

Zagyvai Péter

Kókai Zsófia

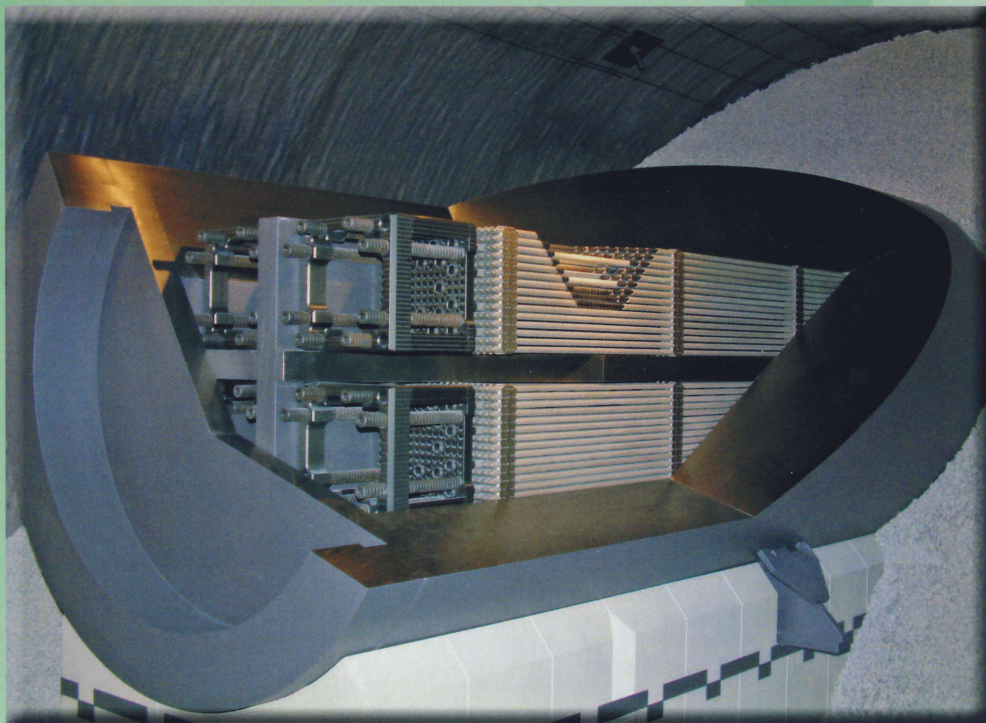
Hózer Zoltán

Breitner Dániel

Fábián Margit

Török Szabina

Börcsök Endre



A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS RADIOAKTÍV HULLADÉKAI

Egyetemi jegyzet

Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpont

Zagyvai Péter – Kókai Zsófia – Hózer Zoltán

Breitner Dániel – Fábián Margit – Török Szabina – Börcsök Endre

A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS RADIOAKTÍV HULLADÉKAI

Egyetemi jegyzet



Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpont
Budapest, 2013

Tartalomjegyzék

Előszó	11
1. Bevezetés – az energiatermelő ágazatok többszemponútú összehasonlítása	13
2. A vonatkozó sugárvédelmi ismeretek összefoglalása	19
2.1. Sugárvédelmi és dozimetriai alapfogalmak	19
2.2. Sugárvédelmi szabályozás	23
3. A radioaktív hulladékok definíciói, hatósági szabályozás	25
3.1. Átfogó nemzetközi ajánlások a hatósági szabályozásra	25
3.2. Magyar szabályozás	26
3.3. Radioaktív hulladékokkal kapcsolatos meghatározások és kategóriák	28
3.3.1. Csoportosítás a hulladékok keletkezése szerint	28
3.3.2. Csoportosítás a hulladékokhoz rendelhető dóziskövetkezmény szerint	29
3.3.3. A hulladékkomponens felezési ideje szerinti felosztás	31
3.3.4. További gyakorlati kategóriák	32
4. Nukleáris energiatermelésből származó radioaktív hulladékok keletkezése	33
4.1. Az uránbányászat	34
4.1.1. Külszíni fejtés	35
4.1.2. Mélyszinti fejtés	35
4.2. Uránérc feldolgozása	37
4.3. Uránérc dúsítása	39
4.4. Fűtőelem-tabletták	41
4.5. Az atomerőmű üzemi hulladékai	41
4.5.1. Hasadási termékek	42
A hasadásban keletkező nemesgázok	43
A hasadásban keletkező radiojódok	44
A hasadásban keletkező cézium	45
A hasadásban keletkező stroncium	46
Egyéb hasadási termékek	46
4.5.2. Urán és transzurán aktivációs termékek	46
Aktiválás termikus neutronokkal	46
Aktiválás gyors neutronokkal	47

4.5.3. Fém szerkezeti anyagok aktivációs termékei	48
Aktivációs termékek termikus neutronokkal	48
Aktivációs termékek gyors neutronokkal	48
4.5.4. Beton szerkezeti anyagok aktivációs termékei	49
4.5.5. Vízkémiai aktivációs termékek	49
4.6. Az atomerőműben keletkező kiegészített üzemanyag a nyílt és zárt üzemanyagciklusokban	51
4.6.1. Az atomreaktorban keletkező kiegészített üzemanyag összetétele	51
4.6.2. A kiegészített üzemanyag mennyisége	53
4.6.3. A kiegészített üzemanyag radiotoxicitása	54
4.6.4. A kiegészített üzemanyag hőfejlődése	55
4.6.5. A nyílt üzemanyagciklus	56
4.6.6. A zárt üzemanyagciklus	57
4.7. Az atomerőmű működési és leszerelés hulladékai	59
4.7.1. A reaktortartály és a belső szerkezeti elemek felaktiválódása	59
Acél szerkezeti elemek felaktiválódása	60
A reaktortartály felaktiválódása	61
4.7.2. Az erőmű normál működése során keletkező további nagy aktivitású hulladékok	63
4.7.3. A 2. blokki sérült üzemanyagból származó hulladékok	63
4.7.4. A leszerelési hulladékok végleges elhelyezése	64
4.8. Egyéb eredetű radioaktív hulladékok	65
4.8.1. Oktató- és kutatóreaktorok	65
4.8.2. Spallációs berendezések	65
4.8.3. Orvosi sugárforrások	66
4.8.4. Gazdasági (ipari és mezőgazdasági) sugárforrások	67
4.8.5. Fegyverkísérletek	68
4.8.6. TENORM	68
5. Radioaktív hulladékok gyűjtése, osztályozása, minősítése és szállítása	69
5.1. Radioaktív hulladékok gyűjtése és osztályozása	69
5.2. Radioaktív hulladékok minősítése	71
5.3. Radioaktív hulladékok csomagolása és szállítása	71
6. Radioaktív hulladékok kezelése	77
6.1. Hulladékkezelés előkészítő műveletei	77
6.2. Térfogatcsökkentés	78
6.2.1. Általános térfogatcsökkentési módszerek	79

Préselés	79
Hőkezelés	80
Bepárlás	81
Szűrés	82
Dekontaminálás	82
6.2.2. Szelektív térfogatcsökkentési módszerek	83
a) Felületi szubsztitúciós módszerek	83
b) Extrakció	83
c) Felületi addíciós módszerek, az adszorpció	85
6.2.3. Térfogatcsökkentési eljárások a Paksi Atomerőműben	85
Préselés	85
Aeroszol szűrők	86
Jódszűrők	86
Vízisztítás	87
6.3. Kondicionálás	87
6.3.1. Cementezés	89
6.3.2. Bitumenezés	92
6.3.3. Üvegesítés	93
Az üvegek alapszerkezete	95
Az üvegek előállítása	96
Az üvegesítés problémái	97
Az összetétel optimalása	97
7. A kiégett üzemanyag és a radioaktív hulladékok átmeneti tárolása és végleges elhelyezése	99
7.1. Többszörös mérnöki gátak és a mélységi védelem elve	99
Példa többszörös mérnöki gátak alkalmazására	100
7.2. Kiégett fűtőelemek átmeneti tárolása	101
7.3. Felszínközeli tárolók	103
7.4. Kis- és közepes aktivitású hulladékok mélységi elhelyezése	104
7.5. Mélygeológiai tárolók	106
7.5.1. A mélygeológiai lerakókkal szemben támasztott követelmények	106
Tároló konténerek	106
Hézagkitöltés	107
Radioaktív anyagok kikerülése	107
A lerakó integritását veszélyeztető események	108
A lerakó hőmérséklete	108
A lerakó geológiai jellemzői	109

7.5.2. Példák tervezett nagy aktivitású radioaktív hulladéktárolókra	110
USA	110
Finnország	110
Svédország	111
Svájc	111
Németország	112
Franciaország	112
Belgium	112
Oroszország	112
Japán	112
Magyarország	113
Regionális lerakók	113
8. Komplex módszerek a radioaktív hulladékok kezelésében	115
8.1. A kiégett üzemanyag újrahasznosítása napjainkban	115
8.2. A kiégett üzemanyag fejlett újrafeldolgozása	117
8.3. A kiégett üzemanyag transzmutációja	118
Függelék	121
F1. Radioaktív bomlások	121
Alfa-bomlás	121
Béta-bomlás	121
Gamma-bomlás	122
F2. Magreakciók	123
F3. Az atomreaktorok felépítése	124
F4. Kiemelt nukleáris létesítmények Magyarországon	125
Meghatározások	129
Tárgymutató	135
Irodalomjegyzék	139
Ajánlott irodalom	145

Előszó

Ezen jegyzet írásának idején a magyar Országgyűlés már döntött új atomerőmű-blokkok építésének előkészítéséről. Ez roppant alapos és széleskörű vizsgálatokat igényel az erőmű teljes életciklusára vonatkozóan, ahol a szakértők kutató munkája mellett fontos szerepet kapnak az atomenergia-felhasználás ellenzőinek építő kritikával megfogalmazott kérdései, melyek nem maradhatnak megválaszolatlanul. A fukusimai baleset óta sajnos nagyon könnyű a közvéleményt demagóg állításokkal és féligazságokkal az atomenergia elfogadása ellen hangolni. Szakmai kritika helyett a nyilatkozók sokszor csak riogatnak a súlyos baleset következményeivel vagy a kiégett fűtőelemből keletkezett nagy aktivitású radioaktív hulladék végleges elhelyezésének megoldatlanságával. Ezt a jegyzetet azoknak a környezettudományban, sugárvédelemben, vagy geológiában ismereteiket elmélyíteni szándékozó hallgatóknak ajánljuk, akik szeretnék megismerni a hulladék kezelésével és biztonságos elhelyezésével kapcsolatos tudást, amely a jövőre történő szakmai felkészültségüket segítheti.

A jegyzet írói nem törekedhettek a radioaktív hulladék-elhelyezéssel kapcsolatos műszaki tudományos ismeretek teljes körű feldolgozására, erre terjedelmi okokból egy egyetemi jegyzetben nincs lehetőség. A célunk inkább az volt, hogy a jelenlegi ismereteket összefoglaljuk, ahol lehet, gyakorlati példákkal kiegészítve. Mivel a hulladéktárolás sok generáció feladata lesz, és ez idő alatt az erre vonatkozó ismereteink is jelentősen bővülni fognak, azt tervezzük, hogy a jegyzetet öt évenként felújítjuk.

Azon hallgatók számára, akik mélyebb energetikai ismeretekkel nem rendelkeznek, a jegyzet elején egy általános fejezetben a jegyzet írásakor elhatározott erőmű építési cselekvési tervben megnevezett alternatívákra vonatkozó környezeti hatásokat általánosságban röviden összehasonlítjuk. Ezt követi a radioaktív hulladék elhelyezés szempontjából alapvető sugárvédelmi ismeretek összefoglalása, majd a 3-7. fejezetekben a hulladék-elhelyezés szabályozása, a radioaktív hulladékok forrásai, ezután pedig a hulladékkezelésre és a végleges elhelyezésre vonatkozó ismeretek.

Az utolsó fejezetben összefoglaljuk a radioaktív hulladékkezelés komplex módszereit, köztük azokat a jelenleg ipari méretekben még nem hasznosított fejlesztési irányokat és elképzeléseket, melybe a jegyzet felújításakor mindig beépítjük az aktuális új ismereteket.

A jegyzet megértéséhez nem szükséges fizikusi, vegyészeti vagy geológusi végzettség, ahol szükséges, mindig leírjuk azokat az alapismereteket, melyek egy környezettan, orvosi vagy agrármérnöki szakon végző hallgatónak a jegyzet megértéséhez szükségesek.

A könnyebb megértés céljából néhány jelölést vezetünk be. A vastagon szedett kifejezések hivatkozása megtalálható a tárgymutatóban. A vastag, dőlt betűs fogalmak definíciója a jegyzet végén a „Meghatározások” fejezetben található. A Függelékben néhány magfizikai folyamatról és nukleáris létesítményről adtunk leírást.

2013. március

A szerkesztők

K
az
si
ha
fe
be
ny
a
ak
m
le
an
sá
eh
all
ric
ta
te

ré
sz
A
20
kő
sz
vo
sá

ka
ze
m