

ATOMERŐMŰVI BALESETEK ÉS ÜZEMZAVAROK TANULSÁGAI 1.

NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENTS AND MALFUNCTIONS, LESSONS LEARNED 1.

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

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

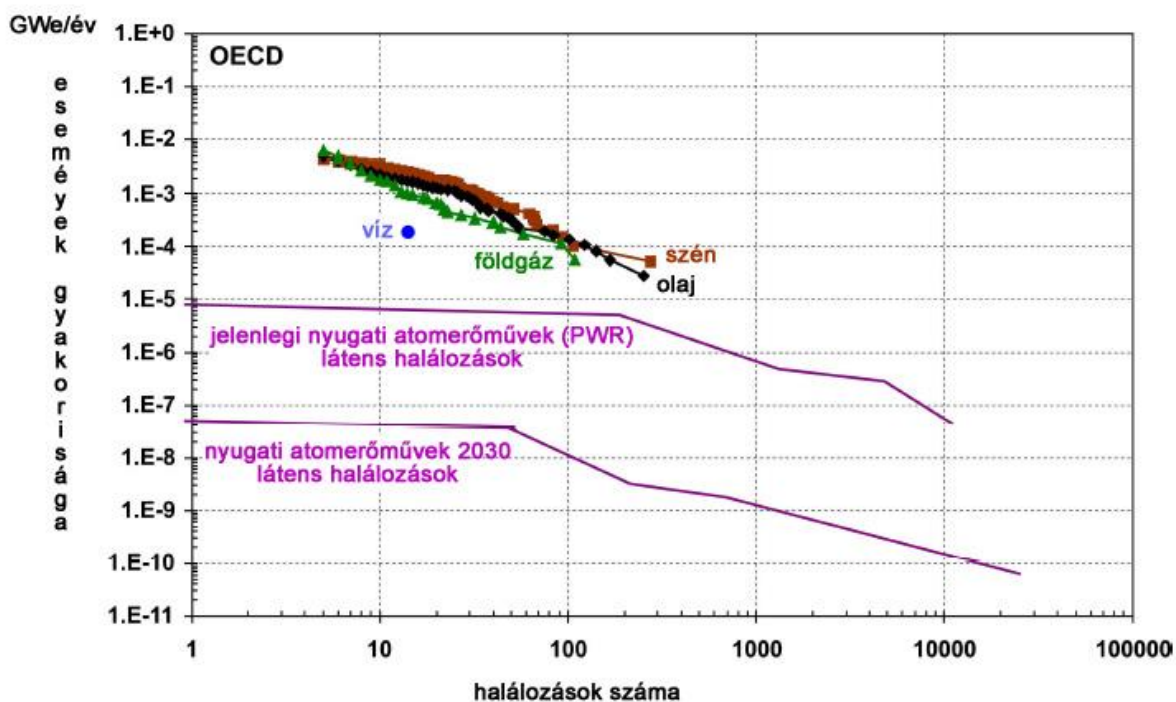
Keywords: Nuclear energy disasters, Windscale, Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima, reasons, consequences

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.02.06.
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.03.22.

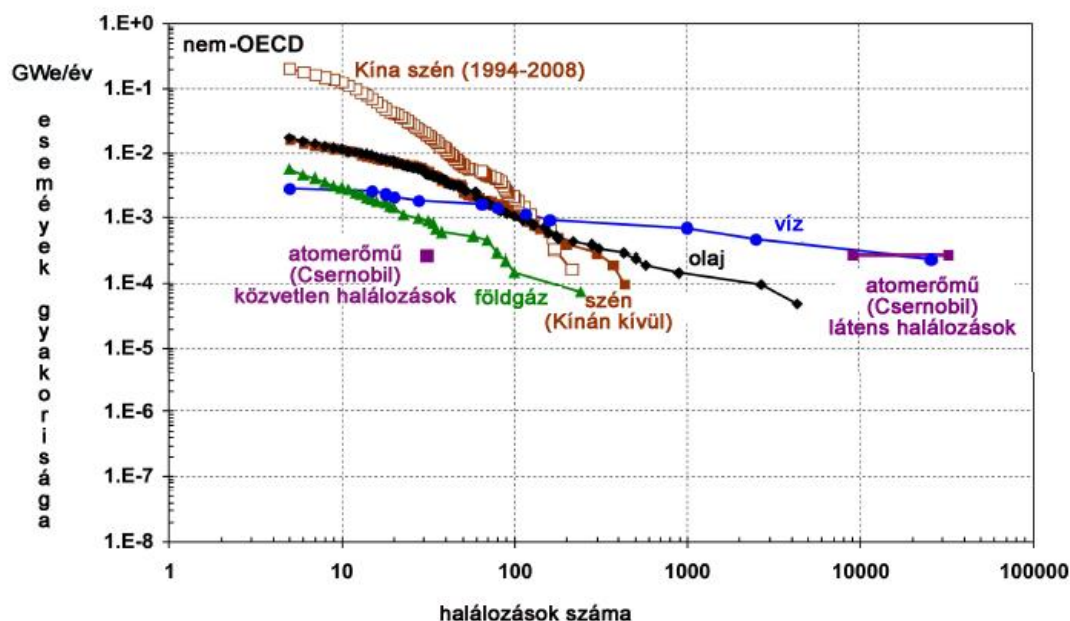
BEVEZETÉS

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 leg súlyosabb atomerőművi baleset eseményeit, tanulságait és a levonható következtetéseket.

Az 1-2. ábrák jól mutatják [1], hogy a fejlett és fejlődő világ energiaiparában bekövetkezett baleseti közvetlen és látens halálozások gyakorisága 1,0-1,5 nagyságrenddel kevesebb az atomerőművekben bekövetkezetteknél, mint a fosszilis alapú és vízenergia termelő erőműveknél.

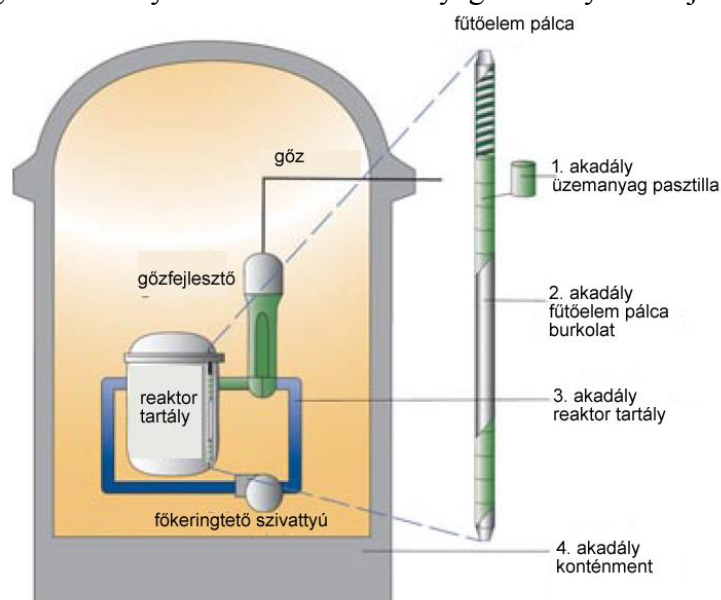


1. ábra OECD országok (1970-2008) energiaiparában a halálozások száma –frekvencia összefüggés [1]



2. ábra nem-OECD országok (1970-2008) energiaiparában a halálozások száma –frekvencia összefüggés (a szerzők szerkesztése a [1] alapján)

Az atomerőművek fő biztonsági alapelve [2] szerint: a tervezés, építés, indítás és üzemelés során sohasem bocsáthat ki a lakosságra káros nagy mennyiségű radioaktív anyagot. Ezt a mélységi védelem filozófiájával biztosítják, a radioaktivitás környezetbe való kikerülését nagyszámú egymás utáni gáttal akadályozzák meg. A 3. ábrán egy *nyomott vizes* (PWR) atomerőmű sémája [2] mutatja, hogy az orosz „matrjoska babához” hasonló egymásba ágyazott védelmi gátak akadályozzák a radioaktív anyagok környezetbe jutását.



3. ábra A védelmi gátak rendszere (a szerzők szerkesztése a [2] alapján)

Három biztonsági szintet alkalmaznak annak megakadályozására, hogy egyik gát se kerüljön veszélybe olyan rendkívüli esemény, mint berendezés meghibásodás, emberi hiba, vagy természeti jelenség következményeként:

1. Maximális biztonságot terveznek a normális üzemre és maximális tűrési képességet rendszer hibák esetére. Természeténél fogva (inherens) konstrukciós elveket alkalmaznak a biztonságos üzemeléshez, első rendűen fontos a minőség, a túlméretezés, az ellenőrizhetőség és vizsgálhatóság biztosítása üzembevetel előtt és üzemelés során. Például negatív reaktivitás biztosítása, sugárzástűrő anyagok alkalmazása.
2. Feltételezik, hogy a gondos tervezés, konstrukció és üzemeltetés ellenére események és téves műveletek előfordulhatnak. Ezért a biztonsági rendszert úgy alakítják ki, hogy a személyzetet és a lakosságot óvják és ilyen események bekövetkezése során a sérüléseket minimalizálják. Például zóna vészhűtő rendszer (ECCS) alkalmazása primerkörü hőhordozó vesztes (LOCA) esetén, vagy feszültségkiesés esetére tartalék dízel generátorok alkalmazása.
3. További biztonsági rendszereket alkalmaznak, hipotetikus üzemzavarok és balesetek hatásainak kezelésére, feltételezve, hogy egyes biztonsági védelmi rendszerek a baleset során meghibásodnak. Előre nem látható és nagyon kis valószínűséggel bekövetkező események hatását is figyelembe veszik. Például ECCS meghibásodik, akkor zónaolvasás lép fel, radioaktív anyag kerül a reaktor épületbe, a biztonsági tartálynak (konténmentnek) tömörnek kell lennie, a sprinkler (zuhanyzó) rendszer üzemelésével le kell csökkenteni a nyomást és a hőmérsékletet, el kell nyeletni az illékony radioaktív izotópokat (^{131}I), biztosítani kell a megfelelő légcserét és szűrést a köztes épületrészekben. A nagyon kis valószínűséggel előforduló üzemzavari baleseti eseményeket figyelembe kell venni, ha előfordulásuk valószínűsége nagyobb, mint 1 esemény 1000 év alatt. Újabban törekednek a 10^{-7} esemény/reaktor év valószínűségi korlát betartására. Ez a legpesszimistább biztonsági feltételezések alkalmazását igényli a biztonsági elemzések során a maximális következmények feltételezése mellett.

Az 1978-ban bekövetkezett USA-beli Three Mile Island-I (TMI) baleset után ezt a biztonsági elemzést kiegészítették az összes új passzív vagy inherens biztonság kialakításánál a meghibásodások biztonságának, a teljes körű ellenőrizhetőségnek, a megfutasok biztonságának és az emberi elnézések biztonságának a figyelembe vételével. A meghibásodások biztonságánál biztosítani kell, hogy egy fontos komponens hibája esetén a rendszer biztonságos állapotba visszavihető legyen. A mindenre kiterjedő ellenőrizhetőség biztosítja a védelmet bármilyen veszélyes emberi beavatkozással szemben. A teljesítmény megfutasok biztonsága lehetővé teszi, hogy a rendszer megfelelő ideig biztonságban maradjon egy baleset kezdete során, miután biztonságos állapotba térítették vissza. Az emberi elnézések biztonsága azt jelenti, hogy a reaktor elvisel egy késői vagy hibás emberi beavatkozást baleseti helyzetbe kerülés nélkül. A nukleáris balesetek csoportosítását mutatja az 1. táblázat.

típus	példa
reaktivitási balesetek	átmeneti tünet
hűtési elégtelenség	átmeneti tünet
baleset üzemanyag manipuláció során	csere, karbantartás
telephelyre vonatkozó balesetek	földrengések, cunami, repülőgép rázuhanás

1. táblázat Tipikus nukleáris baleseti csoportok (saját szerkesztés)

Fontos biztonsági szempont, hogy a reaktorok leállítása után még jelentős remanens hőtermeléssel (a teljes hőtermelés 7-10%-a) rendelkeznek, és további hűtést igényelnek.

Az alábbiakban röviden áttekintjük a múltban bekövetkezett négy legsúlyosabb, atomerőműben bekövetkezett balesetet és a levonható tanulságokat.

WINDSCALE (ANGLIA, 1957)

Az első windscale-i reaktorok grafitmoderálású, levegő hűtésű, plutóniumtermelő reaktorok voltak (4. ábra).



4.ábra A windscale-i reaktor [3]

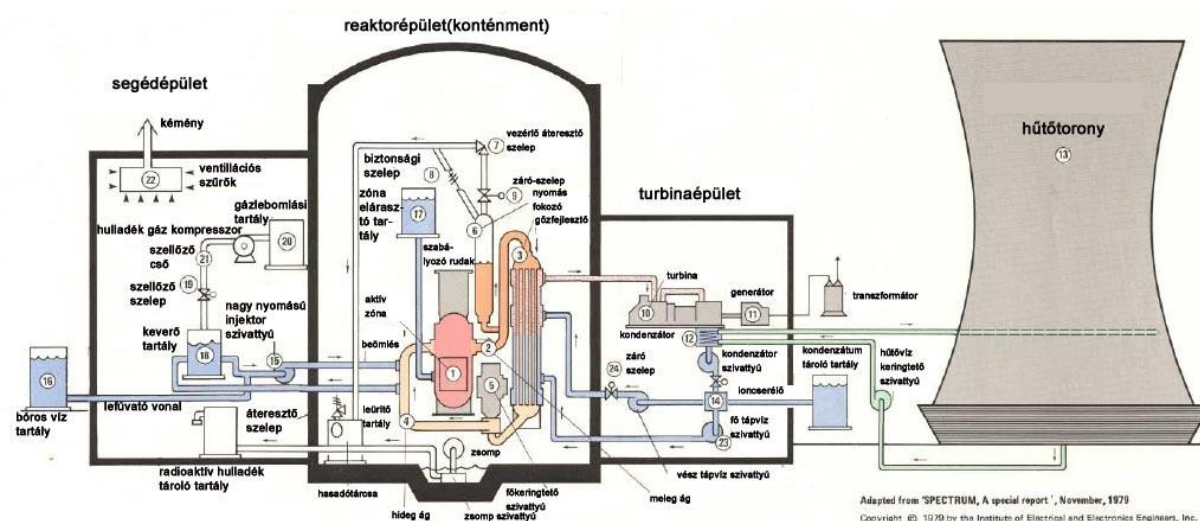
A 200-300 °C hőmérsékletű grafitmoderátorban az alábbi folyamat játszódik le üzem közben: a neutronok a lassulás során a grafitot alkotó szénatomok magjainak ütköznek. A rácshelyből elmozdított szénatom magasabb energiaszintre kerül, ily módon a grafit energiát tárol. Amennyiben azt az "energiával megszívódott" grafitot felmelegítjük, a hőmozgás következtében az atomok visszaugrálnak az eredeti, alacsonyabb energiájú helyeikre, az energiakülönbség pedig hő formájában jelenik meg, tovább melegítve a grafitot. Ez az öngerjesztő folyamat akár a grafit meggyulladásához is vezethet. A folyamatot felfedezőjéről Wigner-effektusnak, vagy wigneritisznek nevezzük. A wigneritisz lehetőségére Wigner Jenő már a hanfordi plutóniumtermelő reaktorok tervezésekor rámutatott és meg is találta annak ellenszerét: mielőtt még a grafit "túlszívna" magát, rendszeresen fel kell melegíteni, hogy a benne tárolt hő felszabaduljon. Ezzel a windscale-i erőműben is tisztában voltak, azonban 1957-ben túl későn és kellő körültekintés nélkül hajtották végre a felmelegítést. Fellépett a Wigner-effektus, október 10-én a reaktor túlforrósodott, végül a grafit meggyulladt. A reaktort elárasztották szén-dioxiddal, de ez nem bizonyult elégségesnek. Végül a vízzel történő oltás mellett döntöttek és október 12-én a tüzet eloltották. A 125 méter magas reaktorkéménybe épített szűrők a reaktorból felszabaduló radioaktivitás zömét visszatartották, így 16,5 PBq összaktivitás került ki a környezetbe, komoly környezeti kárt, illetve emberáldozatot az eset nem követelt. Más források szerint 260, ezen belül 13 halált okozó pajzsmirigyrákos eset kapcsolható a balesethez. Legnagyobb mennyiségben $7 \cdot 10^{14}$ Bq ^{131}I került az atmoszféra alsó rétegeibe, a környező területekre. A reaktor környezetében egy 500 km²-es területen a tej emberi fogyasztásra alkalmatlannak minősítették és elkobozták, mivel benne a ^{131}I izotóp koncentrációja meghaladta a megengedett értéket. A reaktor személyzetének egy tagja 46 mSv dózist kapott, ami az éves természetes háttérsugárzás 20-szorosa. Egyébként a lakosság sugárterhelése - a hatósági intézkedések következtében - a megengedett érték alatt maradt.

THREE MILE ISLAND ATOMERŐMŰ BALESET (USA, 1978, INES 5)

1979. március 28-án az USA Pennsylvania államában levő Harrisburg várostól 16 km-re épült Three Mile Island atomerőmű 2-es blokkjában (TMI-2) súlyos üzemzavar történt, amely hosszú évekre az egész erőmű üzemkiesését okozta. Az erőmű 1-es blokkját csak a baleset

után 6,6 év múlva 1985-ben indították újra.

A baleset előtt mindössze egy évet üzemelő TMI-2 reaktorblokk vázlatrajzát az 5. ábrán mutatjuk be [4].



5. ábra A TMI-2 blokk vázlatrajza (a szerzők szerkesztése a [4] alapján)

A blokk legfontosabb adatai a következők. Könnyűvízes hűtésű és moderátorú Babcock and Wilcox gyártmányú nyomott vizes reaktor (PWR) bruttó termikus teljesítménye 2772 MW, bruttó elektromos teljesítménye 959 MW, nettó elektromos teljesítménye pedig 907 MW. A nettó hatásfok 32,8 %. Az aktív zóna 3,28x3,66 m méretű, a fűtőelem 2,29-2,90 % dúsítású 0,94x0,78 cm méretű UO_2 egy kötegben 208 rúd található, a teljes töltet 177 fűtőelem-kötegből 37000 fűtőelem-rúdból áll. A töltet tömege 83 t. A közepes fajlagos teljesítmény 31 kW/kg urán; 85,6 kW/dm³ aktív zóna, a közepes kiegészítő szint 28800 MW nap/t, a moderátor hűtőközeg 306 °C-os átlagos hőmérsékletű víz. A fűtőelemek maximális hőmérséklete 2343 °C, a hűtőközeg tömegárama 55630 t/h, a víz belépő hőmérséklete 290 °C, kilépő hőmérséklete pedig 318 °C.

A nyomás-szabályozó a primerkör legforróbb része. Tranziens állapotban onnan a motoros biztonsági szelepen, túlnyomás esetén gőz fűvatható le. A lefűtő szelephez kapcsolódó csővezeték a reaktor alatti gyűjtőtartályba vezet. Ebben a tartályban hűtőbordák segítségével hűthető a belépő forró folyadék, vagy gőz. Ha a tartályban túlnyomás alakul ki, egy szelep vezeti ki a folyadékot a reaktor épület lefolyó rendszerébe. A turbógenerátor (1db) 926,5 MW teljesítményű turbinából áll, a belépő gőz hőmérséklete 293 °C, nyomása 62 bar. A rendszer része még 1db 60 Hz-es háromfázisú szinkron-generátor. A kondenzátor 105 400 m³/h térfogatáramú 13,3 °C -os vízzel üzemel. A teljes primerkör egy 65 m magas, acél bélésbevonattal megerősített 5,29 bar nyomásra tervezett betonköpenyben volt, ez az ún. konténment, amely végül is meggátolta, hogy radioaktív szennyeződés kerüljön ki a környezetbe.

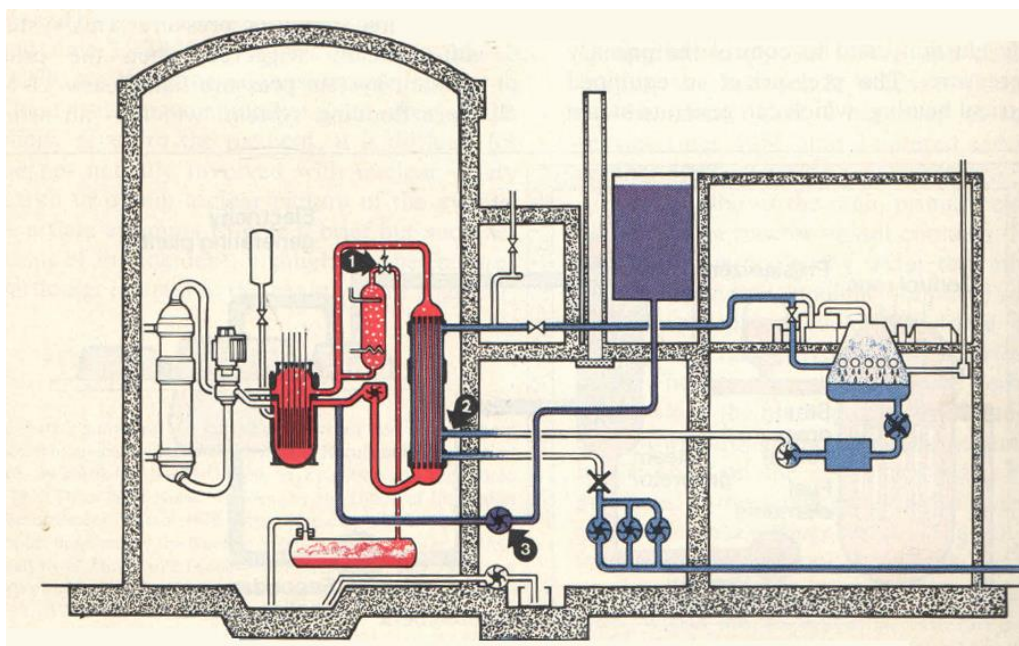
A PWR¹ rendelkezett zóna vészűtő rendszerrel (nagynyomású injektáló, közepnyomású akkumulátor és kisnyomású injektáló). LOCA esetén a konténment tetejéről híg nátrium-hidroxid fecskendeztethető be a jód-gőzök visszatartására és hűtésre. Az üzemzavar menete a

¹ Pressurized Water Reactor

következő volt:

A baleset időrendje [4]:

Turbina kiesés (0-6 perc, 6. ábra)



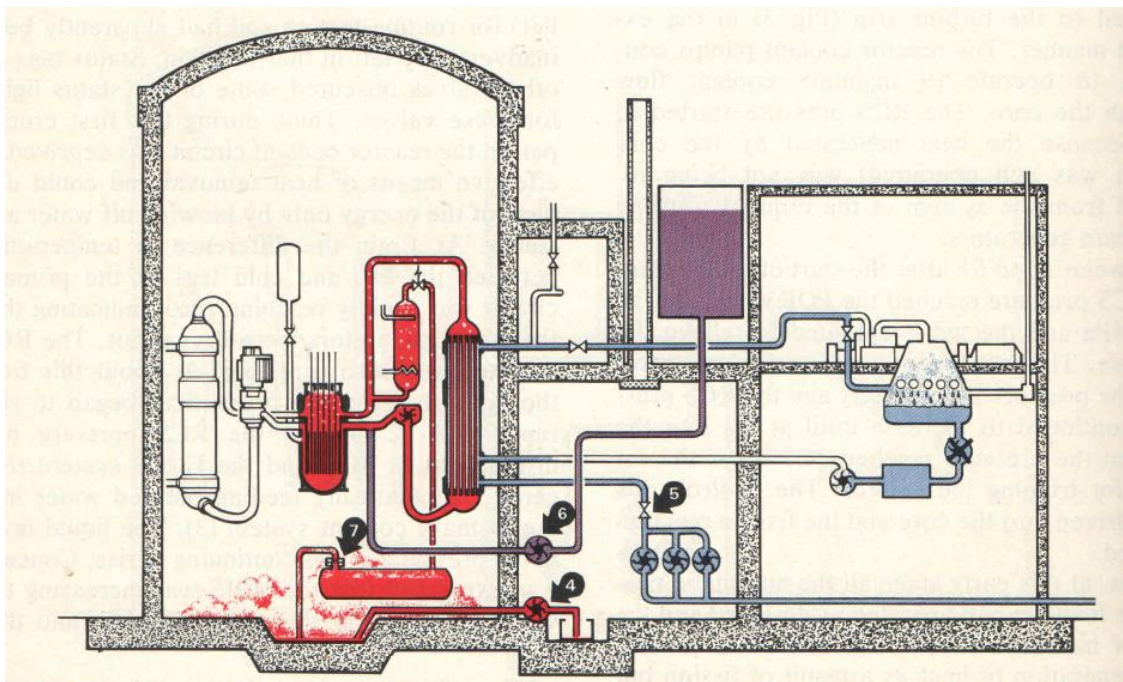
6. ábra 0-6min közötti események (a szerzők szerkesztése a [4] alapján)

Az erőmű teljes 98 %-os üzeme mellett a vészhelyzetben szükséges segéd-tápvízrendszer mindkét tolózára a karbantartás után *zárva maradt*. Az erőmű tápvízrendszere már korábban meghibásodott és 1978-79-ben többször is az 1. blokk leállítását eredményezte. 1979. március 28-án hajnali 4 órakor a 2. blokk tápvízszivattyúi leálltak. Azonnal beindultak a segéd-tápvízrendszer szivattyúi (3 db), de a lezárt tolózárak (az ábrán x-el jelölve) miatt nem jutott víz a hőcserélőbe. Mivel a primerkörü víz nem hűlt le a hőcserélőben nőni kezdett a primerkörü víznyomás. A hiba után 3-6 másodperc között a primerkörü nyomás elérte a 155 bar értéket és a gőzfejlesztő lefűvató szelepe (1) kinyitott. A primerkörü nyomás a puffervhatás miatt még egy kicsit tovább nőtt 162 bar-ra, ezért az automatika állította a reaktort. *Eddig a biztonsági rendszer helyesen működött!* Ugyanakkor a reaktor töltetben jelentős hőmennyiség halmozódott fel a hasadványok bomlási hője révén (1 perc-109 MW_t, 1 óra-46 MW_t, 1 nap-19 MW_t, 1 hét-9 MW_t, 1 hónap-5,4 MW_t). 13 másodperc után a primerkörü nyomás visszaesett 152 bar értékre és a lefűvató szelepek be kellett volna záródniuk, de az sajnos nyitott állapotban fennakadt. (Sajnos ez a hiba már korábban 1977-ben egy ugyancsak Babcox-Wilcox gyártmányú atomerőműben a Besse-Davis atomerőműben is bekövetkezett, de ott a lefűvató szelep fennakadását időben észlelték és a szelepet lezárták komoly elfolyás nélkül. De sajnos nem vonták le a biztonsági következtetéseket és nem keresték meg a fennakadás okát és nem küszöbölték ki azt!) A fennakadt szelepen folyamatosan folyt el a primerkörü hűtővíz. Hiába mentek a segéd tápvízrendszer szivattyúi, a lezárt szelepek miatt a pótvíz nem jutott el a hőcserélőbe, melynek szekunder körü vízszintje vészesen csökkent. 1perc után a hőcserélő kiszáradt és megszűnt a primerkörü víz hűtése, a nyomásfokozóban szintén csökkent a víz szintje.

2 perc 4 másodperc után a primerkörü nyomás 110 bar alá esett és beindult a zóna vészhűtő rendszer nagynyomású befecskendezője és bóros vizet juttatott a reaktor tartályba. Ezért növekedni kezdett a nyomásfokozó vízszintje és folyadékkal telt fel. Ugyanakkor a primerkör egyes részein gőzdugók alakultak ki, tehát nem volt folyamatosan tele vízzel. 4 perc 38

másodperc után a nagynyomású befecskendező egyik szivattyúja kikapcsolt, a másik lefojtva tovább üzemelt.

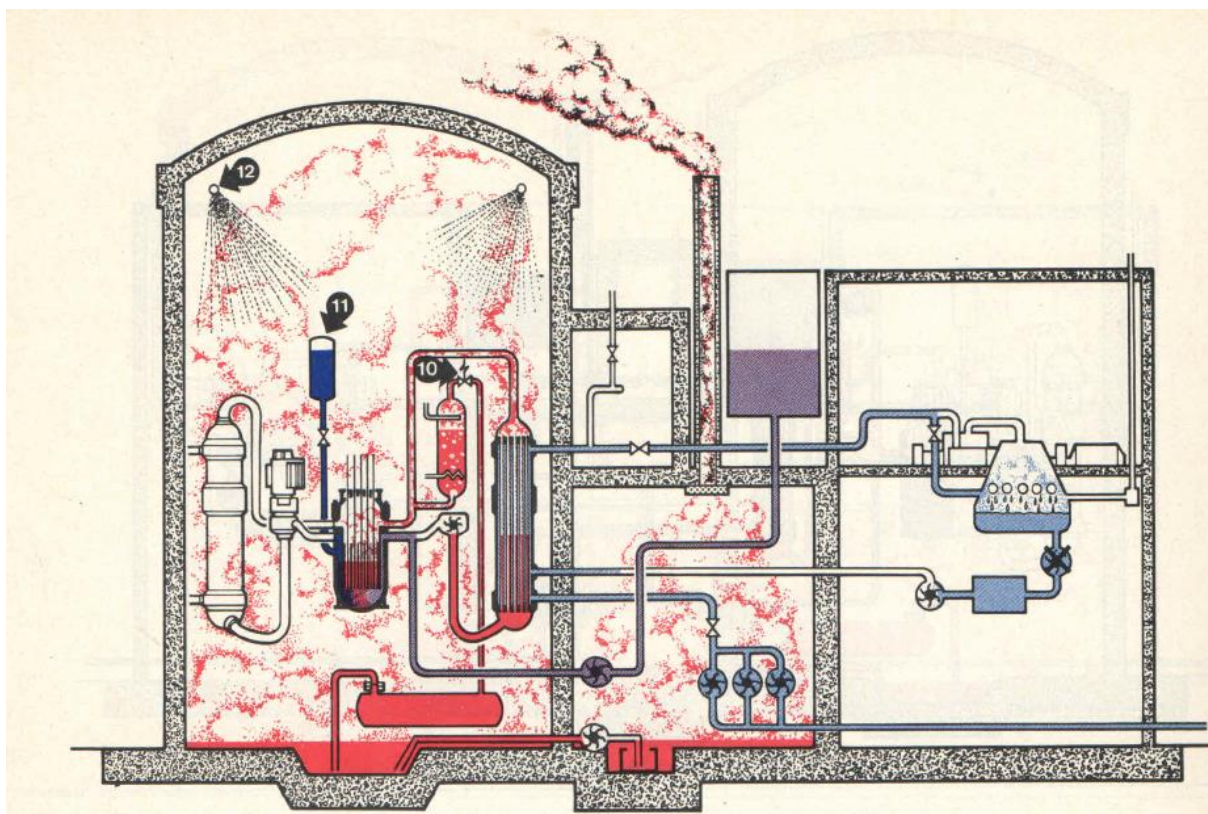
Veszteség a primerköri hűtőközegben (6-20 perc, 7. ábra)[4]



7. ábra 6-20 percek közötti események (a szerzők szerkesztése a [4] alapján)

A 6. percben eltűnt a nyomásfokozó gőzpárnája. Az elfolyt hűtőközeg gyűjtőtartályában gyorsan nőtt a nyomás és 7 perc 43 másodperc után a szivattyú beindult és a tartályból elvezette a vizet a segédépület tartályaiba. A 8. percben az operátorok észrevették, hogy a gőzfejlesztő kiszáradt és a segéd tápvízszivattyúk a lezárt szelepek miatt nem tudják pótolni a vízvesztést. Kinyitották a lezárt szelepeket (6) és víz kezdett folyni a gőzfejlesztő szekunder oldalára. A hűtés beindulás kalapácsütés szerű zajjal járt. Az üzemzavar után 10 perc 24 másodperccel leállt a második nagynyomású befecskendező szivattyú is. Ennek eredményeként a fönnakadt szelepen több primerköri hűtővíz folytott el, mint amennyi a zóna vészűtő rendszerből befolyt. A 11. percben a nyomásfokozó szintjelzője újra két fázist jelzett és a folyadék szint gyorsan csökkent. A 15. percben elhasadt a primerköri biztonsági tárcsa (7) és a kiáramló gőz miatt nőni kezdett a nyomás a konténmentben. Ezután a kiáramló primerköri hűtővíz és gőz az elhasadt tárcsán keresztül a konténmentbe jutott, ahonnan az összefolyt vizet a segédépületbe pumpálták. A 18. percben ugrásszerűen megnőtt a szellőzőrendszerben mért radioaktív gázok mennyisége, de ez még nem fűtőelem-sérülésből, hanem a primerköri vízből származott. A primerköri nyomás csak 83 bar volt és csökkent. Eddig a pontig az események nagyon hasonlóak voltak az ugyancsak Babcock-Wilcox gyártmányú Davis-Besse atomerőműben 1977 szeptemberében lejátszódott üzemzavarhoz, de ott ezután észrevéve a nyitott lefűtató szelepet, azt lezárták és nem történt zónaolvadás.

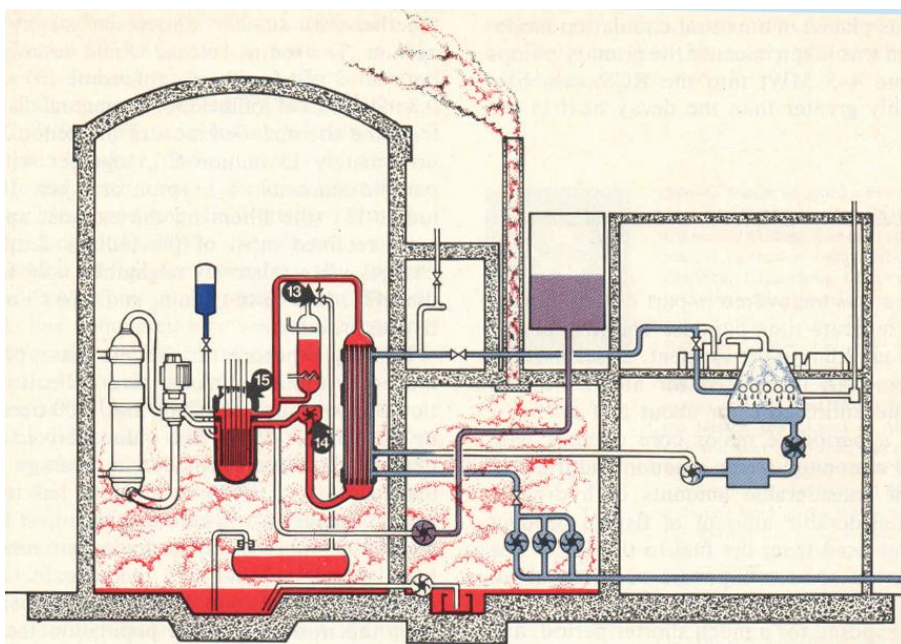
Kiterjedt nyomáscsökkenés (6-11 óra, 8. ábra)[4]



8. ábra 6-11 óra közötti események (a szerzők szerkesztése a [4] alapján)

Az operátorok csökkentették a primerköri nyomást, hogy beinduljon az alacsony-nomású zóna injektáló rendszer. Ezért 7 óra 38 perckor kinyitották a lefűvató szelepet (10) és 8 óra 41 perckor a nyomás 41 barra csökkent és beindult a zóna elárasztás (11). Sajnos azonban csak kevés vizet sajtolta a reaktorba, mert hibásan vízzel telített zónát észlelt. A nyomáscsökkenés közben a magas hőmérsékleten keletkezett jelentős mennyiségű hidrogén jutott a reaktor épületbe. 9 óra 50 perckor a reaktor épület nyomása 1,93 barra nőtt. Bekapcsoltak a vészhűtő-elnyelő zuhanyok (12) és 6 percig üzemeltek. Több durranógáz robbanás következett be a konténment felső részében, a dómban és a gőzfejlesztőben. A nyomást nem sikerült 30 bar alá csökkenteni. Így a 28 baron beinduló bomláshő elvezető rendszert sem sikerült aktiválni. 11 óra 8 perckor ezért elzárták a lefűvató szelepet. A kiszabadult nagymennyiségű radioaktív jód miatt a jódszűrők áteresztettek és az 5 mérföldön belül lakó terhes nők és 6 éven aluli gyerekek számára kiürítést tanácsoltak. A környező népességet ért sugárdózis sohasem haladta meg a megengedett szintet. A nyomáscsillapító tartályban és a konténmentben a 3. és 10. óra között bekövetkezett hidrogén-robbanások után a primerkör leürítését korlátozták. A gőz, a hasadási gázok és a hidrogén a zárt primerköri rendszer egyes részeiben felhalmozódott, veszélyeztetve ezzel az aktív zóna vízszintjét és a primerköri cirkulációt és további hidrogénrobbanással fenyegetett.

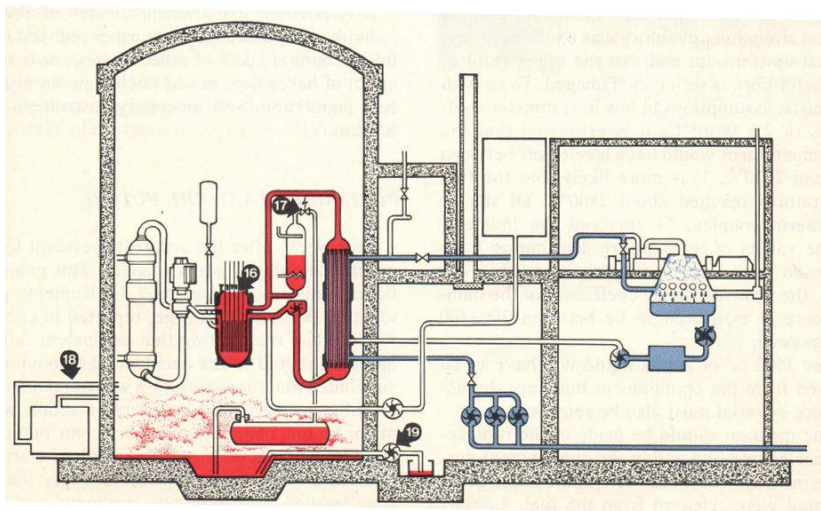
Nyomáscsökkentés és a stabil hűtés helyreállítása (13-16. óra, 9. ábra)[4]



9. ábra 13-16 óra közötti események (a szerzők szerkesztése a [4] alapján)

13 óra 30 perckor ismét lezárták a lefűtató szelepet (13) és beindították a nagynyomású befecskendezést, majd a nyomás helyreállása után 15 óra 51 perckor az „A” (14-es jellel az ábrán) primerköri szivattyút beindították így a kilépő víz 293 °C-os, a belépő pedig 205 °C-ra hűlt.

A hidrogén-buborék eltávolítása (1-8 nap,10. ábra) [4]



10. ábra Az 1-8 nap közötti események (a szerzők szerkesztése a [4] alapján)

A 60. órában egy szakmai krízis-irányító csoportot hoztak létre, amely a következő intézkedéseket hozta:

- a primerköri nyomást 68,9 bar-ra csökkentették,
- bekapcsolták a fő hűtővíz szivattyúkat,

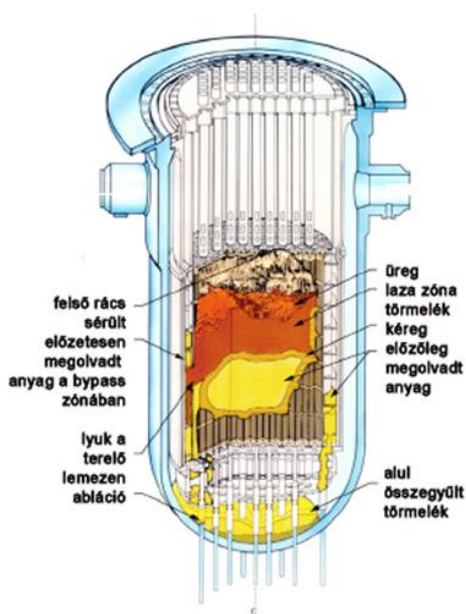
- további hűtésekként egy gőzfejlesztő-turbina egységet bekapcsoltak,
- növelték a nagynyomású befecskendezést,
- a konténmentben rekombinálorakciókkal csökkentették a hidrogén koncentrációt,
- a primerkörben levő gázbuborékokat a túlhevítő mentesítő szelepen keresztül és egyéb úton a hidegebb primervízben elnyelelték.

A reaktor tartályban kb. 28 m³ gázsapka alakult ki, melynek zöme hidrogén (16) volt. Ezt fokozatosan a lefűvató szelepen keresztül kiengedték és a 18-as rekombinátorokban eloxidálták. A segéd-épületből a kifolyt vizet visszapumpálták a reaktor épületbe (19). 1 hónap után a bomlási hő annyira lecsökkent, hogy a primerköri keringtető szivattyúkat kikapcsolták és csak természetes áramlás maradt. (Ekkor már a szivattyúk által bevitt meleg is zavart).

A gázbuborékok sikeres csökkentése után a további intézkedések az alábbiak voltak:

- a hulladékvíz-rendszer befogadóképességének biztosítása, a benne levő alacsony aktivitású víz folyóba történő óvatos kiengedésével,
- a hulladékgáz-rendszer befogadóképességének biztosítása (bomlás, kis ürítések a konténmentbe, óvatos kieresztés a kéményen keresztül),
- a telített jód szűrők cseréje,
- a konténment hidrogén-tartalmának további csökkentése rekombinációval,
- üzembe helyezték a normál előkészítő és víztisztító rendszert, hogy megelőzzék további gázbuborékok képződését az alacsony primerköri nyomás miatt,
- magasabb vízszintet biztosítottak a gőzfejlesztőben a biztonságosabb hűtés érdekében.

Ezen intézkedés-sorozattal sikerült a durranógáz robbanás veszélyét elkerülni és a zóna további sérülését megakadályozni. A zónaolvadás sematikus képét mutatja a 11. ábra.



11. ábra A TMI-2 blokk zónaolvadása (a szerzők szerkesztése a [5] alapján)

Az üzemzavar következményei

A baleset következtében az aktív zóna felső középső részében a hőmérséklet elérte 3100 K hőfokot, itt a fűtőelemek és szerkezeti anyagok megolvadtak, csak a külső részen találtak

néhány ép fűtőelem-köteget. Ennek következtében az aktív zónába nagymennyiségű törmelék került (átmérő: 4-10000 μm között) melynek zöme kerámia, megdermedt fémolvadék illetve kőzet jellegű anyag. A reaktor irányítását szolgáló mintegy 50 kg tömegű 3,8 m magas rozsdamentes acélszerkezet a magas hőmérséklet miatt erősen deformálódott, több ponton összeolvadt az eredetileg 1,2 m távolságra levő fűtőelemtartó ráccsal. A fűtőelem-burkolatok sérülése következtében a hasadási nemesgázok kb. 35 %-a szabadult ki. A fűtőelemek tokozatát alkotó Zr-Nb ötvözet kb. 40 %-a reakcióba lépett a hűtővízzel és hidrogént fejlesztett. Az aktív zóna mintegy 35%-a törmelékké vált a felső középső részben. A sokszoros szigetelésnek köszönhetően a hőérzékelő termoelemek az aktív zónában is sértetlenek maradtak. Majdnem a teljes fűtőelem-törmelék a zóna felső részében rekedt, mivel a felfüggesztő rácsozat szitaként visszatartotta, így nem került ki a primerkörbe.

A legnagyobb veszélyt a gyúlékony robbanó gázok képződése okozta. A hidrogénfejlődés következtében a maximális nyomás a konténmentben megközelítette a 3 bar értéket! A hidrogén és egyéb gyúlékony gázok az alábbi reakciókban keletkezhetnek a víz közvetlen termikus bontása során:

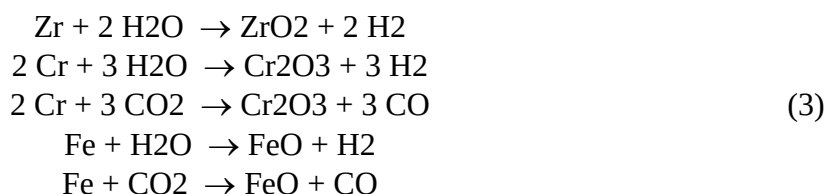


2000 K hőmérsékleten a vízmolekulák kb. 1 %-a bomlik így. A víz radiolízise során hidrogén atomok, hidroxil gyökök képződésén keresztül hidrogén és oxigén gáz keletkezhet. A cirkónium-víz reakció során, az alábbi folyamat szerint keletkezhetett hidrogén



ez a reakció 1580 °C fölött felgyorsul.

Az aktív zóna olvadéka és a beton közti reakciókban a beton bomlásakor felszabaduló CO_2 és vízgőz a forró olvadékon átáramolva, ennek fémes komponenseit oxidálja:



A cirkónium és a króm oxidálása teljesen végbemegy, a vas oxidálása egyensúlyra vezet a hőmérséklet függvényében. Először a cirkónium, majd a króm, végül a vas oxidálása megy végbe. A gázfejlődés szempontjából tehát a cirkónium-víz kölcsönhatás volt meghatározó. Ebből a reakcióból mintegy 500 kg hidrogén keletkezhetett és számítások szerint a konténmentben maximálisan 7,9 % hidrogén és 3,7 % vízgőz lehetett.

A baleset környezeti hatásai

A rendelkezésre álló adatok szerint a baleset következtében a környező lakosságra gyakorolt radioaktív sugárhatás elhanyagolható volt. Az 1979-84 években az erőműből évente felszabaduló gáznemű radioaktív anyagok mennyiségét az alábbi 2. táblázat mutatja be:

	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Teljes kikerült illékony, izotóp-mennyiség (a trícium kivételével)	$1 \cdot 10^{17}$ Bq	$1,63 \cdot 10^{13}$ Bq	$1,75 \cdot 10^{12}$ Bq	$3,37 \cdot 10^{13}$ Bq	$6,4 \cdot 10^{12}$ Bq	$7,66 \cdot 10^{12}$ Bq
I-131	$5,22 \cdot 10^{11}$ Bq	$6,14 \cdot 10^5$ Bq	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
H-3	$5,43 \cdot 10^{12}$ Bq	$3,5 \cdot 10^{13}$ Bq	$2,42 \cdot 10^{12}$ Bq	$4,14 \cdot 10^{12}$ Bq	$1,84 \cdot 10^{12}$ Bq	$5,18 \cdot 10^{11}$ Bq

2. táblázat A TMI-2 blokk balesete során környezetbe került radioaktív anyagok (saját szerkesztés)

KÖVETKEZTETÉSEK

A baleset nem következett volna be, ha konstrukciós hiba miatt a lefűvató szelep nem lett volna hajlamos fennakadásra és így lehetőség biztosítására nagy mennyiségű primerkörü hűtővíz elfolyására. Ha korábbi Davis-Besse erőműben történtek tanulságait is figyelembe vették volna ugyancsak elkerülhető lett volna a baleset.

A baleset megelőzhető lett volna, ha az operátorok megbízható adatokat kapnak a reaktorban lévő víz mennyiségéről és ennek alapján helyesen értékelik a kialakult helyzetet.

ÖSSZEGZÉS

A Windscale-i és a Three Mile Island-i atomerőművi balesetek során a maradékhő nem megfelelő elvezetése részleges zónaolvadáshoz és illékony radioaktív izotópok kibocsátáshoz vezetett. Az USA baleset során különböző kémiai reakciók során keletkezett hidrogén gázrobbanások következtek be. Sajnos ez utóbbi veszélyforrás megjelenését nem vették figyelembe a későbbiek során és az ezután bekövetkezett atomerőművi balesetekben komoly rombolást okoztak a gázrobbanások. Az események következményeiben komoly szerepet játszott az operátorok helytelen reakciója és beavatkozása, valamint az aktív zóna hűtési állapotának ismeretéhez szükséges mérési adatok hiánya, vagy nem megfelelő formában való rendelkezésre állása. A környezetbe került illékony radioaktív izotópok környezetszennyezése döntően időleges volt, emberéletet nem követelt ez a két baleset és tudomásunk szerint bizonyítható egészségkárosodás sem történt. Az USA baleset után javították az operátorok képzési szintjét és a mérőműszerek jobb áttekinthetőségét.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] HIRSCHBERG, S., BURGHERR, P.: Methods and results of assessing energy-related severe accident risks, PSI, 26. Mai 2013., OECD-NEA Workshop on „Approaches to Estimation of the Costs of a Nuclear Accident”, Paris, France, 28-29 May 2013, Burgherr, P., Hirschberg, S., Hunt, A. and Ortiz, R. A. (2004). External costs from major accidents in non-nuclear fuel chains. Work Package 5 Report to the European Commission, DG Research, Technological Development and Demonstration (RTD), "New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies" (NewExt), Vol. Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

- <https://www.oecd-neo.org/ndd/workshops/aecna/presentations/documents/StefanHirschberg-Assessingenergy-relatedsevereaccidentrisks.pdf>, letöltés ideje: 2016. 11. 05.
- [2] D'HAESELEER, W.: Is Nuclear Power a Sustainable Option after Fukushima?, BNEN 2012-2013 Intro William D'haeseleer, <https://set.kuleuven.be/ethiekweek/fukushima2012/dhaeseleer.pdf>, letöltés ideje: 2016. 11. 05.
- [3] <http://avilagtitkai.com/articles/view/5-nuklearis-katasztrofa-melyet-eltitkoltak-a-vilag-elol>, letöltés 2017. 01. 10.
- [4] COLLIER, J.G., DAVIES, L.M.: The Accident at Three Mile Island, Heat Transfer Engineering, Volume 1, Number 3, Jan-Mar. 1980
- [5] REMPE, J., FARMER M., ET AL., Revisiting Insights from Three Mile Island Unit 2 Postaccident Examinations and Evaluations in View of the Fukushima Daiichi Accident, NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING: 172, 223–248 ~2012!