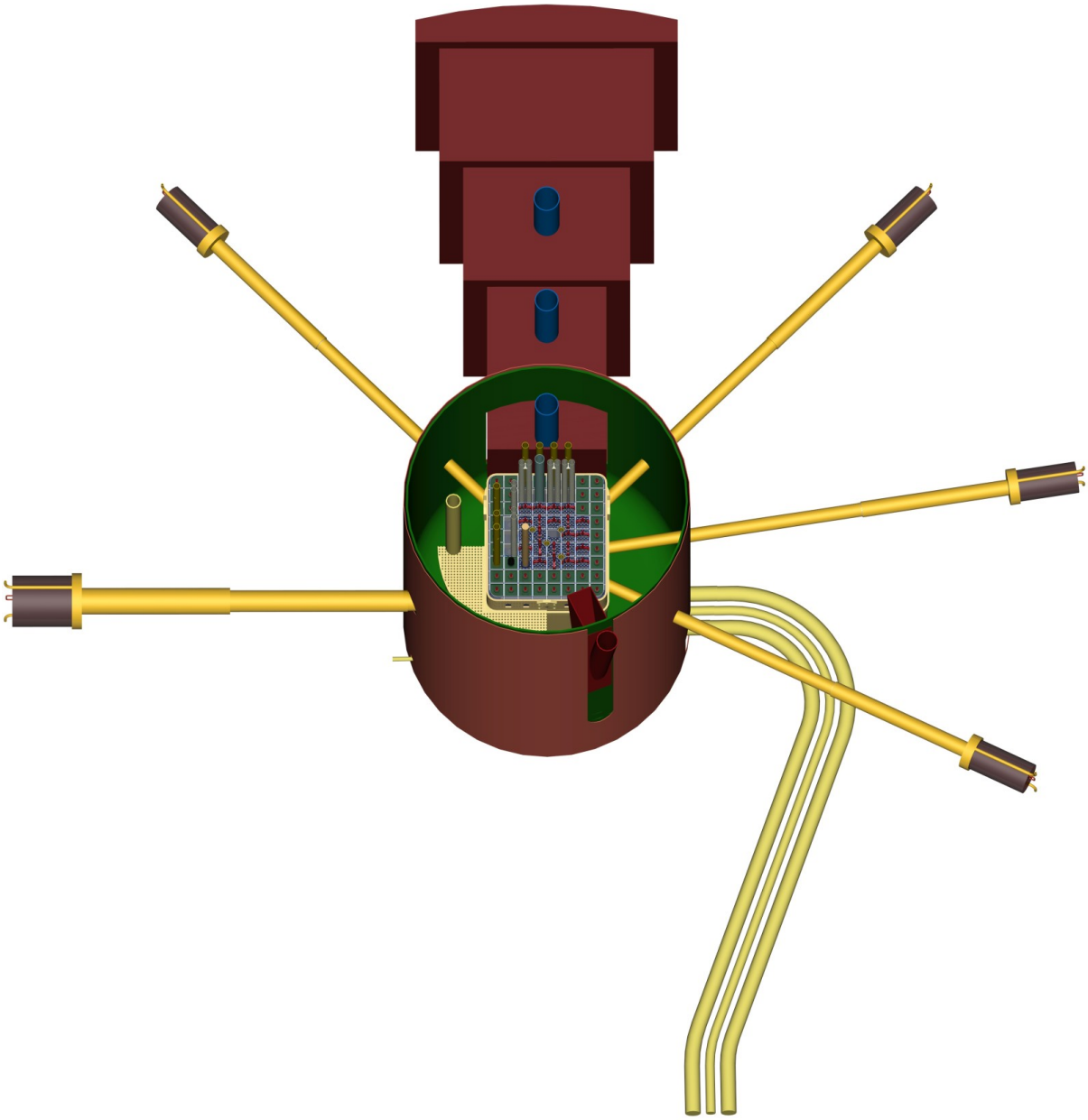
A reaktor maximális hőteljesítménye 100 kW, az aktív zónában a legnagyobb termikus neutronfluxus $2{,}7 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}\ s^{-1}$. Az üzemanyag ^{235}U-ben 10 %-ra dúsított UO_2, pálcánként 8 g ^{235}U található. A fűtőelem-pálcák száma összesen 369, melyek 24 kazettában helyezkednek el. Az aktív zóna eredeti ^{235}U tartalma ezek alapján összesen 2952 g. Moderátorként és hűtőközegként sótalanított víz (H_2O) szolgál. A zónából kiszökni próbáló neutronok miatti reaktivitás-veszteség csökkentésére ún. reflektorokat alkalmazunk, melyek oldalirányban grafitból és vízből, alul és felül pedig vízből állnak. Az irányítás (teljesítmény-szabályozás és biztonságvédelem) két biztonságvédelmi és két szabályozó rúddal történik, melyek anyaga bór-karbid,

illetbe kadmiumozott acél. Ezeket szervómotorok mozgatják az aktív zónában. A biológiai védelmet függőleges irányban a zóna fölött elhelyezkedő 4,8 m magas vízoszlop, míg vízszintesen (oldalirányban) 1,1 m vastag baritbeton + 0,9 m normálbeton adja. A beépített reaktivitás jelenleg (2012.) kb. 80 cent. A kézi szabályozórúd értékessége 0,876 $, az automata szabályozórúd értékessége 1,93 $.

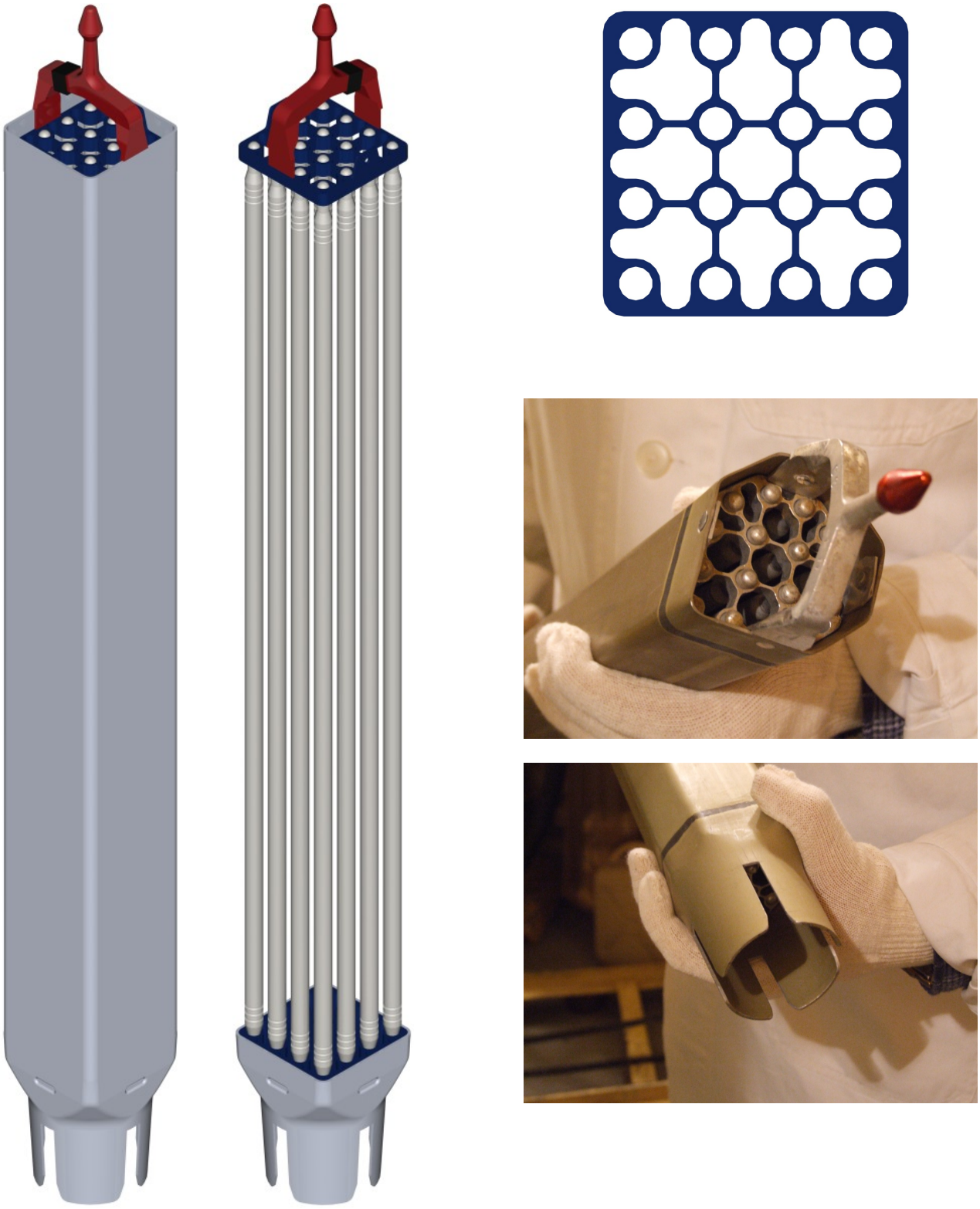
A 2-5. ábrák a reaktortömböt és az azon belül található berendezéseket mutatják be.



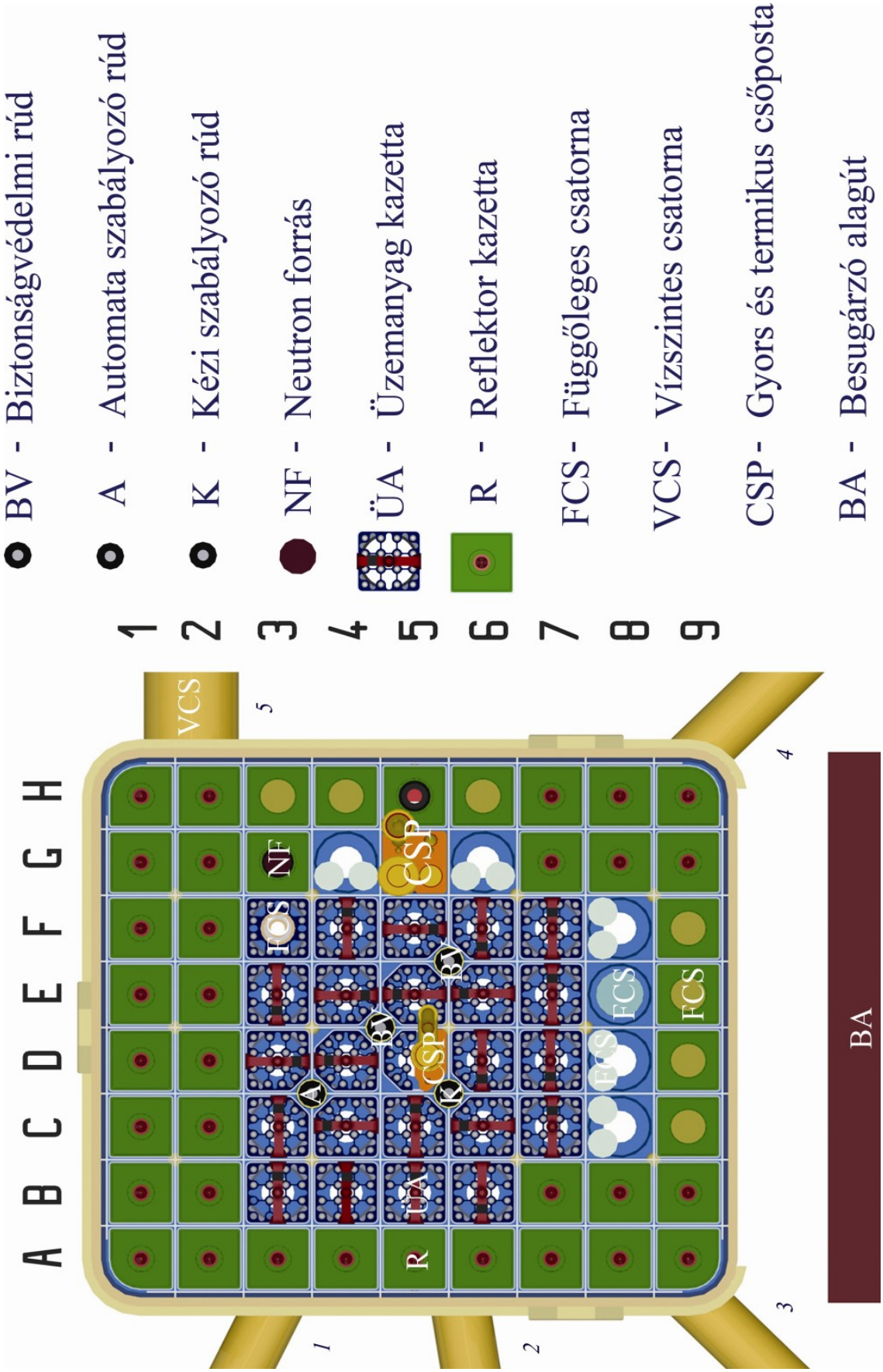
2. ábra: A reaktortartály függőleges metszete



3. ábra: az aktív zóna a reaktortartályban



4. ábra: EK-10 fűtőelemköteg



5. ábra: az aktív zóna

4. A reaktor irányítása

4.1 Általános ismeretek

A reaktorban lezajló láncreakcióba történő beavatkozást, az ahhoz szükséges jelfeldolgozást, s ezáltal a mindenkor szükséges üzemállapot beállítását reaktor irányításnak nevezzük. A reaktor irányítás tárgykörébe tartozik:

- a teljesítmény szabályozás
- a biztonságvédelmi feladatok
- az üzemi ellenőrző jel feldolgozás

Az előbb említett feladatokat egy olyan komplex elektronikai rendszer látja el, amely bizonyos egyszerűsítéssel a következő főbb részekből áll:

- érzékelő szervek: nukleáris és technológiai mérőláncok
- beavatkozó szervek: neutronabszorbens anyagokat tartalmazó biztonságvédelmi és szabályozó rudak a mozgatásukat végző szervomotorokkal és elektromágnesekkel
- logikai rendszer: olyan speciálisan kialakított célelektronika, amely a szabályozási és védelmi funkciók ellátásához szükséges jelfeldolgozást végzi és ennek eredményeképpen vezérli a beavatkozó szerveket: Ehhez fogadja az irányító személy utasításait, és mindezek alapján biztosítja a reaktor biztonságos üzemét, s ha szükséges az azonnali leállítását.

A reaktor teljesítményének mérése több módszerrel lehetséges, de szabályozási célra általában azt a tényt használják fel, hogy a reaktor hőteljesítménye arányos az aktív zóna átlagos neutronfluxusával. Így az állandó teljesítményre történő szabályozás az állandó neutronfluxusra történő szabályozással biztosítható.A neutron érzékelők (detektorok) és a hozzájuk csatlakozó mérőelektronikák (nukleáris mérőláncok) fontos elemei tehát a szabályozásnak. A neutronok detektálásása (reaktor üzemeltetési célokra) általában speciálisan kialakított ionizációs kamrákat használnak.

Neutron érzékelésre itt két meghatározó reakció jöhet szóba:

- az ^{235}U hasadása (a keletkezett hasadványok révén jön létre ionizáció)
- a bór (n,α) reakciója (ahol a keletkező α részecske hozza létre az ionizációt)

A BME Nukleáris Technikai Intézetének atomreaktoránál az irányító rendszerben 2 impulzus üzemű, 4 egyenáramú és egy szélessávú mérőlánc szolgál a teljesítmény ellenőrzésére, valamint a szabályozásra és a biztonságvédelem céljára.

Alacsony reaktorteljesítményen hasadási kamrákat használunk , amelyekben egy ^{235}U réteg konvertálja a semleges részecskékből álló neutronsugárzást a gáz töltetet ionizáló hasadványmagokká. Az I1, I2 jelű hasadási kamrákat impulzus üzemben használjuk: minden, a kamra falában hasadást kiváltó neutront egy impulzusként detektál a kamrára kötött mérőlánc. A vezénylőpulton található műszerek az I1, I2 detektor másodpercenként regisztrált beütésszámát (pps – pulse per second), és az ebből generált periódusidőt is kijelzik. Magas (néhányszor 10 W) reaktorteljesítményen a hasadási kamrák elvesztik a linearitásukat majd telítésbe mennek, ezért másfajta műszerekre is szükség van a reaktor teljesítményének méréséhez.

A másodiknak említett $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ reakción alapul a gamma kompenzált egyenáramú ionizációs kamrák működése. A gamma kompenzált neutrondetektorokban két, azonos geometriájú, de független gáztér van. Az egyik gáztérhez tartozó kamrafalon ^{10}B bevonat van, így ez a detektorfél a neutron és a gamma sugárzás összegét méri. A detektor másik fele nem tartalmaz bórt, így csak a zóna gamma sugárzását méri. A két kamrafél áramát egymásból kivonva, a neutronfluxussal arányos egyenáramot kapunk. Az egyenáramú mérőláncokat a nagyobb (P > 10 W) teljesítménytartományokban használjuk, periódusidő mérésre (E3) teljesítmény korlátozásra (E4, E5) és teljesítmény mérésre valamint szabályozásra (E6).

A jogszabályi környezet szigorodása miatt az 1990-es években be kellett építeni egy hetedik, szélessávú mérőláncot is, a periódusidő magas teljesítményen történő redundáns mérésére (Sz7).

6 mérőlánc biztosítja a jogszabályokban előírt redundáns (két, független rendszer által megvalósított) teljesítményszint védelmi és redundáns periódusidő védelmi jelet a teljes teljesítménytartományban. Mivel különböző mérésekhez különböző teljesítményen kell üzemeltetnünk a reaktort, a teljesítményszint védelmi határérték az operátor által módosítható. A periódusidő határértéke fix (10 s). A határértékek átlépése esetén a reaktor automatikusan leáll: a biztonságvédelmi rudakat tartó elektromágnesek elengednek, az elnyelők az aktív zónába esnek és gyorsan szubkritikus állapotba juttatják a reaktort.

Egyetlen mérőlánc (az E6 jelű) látja el az automatikus teljesítményszabályozás feladatát, és ez a kalibrált lánc is, aminek a mért áramjeléből kiszámítjuk a reaktor termikus teljesítményét.

5. A mérési feladatok

Az indítás előtti kötelező ellenőrzéseket, illetve a technológiai rendszerek (primer/szekunder kör) üzemeltetését az Oktatóreaktor ügyeletes személyzete végzi. A gyakorlat során a hallgatók a reaktor nukleáris üzemeltetését végzik egy instruktorként közreműködő reaktoroperátor felügyeletével (és segítségével). A hallgatók a gyakorlat során többször elindítják és leállítják a reaktort, különböző teljesítményszinteket állítanak be, kézi és automata módban üzemeltetik a reaktort, és különböző reaktorfizikai effektusokat ismernek meg.

A reaktor indításának főbb lépései:

- Irányítópult bekapcsolása, alaphelyzetbe hozása („reset”)
- Müszerek ellenőrzése, méréshatárok beállítása
- Indító neutronforrás bevitele a zónába
- Biztonságvédelmi rudak kihúzása a zónából
- Szabályozórudak beállítása az instruktor által megadott pozícióba
- Teljesítmény felfutás során szükség szerint a méréshatárok állítása
- Indító neutronforrás kihúzása a zónából 1 W teljesítményen
- Kívánt teljesítményszint elérésekor átkapcsolás automata üzemre

A gyakorlat során az alábbi dolgokat mutatjuk be:

- Szabályozó rudak egymáshoz viszonyított értékessége
- Kritikus rúdhelyzet teljesítményfüggése, visszacsatolások
- Szabályozórúd értékesség pozíciófüggése
- Hasadási kamrák beütésszámának teljesítményfüggése
- Éles biztonságvédelmi működés

8. Ellenőrző kérdések

1. Mi a sokszorozási tényező és a reaktivitás?
2. Ismertesse a négyfaktor-formulát!
3. Hogyan épül fel egy termikus atomreaktor?
4. Hogyan működnek a hasadási kamrák?
5. Hogyan működnek a gamma kompenzált ionizációs kamrák?
6. Mit jelent az alul- és felülmoderáltság?