

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Környezettudományi Centrum



**AZ IONIZÁLÓ SUGÁRSZENNYEZÉS AZ ATOMENERGIA
FELHASZNÁLÁSÁBAN
SZAKDOLGOZAT**

Készítette:

GÁBRIS VERONIKA

KÖRNYEZETTAN ALAPSZAKOS HALLGATÓ

Témavezető:

Csanád Máté

ELTE TTK, Atomfizikai tanszék, egyetemi docens

Budapest

2017.

NYILATKOZAT

Név: Gábris Veronika

Neptun azonosító: Y4EXCR

ELTE Természettudományi Kar, Környezettan alapszak, Környezetkutató szakirány

Szakedolgozat címe: **Az ionizáló sugárszennyezés az atomenergia felhasználásában**

A szakedolgozat szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam.

Tudomásul veszem, hogy plágiumnak számít:

- szó szerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi hivatkozás a forrás megjelölése nélkül;
- más személy publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Kijelentem továbbá, hogy a szakedolgozat leadott nyomtatott példányai és elektronikus változata minden tekintetben megegyező.

Budapest, 2017.05.17.

a hallgató aláírása

Tartalom

1. Bevezetés.....	7
2. Alapfogalmak.....	8
3. Ionizáló sugárzások és jellemzésük.....	10
3.1 α -sugárzás.....	11
3.2 A β -sugárzás.....	11
3.3 A γ -kibocsátás.....	12
4. Sugárzás detektálása.....	13
4.1 Általános tulajdonságok.....	13
4.2 A detektorok típusai.....	14
5. A sugárszennyezés forrásai.....	17
5.1 Nukleáris fűtőanyag ciklus.....	18
5.2 Radioaktív hulladékok.....	18
5.3 Atomfegyver kísérletek.....	19
5.4 Radioizotópok előállítása és felhasználása.....	20
5.5 Egészségügyi felhasználás.....	20
5.6 Sugár- és nukleáris balesetek.....	21
6. Atomreaktorok.....	24
6.1 Első generációs atomerőművek.....	24
6.2 Második generációs atomerőművek.....	24
6.3 Harmadik generációs atomerőművek.....	29
6.4 Negyedik generációs atomerőművek.....	30
7. Összefoglalás.....	37
8. Summary.....	38
9. Köszönetnyilvánítás.....	39

1. Bevezetés

Az ionizáló sugárzásokkal való megismerkedés a XIX. század végére tehető, amikor *Wilhelm Konrad Röntgen* nyilvánosan beszámol az újfajta sugarakról, a röntgensugarakról. Ehhez kapcsolódik a XX. század egyik nagy felfedezése, ami a fizikát és kémiát alapjaiban rengette meg. Ez a felfedezés *Henri Becquerhez* és a *Curie* házaspárhoz köthető (Bisztray-Balku, 1979). A vizsgálatok eredményeinek lényege az volt, hogy egyes anyagok spontán módon sugárzást bocsátanak ki. Ezt a jelenséget radioaktivitásnak nevezték el, amely a későbbiekben rengeteg kutatásnak szolgált alapjául. Mára már sikerült megismerni az ionizáló sugárzásokat is.

A radioaktív sugárzás a mindennapjaink szerves részét képezi, ami sokaknak furcsán hangozhat. A köztudatban a mesterséges sugárforrások ismertek jobban, ugyanakkor nem mehetünk el a tény mellett, hogy az úgynevezett természetes háttérsugárzás is jelen van a környezetünkben. Ezek forrásait a fejünk felett és a talpunk alatt kell keresnünk. A kozmikus eredetű, és a földkéregből származó sugárzás is kivette a részét a környezetünk formálásában, a múltban és napjainkban is.

Mesterséges eredetű ionizáló sugárzásokat az élet számos területén alkalmaznak. Az atomerőművekben előállított villamos- és hőenergia mellett, a kutatásban, az orvostudományban és az iparban fontos szerepük van, viszont a pozitív hatások mellett negatív hatásokkal is számolni kell. Minden olyan területen, ahol alkalmazzák a sugárzásokat, fennáll a veszélye a környezet radioaktív anyagokkal való szennyezésének. Ezeknek a szennyezéseknek az élettartama sajnos igen hosszú távra nyúlhat, és a szennyezések könnyen elérhetnek nagy területeket is. Ezért nagyon fontos, hogy a szennyezés lehetőségét is a lehető legkisebbre csökkentsük.

Napjainkban fontos téma a fosszilis energiahordozók kiegészítése vagy kiváltása egyéb energiahordozókkal, amelyekkel hatékonyan fedezni lehetne a világ energia szükségletét. Az atomenergia már eddig is fontos szerepet töltött be a fosszilis energiahordozók mellett, de a múlt technológiáinak biztonsága megkérdőjelezhető.

Szakedolgozatom témájaként a környezetbe kerülő mesterséges eredetű ionizáló sugárzásszennyezés mellett az atomenergia biztonságos, ezáltal a környezetre nézve kíméletes fejlesztéseinek lehetőségeit választottam. Munkám célja, hogy a szennyező források ismertetése mellett a negyedik generációs atomerőművek terveiben rejlő potenciált bemutassam.

2. Alapfogalmak

Azt a tényt, hogy a minket körülvevő anyagok atomok építik fel, a legalapvetőbb megfigyelések közé sorolhatjuk. Már az ókori kultúrákban is felmerült az ötlet, hogy a környezetünket illetve használati tárgyainkat atomokból építik fel, viszont az ekkori természetfilozófusok még nem a mai atomfogalommal dolgoztak, illetve nem volt tudomásuk arról, hogy az atomok további alkotókra is bonthatók. A XIX. század hozta a nagy áttörést, ekkor ugyanis felfedezték, hogy az anyag elemi építőkövének hitt atom korántsem elemi.

Az atomok szerkezetének első átfogó, és részben ma is alkalmazható modellje *Ernest Rutherford* (1871-1937) munkásságának köszönhető. Vizsgálatai során bebizonyította, hogy az atomon belül található egy 10^{-15}m méretű térrész (amit atommagnak nevezünk), ahova az össztömeg több mint 99,9%-a (és a pozitív töltések) koncentrálódnak. Magát az **atommagot** pozitív töltésű protonok és (az 1930-as években Chadwick által felfedezett) semleges neutronok építik fel, amelyeket együtt nukleonoknak nevezünk. Közöttük fellép egy olyan összekötő erős kölcsönhatás avagy magerő, ami kizárólag nagyon kicsi, 10^{-15}m , azaz fermi nagyságrendű távolságokon hat. Ez a kölcsönhatás olyan erős, hogy a protonok közötti elektromágneses taszítást is legyőzi. (Kiss, 2012)

Az atommagokat jellemezhetjük az alapján, hogy hány proton és neutron található bennük. A magban lévő protonszám azaz a rendszám (Z), illetve a neutronszám (N) összegéből kapjuk meg a mag teljes tömegét jellemző **tömegszámot** (A),

$$A=Z+N.$$

Előfordulhat, hogy egy kémiai elem azonos protonszámú magjaihoz eltérő neutron- vagy protonszámok tartoznak. Ezeket **izotópok**nak nevezzük, amik lehetnek stabilak vagy radioaktívak is. A stabil izotópokra nem jellemző a radioaktív bomlás, vagyis szerkezetük időben állandó. A természetben megtalálható izotópok számottevő részére jellemző ez. Ezzel szemben a radioaktív izotópok más tulajdonságokat mutatnak. Vannak olyan atommagok, amik időről időre alacsonyabb és számukra megfelelőbb energiaszintre kerülnek, miközben fotonokat vagy más részecskéket bocsátanak ki, és ennek köszönhetően más atommaggá alakulnak. Ezt a folyamatot **radioaktív bomlásnak** nevezzük. A jelenség közben kibocsátott sugárzás (radioaktív sugárzás) az adott izotópra jellemző, amely alapján beazonosíthatjuk mind az adott izotópot, mind a sugárzás típusát. Az átalakulás meghatározott idő alatt történik, ami

szintén anyagra jellemző. Ez a **felezési idő**, ami megmutatja, hogy a mintában lévő még el nem bomlott radioaktív atommagok mennyisége mennyi idő alatt csökken a felére. Megadhatjuk az időegység alatt történő bomlások számát is, ez az érték az **aktivitás**. Ennek egysége a Becquerel [Bq]: 1 Bq aktivitású az a minta, amiben 1 bomlás történik 1 másodperc alatt. Az aktivitás arányos a mintában lévő radioaktív, bomlásra képes atommagok számával, és az idő előrehaladtával ezen az atommagok száma folyamatosan csökken (Kiss, 2012). Ebből felírható egy összefüggés (Fábián és mtsai, 2012),

$$A = \frac{-dN}{-dt}$$

ahol A az aktivitást és N az időegység alatt elbomló atomok száma. Ha az időegység alatt elbomló atomok számát (N) beszorozzuk a bomlási folyamatra jellemző valószínűséggel (λ), akkor szintén megkapjuk az aktivitást, ezzel az összefüggéssel (Kiss, 2012)

$$A = \lambda \cdot N.$$

Mint ahogy azt az előbbieken említettem, a bomlásra képes atommagok száma az idővel csökken. Ez a csökkenés exponenciálisan történik, így felírható erre a

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

differenciálegyenlet amelynek megoldása az **exponenciális bomlástörvény**:

$$\frac{dN}{dt} = N_0 e^{-\lambda t}$$

A felezési időt is kiszámolhatjuk a korábbiakban megkapott egyenletekből következőképpen (Fábián és mtsai, 2012)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Az atommag bomlásával kapcsolatos alapfogalmakon kívül érdemes pár szót ejteni a dozimetriai mennyiségekről is, mivel az anyagban az ionizáló sugárzások által létrehozott hatást ezekkel írhatjuk le. A dóziszfogalmak között megkülönböztetjük a az elnyelt dózist, az egyenértékdózist illetve az effektív dózist. Az **elnyelt dózis** a besugárzott anyag egységnyi tömegére jutó elnyelt sugárzás energiája, azaz $D = E/m$, ennek egysége a Gy (gray). Az **egyenérték dózis** T szövetben vagy szervben elnyelt, R típusú és minőségű súlyzó tényezőjével súlyozott dózis (Fehér és mtsai, 2010).

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

ahol w_R az adott sugárzás súlyzóteényezője, a $D_{T,R}$ pedig a T szövetben vagy szervben elnyelt dózis. Mértékegysége a sievert (Sv). Ha az egész emberi testet vesszük figyelembe, hogy a szövetekre és szervekre milyen hatással van a besugárzás, akkor azt az **effektív dózissal** írhatjuk le (Fehér és mtsai, 2010):

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

ahol a w_T az adott szövet vagy szerv súlyzóteényezője, a w_R a sugárzás súlyzóteényezője (az egyenértékdózishoz hasonlóan). A mértékegysége szintén sievert (Sv).

3. Ionizáló sugárzások és jellemzésük

Ionizáló sugárzásról akkor beszélhetünk, ha a sugárzás képes a vele kölcsönhatásba lépő atom vagy molekula egy vagy több leválasztani. Az elektron leválasztásának folyamata az **ionizáció**. Az ehhez a minimálisan szükséges energia meghatározható, ez az úgynevezett **ionizációs energia**, ami adott elemre jellemző tulajdonság. Az ionizáló sugárzások forrásai lehetnek természetes és mesterséges eredetűek.

A kisugárzott részecske által hordozott energia szintén fontos, mivel a radioaktív sugárzás ennek a energiának a nagyságával jellemezhető. Erre természetesen nem adhatunk meg egy állandó értéket, mivel minden sugárzási folyamatban más-más energetikai viszonyok vannak. Azt a tartományt, ahova a kisugárzott részecske energiája esik, az atommagban lévő kötések viszonyai határozzák meg. Természetes radioaktivitásnál ez a tartomány 10 keV-tól pár MeV-ig tart, ennél nagyobb energiát csak mesterséges módon lehet előállítani (Kiss, 2012). Az atommagok bomlásainak három fő típusa van: az α -, a β -, illetve a γ -bomlás. Ezen felül fontos megemlíteni azt is, hogy az atommagok képesek spontán hasadásra is, két kisebb atommagra válik szét az atom külső beavatkozás nélkül. Az előbb említett három bomlástípust vizsgáljuk meg a következőkben.

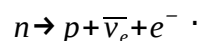
3.1 α -bomlás

Az α -bomlás az egyik leggyakoribb bomlásformának mondható a radioaktív bomlási sorok (vagy családok) között. Az anyamag egy hélium atommagot bocsát ki magából, ami kétszeresen pozitív töltésű és a tömegszáma 4. Ez a ${}^4\text{He}$ az α -részecske. A bomlási sorban keletkező következő elem, a leányelem tömegszáma így négygyel, rendszáma pedig kettővel csökken. A korábbiakban említett kisugárzott részecske energiája ebben az esetben tipikusan +4 MeV és 8 MeV közé esik, kevés eltéréssel. Mindhárom természetben előforduló radioaktív család bomlási sorára jellemző az α -bomlás, viszont a sorokat lezáró bizmut-, és ólomizotópoknál könnyebb radioaktív magoknál már nem fordul elő. A mesterségesen előállított transzurán izotópok fő bomlásformáját jelenti az α -bomlás (Kiss,2012).

3.2 β -bomlás

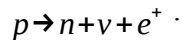
A radioaktív sugárzások vizsgálatánál megfigyelték, hogy az α -részecskéktől eltérő tulajdonságú komponense is van a sugárzásnak (Kiss,2012). Ezt az eltérő sugárzást nevezték el β -sugárzásnak. Idővel felfedezték, hogy a β -bomlásnak három formája is van: a negatív β -bomlás, a pozitív β -bomlás és az elektronbefogás. A közös tulajdonságaik közé tartozik az, hogy a tömegszám nem változik. A bomlási sorokban mindhárom bomlástípus előfordulhat, illetve léteznek olyan izotópok amelyek a három lehetséges bomlástípussal bomlanak.

A **negatív β -bomlás** során a magban egy proton neutronná alakul, így keletkező leányelem rendszáma eggyel nő, tömegszáma változatlan marad. Eközben az atommagból kilép egy elektron és egy antineutrínó. Lényegében a neutron átalakul protonná, antineutrínóvá és elektronná (Kiss, 2012), azaz a következő folyamat megy végbe:

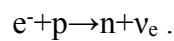


Ezzel szemben a **pozitív β -bomlás** alkalmával egy proton alakul át neutronná, a rendszám eggyel csökken a leányelemben, és a tömegszám sem változik. A folyamat közben egy pozitron és egy neutrínó hagyja el az atommagot. A pozitron tömege azonos

az elektronéval, viszont negatív töltés helyett pozitív töltéssel rendelkeznek. A pozitív β -bomlásnál egy proton alakul át neutronra, neutrínóra és pozitronra (Kiss,2012),



A harmadik típus az **elektronbefogás**, ahol az elektronburok egy elektronja és az atommag protonja reakcióba lépnek egymással, és így egy proton neutronná alakul át. Mivel az elektron tipikusan az atom K-héjáról származik semleges marad, de gerjesztett állapotba kerül. Ennek köszönhetően az átmenet után a leányelem karakterisztikus röntgensugárzást bocsát ki. Az elektronbefogás során a proton és az elektron kölcsönhatásából neutron és neutrínó keletkezik (Kiss, 2012):



3.3 A γ -kibocsátás

Az atommagok radioaktív bomlása mellett az elektromágneses bomlásról is szót kell ejteni, mivel ez is energiakibocsátással járó folyamat. Az atom gerjesztett állapotából alapállapotba (vagy kisebb energiájú gerjesztett állapotba) kerül, az átmenet során pedig energia szabadul fel amit az elektromágneses kölcsönhatásból nyer az atom. Két altípusa van: γ -kibocsátás, illetve belső elektronkonverzió (Kiss, 2012).

A **γ -kibocsátás** során az atommag egy nagy energiájú kvantumot (vagyis fotont) bocsát ki. Ez nem befolyásolja sem a rendszámát, sem a tömegszámát az atomnak, csak a nukleonrendszer energiája csökken.

A gerjesztett atommag az elektronburok egy kötött elektronjával is képes kölcsönhatásba kerülni. Ez a **belső elektronkonverzió** folyamata. A gerjesztési energia átadódik a kötött elektronnak, ami ezáltal kilép az atomból.

Az atommagok képesek spontán hasadásra is, két kisebb atommagra válik szét az atom külső beavatkozás nélkül.

4. Sugárzás detektálása

A radioaktivitás a környezetünk részét képezi, így hatással van az emberre, az élővilágra és az ökoszisztémára is. Felfedezése és megismerése óta a tudomány egyre több tudásra tett szert róla, pozitív és negatív hatásairól egyaránt. Maga a sugárzás szabad szemmel nem érzékelhető, ezért a radioaktivitás megismeréséhez olyan műszerekre van szükség, amivel a sugárzás pontosan megfigyelhető és mérhető. A radioaktív sugárzásokat sokrétűen fel lehet használni az egészségügyben, az iparban és a gazdaságban, amihez elengedhetetlen a pontos értékek ismerete.

Az ionizáló sugárzások megismerése óta napjainkig számos detektortípust fejlesztettek ki. Az alapelve mindnek az, hogy a sugárzás által hordozott energia egésze - vagy csak egy része - átalakul a detektorba érve, vagyis kölcsönhatásba lép a detektor anyagával (Bódisz, 2006). A detektálás célja, hogy a kölcsönhatás során leadott energia elektromos jellé konvertálhatók legyenek. Mint ahogy azt a korábbiakban említettem, a sugárzások sokfélék lehetnek, az anyagban különféle kölcsönhatások jönnek létre általuk. Ennek köszönhetően nem lehet létrehozni egy univerzális detektort, amivel minden fajta és energiatartományba tartozó sugárzást egyformán detektálni tudunk.

4.1 Általános tulajdonságok

Ugyan nem lehet univerzális detektort létrehozni, de a műszerek működésében vannak hasonlóságok. A detektorokkal való megismerkedés előtt érdemes áttekinteni a detektorokra jellemző általános tulajdonságokat.

A részecske detektorba való beérkezése és a detektor kimenetén megjelenő jel között eltelik egy kis idő, ami a **válaszidő**. Ez fontos jellemzője a sugárzást mérő műszernek. A kiértékelés szempontjából az egyik legfontosabb tulajdonság a **válaszfüggvény**, amit azok a meghatározott tulajdonsággal rendelkező részecskék adnak, amelyek a detektor érzékeny tartományába belépnek (Kiss, 2012). Kollimálatlan sugárforrás esetén a forrásból kilépő részecskéinek útja részecskéről részecskére különböző irányba mutat. Így előfordulhat, hogy egy radioaktív mintánál nem detektálható az összes kilépő részecske. A sugárzásdetektoroknak van egy úgynevezett **geometriai határfoka**, ami megadja, hogy a mintából kilépő részecskék mekkora arányban érik el a detektort, mekkora részük kelthet egyáltalán elektromos jelet. Az,

hogy a műszer mekkora valószínűséggel ad elektromos jelet az érzékeny térfogaton áthaladó részecskére a **detektálás hatásfokától** függ. Az **egyesített hatásfok** viszont azt adja meg, hogy a detektor mekkora valószínűséggel detektálja azokat a részecskéket, amik kiléptek a vizsgálandó mintából – ez tehát az előbb említett két hatásfok szorzata. (Kiss, 2012).

A hatásfok fogalmához kapcsolódik a detektor egy adott pontból látott **térszöge**, ez detektor érzékeny térfogatát határoló felület adott pontból való látószögét írja le. Ha a minta egy pontjából szemléljük a detektort, akkor a **térszög faktorról** megadható a teljes érzékeny térfogat azon területe, ahol áthaladnak a részecskék (Kiss, 2012).

A detektorba beérkező részecskék információjának feldolgozása időbe telik. Ez idő alatt a műszer nem képes detektálni az utána beérkező, újabb részecskéket. A feldolgozás közben fellépő átmeneti érzéketlen időszakot **holtidőnek** nevezzük. Ennek az időnek a részarányát (amely tulajdonképpen a mérés során az érzékelésre képtelen állapotban töltött idő aránya) megadhatjuk a **holtidő faktorról** (Kiss, 2012).

A ma használt detektorok nagy százaléka elektronikai jellegű, így a jelek feldolgozása és az információ kinyerése elektronikus formában történik. Rengeteg előnyt jelent a mérést végző személy számára, mivel az információt jól használható formában gyorsan és pontosan kézhez kapja.

4.2 A detektorok típusai

A detektorokat a beérkező sugárzás és a detektor anyaga között létrejövő kölcsönhatás segítségével lehet csoportosítani. A leggyakrabban használt részecskedetektorokat be lehet sorolni az alábbi csoportok közé (Kiss, 2012):

- gáztöltésű detektorok
- szcintillációs számlálók
- félvezető detektorok

A fent felsorolt elektronikus jellegű detektorok korszaka előtt mechanikusan vagy kézzel/szemmel kiolvasható detektoron voltak többnyire használatban. Ilyen a részecske pályáját láthatóvá tevő detektorokat ma már a tudományos kutatásban többnyire nem használnak, de a teljesség kedvéért a jelen szakasz végén ezekre is kitérek.

4.2.1 Gáztöltésű detektorok

A gáztöltésű detektorok voltak a radioaktív sugárzás mérésének úttörői. Működésük alapja a gázatom és a részecskék között létrejövő rugalmatlan ütközés, ugyanis ezen kölcsönhatás során ionizálódnak a gázatomok. Az ionizációnak köszönhetően elektronok lépnek ki az atomból, majd ionpárokat alkotnak. Az ion elektron párok detektorra kapcsolt nagy feszültség hatására töltésüknek megfelelően szétválnak, az anód vagy katód felé haladnak a detektoron belül, és a szétváló ionpár becsapódása miatt elektromos impulzus keletkezik az áramkörben. Az impulzus nagyságából, illetve mennyiségéből következtetéseket vonhatunk le a mért sugárzás tulajdonságaira. A gáztöltésű detektorok három típusát különböztetjük meg: a Geiger-Müller csövekett, az ionizációs kamrákat és a proporcionális kamrákat (Pálmai és mtsai, 1986).

4.2.2. Szcintillációs számlálók

A radioaktív sugárzások detektálásának egy másik módja a szcintillációs számlálók használata. A detektor nevéből is látható, hogy ennek a detektálási módnak az alapja a **szcintilláció**. A beérkező részecske és a detektor anyaga közötti kölcsönhatást egy fényvillanás kíséri, amelyek időbeli sűrűségéből a mért sugárzás intenzitására lehet következtetni, a felvillanás energiája pedig az eredeti részecske energiájával függ össze. Ezek a fényvillanások a szcintillátor anyagban történnek. Sokféle szcintillátorral találkozhatunk (Kiss, 2012):

- szervetlen szcintillátorkristályok
- alkáli-halogenid szcintillátorok
- tisztá szervetlen szcintillátorok
- szerves szcintillátorok
- folyadékszscintillátorok

Mivel a szcintillátorban keletkező fény nem elég erős, hogy elektromos jellé alakítható legyen, ezért a kilépő fényt fotoelektron-sokszorozóba vezetik. A fotoelektron-sokszorozó katódja fényérzékeny, így a szcintillátor által kibocsátott fény miatt elektronok lépnek ki belőle. Továbbhaladva a műszerben az elektronok hatására az újabb és újabb dinódákról újabb és újabb elektronok szakadnak le, így a számuk

megsokszorozódik. Az elektronok útja az anóddal zárul, ahol aztán kialakul az elektromos jel.

4.2.3 Félvezető detektorok

Az eddig említett detektorok közül a félvezető detektorok sugárzó részecskékre vonatkoztatott energiafelbontása a legjobb. Ennek a magyarázata az, hogy a detektorban keletkező elektron-lyuk párok kialakításához (amik szintén töltéshordozó-párok) sokkal kevesebb energia szükséges, mint a gáztöltésű detektorokban kialakuló ionpárokhoz. A leggyakrabban használt félvezetők a germánium, illetve szilícium (Kiss, 2012). A töltéshordozóknak köszönhetően a félvezetők vezetőkké válnak ideiglenesen, így a töltések gond nélkül áthozhatók. A töltéshordozók a feszültség hatására szétválnak a töltésüknek megfelelően az anód vagy katód felé haladnak, ezzel válaszimpulzust keltve. Ebből az impulzusból (mint az eddig tárgyalt detektoroknál) lehet következtetéseket levonni a sugárzás mértékéről.

4.2.4 A részecske pályáját láthatóvá tévő detektorok

Azok a detektorok amik a részecske pályáját láthatóvá teszik, más jellegű információk átadására voltak tervezve, mint az eddig tárgyalt típusok. Mivel nem csak a sugárzás intenzitásából lehet az adott sugárzásra jellemző tulajdonságokat megismerni, így szükség van olyan műszerre, ami megmutatja a többi jellemezhető karakterisztikáját. Egy töltött részecske haladásának pályájából, ennek jellemzőiből (hossz, illetve vastagság), vagy esetleg a haladási irány megváltoztatásából további információkra lehet szert tenni (Kiss, 2012).

A töltött részecske haladása közben a pályája mentén töltéshordozókat hoz létre, amik olyan folyamatoknak lesznek a részesei, amik makroszkopikusan látni engedik ennek a pályának a vonalát. Ez a folyamat szolgál a detektorok működésének alapjául (Kiss, 2012).

Benkő és munkatársai (2011) munkája alapján négyféle típust különböztetünk meg: a ködkamrát, a buborékkamrát, a fotoemulziót és a szilárdtest-nyomdetektorokat.

A **ködkamra** az egyik legrégebbi nyomdetektor. Túltelített gőz segítségével érzékelteti a részecske pályáját. Mint ahogy azt a bevezetőben is említettem, a részecske pályája mentén töltések keletkeznek. Ezek a töltések kondenzációs magként

viselkednek, amiken aztán megindul a cseppnövekedés, így a a pályát egy vékony ködvonal jelzi. Két fajta ködkamrával találkozhatunk, ez a Wilson-kamra és a diffúziós ködkamra. A működési alapelvük teljesen megegyezik, csupán a túltelített gőz létrehozása különbözik.

Működésében sok hasonlóságot mutat a **buborékkamra**. Itt a folyadék az a közeg, ahol a részecske áthalad. Túlnyomáson éppen forráspont alá van hevítve a folyadék, majd a részecske beérkezésekor hirtelen lecsökkentik a nyomását, amely művelet hatására a közegbeli forráspont lecsökken, így a közeg túlhevítetté válik. A nyomás csökkentésével megindul a buborékképződés ott, ahol a részecske ionizálta a közeget. Így a pálya buborékokból alkotott csíkkal rajzolódik ki .

A sugárzás felfedezése óta használt **fotoemulzió** mára már elavult technikának mondható, a kiértékelés nehézsége miatt. Ahol sugárzás éri a fotoemulziót ott nyomot hagy, ami előhívás után látható.

A **szilárdtest-nyomdetektorban** a töltött részecske szilárd anyagon halad át. A részecske a pályája mentén egy járat szerű nyomot hagy, amit megfelelő anyaggal láthatóvá lehet tenni, és így mikroszkóppal vizsgálhatóvá válik.

Manapság ezeket a detektortípusokat nem használják, a részecskék nyomkövetérére is (tipikusan jól szegmentált félvezető vagy ionizációs) detektorokat használnak. Ezekből ugyanis a részecske nyomának minden jellemzője elektronikusan kiolvasható és eltárolható, akár másodpercenként sok ezer részecske esetén is.

5. A sugárszennyezés forrásai

Mesterséges eredetű sugárszennyezésről az ionizáló sugárzások felfedezése, és aktív használata óta beszélhetünk. Az ionizáló sugárszennyezés felfedezését nagy érdeklődés kísérte, mivel eddig megvalósíthatatlan elképzelések elérhetővé váltak. Ugyanakkor a sugárzások károsító hatásai is igen fontosak a haszon és a kockázat elemzése céljából.

A sugárszennyezés fontos forrásai az atomerőművek és a hozzá tartozó folyamatok, a nukleáris fűtőanyag legyártásától egészen egy reaktor felszámolásának lépéséig. Ezen kívül a nukleáris fegyver kísérletek, a radioizotópok előállítása és az orvostudományban használt radioaktív diagnosztika is mesterséges szennyezést okoz. A múltban történt nukleáris balesetokról is érdemes pár szót ejteni, mivel ezek a hosszú

távú negatív hatásokon kívül nagy környezetvédelmi problémákkal bírnak (Benkő és mtsai, 2011). Fontos látni ugyanakkor, hogy az embert érő átlagos dózis legnagyobb része (közel 40%-a) természetes forrásokból származik (legfőképpen a belélegzett radonból), míg a mesterséges források közül a legjelentősebb az orvosi vizsgálatok során elnyelt dózis (a teljes dózisterhelés közel fele). Ezzel szemben a nukleáris energia felhasználásából adódó dózisterhelés egy átlagos ember számára elhanyagolható, a teljes dózis kevesebb, mint egy tízezrede (UNSCEAR Report, 2008).

Mint ahogy sok környezeti hatásnál forrásánál, a sugárszennyezés forrása is lehet lokális, regionális és globális. Akkor beszélünk lokális forrásról, ha 100 km-en belül jelentős a forrás hatása. A regionális hatás 1000 km-en belül értendő, a globális hatás pedig megközelítőleg az egész féltekére vonatkozik (Benkő és mtsai, 2011).

5.1 Nukleáris fűtőanyag ciklus

Amikor a nukleáris fűtőanyag ciklusról beszélünk, akkor az a kezdetektől (az uránérc bányászatától) egészen a folyamat legvégéig (egy reaktor felszámolásáig) értendő. Mivel a ciklus minden pontján sugárzó anyagok felhasználása történik, így elkerülhetetlen a sugárszennyezés. Az összes pont hosszas kifejtésére ebben a dolgozatban sajnos nincs lehetőség, de egy-egy állomását a későbbiekben részletezni fogom. Itt is megemlítem, hogy az ebből származó összes dózis átlagosan a teljes terhelés kevesebb, mint egy tízezrede (UNSCEAR Report, 2008).

5.2 Radioaktív hulladékok

Azokat az anyagokat soroljuk be a radioaktív hulladékok közé, amelyek radioaktív sugárzással bírnak és már nem kerülnek felhasználásra, illetve a tulajdonságaik miatt nem lehet úgy kezelni őket, mint a kommunális hulladékot. Radioaktív hulladékok sokféleképpen keletkezhetnek. Az összes olyan ágazat, ahol sugárzással foglalkoznak, előállít radioaktív hulladékot eltérő arányban. Az ilyen jellegű anyagokat osztályozzák a bennük megtalálható radioizotópok aktivitása alapján, ami megkönnyíti a hulladék elhelyezésének folyamatát. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) négy különböző kategóriába osztja be a radioaktív hulladékokat (Benkő és mtsai, 2011):

1. **Kis aktivitású** hulladékok (low level waste – LLW) közé tartoznak azok az anyagok, amikben nagyon kevés, szinte elhanyagolható mennyiségű radioizotópok vannak.
2. A **közepes aktivitású** hulladékok (intermediate level waste – ILW) azok, amiknek a kezelése közben már a sugárvédelemről is gondoskodni kell. Ezeknek a hulladékoknak a radioizotóp tartalma még mindig nagyon alacsony.
3. Az olyan hulladékok amik transzurán elemeket tartalmaznak, azok tartoznak a **nagy aktivitású** hulladékok (high level waste – HLW) közé. Ezeket úgynevezett köztes tárolókban tárolják a végleges elhelyezésig.
4. Az **α -sugárzó** hulladékok kezelése hasonlóan történik, mint a nagy aktivitású hulladékoké. Ebbe a kategóriába azok az anyagok tartoznak, amik α -sugárzó radioizotópokkal vannak szennyezve.

A világon többnyire kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék keletkezik, viszont ezek a radioaktív hulladékok által okozott sugárszennyezésnek csak egy kis százalékát okozzák. A nagy aktivitású hulladékok sugárszennyezése lényegesen több (Benkő és mtsai, 2011). Ezek végleges elhelyezése még ma sem megoldott azonban.

5.3 Atomfegyver kísérletek

Az atomfegyverek használatának kezdete az 1940-es évekig nyúlik vissza. A robbantási kísérletek és a fegyverek használata igen nagy környezetterhelő hatással bírnak. A nagy energiájú robbanás során a sugárterhelés mellett az el nem hasadt töltet darabjai, illetve hasadványtermékek szétszóródásával is számolni kell. Ezek nem csak a közvetlen környezetet veszélyeztetik. A légkörbe feljutva a nagy földi légkörzésnek megfelelően elkeveredik, így egy északi féltekén elvégzett robbantás az egész féltekét elszennyezheti. Ezek a kísérletek a 60-as évektől korlátozva vannak, ennek ellenére a 80-as évekig légköri robbantások még előfordultak. A robbantásokon kívül az atomfegyverek legyártásakor is keletkezhet sugárszennyezés, így a közelben élő lakosság magasabb sugárterhelésnek lehet kitéve (Benkő és mtsai, 2011). Átlagosan ugyanakkor az ebből fakadó dózis a teljes (mesterséges és természetes) dózis kevesebb, mint 0.2%-a (UNSCEAR Report, 2008).

5.4 Radioizotópok előállítása és felhasználása

A radioizotópok sugárszennyezése az eddig említett források mellett eltörpül. Az iparban használt radioizotópok nagyon kis százaléka jut ki a környezetbe, amik általánosságban kevésbé veszélyes, rövid felezési idejű izotópok. A lakossági használatra gyártott termékekben a radioizotópok felhasználása mára már nem ajánlott a fogyasztók védelmének érdekében.

5.5 Egészségügyi felhasználás

Az ionizáló sugárzások felfedezése az egészségügyben hozta a legnagyobb fejlődést. Napjainkig számos olyan diagnosztikai vagy terápiás eszköz lett kifejlesztve, aminek alapjait ionizáló sugárzások biztosítják. Mivel ezeknek a használata folyamatosan nő, egyenesen arányosan nő a lakosság sugárterhelése is. A világon országtól függően átlagosan a sugárterhelés 20-50%-áért felelős az egészségügyi vizsgálatok során keletkezett dózisterhelés, és fejlettebb országokban magasabb ez az arány (UNSCEAR Report, 2008). Globálisan elterjedtek ezek az eljárások, ezért kimondhatjuk, hogy a sugárterhelés növekedése is az egész világra értendő. Ezért fontos a sugárvédelmi szempontok figyelembe vétele, hogy a negatív hatások helyett a pozitív hatások domináljanak. Benkő és munkatársai (2011) munkája szerint megkülönböztetjük a diagnosztikai és terápiás eljárások között a röntgendiagnosztikát, az izotópdiaosztikát, a sugárterápiát és a radiofarmakonok terápiás célú használatát.

A **röntgendiagnosztikánál** a röntgensugárzás azon tulajdonságát veszik alapul, hogy az anyagban képes részben elnyelődni. Az anyag sűrűségétől függ az elnyelődés mértéke. Ha az adott anyagon áthaladott röntgensugárzást egy fényérzékeny lemezen érzékelik, akkor kirajzolódnak a sűrűségbeli különbségek. Az emberi testben lévő szövetek sűrűsége eltérő (csontszövet sűrűbb a lágy szöveteknél), ezért a röntgendiagnosztika nagyon jól alkalmazható ezeknek a vizsgálatához. A sugárterhelés ebben az esetben a gyakori vizsgálatokból, illetve a nem korszerű diagnosztikai gépekből származik. Ez a betegek mellett az orvosokat és asszisztenseket is érinti. Maga a gép kikapcsolt állapotban nem sugároz.

Egy másik ionizáló sugárzás segítségével működő diagnosztikai módszer az **izotópdiaosztika**. A vizsgálat lényege, hogy a radioaktív izotópot olyan anyaggal

együtt juttatják be a szervezetbe, ami a vizsgálandó szervben összegyűlik, tárolódik majd a szervezet kiüríti. A kilépő sugárzást gamma kamerákkal detektálják, majd a feldolgozott jelekből kirajzolódik a vizsgált szerv képe. A sugárterhelés ebben az esetben a beteget, és a vele érintkező személyeket érinti. A beteg testéből kiürülő radioaktív izotópok növelik a környezet a radioaktív szennyezettségét, ami a lakossági sugárterhelést is emeli.

Az izotópdiagnosztikához hasonló elven működik a **radiofarmakon terápiás célú alkalmazása** is. A radioaktív izotóp olyan anyaggal van együtt bejuttatva a szervezetbe, ami a kezelni kívánt szövetben összegyűlik. Ez a kezelés típus nagyobb sugárterheléssel jár, viszont ritkán alkalmazzák. Mint az izotópdiagnosztikánál, itt is hatással van a beteggel érintkező személyekre is a sugárzás, nem csak a betegre.

A **sugárterápia** során a sugárzás forrása az emberi testen kívül helyezkedik el. A beteg kezelendő szöveteit/szerveit egy sugárnyalábbal célozzák meg. A sugárnyaláb típusa és energiája a megcélzott szövet elhelyezkedésétől függ. A sugárterápia alkalmazása a betegeknél szerencsére elég ritkának mondható, bár a daganatos megbetegedések elterjedésével egyre gyakoribb. A röntgengépekkel ellentétben a sugárterápiás műszerek (típustól függően) áramtalanítva is sugározhatnak, így megfelelő védelmet kell biztosítani a készülék köré.

5.6 Sugár- és nukleáris balesetek

A mesterséges eredetű sugárszennyezés forrásai közül nem lehet olyat megemlíteni, ahol ne lett volna valamekkora szintű baleset. A sugár- és nukleáris baleset között különbség van. Sugárbalesetről akkor beszélünk, ha valamilyen rendkívüli esemény hatására ionizáló sugárzás alkalmazása során egy vagy több személy határértéket meghaladó sugárterhelésben részesül (Göbl, 2001). Ha a nukleáris energia felhasználásának valamely pontján baleset történik, azt nukleáris balesetnek nevezzük. A sugár- és nukleáris balesetek hatása a környezetre és a lakosságra változó, függ a baleset jellegétől. A következő pontokban három különböző baleset példáján mutatom be a sugárszennyezés mértékét.

5.6.1 *A csernobili baleset*

Az emberiség történetének legnagyobb atomerőművi nukleáris balesete a Csernobili Atomerőműhöz köthető, ez 1986. április 26-án történt. Az atomerőmű 4-es blokkjának karbantartása április 25-re volt tervezve. Egy kísérletet akartak elvégezni a leállítandó blokkal, aminek a lényege az volt, hogy ha valamilyen okból le kell állítani a rendszert, a leálló turbógenerátorok mozgási energiáját felhasználva meghajtsák a keringetőszivattyúkat, amíg a dízelaggregátorok üzembe állnak. A kísérlet előkészítése közben és folyamatában a kezelők megsértették az előírásokat, ami végül a balesethez vezetett. A reaktorban hirtelen egymást követték a végzetes folyamatok, majd a kimenetelük egy gőzrobbanás volt, amit vegyi robbanás követett. A blokkba bejutó oxigénnek köszönhetően tűz ütött ki, ami még jobban elősegítette a radioaktív szennyezés terjedését. A reaktorból a baleset után 10 napig a radioaktív szennyezők nagy mennyiségben jutottak ki, ezzel tovább növelve a helyzet súlyosságát. Megközelítőleg 1-2 EBq volt a kibocsátott anyag összes aktivitása. Az atomreaktor környezetéből 30 km-es körzetben evakuálták a lakosságot (Benkő és mtsai, 2011).

A balesetet követően jelentősen megnövekedett egyes betegségek száma, ilyen a rosszindulatú pajzsmirigy daganat is, ami legfőképp a gyerekeknél okozott problémát. Ezen kívül sok más daganatos megbetegedés gyakorisága is megnőtt.

A keletkezett sugárszennyezés a környező országokba eljutva még nagyobb területeket szennyezett be. Hazánkban négy nappal a baleset után lehetett észlelni a megnövekedett β -aktivitást a levegőben lévő aeroszokból (Benkő és mtsai, 2011). Rengeteg problémát okozott a balesetet követő években a megnövekedett sugárterhelés a környezetben, különös tekintettel arra, hogy a balesetről és a szükséges óvintézkedésekről a „szocialista blokk” országaiban nem vagy csak késlekedve tájékoztatták a lakosságot.

5.6.2 *A Three Mile Island-i baleset*

A csernobili baleset előtt, 1979. március 28-án a Pennsylvania államban lévő atomreaktorban probléma lépett fel. A reaktor egy blokkját ismeretlen okok miatt nem megfelelően hűtötték, lényegében hűtés nélkül maradt. Ez ahhoz vezetett, hogy a fűtőelemek egy része elkezdett megolvadni. Az atomreaktor megfelelő szigetelése miatt a keletkező radioaktív gőzfelhő nem tudott kijutni a légkörbe, és a szennyezett víz sem

tudott kijutni a környezetbe. Ennek ellenére különböző okok miatt később mégis jutott radioaktív szennyezés a környezetbe, viszont ennek a következményei meg sem közelítették a csernobili baleset következményeit (Pór, 2012).

5.6.3 A Windscale-i baleset

Az előbbiekkal ellentétben a a Windscale-i atomreaktor katonai célokat szolgált, Anglia elő akarta állítani a saját atombombáját. 1957-ben túlhevülés miatt tűz ütött ki. A kezelők meg tudták előzni a katasztrófát, viszont a szennyezést nem. 740 TBq aktivitású anyag jutott ki a környezetbe, amit kezdetben eltitkoltak. Nem volt szükség a lakosság kitelepítésére, viszont a reaktort környező területeken korlátozták a tejfogyasztást (Benkő és mtsai, 2011).

6. Atomreaktorok

Az atomreaktorok történetének kezdetén a felhasználásuk célja nem volt békés szándékú. Az elsőként, 1942-ben megépített reaktor plutónium gyártása miatt volt fontos. Ekkor még nem hasznosították a melléktermékként keletkező hőenergiát. 1951-ben az USA-ban a világon először villamosenergiát állítottak elő a nukleáris energiából. Az első békés célú atomreaktor megépítésére az első reaktor megépítése után több mint egy évtizeddel, 1954-ben került sor Oroszországban. Innentől az idő múlásával egyre több reaktor épült meg, fejlesztve a technológiákat. Napjainkban 449 energiatermelő atomreaktor működik a világon (IAEA adatai alapján). Az atomerőműveket 4 generációba sorolhatjuk. Az 1. és 2. generációs atomerőművek közé tartoznak a már megépített és ma is működő reaktorok. Ezeknek a fejlesztései, és terveik tartoznak a 3. és 4. generációs reaktorokhoz.

6.1 Első generációs atomerőművek

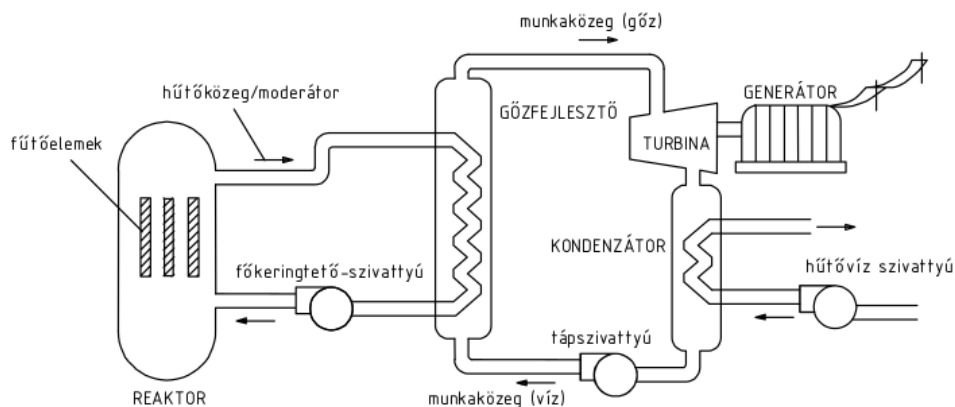
Az atomerőművek térhódításának korai szakaszában, az 1950-es és 60-as években épültek az első generációs atomerőművek. A technológiák ekkor még gyerekcipőben jártak, ami miatt a reaktorok rengeteg hiányossággal rendelkeztek. Az akkor épült reaktorok töredéke az ami még mindig működőképes.

6.2 Második generációs atomerőművek

A korábbi tapasztalatokból okulva az 1970-es években megkezdődtek a második generációs atomerőművek üzembe helyezései. A világon ma is működő atomerőművek igen nagy százaléka tartozik ebbe a kategóriába. Ezek a reaktorok már korszerűbbek és biztonságosabbak az első generációs atomerőművekhez képest, viszont a mai energia előállítás és felhasználásbeli nézeteknek nem feltétlen felelnek meg.

6.2.1 Nyomott vizes reaktor (Pressurized Water Reactor – PWR)

A ma működő reaktorok zömmel (többek között a paksi blokkok is) nyomott vizes reaktor (ld. 1. ábra). A nevét a moderátorként és hűtőközegként használt nagynyomású vízről kapta. A nyomás nagysága változó, a primer és szekunder körben különbözik. Az aktív zónában lejátszódó magreakciókból termelődő energia átadódik a primer körben keringő víznek, amely ezáltal felmelegszik. A primer körben keringő víz a nyomás (120-150 bar) hatására a forráspontot jóval meghaladva sem forr fel (Pátzay, 2011). Ez a primer körű víz átadja az energiáját a szekunder körű víznek a gőzfejlesztőn keresztül. Mivel a szekunder körben keringő víz nyomása alacsonyabb, az átadott hőenergia hatására felforr, és a keletkező gőz meghajtja a turbinákat, ami pedig generátor segítségével előállítja az elektromos áramot. A keletkező gőz egy kondenzátorban lecsapódik, amit visszaforgatnak a rendszerbe. A nyomott vizes reaktor előnye, hogy biztonságos, kevés az esély a radioaktívan szennyezett víz és a külső forrásból hűtésre használt víz keveredésének. A reaktor passzív biztonságát az adja, hogy a hűtővíz elforrása esetén a moderátor is eltűnik a rendszerből, így a láncreakció leáll. A reaktortípus hátránya az alacsony, ~30%-os hatásfok .



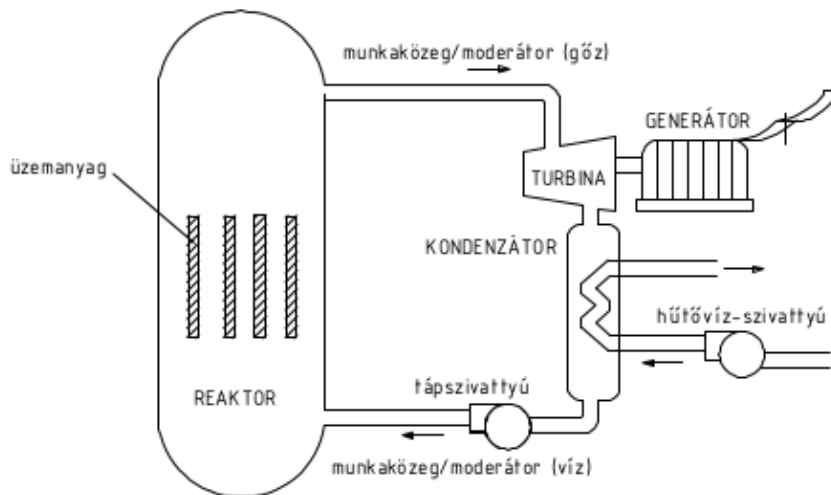
1. ábra: A PWR felépítése

forrás: Balogh és mtsai (2002)

6.2.2 Forralóvizes reaktor (Boiling Water Reactor - BWR)

A forralóvizes reaktorok (ld. 2. ábra) működésének alapelve sok hasonlóságot mutat a PWR-reaktorok működésével, mivel a forrásban lévő vízből kilépő gőz hajtja meg a turbinákat mindkét esetben. Ennek ellenére a BWR-reaktorok felépítésében

vannak különbségek is. A reaktorba belépő víz nyomása alacsonyabb (~70 bar), így az aktív zónában lejátszódó magreakcióknak köszönhetően a víz a primer körben felforr. A keletkező radioaktív gőz hajtja meg közvetlenül a turbinát, ami generátorhoz kötve elektromos áramot állít elő. A forralóvízes reaktor hatásfoka alig haladja meg a 30%-ot. A BWR-reaktoroknál kockázatot jelent az, hogy a turbinát sugárzó környezetben üzemeltetik, így a külső forrásból származó hűtővíz csak a kondenzátorral van elválasztva a radioaktívan szennyezett területtől (Comsan, 2007).



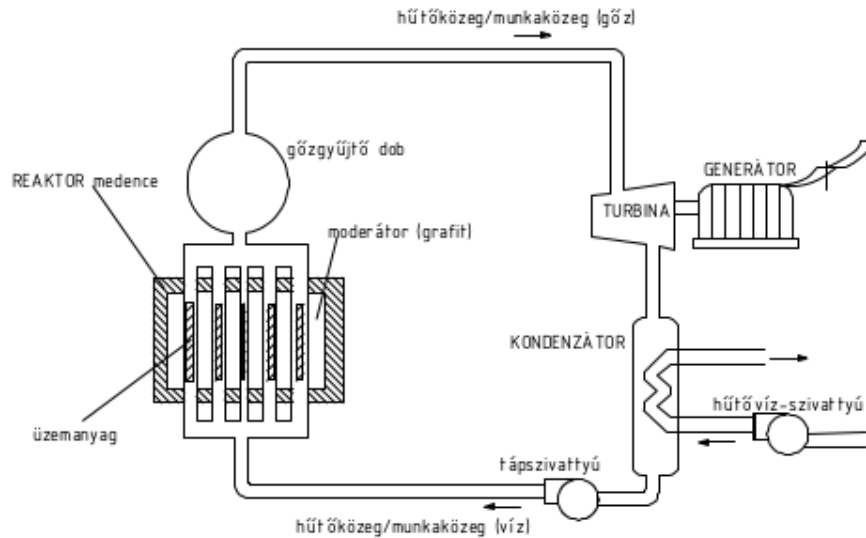
2. ábra: A BWR felépítése

forrás: Balogh és mtsai (2002)

6.2.3 RBMK-reaktor

A volt Szovjetunió területén kifejlesztett és épített atomerőművek nagy része RBMK típusú -reaktorok. Az eddig tárgyalt típusoktól eltérően ezekben a reaktorokban moderátorként grafitot használnak, víz mellett. Hűtőközegként használják a vizet, ami forrásban lévő nagynyomású könnyűvíz. Az RBMK-reaktorok aktív zónájában a grafitmoderátorok között nagy nyomás alatt tartott csövek találhatók. Ezekben a csövekben a fűtőelemek, és a mellettük áramló könnyűvíz van. A forrás csövekben történik, és hasonlóan a BWR-reaktorokhoz a keletkező gőz hajtja meg a turbinákat. Hatalmas teljesítményt lehet elérni egy ilyen reaktoral, illetve nagy előnye még, hogy a kiégett fűtőelemek cseréjéhez nem kell leállítani a reaktort. Hátrányai közül ki kell emelni az aktív zóna méretét és elrendezését, ami miatt a moderálás igen nehéz, és az ún. pozitív üregetényező. Ha a hűtőközeg egy része elforr, akkor ott a reaktor

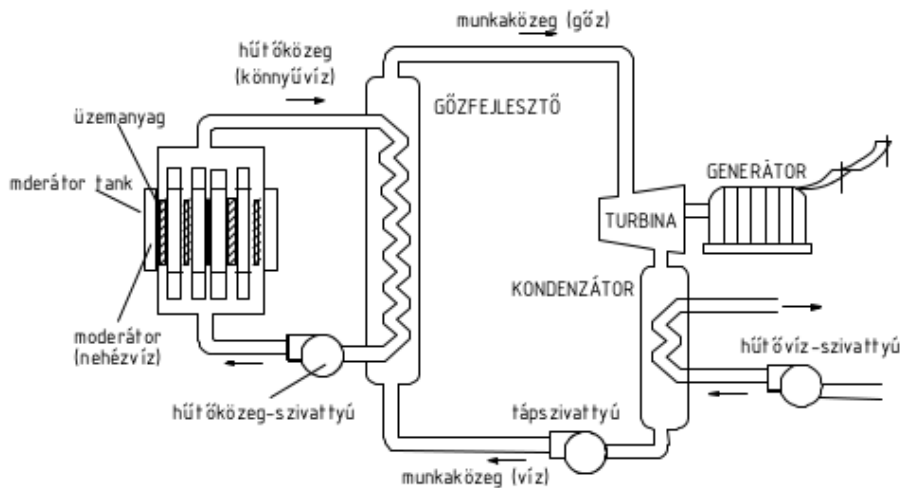
teljesítménye hirtelen megnő a víz neutronelnyelésének hiányában, ami a reaktor túlhevülését okozhatja (Benkő és mtsai, 2011).



3. ábra: Az RBMK felépítése
forrás: Balogh és mtsai (2002)

6.2.4 Nehésvizes reaktor (Heavy Water Reactor – HWR)

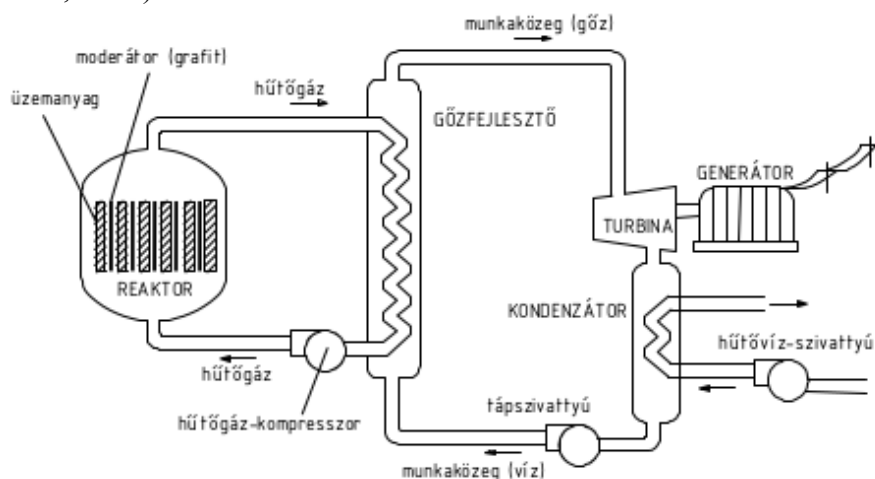
A nehésvizes reaktorokban a PWR-reaktor primer köréhez hasonlóan nagy nyomás uralkodik. Hűtőközegnek és moderátornak nehésvizet alkalmaznak (Faw és mtsai, 2002). Az egyik legismertebb nehésvizes reaktor típus a kanadai CANDU reaktor. A nehésvíz moderátor egy nagy tartályban van, amiben a fűtőanyag vízszintes csövekben van. A hűtőközeg ezeken a csöveken át áramlik, de mivel nyomás alatt van, ezért nem forr fel. A gőzfejlesztőben a hűtőközeg átadja az energiáját a szekunder körben keringő könnyűvíznek, ami felforrva gőzt fejleszt. A keletkező gőzzel hajtják meg a turbinákat. A reaktort körülvevő biztonsági tartály megakadályozza, hogy radioaktív szennyezés jusson a környezetbe valamilyen meghibásodás során. Így a reaktor biztonságosnak mondható, viszont a nehésvíz alkalmazása miatt drága (Pátzay, 2011).



4. ábra: A HWR felépítése
forrás: Balogh és mtsai (2002)

6.2.5 Gázhűtésű reaktorok (Gas-cooled Reactor – GCR)

Már az első generációs atomerőművek építéskor is elterjedt volt ez a technológia. A gázhűtésű reaktorokat a csernobili baleset után felszámolták, mivel a GCR-ekben is grafit moderátor van. Fejlesztések sorozata után a gázhűtésű reaktorok építése újrakezdődött. A grafit megmaradt moderátornak, viszont a legújabb GCR-eket már hélium, vagy szén-dioxid hűti. A reaktor előnye, hogy nagyon magas hőmérsékleten tud működni a gázhűtés miatt, ezért nagy teljesítmény nyerhető ki belőle magas hatásfokon (Faw és mtsai, 2002).



5. ábra: A GCR felépítése
forrás: Balogh és mtsai (2002)

6.2.6 Gyors tenyésztő reaktorok (*Fast Breeder Reactor – FBR*)

A gyors tenyésztő reaktorokban a neutronok moderálása nélkül zajlanak le a magreakciók. A reaktor aktív zónájában nem csak a fűtőelemekben létrejövő maghasadások mennek végbe, hanem az az U-238 átalakulása hasadóképes Pu-239-é. Az ilyen reaktorokat azért nevezik tenyésztő reaktornak, mert az aktív zónában több hasadóanyag termelődik, mint amennyi az energiatermeléshez szükséges lenne. A reakció közben keletkezett hőt folyékony fémekkel, többnyire nátriummal vonják el (Benkő és mtsai, 2011).

6.3 Harmadik generációs atomerőművek

A sajnálatos csernobili atomerőmű baleset következtében visszaesett az atomenergia iránti érdeklődés, majd a 90-es évekre teljesen megszűnt a második generációs atomerőművek építése. Az addig megszerzett tudással és tapasztalattal megkezdődtek a fejlesztések, amik a második generációs atomerőműveket vették alapul. Az tervek szerint az új reaktorok sokkal gyorsabb építési, és üzembe helyezési procedúrán mennek át. A nagyobb biztonság érdekében a külső és belső védelmet is megújították. A reaktorok felépítése magasabb fokú védelmet nyújt az előre meg nem jósolható környezeti behatásokkal szemben, illetve az üzemben belüli problémákkal szemben is. A belső védelem egy fontos lépése a passzív védelem előtérbe helyezése. A biztonság mellett a gazdaságosság is fontos szempont. Az új reaktorok fűtőanyag felhasználása hatékonyabb, így kevesebb radioaktív hulladék keletkezik (Pátzay, 2011).

Faw és munkatársai (2002) munkája alapján a harmadik generációs atomerőművek működésének irányelveit ismertetem a következő pontokban.

A második generációs forralóvízes reaktor fejlesztéseiből született meg az **ABWR** (Advanced Boiling Water Reactor), az első harmadik generációs reaktor. Céljük a biztonság és az üzemidő megnövelése, illetve a költségek és az építkezés idejének csökkentése volt. Ezek mellett alkalmazkodtak a fűtőanyag ciklus esetleges jövőbeli változásaihoz. Japánban már felépítettek két ABWR-blokkot.

A BWR és ABWR tulajdonságait alapul véve fejlesztették ki a **ESBWR-t** (Economic Simplified Boiling Water Reactor), ami egy lényegesen leegyszerűsített

reaktor. Az egyszerűségének köszönhetően az építés hossza, és a költségek is csökkentek.

A nyomott vizes reaktorok alapján tervezték meg az **EPR-t** (Evolutionary Power Reactor). Magas szintű védelemmel látták el, kívülről olyan biztonsági tartály védi, amely egy repülőgép becsapódásból származó károkat is elhárítana. A reaktoron belül bekövetkező problémákból adódó balesetek lehetőségét csökkentették, de ha mégis megtörténne az nem járna súlyos következményekkel.

Szintén PWR továbbfejlesztés az **AP1000** (Advance Pressurized Water Reactor). A felhasznált alkotóelemek számát radikálisan lecsökkentették, így az építés ideje és a költségek is csökkentek az eredeti nyomott vizes reaktor költségeihez képest.

A négy kiragadott példán kívül számos terv és megvalósítás született az évek alatt, amik hozzájárultak a atomenergia használatának környezetterhelő vonásainak csökkentéséhez.

6.4 Negyedik generációs atomerőművek

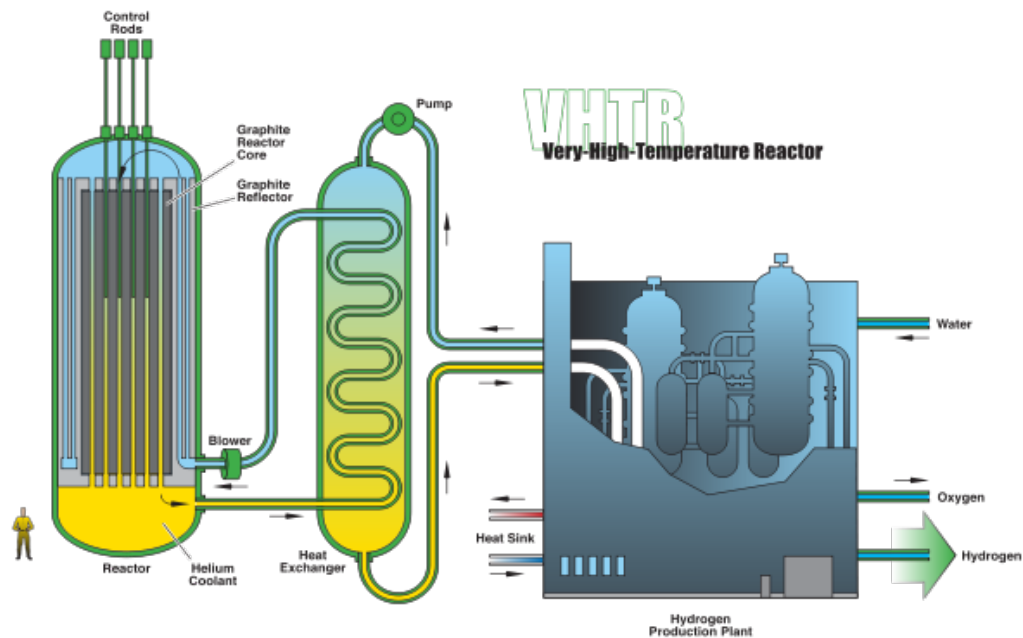
Régóta tisztában vagyunk azzal a ténnyel, hogy a környezet hatással van ránk, emberekre. Ezeket a hatásokat a tudomány fejlődésével együtt párhuzamosan ismertük meg. Azonban a fordított felállás, vagyis az emberek bioszféra átalakító hatásai sokáig el nem ismert kijelentések voltak. Ez mára már megváltozott, de számolnunk kell a múltban történt események következményeivel. A mai tudomány nagy erővel dolgozik a problémák mérséklésén és az olyan technológiák kifejlesztésén, amivel megkímélhetjük környezetünket az esetleges negatív hatásoktól.

Az atomenergia felhasználásának történetében számos olyan esetet találunk, aminek komoly kihatása volt az emberekre és környezetükre, amik többnyire hosszú távú hatások voltak. Ebből adódóan szükség volt olyan reaktorok kidolgozására, amik megfelelnek a következő elvárásoknak (Pátzay, 2011): nagyfokú biztonság és megbízhatóság, megépítésének és működtetésének gazdaságossá tétele, a keletkező hulladékok minimalizálása, kizárólag békés célokra való felhasználás és a természeti erőforrások fenntartható használata. Fontos megemlíteni továbbá, hogy a negyedik generációs reaktorok akár a korábban használhatatlannak ítélt kiégett fűtőanyagcellákat is hasznosíthatják, így akár a környezeti sugárszennyezés abszolút értelemben vett csökkentését is el lehet érni majd velük.

Az Egyesült Államok kezdeményezésére létrejött egy nemzetközi összefogás, ahol a negyedik generációs atomerőművek kidolgozásán dolgoztak. A tervek szerint 2025 és 2030 között üzemelnék be az új fejlesztésű reaktorokat.

6.4.1 Nagyon magas hőmérsékletű reaktor (Very High Temperature Reactor – VHTR)

A VHTR (ld. 6. ábra) alkalmazása az energiatermelésen kívül magas hőmérsékletű folyamatokhoz lenne lehetőség biztosítani a hőenergiát. A villamosenergia mellett hidrogén előállítás is történne. Moderátorként grafitot, hűtőközegnek pedig héliumgázt alkalmaznának. A gázhűtésnek köszönhetően a reaktor nagyon magas hőmérsékleten, akár 1000°C-on tudna működni, teljesítménye 250-300 MW_e közé tehető. Üzemanyagként urán és plutónium keveréke, urán és tórium keveréke, plutónium és MOX (visszamaradt urán és plutónium vegyes-oxid tartalmú fűtőanyag) is használható. A VHTR fűtőanyag ciklusa nyitott, vagyis a reaktorban alkalmazott fűtőanyag csak egyszer használható fel. Ez fenntarthatóság szempontjából nem a legmegfelelőbb (Pátzay, 2011).

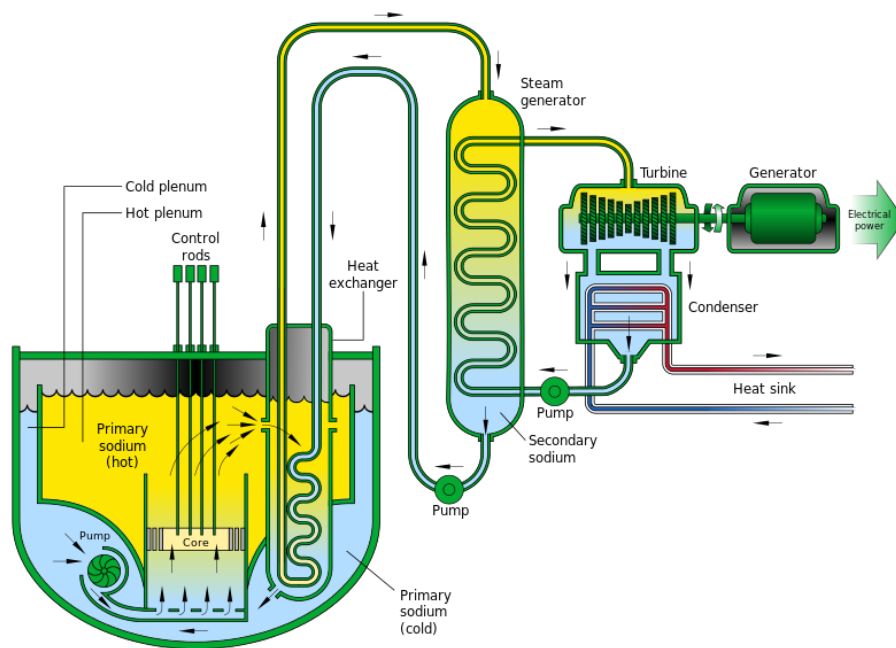


6. ábra: A VHTR felépítése

forrás: en.wikipedia.org/wiki/Gen-IV

6.4.2 Nátriumhűtésű gyorsreaktor (Sodium-cooled Fast Reactor - SFR)

A nátriumhűtésű gyorsreaktorokban (ld. 7. ábra) villamos energia előállítása mellett nagy aktivitású aktinidák kezelése is történik. A fűtési ciklus zárt, így lehetővé teszi az elhasznált hasadóanyagok regenerálását. Ez fontos a fenntartható erőforrás használat miatt. A tervezett teljesítmény reaktoronként változó, néhány száz MW_e-től egészen 1700 MW_e-ig terjedhet. Üzemanyagként MOX, illetve uránium-plutónium-cirkónium ötvözet is használható. A termikus erőművek kiégett fűtőelemei felhasználhatók az SFR-ben kezdeti üzemanyagként, ezzel is csökkentve a radioaktív hulladékok mennyiségének növekedését. A hűtőközeg folyékony nátrium, aminek a párolgása üzemi hőmérsékleten igen alacsony, így a reaktor atmoszférikus nyomáson működhet. A nátrium reakcióképessége miatt a víz és oxigén bejutását meg kell akadályozni. A negyedik generációs atomerőművek tervei közül a nátriumhűtésű gyorsreaktor a legjobban kidolgozott, így bevezetésük már 2020 előtt is elképzelhető (Pátzay, 2011).

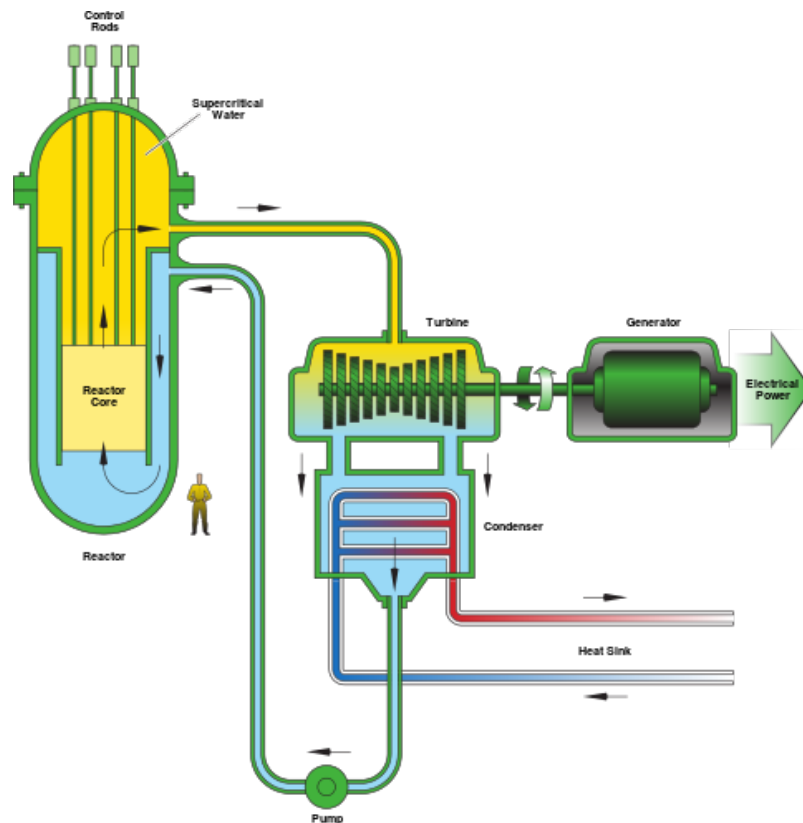


7. ábra: Az SFR felépítése

forrás: en.wikipedia.org/wiki/Gen-IV

6.4.3 Szuperkritikus vízhűtésű reaktor (Supercritical Water Reactor – SCWR)

A szuperkritikus vízhűtésű (ld. 8. ábra) reaktorok kétféle üzemmódban is működhetnek. Maga a reaktor forralóvízes reaktorként működik mindkét esetben, ahol a víz a kritikus pontja (22,1 MPa, 374 °C) felett van a nyomás és a hőmérséklet. Egy ilyen reaktor teljesítménye 300 MW_e-től 1700 MW_e-ig terjedhet, hatásfoka meghaladja a 44%-ot. A fűtőanyag mindkét esetben urán-dioxid. A gyorsneutronnal működő üzemmód esetén a fűtőanyag ciklus zárt, így az elhasznált hasadóanyag visszaforgatható a rendszerbe. Ebben az üzemmódban nincs szükség moderátorra. A termikus neutronnal működő üzemmódban a fűtőanyag ciklus nyitott, kiegészítő moderátor szükséges. A reaktor biztonsági kérdései még fejlesztést igényelnek, így az SCWR-k üzembe helyezése a 2020-as évek közepe felé várható (Pátzay, 2011).

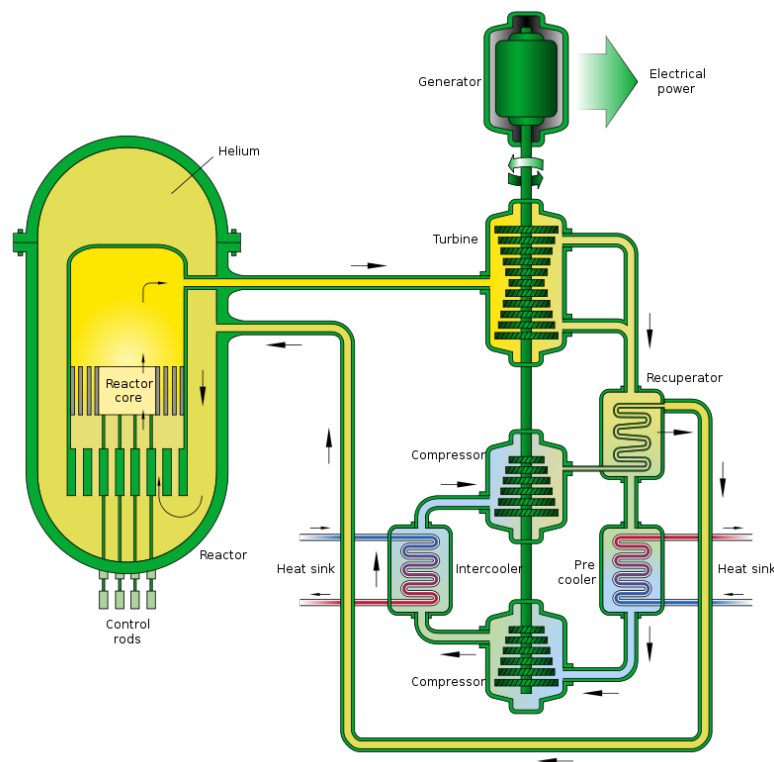


8. ábra: Az SCWR felépítése

forrás: en.wikipedia.org/wiki/Gen-IV

6.4.4 Gázhűtéses gyorsreaktor (Gas-cooled Fast Reactor – GFR)

Mint az eddig tárgyalt gázhűtéses reaktoroknál, a GFR (ld. 9. ábra) is nagyon magas hőmérsékleten képes működni. A hűtőközege héliumgáz. Mint minden gyorsreaktornál a fűtőanyag ciklus zárt, a kiégett fűtőanyag újra felhasználható a reaktor működtetésében. 48%-os hatásfok mellett 288 MW_e teljesítményre képes. A gázhűtésű gyorsreaktor megfelel a negyedik generációs atomerőművek követeléseinek, legkorábbi időpontja az üzembe helyezésnek a 2020-as évek elejére tehető (IRSN, 2012).



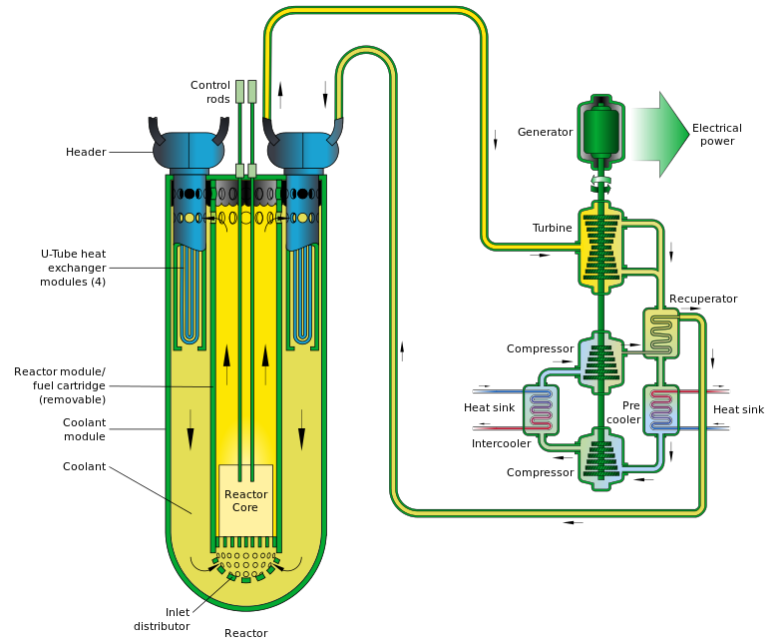
9. ábra: A GFR felépítése

forrás: en.wikipedia.org/wiki/Gen-IV

6.4.5 Ólomhűtésű gyorsreaktor (Lead-cooled Fast Reactor – LFR)

Az ólomhűtésű gyorsreaktor (ld. 10. ábra) gyorsneutronnal működő, zárt fűtőanyag ciklusú reaktor, villamos energia és hőenergia előállítására tervezve. A teljesítménye változó, 20 MW_e és 1000 MW_e közé tehető. Üzemanyagként U-238-t használ fel, ami a gyorsreaktornak köszönhetően hatékonyan átalakítható plutóniummá. A reaktorban folyékony ólom vagy folyékony ólom-bizmut eutektikumot alkalmaznak hűtőközegnek, ami a folyékony nátriumhoz képest jobb, mivel az ólom nem lép

reakcióba a vízzel. Ennek köszönhetően az LFR felépítése egyszerűbb az SFR-hez képest. Ez a fajta negyedik generációs atomreaktor jól működne kis országok energiaellátásában. Az első LFR megépítése szintén a 2020-as évek elejére tehető (IRSN, 2012).

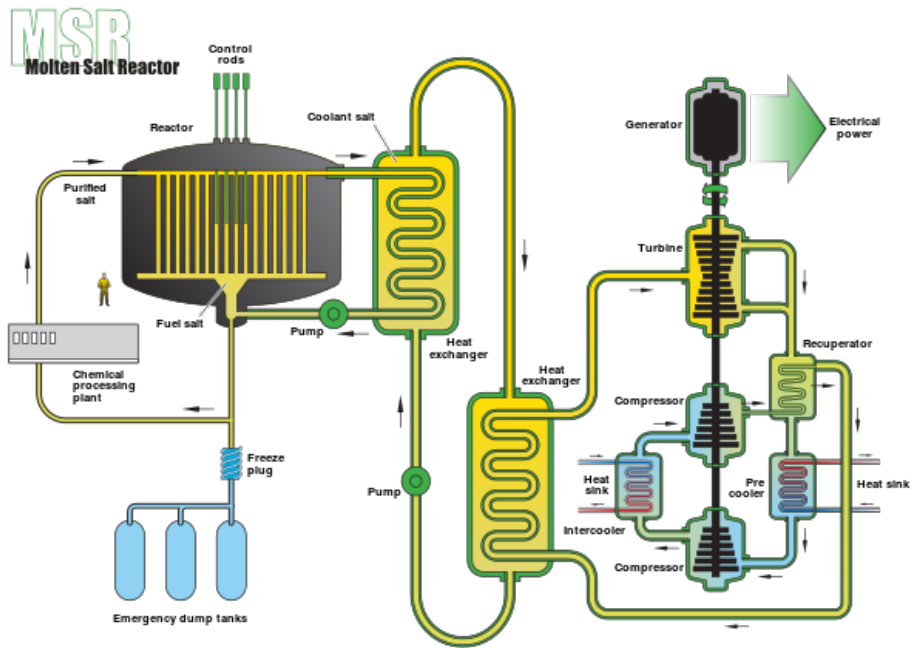


10. ábra: Az LFR felépítése

forrás: en.wikipedia.org/wiki/Gen-IV

6.4.6 Sóolvadék-hűtésű reaktor (Molten Salt Reactor - MSR)

Ennek a reaktornak a különlegessége, hogy az urán vagy plutónium-fluoridot tartalmazó sóolvadék egyszerre tölti be a hűtőközeg és az üzemanyag szerepét. Az MSR-ben villamos energia és hidrogéngáz termelése is történik. A reaktorban a termikus és epitermikus neutronok az olvadékba kevert aktinidák hasítására és hasadó anyaggá alakításra képesek. Tervek szerint négyféle üzemmódban lehet működtetni a reaktort, fűtőanyag ciklusnak megfelelően. Üzemmódtól függ a teljesítmény, 250 MW_e-ra vagy 1000 MW_e-ra képes. Az MSR (ld. 11. ábra) működése biztonságos, zárt fűtőanyag ciklusa és az üzemanyag kiegészítésének hatékonysága miatt az erőforrások fenntarthatóságának szempontjából nagyon jól megfelel. A sóolvadék-hűtésű reaktorok fejlesztései várhatóan a 2030-as elejére fejeződnek be (Pátzay, 2011).



11. ábra: Az MSR felépítése
 forrás: en.wikipedia.org/wiki/Gen-IV

7. Összefoglalás

Szakedolgozatom célja a mesterséges eredetű ionizáló sugárszennyezések forrásainak áttekintése és egyik lokálisan fontos forrásának, az atomerőművek típusainak bemutatása, illetve a negyedik generációs atomerőművek környezetkímélőbb fejlesztéseinek ismertetése.

A környezetvédelmi szabályozásoknak köszönhetően ma már az ipari ágazatok jogilag kontrollálva vannak. Emellett a tudomány egyre több környezetkímélő technológiával rukkol elő, ez alól a nukleáris energia felhasználása sem kivétel. Az atomenergia hasznosításának kezdetén a környezetvédelem szempontja nem volt mérvadó. Ennek, és a biztonság hiányának a következményei ma már mindenki számára ismertek. A reaktorok első és második generációjába tartozó atomerőmű típusok továbbfejlesztésével alakultak ki a harmadik és negyedik generációs atomerőművek. Ezek a korábbi verziók hiányosságait feljavítva, a mai szükségleteknek megfelelően lettek megtervezve. A negyedik generációs atomerőművek fejlesztése közben a legtöbb olyan eshetőségre gondoltak, amivel a környezetterhelés mértékét csökkenthetik. A kiégett fűtőelemek hatékony újrahasznosítása (ezáltal a hulladék csökkentése), az építési idő és költségek csökkentése, a reaktorok biztonságos felépítése mind hozzájárul az atomenergia megbízható alkalmazásához.

Azt ki lehet jelenteni, hogy a negyedik generációs atomerőművek mindenképp olyan technológiákat jelentenek, amik a megtermelt energia egységre jutó szennyezők kibocsátását a minimálisra csökkentik.

A környezetvédelemmel kapcsolatban egyre több tájékoztatást kapnak a laikusok is, viszont az atomenergia környezetkímélő vonásai kevésbé ismeretesek. Úgy gondolom, hogy a tájékoztatás nagyon fontos, mivel a múltban történt balesetek megváltoztatják a nukleáris energia felhasználásának megítélését.

Napjainkban egyre csak nő a globális energiaszükséglet, ami miatt fontos az energiahordozók teljes körű kihasználása. A fosszilis energiahordozók mennyisége véges, így más megoldásokra is szükség van. A megújuló energiahordozók teljesítménysűrűsége nem elég, hogy fedezze az energiaszükségletet, ezért hosszútávon mindenképp szükség van kiegészítő energiaforrásokra. A negyedik generációs atomerőművek megoldás jelentenének erre a problémára.

8. Summary

The purpose of my thesis is to review the sources of ionizing radiation pollution, sources of artificial origin, and to present one of their locally important sources, the types of nuclear power plants, furthermore the more environmentally friendly developments of the fourth generation nuclear power plants.

Thanks to environmental regulations, industrial sectors are now legally controlled. In addition, science is emerging with more and more environmentally friendly technologies, from which the application of nuclear energy is not an exception. At the beginning of the utilization of nuclear energy, the aspect of environmental protection was not relevant. This and the lack of security have had consequences. Third and fourth generation type nuclear power plants were developed via the further improvement of the first and second generation nuclear power plants. The earlier flaws have been fixed and the reactors have been redesigned to meet today's needs. During the development of fourth-generation nuclear power plants, most of the eventualities were considered to reduce the environmental impact. Effective recycling of spent fuel (thus reducing waste), reducing construction time and costs, and the safe structure of reactors all contribute to the reliable use of nuclear energy.

It can be said that **the fourth-generation nuclear power plants, by all means, have the technology that could minimize risks and reduce the emission of pollutants as much as possible.**

The lay people are increasingly informed about environmental protection, but the environmentally friendly aspects of atomic energy are less known. I believe that information is very important because accidents in the past can change the perception of the way in which nuclear energy is used.

Today, global energy needs are growing, which is why full use of energy sources is important. The amount of fossil fuels is finite, so other solutions are needed. The power density of renewable energy sources is not enough to cover the energy needs, so by all means there is a need for additional energy resources in the long term. The fourth-generation nuclear power plants would be a solution to this problem.

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni Csanád Máténak, a témavezetőmnek, hogy egyéb elfoglaltságai mellett vállalta szakdolgozatom ellenőrzését, ha segítségre volt szükségem folyamatosan rendelkezésemre állt, és legjobb tudása szerint segítette munkám elkészülését. Emellett szeretnék még köszönetet mondani a témaválasztásban nyújtott segítségéért is.

Irodalomjegyzék

BISZTRAY-BALKU S. 1979. Radiológiai munkák, sugárzás elleni védelem 15-27.o.
36-43.o.

DOBRECOV L. N. 1964. Atomfizika 94-102.o.

BUDÓ Á., HORNYÁK L., MÁTRAI T. 1999. Kísérleti fizika III. kötet, 493-497.o.

ANGELI I., BALOGH K., BIRI S., FÉNYES T., KOLTAY E., SOMORJAI E.,
SVINGOR É., TRÓN L., VALEK A. 2009. Atommagfizika I. 327-368.o. 473-493.o.

FEHÉR I., DEME S., ANDRÁSI A., BALLAY L., BUJTÁS T., CSETE I., FEHÉR I.,
HORVÁTH K., KANYÁR B., KOBLINGER L., KÖTELES GY., NÁDASI I., ORMAI
P., VINCZE Á., ZAGYVAI P., ZOMBORI P. 2010. Sugárvédelem. 34-39.o.

BÉRCES GY., EROSTYÁK J., KLEBNICZKI J., LITZ J., PINTÉR F., RAICS P.,
SKRAPITS L., SÜKÖSD CS., TASNÁDI P. 2002. A fizika alapjai, második javított
kiadás, 656-663.o. 679-681.o.

SMITH C. 2002. Environmental Physics 241-275.o.

KISS Á., TASNÁDI P. 2012. Környezetfizika, 23-37.o. 69-96.o.

BÓDIZS D. 2006. Atommagsugárzások mérés technikái 43-58.o. 61-168.o.

DR. PÁLMAI GY., DR. VIRÁGH E. 1986. Atomtechnika és környezetvédelem 27-
35.o.

BENKŐ ZS. I., CSŐVÁRI M., DÍVÓS F., KOVÁCS T., PÁTZAY GY., RAICS P.,
SOMLAI J. VÁRHEGYI A. 2011. Sugárvédelem, második javított kiadás, 245-253.o.
256-259.o. 260.o. 332-343.o.

PÓR G. 2012. Atomenergetikai alapismeretek, 3-11.o.

DR. ERDŐSI N., HOLLAND J., DR. JÉKI L., DR. OSZTROVSZKI GY., SZÍVÓS K., WIEGAND GY. 1983. Atomerőmű Magyarországon 34-41.o.

BALOGH A., BIHARI P. 2002. Erőművek 143-155.o

KIRÁLY M., RADNÓTI K. 2015. Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük, Nukleon, VIII. évf. 177.

DR. ÁCS T., DR. BENCZE B., DR. FELLCAI T., DR. GOROVE L., DR. GŐBL G., DR. HÉDER J., DR. KÖTELES GY., DR. LAMBOY L., DR. MALCLÁRY L., DR. PAP Z., DR. SOMORVÁRI ZS., DR. SZABÓ K., DR. SZEGLECZLY D., DR. SZOLCOLY M. DR. TURY P. 2000. Oxiológia, 535.o.

FAW E. R., SHULTIS J. K. 2002. Fundamentals of nuclear science and engineering, 318-347.o.

M.N.H. COMSAN 2007. Status of nuclear power reactor development, 6th Conference on Nuclear and Particle Physics, 79.o.

PÁTZAY GY. 2011. Atomenergetika és nukleáris technológia, 28-46.o.

IAEA honlapja (<https://www.iaea.org/>, 2017.05.13.)

PÁTZAY GY. 2011. Atomenergetika és nukleáris technológia, 28-46.o.

IRSN 2012. Overview of Generation IV (Gen IV) Reactor Designs // Safety and Radiological Protection Considerations, IRSN Report 2012/158

KERESZTÚRI A., PATAKI I., TÓTA Á., 2014. Negyedik generációs reaktorok, Fizikai Szemle, 2014/04, 112.o.

UNSCEAR 2008, SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNITED NATIONS, New York, 2010

THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM honlapja (https://www.generation4.org/gif/jcms/c_9260/public, 2017.05.13.)