



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vegyésmérnöki és Biomérnöki Kar
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

Írta:
PÁTZAY GYÖRGY

Lektorálta:
ELTER ENIKŐ

ATOMENERGETIKA ÉS NUKLEÁRIS TECHNOLÓGIA

Egyetemi tananyag

2011



COPYRIGHT: © 2011-2016, Dr. Pátzay György, BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

LEKTORÁLTA: Elter Enikő, BME KKFT

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)
A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2-08/2/A/KMR-2009-0028 számú, „Multidiszciplináris, modulrendszerű, digitális tananyagfejlesztés a vegyészmérnöki, biomérnöki és vegyész alapképzésben” című projekt keretében.



ISBN 978-963-279-468-6

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

AZ ELEKTRONIKUS KIADÁST ELŐKÉSZÍTETTE: Faragó Andrea

KULCSSZAVAK:

energiaellátás, nukleáris energetika, hasadási és fúziós energiatermelés, működő atomreaktorok, 1., 2., 3. és 4. generációs atomerőművek, nukleáris fűtőelem ciklusok, nukleáris üzemanyagok előállítása, szerelése, felhasználása, atomerőművek vízüzemei, PWR, BWR, VVER, dekontamináló eljárások, kiégett fűtőelemek kezelése, reprocessálás, radioaktív hulladékok, Paksi Atomerőmű, radioaktív izotópok, alkalmazás, diagnosztika, orvosi alkalmazások, sugárzások mérése, adatfeldolgozás

ÖSSZEFOGLALÁS:

A jegyzet részletesen foglalkozik hazánk, az EU és a világ energiaellátásának jelenével és jövőjével, ezen belül a megújuló és atomenergiák szerepével. Tárgyalja a hasadási és a fúziós energiatermelés elvi technológiai alapjait, jellemzőit és problémáit. Ismerteti az 1., 2., 3. és 4. generációs atomerőművek jellemzőit, az erőművekhez kapcsolódó fűtőelem ciklusokat. Bemutatja a nukleáris fűtőelemek előállításának lépéseit, technológiáit, a legelterjedtebb atomerőművek vízüzemeit. Foglalkozik a dekontamináló eljárásokkal, a kiégett fűtőelemek és a radioaktív hulladékok kezelésével, elhelyezésével. Ismerteti a Paksi Atomerőmű legfontosabb jellemzőit és bemutatja a radioaktív izotópok és a radioaktív sugárzások ipari, mezőgazdasági, biztonsági, orvosi és egyéb alkalmazási lehetőségeit. Részletesen tárgyalja a radioaktív sugárzások detektálásának alapelveit, eszközeit, eljárásait, berendezéseit, kiértékelési módszereit.

A jegyzet 240 zömében színes ábrát, 47 táblázatot, 4 interaktív és 18 nem interaktív animációt tartalmaz.

TARTALOM

| | | |
|-------|---|-----|
| 1. | BEVEZETÉS..... | 5 |
| 2. | AZ ENERGIAELLÁTÁS JÖVŐJE, A NUKLEÁRIS ENERGIA SZEREPE, JELENTŐSÉGE A 21. SZÁZADBAN..... | 7 |
| 2.1. | A világ energiaigénye és energiahordozó készletei | 7 |
| 2.2. | A jövő lehetséges energiaforrásai | 10 |
| 2.3. | A nukleáris energiatermelés jövője, megoldandó feladatok | 12 |
| 2.4. | Fúziós energiatermelés..... | 14 |
| 2.5. | Új típusú, fission energiatermelés..... | 15 |
| 3. | A HASADÁSON ALAPULÓ ENERGIATERMELÉS ALAPJAI..... | 18 |
| 3.1. | Nukleáris energiatermelés maghasadással | 19 |
| 4. | A MŰKÖDŐ ATOMREAKTOROK TÍPUSAI: 1. ÉS 2. GENERÁCIÓS REAKTOROK | 28 |
| 4.1. | A nukleáris energiatermelés jelenlegi helyzete..... | 28 |
| 5. | AZ ATOMREAKTOROK FEJLESZTÉSÉNEK TENDENCIÁI, 3. ÉS 4. GENERÁCIÓS REAKTOROK | 33 |
| 5.1. | Az új 3. generációs reaktorok műszaki jellemzői és várható alkalmazásai..... | 37 |
| 5.2. | A 4. generációs atomreaktorok | 38 |
| 5.3. | A 4. generációs atomerőművek várható alkalmazása | 46 |
| 6. | NUKLEÁRIS FŰTŐELEMCIKLUSOK. NYITOTT ÉS ZÁRT CIKLUSÚ HASADÓANYAG-FELHASZNÁLÁS | 47 |
| 6.1. | Fűtőelemciklusok..... | 47 |
| 6.2. | Nukleáris üzemanyagciklusok elválasztási technológiái | 54 |
| 6.3. | Transzmutáció a továbbfejlesztett üzemanyag ciklusban | 57 |
| 7. | NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGOK ELŐÁLLÍTÁSA, SZERELÉSE, FELHASZNÁLÁSA..... | 59 |
| 7.1. | Az uránérccek és feldolgozásuk fűtőelemekké..... | 59 |
| 8. | ATOMREAKTOROK ÜZEMELÉSÉNEK JELLEMZŐI, VÍZÜZEMEK..... | 70 |
| 8.1. | PWR nyomottvízes reaktorok üzemelése..... | 70 |
| 8.2. | BWR forralóvízes reaktorok üzemelése..... | 77 |
| 8.3. | Atomerőművek vízüzeme | 85 |
| 9. | KONTAMINÁCIÓ, DEKONTAMINÁCIÓ..... | 102 |
| 9.1. | Nem-kémiai dekontamináló eljárások..... | 105 |
| 9.2. | Kémiai dekontamináló eljárások..... | 106 |
| 9.3. | Néhány kémiai dekontamináló eljárás | 108 |
| 9.4. | Elektrokémiai dekontamináló eljárások..... | 115 |
| 10. | KIÉGETT FŰTŐELEMKEK KEZELÉSE, ELŐKÉSZÍTÉSE TÁROLÁSRA, REPROCESSZÁLÁS..... | 117 |
| 10.1. | Nagy aktivitású hulladékok átmeneti tárolása..... | 122 |
| 10.2. | A radioaktív hulladék végleges elhelyezése..... | 124 |
| 10.3. | Kiégett fűtőelemek feldolgozása (reprocesszálás)..... | 127 |
| 11. | RADIOAKTÍV HULLADÉKOK KELETKEZÉSE, KEZELÉSE ÉS ELHELYEZÉSE | 135 |
| 11.1. | Radioaktív hulladékok osztályozása | 135 |
| 11.2. | Hosszú felezési idejű nuklidok radioaktív hulladékokban | 139 |
| 11.3. | Kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok kezelése | 141 |
| 11.4. | Hulladékkezelő módszerek | 147 |
| 11.5. | Beágyazó mátrixanyagok..... | 154 |
| 11.6. | Radioaktív hulladékok keletkezése és kezelése könnyűvízes atomerőművekben | 159 |
| 12. | A PAKSI ATOMERŐMŰ FELÉPÍTÉSE, JELLEMZÉSE, ÜZEMVITELE | 166 |
| 12.1. | A reaktorok üzemidő-hosszabbítása | 174 |
| 13. | RADIOAKTÍV IZOTÓPOK ALKALMAZÁSA..... | 175 |
| 13.1. | Radioaktív sugárforrások ipari és mezőgazdasági alkalmazása..... | 178 |
| 13.2. | Radioaktív nyomjelzők alkalmazása..... | 188 |

| | |
|--|-----|
| 14. RADIOAKTÍV IZOTÓPOK ÉS A RADIOAKTÍV SUGÁRZÁS ORVOSI, GYÓGYÁSZATI ALKALMAZÁSA | 193 |
| 14.1. Diagnosztikai radiográfia | 193 |
| 14.2. Radioaktivitás terápiás alkalmazása | 198 |
| 15. A RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSOK MÉRÉSE A KÖRNYEZETBEN | 200 |
| 15.1. α -sugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával | 201 |
| 15.2. β -sugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával | 202 |
| 15.3. γ -sugárzás és röntgensugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával | 204 |
| 15.4. Neutron-sugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával | 207 |
| 15.5. Gázionizációs detektorok | 208 |
| 15.6. Szcintillációs detektorok | 212 |
| 15.7. Félvezető detektorok | 215 |
| 15.8. Fotoemulziók | 217 |
| 15.9. Termolumineszcens (TLD) detektorok | 218 |
| 15.10. Szilárdtest nyomdetektorok | 218 |
| 15.11. Mérőeszközök és jellemzőik | 219 |
| 15.12. Mérési módszerek | 226 |
| 15.13. Mérési adatok feldolgozása | 227 |
| RÖVIDÍTÉSEK | 233 |
| ÁBRÁK, ANIMÁCIÓK, TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE | 234 |
| Ábrák | 234 |
| Animációk | 238 |
| Táblázatok | 239 |

1. BEVEZETÉS

1975 óta a Budapest Műszaki Egyetem Kémiai Technológia, majd 2008 óta Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszékén folyamatosan oktatom a „Radiokémia”, a „Kémiai technológia”, a „Vizkémia és technológia”, az „Energiatermelés” és a „Korszerű energiatermelés” tárgyakat vegyész-, biológus- és környezetmérnök-hallgatók számára, a „Nukleáris környezetvédelem” tárgyat gépészmérnök-hallgatóknak és a „Radioaktív hulladékok” tárgyat környezetvédelmi szakmérnök-hallgatóknak. Az eltelt hosszú idő során felmerült egy, az atomenergetikával és a nukleáris technológiák alkalmazásával kapcsolatos ismeretanyagokat elsősorban gyakorlati oldalról megközelítő jegyzet, könyv szükségessége. Különösen az elmúlt 2010-es évben vált világossá, hogy a jelenlegi civilizációnkat alapvetően érintő, sürgető és megoldásra váró globális kérdések között (népesedés, élelmiszer- és vízellátás, környezetszennyezés, energiaszolgáltatás stb.) a megbízható, hosszú távú és megfizethető energiaellátás kérdésének megnyugtató megoldása aktuálissá vált. Ezen belül kiderült, hogy a fosszilis energiahordozók felhasználásán alapuló energiaszolgáltatás nem tartható tovább fent, és azokat teljes mértékben helyettesíteni csak a napenergia – jelenleg kidolgozásra váró – technológiai megoldásaival és a nukleáris energia fokozottabb, továbbfejlesztett alkalmazásával lehet. Ezen a területen rendkívül gyorsan avulnak el az ismeretek, ezért igen nehéz a legújabb ismereteket közlő „up-to-date” jegyzetet, könyvet írni. A legújabb kutatási eredmények és elképzelések információihoz csak korlátozott a hozzáférés, ezért jelen könyv alapvetően a 2000–2005 évek már elfogadott, többé-kevésbé tisztázott ismeretanyagára épül.

A könyv tizenöt fejezetben foglalja össze a témakör fontosabb ismereteit. Természetesen a fejezetek részletezettsége, tartalma nem azonos nagyságú, melyért az olvasó megértését kérem. A jövőben lehetőségeimhez képest igyekszem kiegészíteni, pótolni az olvasók által hiányolt ismereteket.

A bevezetés után a második fejezetben az energiaellátás jövőjét, a nukleáris energia szerepét és jelentőségét tárgyalom századunkban. Ismertetem azt a három fő okot, mely következtében a világ energiaellátása nem alapozható tovább fosszilis, nem-megújuló energiahordozókra. Röviden tárgyalom a nukleáris energiatermelés fúziós és az új hasadási eljárásait.

A harmadik fejezetben részletesebben ismertetem a jelenleg technológiailag megoldott maghasadáson (^{235}U) alapuló energiatermelés alapjait, jellemzőit, és röviden a jelenleg üzemelő reaktorok típusait, jellemzőit.

A negyedik fejezetben a jelenleg működő 1. és 2. generációs atomreaktorok fontosabb típusait tárgyalom. Itt részletesebben ismertetem a legfontosabb könnyűvízes reaktorokat és a nehézvízes CANDU-reaktort, a gáz- és folyékonyfém-hűtésű reaktorokat.

Az ötödik fejezetben az újonnan fejlesztett 3. és 4. generációs atomreaktorok fejlesztési irányzatait és a jövő atomerőműivel szemben támasztott követelményeket ismertetem.

A hatodik fejezet célja a nukleáris üzemanyagciklusok, a hasadóanyag-szükségletek és a radioaktív hulladék-mennyiségek, valamint a nukleáris üzemanyagciklusok elválasztási technológiáinak és a transzmutáció lényegének az ismertetése.

A hetedik fejezetben röviden tárgyalom a nukleáris energetikában jelenleg alkalmazott üzemanyagok előállítási, szerelési és felhasználási technológiáit.

A nyolcadik fejezet az atomreaktorok üzemelésének jellemzőit, vízüzemeit tárgyalja. Külön tárgyalja a PWR és VVER nyomottvízes reaktorok primer- és szekunderköri vízüzemeit.

A kilencedik fejezetben részletesen ismertetem a különböző dekontamináló eljárásokat.

A tizedik fejezet tárgyalja a kiegészítő fűtőelemek kezelésének, szállításának, tárolásának és reprocessálásának technológiáit.

A tizenegyedik fejezet a radioaktív hulladékok minősítésével, gyűjtésével, osztályozásával, tárolásával, szállításával, kezelésével, térfogatcsökkentésével, kondicionálásával, immobilizálásával, minősítésével és átmeneti és végleges elhelyezésével foglalkozik.

A tizenkettedik fejezetben a Paksi Atomerőmű történetét, felépítését és rövid üzemvitelét ismertetem.

A tizenharmadik fejezetben a radioaktív izotópok előállítását, ipari, mezőgazdasági, kutatási, biztonsági és egyéb alkalmazási eseteit tárgyalom.

A tizennegyedik fejezet tárgya a radioaktív izotópok orvosi alkalmazása, detektálási és terápiás eljárásainak rövid ismertetése.

A tizenötödik fejezet ismerteti a radioaktív sugárzások detektálásának alapjait, a fontosabb detektortípusokat, az alkalmazott elektronikai eszközöket és a radioaktív mérési eredmények értékelésének alapjait.

A végén egy rövidítésjegyzék található.

Budapest, 2011. február 11.

Pátzay György