

ATOMERŐMŰVI BALESETEK ÉS ÜZEMZAVAROK TANULSÁGAI 2.

NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENTS AND MALFUNCTIONS, LESSONS LEARNED 2.

DOBOR József; KOSSA György; PÁTZAY György
(ORCID: 0000-0003-0191-4261) (ORCID: 0000-0002-4404-2929)
(ORCID: 0000-0002-5541-8012)

patzay.gyorgy@uni-nke.hu; dobor.jozsef@uni-nke.hu; info@intertanker.hu

Absztrakt

A nukleáris energia jelentősége hazánkban számottevő, Magyarország energiasztratégiájának egyik pillére. Nemzetközi értékelések alapján kevésbé veszélyes, mint a fosszilis energiahordozók használatát kísérő veszélyek. A jelentős társadalmi előítélet az elmúlt évtizedekben bekövetkezett káreseményeknek tulajdonítható. A cikk ismerteti az elmúlt évtizedek legjelentősebb nukleáris baleseteit, okait és tanulságait. A publikáció két részben kerül közlésre. Az ismertetett balesetek minden esetben műszaki-tervezési hiányosságok következményei és emberi hibákkal/tényezőkkal képeznek direkt kapcsolatot. Az írás kitér arra, hogy minden káresemény több – sokszor egymástól független – hiba okozataként következik be.

Kulcsszavak: atomerőművi balesetek, Windscale, Three Mile Island, Chernobil, Fukushima, okok, következmények

Abstract

Nuclear energy plays an important role in Hungarian energy production. According to frequency-consequence curves for severe accidents in various energy chains fatality rates are lowest for western hydropower and nuclear power plants. On contrary the large nuclear disasters (Chernobyl, Fukushima) caused a negative publicity to nuclear energy. In this paper the four significant nuclear energy disaster in last decades is discussed, including reasons and consequences. Paper has two parts. In these disasters technical, construction errors and deficiencies are the main reasons and human errors are only consequence of existing danger.

Keywords: Nuclear energy disasters, Windscale, Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima, reasons, consequencest

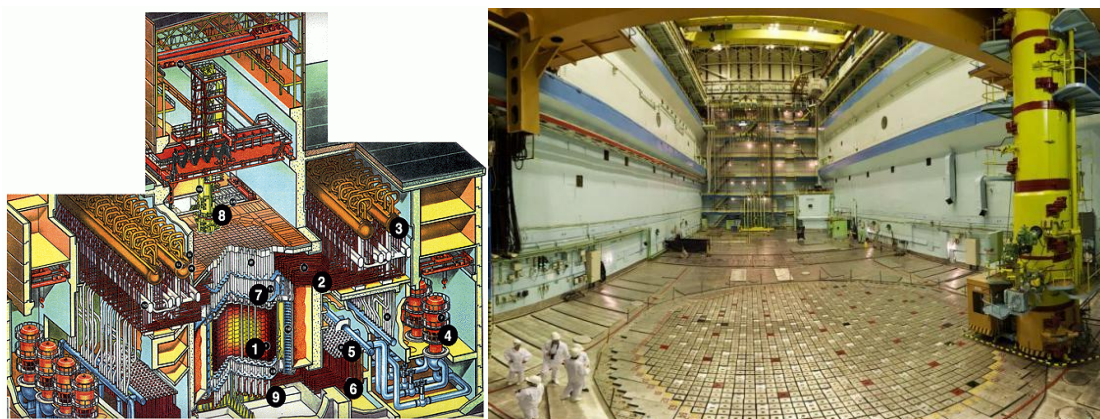
A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.08.29.
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.09.02.

BEVEZETÉS

Az atomenergetika elmúlt évtizedeiben négy komoly atomerőművi baleset és számos üzemzavar következett be. Ezen nem kívánatos események részleges tanulságait és a levonható következtetéseket kívánjuk tárgyalni. Az a tény közismert, hogy az atomerőművek üzemi biztonságával szemben kezdettől fogva maximális követelményeket írtak elő és igyekeztek a biztonsági követelményeket betartani és betartatni. Mégis az elmúlt évtizedekben az egész világra, a közvéleményre, a politikára, az iparbiztonságra jelentősen kiható balesetek és üzemzavarok következtek be, melyeknek tanulságait a mai napig elemzik, értékelik és az atomerőművek biztonságát befolyásoló technikai és szervezési eljárásokat, előírásokat újra és újra átdolgozzák. Cikkünkben röviden összefoglaljuk az eddig bekövetkezett négy legsúlyosabb atomerőművi baleset eseményeit, tanulságait és a levonható következtetéseket. A cikksorozat 1. részében az általános alapelvek után tárgyaltuk a windscale-i (Nagy Britannia) és a Three Mile Island-i (USA) atomerőművi baleseteit [1] azok következményeit és a levonható tanulságokat. Jelen 2. részben a Csernobili (SZU) és a Fukushimai (Japán) baleseteket tárgyaljuk.

A CSERNOBILI ATOMERŐMŰ BALESET (SZOVJETUNIÓ, 1986 INES 7)

Az RBMK-1000 típusú forralócsöves reaktor felépítését mutatja a 1. ábra.



1. ábra A csernobili RBMK-1000 reaktor felépítés (1. aktív zóna, 2. forralócsövek, 3. gőzseparátor, 4. fő keringtető szivattyú, 5. csoport osztófejek, 6. vízcsövek fejei, 7. felső biológiai védelem, 8. fűtőelem rakodógép, 9. alsó biológiai védelem, a szerzők szerkesztése a [2, 3] alapján)

A reaktor forralóvízes, csatornatípusú, grafittal moderált, könnyűvíz hűtésű, 3140 MW termikus, 1000 MW elektromos teljesítményű volt. A 4. Blokkot 1983 decemberében helyezték üzembe. A reaktorban 2000 db fűtőelem volt, melyben 180 t 1,8 %-os dúsítású UO_2 hasadóanyag található, 180 szabályozó rúddal. A reaktorban egy hengeres 21,6 m átmérőjű 25,5 m magas fedett betontartályban négyszögletes keresztmetszetű grafitoszlopok képezik az aktív zónát, melyek tengelye mentén hengeres csatornákat képeztek ki. A grafit moderátort gáztömör acélkonténerrel vették körül, melyet a grafit oxidációjának megakadályozására és jobb hűtése érdekében hélium-nitrogén gázkeverékkel töltöttek meg. A szovjetek kedvelték ezt a reaktortípust, mert katonailag felhasználható plutóniumot szolgáltatott, csak 1,8 %-ra dúsított fűtőelemmel működött, hosszabb kampányidővel dolgozhatott, mert átrakáshoz nem kellett a reaktort leállítani. Ugyanakkor jelentős hátrányokkal rendelkezett, több éghető anyagot tartalmazott a többi reaktortípusnál, 1661 db nyomás alatti forralócsöve közül bármelyik meghibásodhatott, a víz kifolyása esetén a forró grafit hidrogént fejleszthetett, és ami a legfontosabb "pozitív visszacsatolása" miatt könnyebben megszaladhat a teljesítménye,

mint a többi reaktor esetén. A technológiai csatornák a fűtőelemek elhelyezését szolgálják és itt áramlott a hűtővíz is. A csatornák központi része a 88 mm átmérőjű és 4 mm falvastagságú cirkónium cső volt, amely rozsdamentes acélban végződött. Egy csatornában két-két egyenként 18 fűtőelemet tartalmazó köteg volt. Egy fűtőelem UO_2 tablettáktól töltött, hermetikusan lezárt 13,5 mm átmérőjű és 3 500 mm hosszú cirkónium csövekből állt. A hűtőközeg víz-gőz keverék, tömegárama 36 500 t/h, a gőztermelés 5400 t/h, a telített gőz hőmérséklete 284 °C volt. A víz a technológiai csatornában forrásig hevült és részlegesen (14 tömeg %) gőzzé alakul. A két-két gőzszeparátorban a két fázis elvált, a száraz gőz a két 500 MW-os turbinára áramlott, a vizet pedig a fő keringtető szivattyúk (körönként 4 db, összesen 8 db) visszatáplálták a reaktorba.

1986. április 26-án az ukrán csernobili forralócsöves (RBMK-1000) atomerőmű új, 4. blokkjában bekövetkezett az atomerőművek történetének addigi legsúlyosabb balesete. Az erőmű Kijevtől 100 km-re, északra Pripjaty és Csernobil városok közelében helyezkedett el. Az RBMK-1000 reaktor vízű hűtésű, víz és grafit moderátorú forralócsöves reaktortípus volt. Mint minden akkori szovjet reaktor, a csernobili reaktor sem rendelkezett biztonsági védőtartály épülettel, konténmenttel. A reaktortípus alapvetően konstrukciós hibával rendelkezett: a víz és a grafit jelenléte miatt alacsony teljesítményen az ún. pozitív üregtéyzői hatás következtében labilis volt. Itt a teljesítmény megszabadása könnyen bekövetkezhetett, ezért a reaktort tilos volt alacsony teljesítményen üzemeltetni. Ezen felül a grafit moderátor jelenléte fokozott tűzveszélyt is jelentett. A nagyon súlyos baleset fő oka az említett konstrukciós hiba volt mely rendkívül súlyos és felelőtlen emberi hibával párosult. A baleset időrendi eseményeit röviden az alábbiakban foglalhatjuk össze:

1986. április 25-én a reaktor karbantartási szünetének kezdete előtt nem nukleáris képzettségű, külső szakemberek egy ún. turbina kifutási kísérletet kívántak megismételni. A lecsökkentett teljesítményen végzett kísérletben arra kerestek választ, hogy turbina lekapcsolást eredményező kisebb üzemzavar esetén a generátor saját tehetetlenségénél fogva még mennyi ideig forog olyan sebességgel, melyhez tartozó generált elektromos energia még meghajtja a fő keringtető szivattyúkat, a tartalék áramforrást biztosító dízel generátorok beindulása előtt. A kísérlet megkezdésére késő estig várniuk kellett, de már addig is szabálytalanul kikapcsolták a zóna vészűtő rendszert beindító automatikát.

Éjjel 11 óra körül hozzákezdtek a kísérlethez, melynek első lépése keretében megkezdtek a teljesítmény csökkentését. Sajnos azonban a teljesítmény csökkentést nem jól vezérelték, ezért a csökkentett, de még biztonságos teljesítmény alá került a reaktor teljesítménye. Ekkor a reaktort azonnal le kellett volna állítani, de az automatikát itt is kikapcsolták és megpróbálták a szabályozó rudak fölhúzásával a teljesítményt feljebb tornáztatni. Ez azonban a közismert „jódgödör” effektus (a reaktorban felhalmozódott jód és egyéb izotópok neutron elnyelése miatt kezdetben nehéz a teljesítményt növelni) miatt nem sikerült. Ezért az összes szabályozó rudat teljesen kihúzták a reaktorból és még a hűtővíz átáramlási sebességét is lecsökkentették.

1 óra 23 perckor elkezdtek a kifutási kísérletet és az egyik turbinát lekapcsolták, ennek eredményeként lassan csökkent az átáramoltatott hűtővíz mennyisége és a reaktor – mivel a labilis állapotban üzemelt – néhány másodperc alatt megszabadt. Az operátor észlelve a veszélyt vészleállítást kísérelt meg, de a lefelé haladó szabályozó rudak már nem tudtak belépni a zónába a megolvadt elgörbült szerkezetek következtében. Igen rövid idő alatt 3000 MW hőteljesítmény helyett 100-szor akkora, vagyis 300 000 MW hőteljesítmény szabadult föl, mely hatalmas hőimpulzus pillanatok alatt elforralt a hűtővizet és a gőzrobbanás szétvetette a reaktort. Az izzó cirkónium, acél, beton és grafit a vízből hidrogént és szén-monoxidot fejlesztett és a második, gázrobbanás tovább rombolta a reaktort és a grafit meggyulladását okozta. A robbanások letépték a reaktor fedelét, elvitték az épület sarkát és a kiszabaduló radioaktív gázok, gőzök, valamint a grafit égésével levegőbe porlasztott illékony

szilárd radioaktív anyagok közvetlenül a környezetbe kerültek. Egy részük a közelbe hullott ki, de a finomabb radioaktív por és a légnemű anyagok nagy távolságba és magasságba is eljutottak.

Óriási emberáldozat és hősiesség árán a kisebb tüzeket hamar, a grafit tüzet kb. 1 hét alatt oltották el. Ezután a reaktor alaplemezen lévő izzó összeolvadt „láva” alá egy második vastagabb és hűthető vasbeton lemezt építettek, hogy az ún. „Kína szindróma” esetleges bekövetkezését megakadályozzák. Ezt követően egy vasbeton szerkezettel (szarkofággal) borították be a sérült reaktort. Ennek jelentős kockázati tényezője, hogy a megépített szarkofág a még épen maradt, de jelentős hő- és sugárdózist szenvedett épületszerkezetekre támaszkodik. A 2. a, b ábrákon a sérült reaktor, a reaktor épület épen maradt részére támaszkodó megépített szarkofág látható.



a)



b)

2. ábra a) A sérült reaktor, b) az épület épen maradt részére támaszkodó megépített szarkofág (a szerzők összeállítása a [4, 5] irodalom alapján)

A reaktort övező 30 kilométeres körzet a kihullás következtében jelentősen elszennyeződött, ebből a zónából 135 000 embert kellett kiköltöztetni. A radioaktív porfelhő Európa majd minden országába eljutott és több-kevesebb kihullás, vagy kimosódás révén jelentős területeket szennyezett el. A kezdeti nagyobb aktivitásokban a rövidebb élettartamú jód, tellúr izotópok, néhány év elteltével a hosszabb élettartamú cézium és stroncium izotópok domináltak.

A zónaösszetételt és a kikerült radioaktív izotópok mennyiségét, a 10 nap alatti napi jódkibocsátásokat és a csernobili baleset bekövetkeztéig a környezetbe kikerült radioaktivitás mennyiségét mutatják a következő 1. és 2. táblázatok [6]. Az 3. táblázatban pedig a környezetbe került becsült radioaktív kibocsátások mennyiségi összehasonlítását mutatjuk be.

Zónaösszetétel 1986 április 26-án			teljes kibocsátás a baleset során	
Radionuklid	felezési idő	aktivitás (PBq)	a kikerült izotóp (%)	aktivitás (PBq)
¹³³ Xe	5.3 d	6 500	100	6500
¹³¹ I	8.0 d	3 200	50 - 60	~1760
¹³⁴ Cs	2.0 y	180	20 - 40	~54
¹³⁷ Cs	30.0 y	280	20 - 40	~85
¹³² Te	78.0 h	2 700	25 - 60	~1150
⁸⁹ Sr	52.0 d	2 300	4 - 6	~115
⁹⁰ Sr	28.0 y	200	4 - 6	~10
¹⁴⁰ Ba	12.8 d	4 800	4 - 6	~240
⁹⁵ Zr	1.4 h	5 600	3.5	196
⁹⁹ Mo	67.0 h	4 800	>3.5	>168
¹⁰³ Ru	39.6 d	4 800	>3.5	>168
¹⁰⁶ Ru	1.0 y	2 100	>3.5	>73
¹⁴¹ Ce	33.0 d	5 600	3.5	196
¹⁴⁴ Ce	285.0 d	3 300	3.5	~116
²³⁹ Np	2.4 d	27 000	3.5	~95
²³⁸ Pu	86.0 y	1	3.5	0.035
²³⁹ Pu	24 400.0 y	0.85	3.5	0.03
²⁴⁰ Pu	6 580.0 y	1.2	3.5	0.042
²⁴¹ Pu	13.2 y	170	3.5	~6
²⁴² Cm	163.0 d	26	3.5	~0.9

1.táblázat A zónaösszetétel és a csernobili baleset során és a környezetbe került radioaktivitás (PBq és a készlet %-a) (a szerzők készítették a [6] irodalom alapján)

¹³¹I izotóp napi kibocsátása

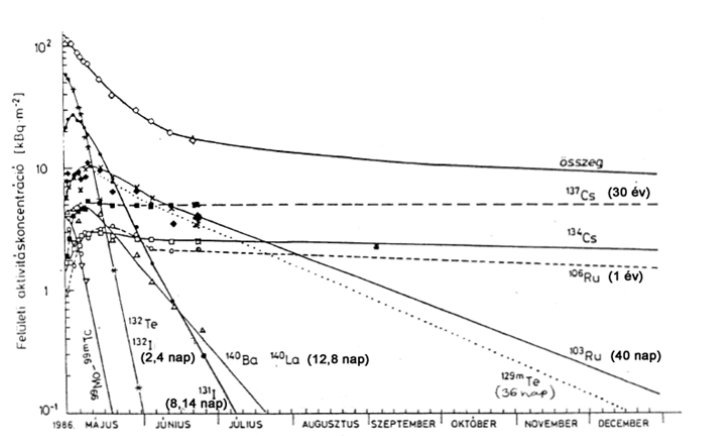
kibocsátás napja	napi kibocsátás (PBq)
április 26	704
április 27	204
április 28	150
április 29	102
április 30	69
május 1	62
május 2	102
május 3	107
május 4	130
május 5	130
összesen	1760

2.táblázat A környezetbe került jó d 131-es izotóp kibocsátások időfüggése (PBq) (a szerzők készítették a [6] irodalom alapján)

Forrás	Ország	időpont	radioaktivitás (Bq)	fontos izotópok
Hiroshima-Nagaszaki	Japán	1945	4x10 ¹⁶	hasadási termékek, aktinidák
Légköri atomrobbantások	USA-SzU	1963	2x10 ²⁰	hasadási termékek, aktinidák
Windscale	UK	1957	1x10 ¹⁵	¹³¹ I
Cseljabinszk-Kisztim	SzU	1957	8x10 ¹⁶	hasadási termékek, ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs
Three Mile Island	USA	1979	1x10 ¹²	nemesgázok, ¹³¹ I
Csernobil	SzU	1986	2x10 ¹⁸	¹³¹ I, ¹³¹ Cs

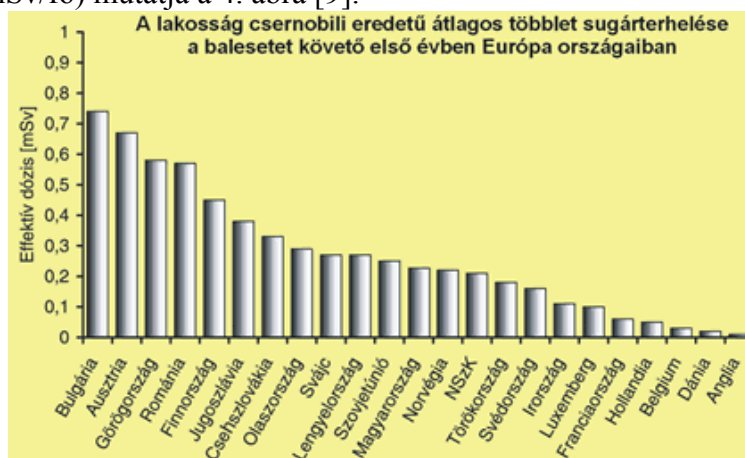
3.táblázat A környezetbe került radioaktív kibocsátások mennyiségi összehasonlítása (Bq)

A csernobili atomerőművi baleset kibocsátása hatással volt hazánkra is. A következő, 3. ábrán a baleset idején egy budapesti füves futballpálya talajfelszíni radioaktív szennyezettségét mutatja, az egyes komponensekre 1986. december 31-ig extrapolált értékekkel [7].



3. ábra A baleset idején budapesti füves futballpálya talajfelszíni radioaktív szennyezettsége, az egyes komponensekre 1986. december 31-ig, extrapolált értékekkel (kBq/m^2) [7]

Az ország lakossága által elszennvedett effektív többlet dózis 1986-ban az éves dózis mintegy 10-30%-a volt. Az európai országok lakosságát a baleset következtében ért többlet effektív dózist (mSv/fő) mutatja a 4. ábra [9].



4. ábra Európa lakosságának többlet sugárterhelése [9]

Azóta a sérült szarkofágot 2016-ban egy új biztonságosabb szarkofággal fedték be (5. ábra).



5. ábra Az új csernobili szarkofág [16]

A baleset következményei

- 50 tűzoltó és mentőszemélyzet, akit rövid időn belül sugárbetegségben haltak meg, 135 000 embert kitelepítettek az erőmű 30 km-es körzetéből
- A későbbiek során 9 gyermek pajzsmirigyrákban halt meg

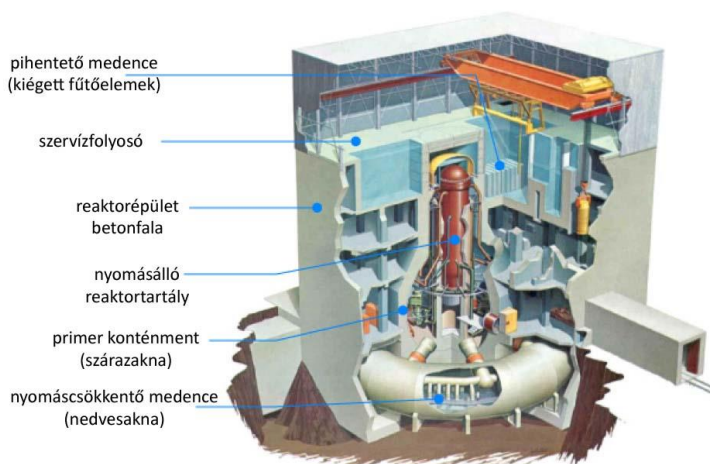
- 3940 ember halálát tételezik fel a jövőben a legszennyezettebb területeken a lineáris küszöbdózis hiányát feltételező elmélet szerint
- Összesen így megközelítőleg 4000 halálessettel számolnak

Összességében elmondható, hogy a baleset nem következett volna be abban az esetben, ha:

- tervezési hiba miatt nem építenek pozitív üregtényezővel rendelkező éghető grafitot tartalmazó vízhűtésű nagy erőművi reaktort;
- tervezési hiba miatt nem alkalmaznak a szabályozó rudak alján moderátort;
- ha emberi hiba következtében nem sértik meg többszörösen az alapvető biztonsági szabályokat

A FUKUSHIMA- ATOMERŐMŰVI BALESET (2011, JAPÁN)

A Fukushima Daiichi-ben (Japán) üzemelő reaktorok General Electric típusú forralóvízes reaktorok (BWR) voltak [5] és a 60-as években a Toshiba és a Hitachi cégek létesítették Mark I típusú konténmentekkel. Az 1.-3. blokkokat 1971-75 között üzemelték be, az 1. blokk 460 MW, a 2.-5. blokkok 784 MW, a 6. blokk pedig 1100 MW elektromos teljesítményű volt. Leállás esetén 40 perc múlva a maradékhő éréke a termikus teljesítmény $\sim 1,5$ %-a, azaz az 1. blokk esetén ez 22 MW, a 2.-3. blokkoknál 133 MW hőteljesítményt jelentett. Hűtés nélkül ez a nyomás alatti térben többlet elgőzölést okozhatott, melyet a szárazaknának nevezett primer konténmentbe (PCV) engednek át ilyenkor biztonsági szelepek segítségével. A reaktor sémája a 6. ábrán látható.



6. ábra A Fukushima Daiichi BWR reaktorok sémája [10]

A Daiichi telephelyen a 60-as évek elején épült forralóvízes reaktorokhoz tervezett cunami hullám védmű magassága először 3,1m volt, így a blokkokat 10m-rel a tengerszint fölé építették és a vízkivételi szivattyúk 4 méterrel a tengerszint alatt szívták a vizet. 2002-ben a tervező hullám magasságot 5,7 méterrel tervezték és ilyen gát épült. 1993-as szakértések már számoltak 14 m fölötti hullámmal is, de ennek tudatában sem tettek megelőző intézkedéseket, a diesel generátorok magasabbra helyezését és az épületek alsó részeinek vízszigetelését.

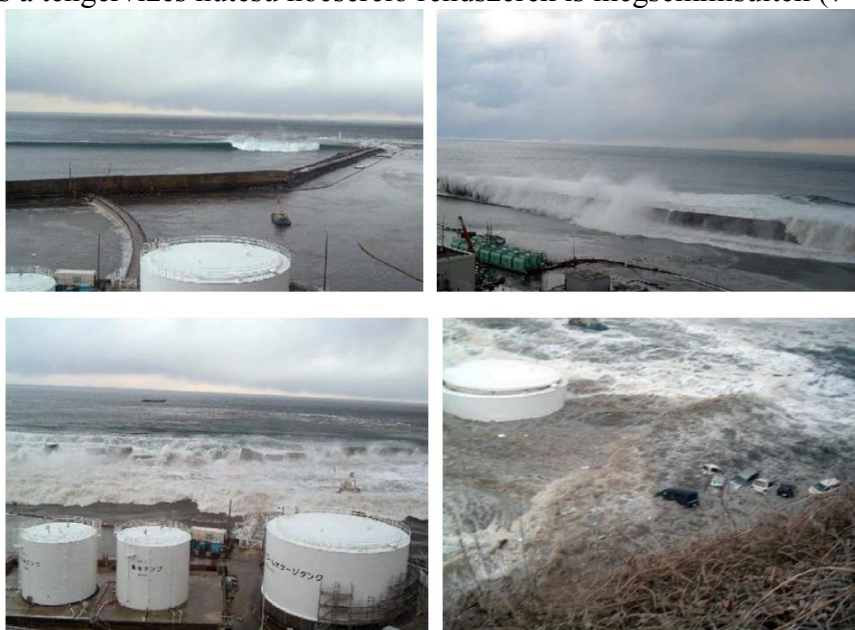
A baleset [10] lefolyása:

2011. március 11-én 2 óra 46 perckor a Japán Honshu sziget keleti oldalán a Richter skála szerinti 9-es erősségű földrengés keletkezett, melynek epicentruma 130 km-re volt Sendai városától 11 km-es mélységben. Ez volt Japán eddigi legerősebb és a világ ötödik legerősebb földrengése. A földrengés 3 percig tartott és a ritka dupla rengések csoportjába tartozott. A rengés során a tengerfenék egy része megközelítőleg 10-20 métert mozdult függőleges

irányban, Japán e szigete néhány méterre kelet felé mozdult el és a helyi tengerpart 0,5 métert süllyedt. A rengés után keletkező tengerár (cunami) 560 km² szárazföldet árasztott el és 19 000 ember halálát okozta. Több mint 1 millió épület sérült, vagy semmisült meg.

A térségben található 11 atomerőművi blokk közül az éppen üzemben lévők (Fukushima Daiichi 1,2,3, Fukushima Daini 1,2,3,4, Tohoku Onagawa 1,2,3, Japco Tokai 1) mindegyike a földrengés észlelésekor azonnal automatikusan leállt. A földrengés egyik reaktorban sem okozott észlelhető károsodást. A reaktorok mindegyike földrengésálló volt de cunamival szemben sérülékenyek voltak. A 11 blokkból az események után 8 esetén külső hálózatról, vagy tartalék dízelgenerátorokról üzemeltethető maradékhő elvonó rendszer állt rendelkezésre és lehűtve a reaktorokat megakadályozta a zónaolvadást.

A maradék 3 korábban üzemelt és azonnal leállt blokk a Daiichi telephelyen lévő 1,2,3 blokkok a földrengést 1 óra múlva követő 15 méter magas cunami következtében 3 óra 42 perckor elvesztették a maradékhő elvonó rendszerüket, mert a 13 tartalék generátor közül 12 tönkrement és a tengervizes hűtésű hőcserélő rendszerek is megsemmisültek (7-8. ábrák).

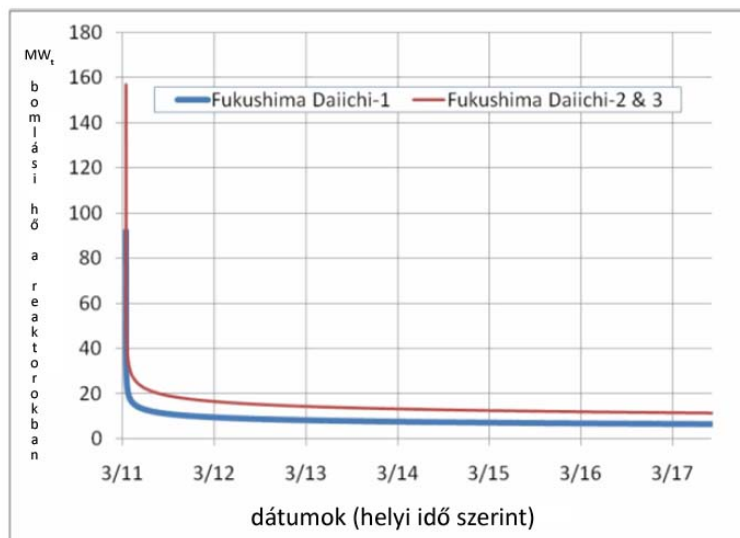


7. ábra A 6 m magas védőfalon átbukó cunami hullám 5m magasan mindent elpusztított [11]



8. ábra A Fukushima Daiichi 1.- 4. blokkjai a cunami előtt és után [11]

Ennek következtében az 1,2,3 blokkok és a hideg 4 blokkban lévő a reaktorból frissen kiemelt fűtőelemeket tároló lévő medence maradékhő elvonás nélkül maradt. A maradékhő számított értékeit mutatja a reaktorblokkokra a következő 9. ábra [8].



MIT Nuclear Science & Engineering info hub

9. ábra A Fukushima Daiichi 1.-3. blokkok számított maradékhő értékei 2011. március 11.-17. között [12]

A földrengés és a cunami következtében 3 erőművi alkalmazott halt meg, de a radioaktív sugárzás következtében senki.

A földrengést több száz utóregés követte, köztük egy 7,1-es erősségű is, de további károk nem keletkeztek. A földrengés után, a blokkok leálltak és a teljes telepre megszűnt a külső áramellátás, így bekapcsoltak a turbina épületek alagsoraiban elhelyezett tartalék dízelgenerátorok.

41 perc múlva 3 óra 42 perckor megérkezett az első, majd 8 perc múlva a második cunami hullám. A 15 méteres cunami hullám következtében a turbina csarnokok, ahol a dízel generátorok is elhelyezkedtek 5 méteres víz alá kerültek, a teljes maradékhő elvonó rendszerük megsemmisült, egyedül egy léghűtésű generátor maradt üzemképes, mely az 5. és 6. blokkokat látta el árammal. Az 1. és 2. blokkot ellátó akkumulátorok is tönkrementek, a 3. blokk akkumulátorai pedig 30 óráig adtak áramot. Este 7 óra 3 perckor nukleáris veszélyhelyzetet hirdettek, 8 óra 50 perckor elrendelték a 2 km sugarú körön belüli lakosság kitelepítését, melyet 9 óra 23 perckor 3km-re, hajnali 5 óra 44 perckor pedig 10km-re terjesztettek ki. Még aznap a zónát 20 km-re bővítették.

A baleset során a növekvő nyomású gőzt a reaktorok alatti elnyelető térbe, a nedves aknába (wetwell) engedték és később bekapcsoltak a zóna vészhűtő (ECCS) rendszerek is. Áramellátás hiányában ezek a hűtő rendszerek 3 nap alatt folyamatosan megszűntek üzemelni és szombat után külső tűzoltó fecskendőkkel, tengervízzel hűtötték a nyomásálló teret, de ehhez le kellett csökkenteni a bennük lévő nyomást, a gőznek az elnyeletőbe történő lefűvadásával. Az elfolyó hűtővizet hűtötték és recirkuláltatták.

Az 1. blokkban már a nyomásnövekedés után 4,5 órával a fűtőelem kötegek szárazra kerültek, hőmérsékletük elérte a 2800 °C értéket és a központi mag kezdett megolvadni és később a kötegek felső része az alul lévő vízbe zuhant. Ezután a hőmérséklet csökkent. A nyomásnövekedés miatt a konténmentet igyekeztek lefűvadni, főleg kézi vezérléssel, ennek sikertelensége miatt a reaktor épülete károsodott. A távozó gőz radioaktív nemesgázokat, jódot és aeroszolókat tartalmazott, hidrogén gázzal keverve és szombaton délután 3 óra 36 perckor a reaktor konténment feletti szervizfolyosón hidrogénrobbanás történt letépve az

épület fedelét és megrongálva a reaktor felső részét. A hidrogén a fűtőelemek cirkónium burkolatának a magas hőmérsékletű vízgőzzel történő reakciójában keletkezett. A sérült aktív zóna feltételezések szerint a nyomásálló tér aljára került, de később kiderült, hogy átolvasztva a reaktortartály fenekét 65 cm mélyen behatolt az alatta levő 2,6 m vastag beton lemezbe, majd hűlés közben megszilárdult és a szárazakna nem sérült.

A 2. blokkban 2011. március 14-én megszűnt a gőzinjektoros vízűtés és csak 6 óra múlva kezdtek hűteni tűzoltó fecskendőkkel a reaktort. Így a töltet szárazra került, felső része megolvadt és az alul lévő vízbe zuhant. A növekvő nyomás miatt lefűvatást végeztek többször is a hidrogénrobbanás elkerülésére. 15-én mégis, valószínűleg hidrogénrobbanás következtében a nedvesakna elnyelető valószínűleg felhasadt és lecsökkent a másodlagos konténmentben (szárazakna, drywell) a nyomás. Valószínűleg a sérült három blokk közül innen juthatott ki a környezetbe a radioaktivitás döntő része.

A 3. blokkban 2011. március 12-én megszűnt a maradékhő elvonás és a zóna vészűtő rendszer nagynyomású egysége sem működött, a fűtőelemek körül csökkent a vízszint. A megnövekedett gőznyomást az elnyelető térbe (nedves akna) fűvatták és tűzoltó fecskendőkkel, tengervízzel hűtötték a reaktort. Az előző blokkokhoz hasonlóan itt is megolvadt a fűtőelem kötegek egy része, olvadt felső részük az alul lévő vízbe zuhant és részben átégethették a tartály falát, elérve az alatta lévő betont. 14-én a lefűvatott illékony elegy egy része visszajuthatott a felül lévő szervizfolyosóba és hatalmas hidrogéngáz robbanás következett be és a 2 blokkhoz hasonlóan roncsolta a reaktorépület felső részét, radioaktív részecskéket szórva szét a telephelyen.

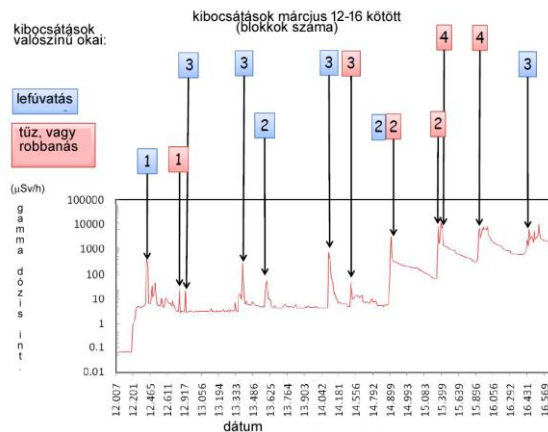
A 4. blokkban 2011. március 15-én hidrogénrobbanás következett be, valószínűleg a 3. blokkban keletkezett és a lefűvatás során a szellőzőn keresztül az épületbe jutott hidrogéngáz robbant fel.

2012-es év elejére a reaktorterekben a hőmérséklet 27-54 °C értékekre csökkent le. Az összes blokk külső áramforrásból történő energiaellátását 2012. március végére oldották meg. 2016 márciusára a három blokk maradékhő teljesítményének összege 1 MW-ra esett.

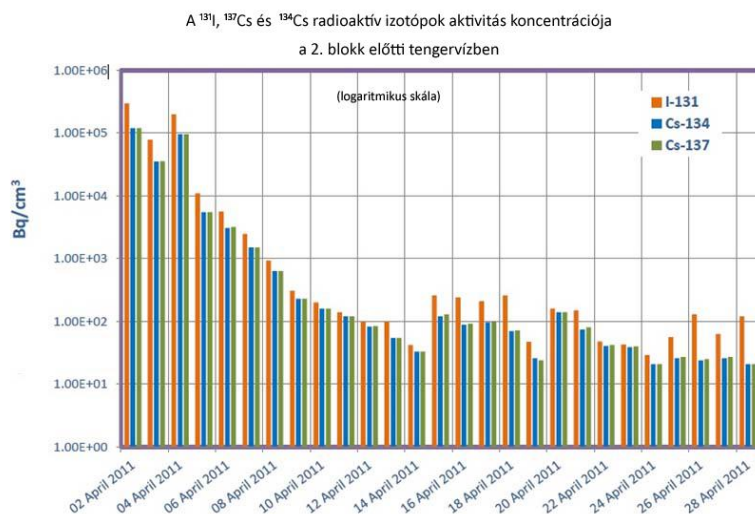
A sérült három blokk mellett komoly problémát jelentett a 4. blokk frissen kirakott (548 db), és a blokk tetején elhelyezett pihentető medencében lévő hőtermelő fűtőelem kötegek hűtése. A folyamatos hűtés megszűnése után a medence vizének egy része elpárolgott, de a kötegek még így is víz alatt maradtak. A blokkban történt hidrogén robbanás után is sikerült elkerülni a kötegek megolvadását.

Az 1.-3. blokkok tengervízzel történő hűtése során a hűtővíz mintegy 40 %-a elpárolgott. A reaktorokból kifolyt radioaktív hűtővíz egy része a tengerbe jutott. A radioaktivitás kibocsátási csúcsa 15-én volt, döntően a 2. blokkból. A kibocsátott radioaktív nuklidok zöme ¹³¹I és ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs volt. A ¹³¹I-ekvivalens értékben ($A_{I-131} + A_{Cs-137} \cdot 40$) kibocsátott aktivitás becsült értéke 570 PBq volt, ez ~10%-a volt a csernobili baleset során kibocsátott 5200 PBq ¹³¹I-ekvivalens kibocsátott radioaktivitásnak. A blokkonkénti levegőbe történő kibocsátást és a tengervíz, valamint a prefektúrában¹ lévő talaj radioaktivitását mutatja a következő három 10., 11., 12. ábra.

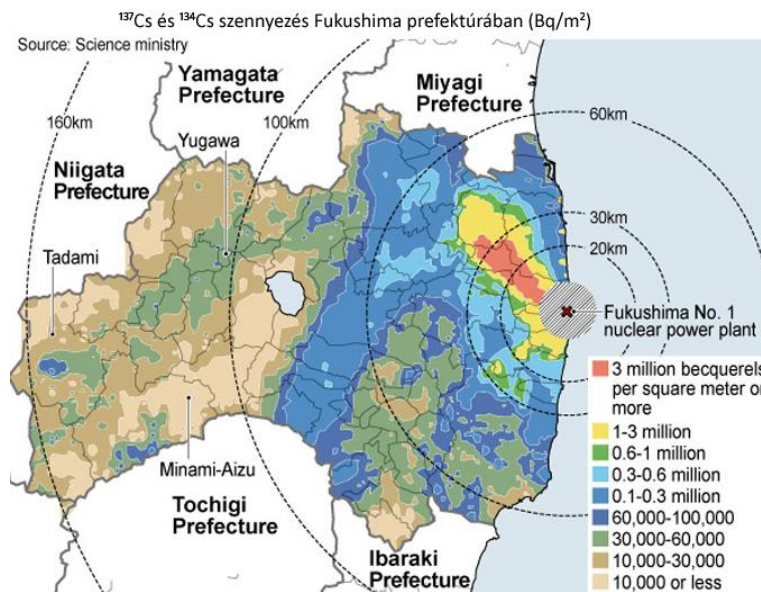
¹ prefektúra: közigazgatási egység



10. ábra Radioaktivitás kibocsátások következtében mért dózisintenzitások az 1.-4. blokkokból 2011. március 12.-16. között (µSv/h) [12]

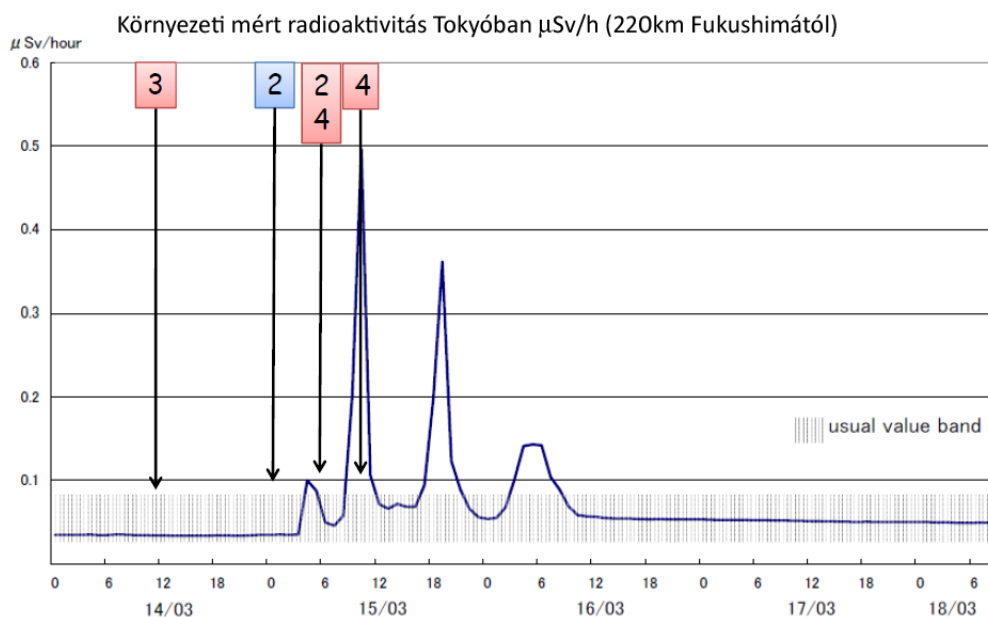


11. ábra Radioaktív jód és cézium aktivitás koncentrációk (Bq/cm³) a tengervízben a 2. blokk előtt [13]



12. ábra A talaj radioaktív cézium szennyezettsége Fukushima prefektúrában [14]

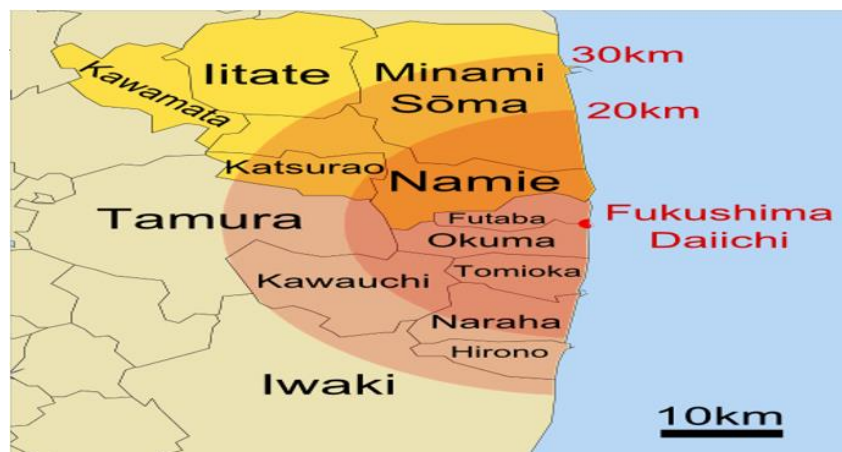
A Fukushima Daiichi teleptől 220 km-re fekvő fővárosban, Tokióban mért környezeti dózisintenzitásokat mutatja a következő 13. ábra.



http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/__icsFiles/afielldfile/2011/03/19/1303902_1818_5_2.pdf

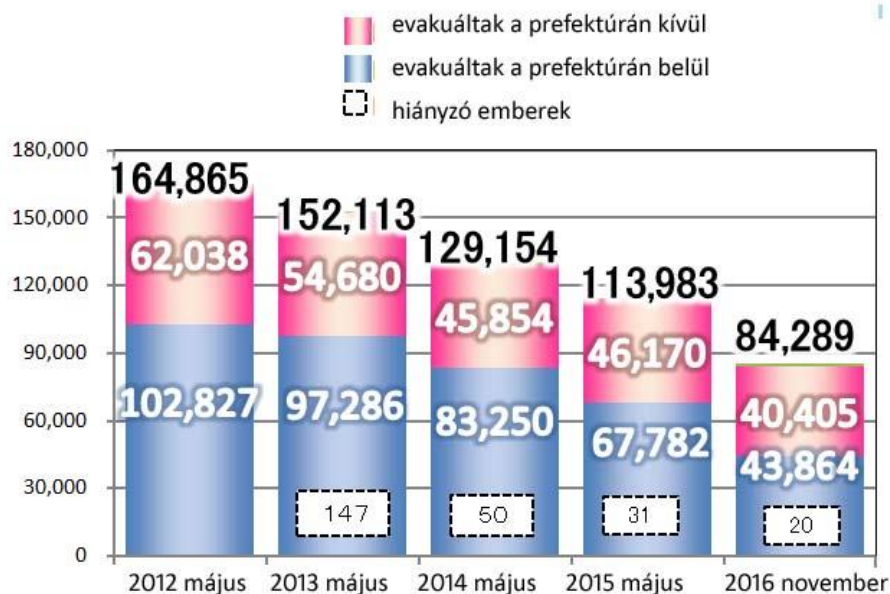
13. ábra A 2, 3 és 4. blokkok kibocsátásai alapján mért környezeti mért dózisintenzitások Tokióban [12]

A reaktor környezetéből a lakosság kitelepítését több lépcsőben végezték. A baleset napján 134 000 embert telepítettek ki az erőmű 3-20 km-es körzetéből, majd 4 nappal később a 20-30 km közötti lakosokat, további 354 000 embert is kitelepítettek. A zónákat mutatja a következő 14. ábra.



14. ábra A kitelepítési zónák [14]

A 20 km és 30 km zónák közti területre egy 20 mSv/év dózisintenzitási korlátot állítottak fel és ez az érték volt a visszaköltöztetés küszöbértéke is. A 20-50 mSv/év dózisintenzitású területekre tilos volt visszaköltözni és dekontaminálási tevékenységekkel, igyekeztek csökkenteni a szennyezettséget. A cunami a területen működő 24 mérőállomásból 23-at tönkretett. A kitelepítettek arányát és visszaköltöztetését foglalja össze a következő 15. ábra.



15. ábra A kitelepítettek száma 2012. május – 2016. november között [14]

A baleset következményei:

- erős földrengés után 15 méteres cunami szökőár tönkretette a maradék hő hűtést 3 reaktornál
- 3 BWR reaktor és 4 pihentető medence sérült, 4 reaktor végleg kiesett az energiatermelésből
- 3 reaktor 30-70 %-os zónasérülést szenvedett (fűtőelemek, reaktortartály primer konténment)
- legalább 4 hidrogénrobbanás következett be, valószínűleg tűz volt több pihentető medencénél is
- a 3 reaktort július végére lehűtötték és december közepére hideg leállítási helyzetbe hozták
- a tengerbe hosszabb ideig szivárgott radioaktív hűtővíz
- az erőmű területe radioaktív hasadási termékekkel szennyeződött
- 20 km sugarú szennyezett zóna keletkezett
- a baleset INES minősítése 7, mert a 4.-5. napok között jelentős radioaktív izotóp kibocsátás történt, melynek becsült értéke 570 PBq 131I-ekvivalens aktivitás volt
- az erőművi balesetnek nem volt sugárzás okozta halottja, 165 000 embert telepítettek ki, ezek közül 84 000 már visszatérhetett
- a kitelepítések következtében több mint 1000 (főként idős) ember halt meg.

Összességében megállapítható, hogy a baleset nem következett volna be, ha az 1993-as szakértői jelentések alapján magasabb cunami gátat emeltek volna és a diesel generátorok magasabbra helyezésével és az épületek alsó részeinek vízszigetelésével megelőzték volna a cunami romboló hatását.

KÖVETKEZTETÉSEK

Az elmúlt évek négy legsúlyosabb atomerőművi baleseteinek rövid értékelése alapján a következő általános következtetéseket vontuk le:

- Négy komoly atomerőmű balesetet tekintettünk át, mind a négy esetben tűz és három esetben robbanás is bekövetkezett az atomerőművi blokkokban és zónasérülés, valamint reaktor szerkezeti sérülés lépett fel.
- A két legsúlyosabb balesetet (Csernobil és Fukushima) az INES skálán 7-es, a TMI balesetet 5-ös kategóriába sorolták. Mindegyik baleset során radioaktív anyagok kerültek ki a reaktorokból a környezetbe és szennyeztek el kisebb nagyobb területeket.
- A legsúlyosabb radioaktív kibocsátással és következménnyel a csernobili baleset járt, a baleset következtében bekövetkezett közvetlen halálesetek száma 50-100 közé tehető, a baleset késői hatásaként várható halálesetek becsült száma 4000 fő.
- A két, komoly lakossági kitelepítéssel járó baleset stressz hatások következtében bekövetkezett haláleseteit Csernobil és Fukushima esetén is 1000-2000-re becsülik.
- Ugyanakkor a nukleáris baleset következtében nem volt haláleset sem a windscale-i, sem a Three Mile Island-i, sem a fukushimai események során.
- Megállapítható, hogy a TMI és a fukushimai atomerőművi baleset elkerülhető, illetve enyhíthető lett volna, ha a jelenlévő személyzet időben pontos információhoz jutott volna a reaktorokban lévő hűtővíz pontos mennyiségéről és a zónaolvadások következtében létrejött olvadt aktív zóna pontos térbeli elhelyezkedéséről. Erre amerikai kutatók [15] a gyors neutronok és a gammasugárzás mérésén alapuló roncsolásmentes, ún. „hodoszkópos” szintmérést illetve anyageloszlás mérést javasoltak. Sajnos ez a hiányosság már a TMI baleset értékelésénél kiderült, de nem került be a reaktorbiztonsági műszaki követelmények közé, így Fukushimában is a személyzet „sötétben tapogatózott”.
- Az utóbbi három súlyos atomerőművi baleset elsődleges oka konstrukciós hibaként jelölhető meg, azaz a TMI esetben a fennakadásra hajlamos lefűvató szelep hibáját már a Davis-Besse eset után ki kellett volna küszöbölni, Csernobilban nem lett volna szabad egy alapvetően kis teljesítményen labilis nagy erőművi reaktort megépíteni és Fukushimában a tengerparti erőművek esetén a vészűtő rendszerek összes elemét tengerár számára elérhetetlen helyen kellett volna elhelyezni.
- Az utóbbi három baleset során természetesen operátori és más emberi hibák is közrejátszottak, de a konstrukciós hibák hiányában nem következtek volna be még ekkor sem súlyos balesetek.
- A balesetet szenvedett 2. generációs atomerőműveket felváltó 3. és 3+ generációk esetén az említett tanulságokat beépítették a tervezésbe és megvalósításba, figyelembe véve a mélységi védelem, a védelmi gátak rendszere, a kis valószínűségű többszörös hibák halmozott hatása és a rendszerekben természeténél fogva jelenlévő (inherens) tulajdonságok elveinek felhasználását.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DOBOR J.; KOSSA GY.; PÁTZAY GY., Atomerőművi balesetek és üzemzavarok tanulságai 1. (Nuclear Power Plant Accidents and Malfunctions, Lessons Learned 1.), Hadmérnök, XII. Évfolyam 1. szám, 2017. március, 58-71
- [2] <http://ncbj.edu.pl/rbmk-reaktor-z-czarnobyla/budowa-reaktora-rbmk> (letöltve: 2016.06.29.)
- [3] http://insp.pnnl.gov/-reports-status-2001status_rpt-statrpt2001_appa.node.htm (letöltve: 2016.06.29.)
- [4] <https://www.nbcnews.com/news/world/chernobyl-anniversary-ukraine-holds-fast-nuclear-energy-despite-disaster-n554036> (letöltve: 2016.06.29.)

- [5] <http://m.futurist.ru/articles/930-zapovednaya-zona-otchuzhdeniya-kak-zhivet-pripyaty-cherez-30-let-posle-katastrofi> (letöltve: 2016.06.29.)
- [6] <https://www.oecd-nea.org/rp/chernobyl/c02.html> (letöltve: 2016.06.29.)
- [7] BÍRÓ T., FEHÉR I., SZTANYIK B. L.Ó: *A csernobili atomerőmű baleset sugárzási következménye Magyarországon*, Energia és Atomtechnika, XI. évf. 4. szám, 145-155
- [8] *William D'haeseleer Nuclear Safety*, 9a. safety_BNEN intro_2012-13.ppt (letöltve: 2016.06.29.)
- [9] *Sugárzónben élünk, a környezeti radioaktivitás összetevői*, <https://www.google.hu/search?client=opera&q=sug%C3%A1r%C3%B6z%C3%B6nben+%C3%A9l%C3%BCnk+a+k%C3%B6rnyezeti&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8> (letöltve: 2017. 01. 06.)
- [10] *Fukushima Accident World Nuclear Association.pdf*, (Updated November 2016), (letöltve: 2017. 01. 06.)
- [11] M. RAGHEB, FUKUSHIMA EARTHQUAKE AND TSUNAMI STATION BLACKOUT ACCIDENT, <http://mragheb.com/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Fukushima%20Earthquake%20and%20Tsunami%20Station%20Blackout%20Accident.pdf> (letöltve: 2017. 01. 06.)
- [12] JOSEPH E SHEPHERD, *The Crisis at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant* Aerospace and Mechanical Engineering California Institute of Technology Pasadena, CA, (letöltve: 2017. 01. 06.)
- [13] FEHÉR Á. *Mi történt Fukushimában* http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/docs/kulonsz/2011sv/szekcio5/fukushima_helyzet.pdf, (letöltve: 2017. 01. 06.)
- [14] *Transition of evacuation instruction zones*, <http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal-english/en03-08.html> <http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal-english/> (letöltve: 2017. 01. 06.)
- [15] A.DEVOLPI, *Nuclear Reactor Safety: Lessons from Three mile Island and Fukushima*, Federation of American Scientists Public Interest Report, 2012 summer edition, Summer2012_NuclearPowerSafety-deVolpi.pdf, (letöltve: 2014. november 05.)
- [16] <http://chnpp.gov.ua/uk/> (letöltve: 2017. 01. 06.)