

Az atomreaktoroknak több fajtája van, de közülük szinte kizárólag az atomerőművek reaktorai ismertek. [1]. Ez érthető, hiszen ezek termelik az energiát, ami a reaktorok fő felhasználása, ám némi figyelmet a többi reaktorfajta is megérdemel.

Néhány általános gondolat az atomreaktorokról

Atomreaktoroknak azokat a berendezéseket nevezzük amelyekben maghasadás megy végbe, úgy hogy az önfenntartó láncreakció lehetősége adott.

A reaktorok osztályozása több szempontból történhet. Az egyik lehetséges osztályozási szempont a felhasználás. Így négy alapvető típust különböztethetünk meg, úgymint a reaktortechnikai és biztonságtechnikai kutatások céljára épült kritikus rendszereket, a speciális reaktorokat, amelyek többsége haditechnikai felhasználású vagy közlekedési eszközök (elsősorban hajók) energiaforrásául szolgál, a neutronfizikai kutatásokra és/vagy radioaktív izotópok előállítására alkalmas kutatóreaktorokat, valamint az energiatermelésre használt atomerőműveket. Természetesen ez a felosztás, akárcsak bármilyen osztályozás bizonyos mértékig önkényes. Önkényes hiszen előfordul, hogy alapvetően energiatermelésre szolgáló atomerőművet részben izotóptermelésre (például ^{60}Co) vagy haditechnikai célra (plutónium előállítása) használnak. Ennek ellenére hasznos lehet a fenti felosztáson alapuló tárgyalás, hiszen megkönnyíti a sokféle reaktortípus áttekintését.

A négy alapvető típus szerepe természetesen nem azonos súlyú. A legfontosabb csoportot nyilván az energiát termelő atomerőművek jelentik. Jelen írás nem kíván az atomerőművekkel foglalkozni, hiszen azok irodalma magyar nyelven is bőséges [1, 2]. A kritikus rendszerek azért építették, hogy az atomerőművek, kutatóreaktorok vagy speciális reaktorok tervezését megkönnyítsék, a biztonság néhány aspektusa (például a neutronspektrum hatása a reaktor dinamikai tulajdonságaira) így kísérletileg tanulmányozható. A speciális reaktorok nukleáris szempontból nem különböznek jelentősen az atomerőművektől. Megjegyezzük, hogy a műszaki fejlődés során egy-egy speciális célra kifejlesztett reaktorból atomerőmű is válhat.



Vidovszky István fizikus (ELTE 1972), kandidátus (1989). 1972-től 2014-ig a KFKI, majd a KFKI AEKI kutatója, 1995–2012 között igazgatóhelyettese. Reaktorfizikai kísérletekkel és a kutatóreaktorok biztonságával, hasznosításával foglalkozott. Több éven át irányította a ZR-6 nemzetközi célprogram kísérleti tevékenységét. Részt vett a hazai atomerőmű biztonságának elemzésére irányuló ÁGNES projekt munkájában. A Magyar Nukleáris Társaság alapító tagja, 2001–2003-ig elnöke.

Erre már van is példa, az ólomhűtésű gyorsreaktorokat ugyanis eredetileg tengeralattjárók hajtására tervezték, ám továbbfejlesztett változatuk szerepel a legújabb, negyedik generációs atomerőművek között. A kutatóreaktorok általában közvetlenül nem kapcsolódnak az atomerőművekhez, bár előfordul, hogy atomerőművi problémák (például a tartálykárosodás időben előrehozott tanulmányozása) megoldására is használják őket. Azonban a kutatóreaktorok – mint az általános nukleáris kultúra megtestesítői – nem választhatók el az atomerőművektől, azaz a biztonsági kultúra függ a kutatóreaktoros tapasztalatoktól is.

Kritikus rendszerek, más néven zéró-reaktorok

A kritikus rendszerek építésének célja többnyire a kifejlesztés alatt álló reaktorok (atomerőművek, kutatóreaktorok) tervezési paramétereinek ellenőrzése. Tehát ezek a reaktorok egy-egy nagyobb reaktor nukleáris modelljének tekinthetők. A nukleáris modell azt jelenti, hogy a reaktor legtöbb reaktorfizikai tulajdonsága meg egyezik a modellezni kívánt reaktoréval, azonban a reaktor teljesítménye sokkal kisebb, közel zérus, innen ered a típus másik neve. A kis teljesítmény folytán a reaktorhoz könnyebb hozzáférni, ezért számos olyan mérés elvégezhető rajta, ami a nagy reaktorokon nem. További előny, hogy viszonylag olcsón megépíthető és ezért a kísérletek már jóval a prototípus elkészülte előtt elvégezhetőek. A kis teljesítmény következtében viszont nincsenek visszacsatolások, ezért nem minden reaktorfizikai paraméter ellenőrzésére alkalmas. Természetesen olyan kritikus rendszerek is épültek, amelyek nem modelleznek semmit, ezek demonstrációs vagy oktatási célokat szolgáltattak, ilyen volt például a KFKI-ban¹ tervezett és épített ZR-4,² ami egy nemzetközi ipari vásáron reklámozta az atomtechnikát, később pedig fontos kalibrációs méréseket tett lehetővé. Érdemes megjegyezni, hogy a világ első atomreaktora, amelynek célja a láncreakció fenntarthatóságának bizonyítása volt és amelyet *Fermi* indított el 1942-ben, szintén egy kritikus rendszer volt.

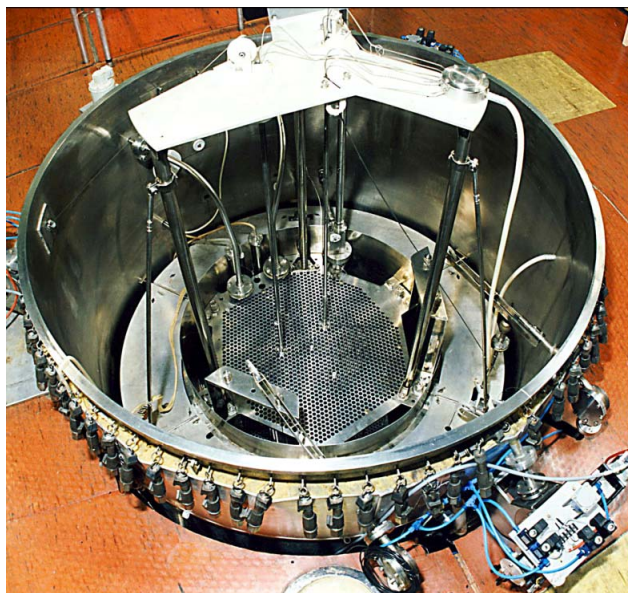
A kritikus rendszerek fontos tulajdonsága a flexibilitás. Míg a nagyobb teljesítményű reaktorok konfigurációja többé-kevésbé állandó, hiszen a konfiguráció bármilyen megváltoztatása jelentős erőfeszítést igényel, addig a kritikus rendszerekben fontos paraméterek, mint a dúsítás, a hőmérséklet, a fűtőelemek távolsága könnyen változtatható. Ezért a kritikus rendszerek sokféle szituáció modellezésére alkalmasak.

Az 1. ábrán látható a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben létesített ZR-6³ kritikus rendszer. A ZR-6 a

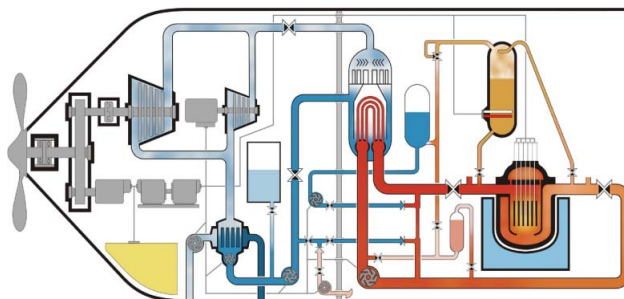
¹ KFKI – Központi Fizikai Kutatóintézet (1950–1991)

² ZR-4 – kritikus rendszer a KFKI-ban (1965–1985)

³ ZR-6 – kritikus rendszer a KFKI-ban (1972–1990)



1. ábra. A ZR-6 kritikus rendszer.



2. ábra. Speciális reaktor – tengeralattjáró energiaforrása.

VVER⁴ típusú atomerőművi reaktorok nukleáris modellje volt, 1972 és 1990 között több mint 300 különféle reaktorzóna konfigurációt vizsgáltak rajta [3]. A kísérletek eredménye bekerült nagy nemzetközi adatbázisokba [4], így hasznosult, de volt olyan eredmény is ami gyakorlati probléma, a sűrített rácsosztású tárolók biztonsága, megoldásában segített [5].

A kritikus rendszerek biztonsága jelentősen eltér a teljesítményreaktorokétól. A kis teljesítmény miatt a kritikus rendszereken bekövetkező balesetek környezeti hatása csekély, legtöbbször elhanyagolható.

A kritikus rendszerek teljesítménye nem állandó, hanem függ az éppen folyó kísérlet követelményeitől. A jellemző értékek néhány milliwatt és néhány száz watt közé esnek.

Speciális reaktorok

E csoportba sokféle és igen különböző reaktor tartozik, többségük haditechnikai célból készült és ezért viszonylag keveset lehet tudni róluk.

A speciális reaktorok legérdekesebb csoportja az, amely járművek hajtására szolgál. Tekintettel arra, hogy a reaktorok mérete nem lehet tetszőlegesen kicsi, bizonyos járműtípusok (közúti, vasúti) hajtása ma nem tűnik reálisnak. Egyelőre csak vízi járművek (hajók, tengeralattjárók) hajtását végzik reaktorok, de a tudományos fantasztikus irodalom az űrhajózásban is jelentős szerepet tulajdonít a reaktoroknak, ennek lehetősége nem cáfolható, ám ehhez több lényeges problémát kell még megoldani. A reaktorral hajtott járművek egy része hadi rendeltetésű (tengeralattjárók), ám más része (például jégtörők) békés célú. A 2. ábrán egy atom-tengeralattjáró látható.

⁴ VVER – víz-vizes energetikai reaktor (Voda-vodannij energieteszki reaktor) – a PWR csoportba tartozik.

A világon elsőként épült reaktorok haditechnikai célokat szolgáltak. Később békésebb irányba fordult a helyzet, ma már a világban üzemelő reaktoroknak csak elenyésző hányada katonai felhasználású. A legfontosabb haditechnikai alkalmazás a plutónium termelése volt, a plutónium ugyanis alkalmas bomba alapanyagának, ám a természetben nem található meg. A plutónium termelése több évtizeden át jelentős intenzitással folyt. Mára minden nagyhatalom jelentős mennyiségű felesleges plutóniummal rendelkezik, ezért a katonai célú gyártást néhány éve teljesen megszüntették, és e tekintetben egymást ellenőrzik. A nemzetközi egyezmények tiltják a többi ország nukleáris fegyverkezését, ezen belül a plutónium termelését is, ezért, ha van is plutónium termelés valahol, arról tudni nem lehet.

A speciális reaktorok biztonsága nehezen megítélhető, hiszen a hadi felhasználás más biztonsági követelményeket támaszt, mint a békés, a járművek biztonságát pedig nem lehet kizárólag azok energiaforrásának biztonságához kötni. A speciális reaktorok teljesítménye kisebb az atomerőművek átlagos teljesítményénél ám sok esetben megközelítik azt.

Kutatóreaktorok

A kutatóreaktorok vagy a neutronfizikai kutatások eszközei, vagy a radioaktív izotópok előállítására alkalmas berendezések. Gyakori, hogy a két cél egy reaktorban valósítható meg (így van ez a Budapesti Kutatóreaktor esetében is), de vannak kizárólag neutronfizikai kísérleteket szolgáló és csak izotópot termelő reaktorok is. Kutatóreaktorok szolgálják az oktatás, képzés, továbbképzés céljait is. Szokás külön kategóriaként említeni a főleg vagy kizárólag oktatási célokat szolgáló oktatóreaktorokat. Mi ezt a megkülönböztetést nem tesszük meg, hiszen sem felépítésben, sem egyéb tulajdonságaiban nem különböznek a kutatóreaktorok és az oktatóreaktorok egymástól, a felhasználás pedig nem állandó és nem kizárólagos jellemzője egy reaktornak, hiszen egy kutatóreaktor bármikor használható oktatási célokra is, és egy oktatóreaktor is alkalmas neutronfizikai kísérletekre.

A kutatóreaktorokon végezhető kísérletek spektruma igen széles. A már említett sugárkárosodás tanulmányozásán túl például neutronaktivációs analitika segítségével, igen kis mennyiségű anyag felhasználá-

sával határozható meg egy minta összetétele. Ennek fontos alkalmazása van például a bűnüldözés (nyomok elemzése) és a régészet (eredetmeghatározás) területén. A neutronradiográfia a röntgenradiográfiához hasonlóan fontos roncsolásmentes vizsgálati módszer, így vizsgálhatók például helikopterrotorok, amelyek épsége a helikopterek üzemben tarthatósága szempontjából elengedhetetlen. A neutronszórás (különösen a küsszögű szórás) vizsgálata ugyancsak sok gyakorlati probléma megoldására alkalmas a különböző iparágak területén. E területen különösen a kisenergiájú neutronok hatékonyak, ezért alkalmaznak úgynevezett hidegneutron-forrásokat a kutatóreaktorok mellett. A hidegneutron-forrás lelke egy cseppfolyós hidrogén- vagy héliumtartály, amelyben az alacsony hőmérséklet (néhány kelvin) folytán a neutronok az egyébként elérhetőnél jóval kisebb energiára lassulnak le. A Budapesti Kutatóreaktor is rendelkezik hidegneutron-forrással.

A kutatóreaktorok felhasználásának másik fontos területe a radioaktív izotópok ellátása. Ezek az izotópok ma már nélkülözhetetlenek a gyógyászatban, mind a diagnosztika, mind a terápia számára. A radioaktív izotópok az iparban is fontos szerepet játszanak, sokféle vizsgálat (például csővezetékek, tartályok épségének ellenőrzése) más módszerrel nem vagy csak nehezen végezhető el. Azonban meg kell jegyezni, hogy a legtöbb radioaktív izotóp előállításának az a feltétele, hogy a reaktor teljesítménye (neutronfluxusa) elegendően nagy legyen és emellett a reaktor hosszabb ideig folyamatosan üzemeljen. A Budapesti Kutatóreaktorban állítanak elő radioaktív izotópokat, ám e területen még van tér a fejlődésre. A legfontosabb diagnosztikai célú izotóp, a ^{99}Tc előállítása még csak a tervek között szerepel.

A kutatóreaktorok teljesítménye jóval nagyobb a kritikus rendszerekénél, de lényegesen kisebb az átlagos atomerőművékéénél. Jellemző teljesítményük 500 kW és 100 MW között van. Teljesítményen itt mindig hőteljesítményt értünk, hiszen kutatóreaktorok általában nem termelnek villamosenergiát. A kutatóreaktorok teljesítménye nem feltétlenül állandó, hanem függ az éppen folyó kísérletek igényeitől. A legtöbb kutatóreaktor az esetek többségében a maximális teljesítményen üzemeltetik, ám vannak impulzusreaktorok is (például TRIGA⁵) ahol egyes kísérletekben rövid ideig az állandó teljesítmény sokszorosán is lehet üzemelni.

Meg kell jegyezni, hogy a kisebb teljesítményű reaktorok kihasználtsága általában problematikus. Ennek oka nem feltétlenül a reaktor teljesítményében keresendő, hanem abban, hogy ilyen reaktorok többnyire iparilag fejletlenebb országokban üzemelnek. A tíz MW feletti teljesítményű reaktorok általában olyan keresettek, hogy azokon nyalábidót kapni csak kiemelkedően jó mérési programmal lehet. A fél – két MW teljesítményű reaktorok viszont gyakran kihasználatlanok és alig néhány órát üzemelnek évente. A 3. ábrán a Budapesti Kutatóreaktor [6] látható.

⁵ TRIGA – oktató-, kutató-, izotóptermező-reaktor, a General Atomics gyártmánya (Training, Research, Isotopes, General Atomics).



3. ábra. A Budapesti Kutatóreaktor.

A reaktortömböt körülvevő narancssárga kádak bórsavat tartalmaznak és az egyes csatornáknál kialakított mérőhelyek árnyékolását szolgálják. A képen jól látszik, hogy a reaktor kihasználtsága jó, hiszen teljesen körbe van építve mérőhelyekkel. A Budapesti Kutatóreaktor teljesítménye 10 MW.

A kutatóreaktorok biztonsága kiemelkedő. Ennek oka az, hogy a kutatóreaktorokkal szemben általában ugyanazokat a követelményeket támasztják, mint az atomerőművekkel szemben, viszont a kutatóreaktorok kisebb teljesítménye és egyszerűbb szerkezete (az energiatermelő részek hiánya miatt) folytán a kockázat még kisebb. Nincsen tudomásunk kutatóreaktorban bekövetkezett jelentős balesetről.

A kutatóreaktorok száma nagyjából megegyezik az atomerőművi blokkok számával, azaz néhány száz. A fejlett atomtechnikával rendelkező országokban általában jóval kevesebb a kutatóreaktor mint az atomerőmű, viszont sok atomerőművet nem üzemeltető ország rendelkezik kutatóreaktorral.

Irodalom

1. Király Márton, Radnóti Katalin: Az atomerőművek működéséről egyszerűen, típusaik és jövőjük – 1–3. rész *Fizikai Szemle* 66 (2016) 331–336., 372–377., 403–407.
2. Elter J., Gadó J., Holló E., Lux I. (szerk.) *Atomreaktorok Biztonsága*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest (2013) 53–76. (ISBN:978-963-312-180-1)
3. Bárdoš J., Becker R., Dabrowski C., Gácsi L., Gadó J., Józefowicz E. T., Kravchenko Iu. Ia., Krinizs K., Stanolov A., Szatmáry Z., Turi L., Vidovszky I.: *Final report of TIC, Volume 1. Experimental Investigations of the Physical Properties of WWER-type Uranium – Water Lattices*. Akadémiai Kiadó, Budapest 1985.
4. OECD NEA: *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*.
5. J. Gadó, I. Vidovszky: Influence of Water Density Change on Criticality Parameters in Special Fuel Lattices. *Nuclear Science and Engineering* 104 (1990) 217.
6. Vidovszky I.: The Budapest Research Reactor. *Science & Technology in Hungary* 10 (2000) 176.