

Fenntartható fejlődés és atomenergia

12. előadás

Atomerőművek biztonsága

Prof. Dr. Aszódi Attila, Dr. Yamaji Bogdán

Biztonság

- **Alapvető szükséglet és szubjektív élmény** lét és/vagy egzisztenciális helyzetekben: **amikor a személyt nem fenyegeti semmifajta veszély, vagy ha igen, képes azt elkerülni...**
- (Műszaki) Építmény, gép, szerkezet biztos szilárdsága, működésének zavartalansága, illetve az a jellege, hogy a környezetének, a közelében vagy benne tartózkodóknak az épségét nem fenyegeti. A biztonság mindig viszonylagos, azaz csak meghatározott környezeti feltételek között, a megengedettnél nem nagyobb igénybevételek esetén áll fenn.

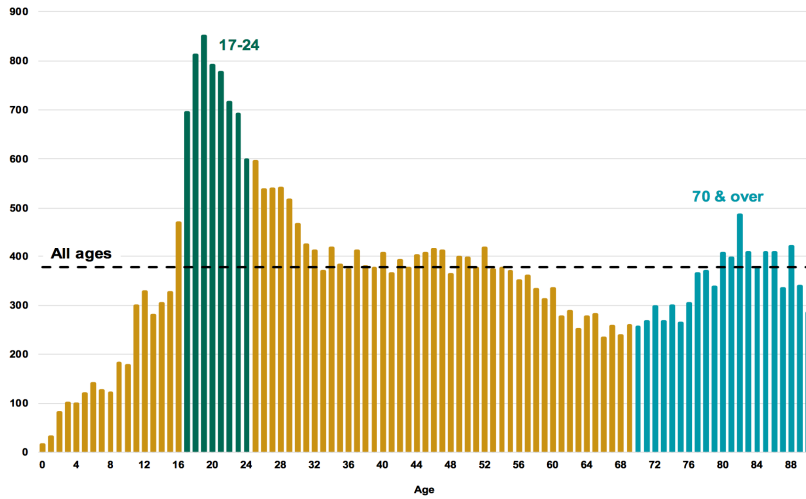
Magyar Nagylexikon, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1995

Mi a legbiztonságosabb közlekedési forma?

Deaths per Billion Passengers

km	Journeys	Hours
Air 0.05	Bus/Coach 4.3	Bus/Coach 11.1
Bus/Coach 0.4	Rail 20	Rail 30
Rail 0.7	Van 20	Air 30.8
Van 1.2	Car 40	Water 50
Water 2.6	Foot 40	Van 60
Car 3.1	Water 90	Car 130
Pedal cycle 44.6	Air 117	Foot 220
Foot 54.2	Pedal cycle 170	Pedal cycle 550
Motorcycle 108.9	Motorcycle 1,640	Motorcycle 4,840

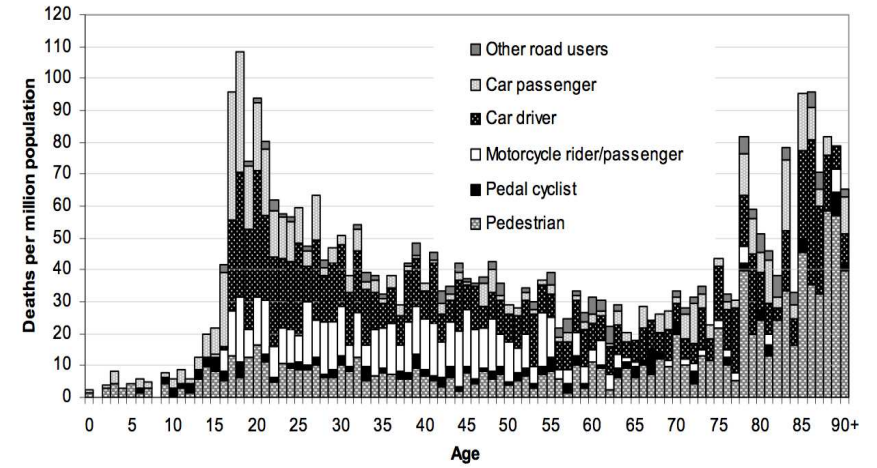
Number of Road Deaths or Seriously Injured by Age



Source: Reported Road Casualties Great Britain: 2015 Annual Report

Forrás: John Roberts, University of Manchester

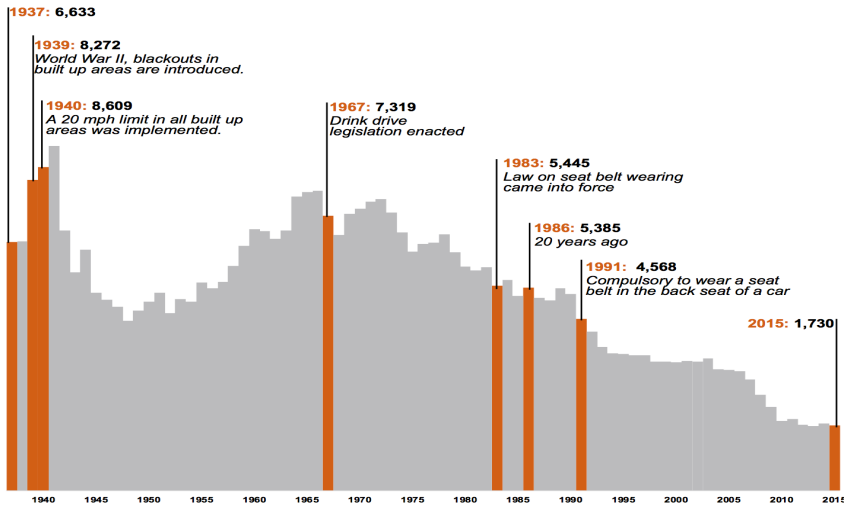
Number of Road Deaths or Seriously Injured by Age



Source: Reported Road Casualties Great Britain: 2009 Annual Report

Forrás: John Roberts, University of Manchester

Deaths per Billion Passengers



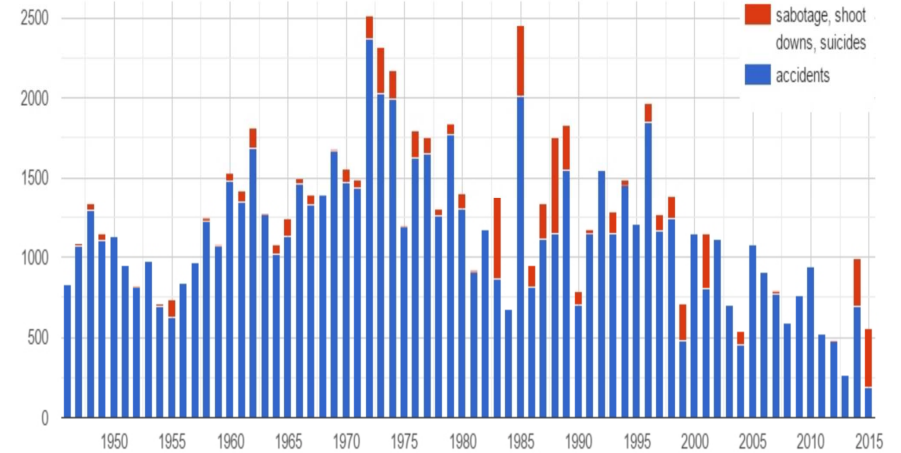
Source: Reported Road Casualties Great Britain: 2015 Annual Report

Forrás: John Roberts, University of Manchester

World Airliner Accident Fatalities

Worldwide airliner accident fatalities

AviationSafetyNetwork



Forrás: John Roberts, University of Manchester

Airline safety



Two fatal accidents, both involving small turbo-prop aircraft, with a total of 13 lives lost.

Forrás: John Roberts, University of Manchester
<http://www.independent.co.uk/travel/news-and-advice/air-safety-2017-best-year-safest-airline-passengers-worldwide-to70-civil-aviation-review-a8130796.html>

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

9

Mire tervezünk egy hidat?

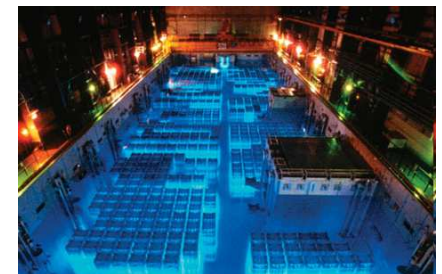


Mire tervezünk egy hidat?



Mire tervezünk atomerőművet?

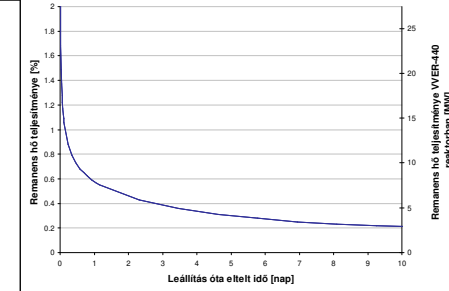
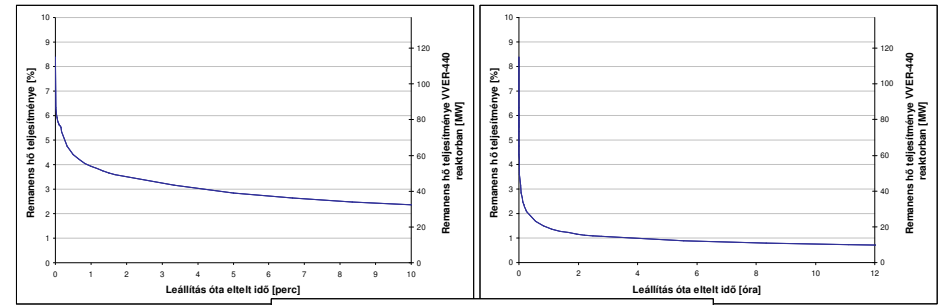
- Az áramtermelés mellett arra, hogy a biztonsági funkciókat ellássa.
 - Normál üzemben nagyon kis radioaktív kibocsátás
 - De: igen jelentős radioaktivitás van felhalmozva
 - ⇒ Nagyon kis valószínűséggel (súlyos baleset esetén) jelentős környezeti kibocsátás is lehet
 - **Cél a lakosság elfogadhatatlan többlet sugárterhelésének megakadályozása**
 - Biztonságos atomerőmű tervezése és építése
 - Biztonságos üzemeltetés és karbantartás



Az atomerőmű különlegessége

- Nagy mennyiségű radioaktív anyag.
- A sugárzástól a dolgozókat és a környezetet normál üzemben is védeni kell.
- Baleset esetén a radioaktív anyag környezetbe jutását meg kell akadályozni.
- Ha mégis kijutna radioaktivitás, kész tervekkel kell rendelkezni a problémák kezelésére.
- A **remanens hő** (maradék hő) okozta többlet feladatok.

Remanens hő a reaktor leállítása után

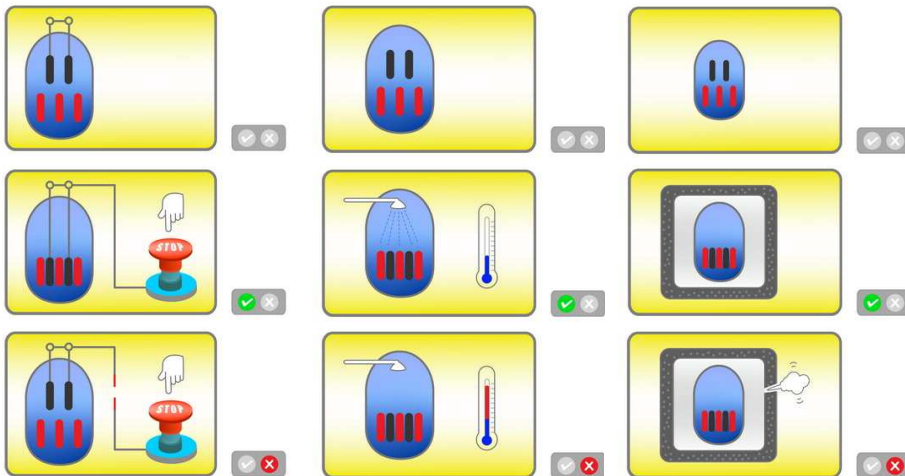


Biztonsági funkciók

1. Láncreakció hatékony szabályozása és lezárása

2. Hűtés normál üzemben és üzemzavarok alatt

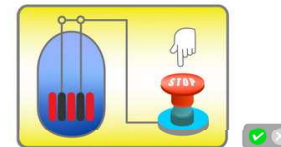
3. Radioaktív anyagok benttartása



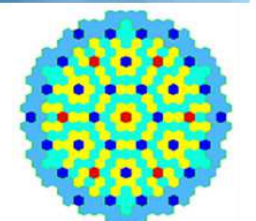
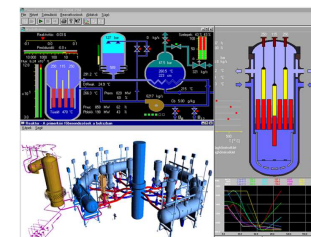
Biztonsági funkciók

1. Láncreakció hatékony szabályozása és lezárása

Viszonylag egyszerűen megvalósítható



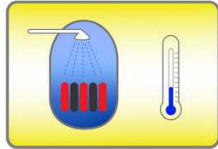
Tianwan NPP, Kína, VVER-1000



3.6% dúsító szűzemenyeg
2.4% dúsító szűzemenyeg
1.6% dúsító szűzemenyeg
szabályozó kazeták
biztonsági védelmi kazeták

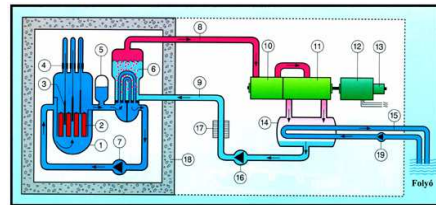
Biztonsági funkciók

2. Hűtés normál üzemben és üzemzavarok alatt

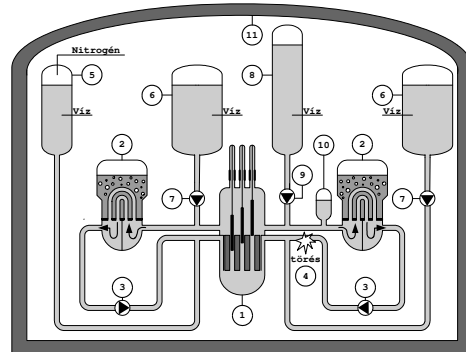


Normál üzemi hűtés az energiatermelési folyamat révén
 Üzemzavarokra szükséges:

- végső hőnyelő, amibe a leállított reaktorban keletkező remanens hő elvezethető
- normál üzemi hűtésen túl biztonsági hűtővíz szükséges
- aktív üzemzavari rendszerek áramellátása biztosítandó (minden tervezési üzemzavar alatt is)



Fenntartható fejlődés és atomenergia



Dr. Aszódi Attila, BME NTI

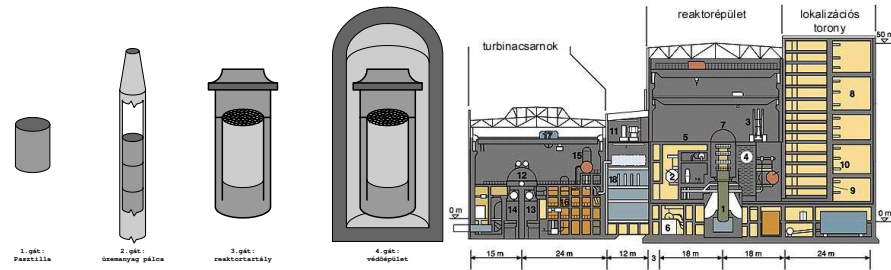
Biztonsági funkciók

3. Radioaktív anyagok bentartása



Megtöbbszörözött mérnöki gátak rendszere
 Üzemzavarokra szükséges továbbá:

- üzemanyag hűtendő, hogy integritása fennmaradjon
- hermetikus épület integritása biztosítandó
 - hőelvezetés a hermetikus épületből
 - hidrogénkezelés megakadályozása
 - ha mégis keletkezne hidrogén, a hidrogénrobbanás megakadályozása



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

Az atomerőművek biztonsága

A 108/1997. (VI. 25.) Korm. rendelet szerinti NBSZ 3. kötetének 3.8. fejezete (Általános tervezési szempontok) 3.088. pontja szerint:

- „3.088. A lehetséges jelentős hibák és meghibásodások ellen az atomerőművet mélységi védelemmel kell megtervezni úgy, hogy
- a) radioaktív anyagok környezeti kibocsátása ellen a fizikai gátakat többszörözni kell,
 - b) a védelmek különböző szintjeit kell biztosítani.”

A 3.088. pontban kulcsfogalomként szerepel a „mélységi védelem” elve. A mélységi védelem fogalmának meghatározását a 108/1997. (VI. 25.) Korm. rendelet szerinti NBSZ 3. kötet „Meghatározások” című fejezete adja meg:

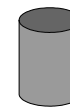
„Mélységi védelem

Egy adott biztonsági célkitűzés megvalósítása érdekében alkalmazott műszaki megoldások és intézkedések egymásra épülő olyan összessége, amelyek bármelyikének hatástalan volta mellett is teljesül a biztonsági célkitűzés.”

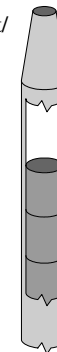
Az atomerőművek biztonsága

Mérnöki gátak

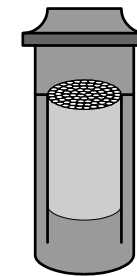
- üzemanyag-mátrix
- fűtőelem-burkolat
- reaktortartály és egyéb primerköri berendezések fala
- hermetikus védőépület/ konténment (containment)



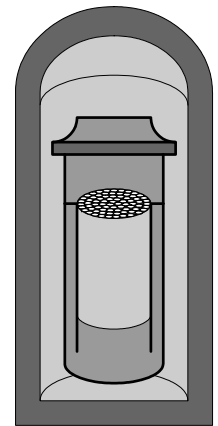
1. gát: Pasztilla



2. gát: üzemanyag pálca



3. gát: reaktortartály



4. gát: védőépület

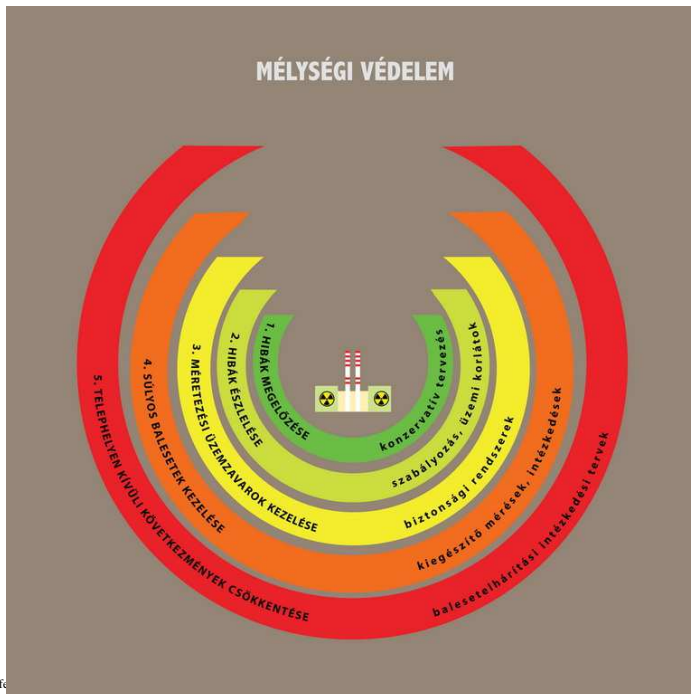
Biztonság – egy ellenpélda



Az atomerőművek biztonsága

MÉLYSÉGI VÉDELEM

- Hármaskövetelmény:
 - baleset megelőzése
 - monitorozás (balesetre utaló jelek figyelése)
 - baleset következményeinek enyhítése
- A mélységi védelem elve:
 - Az összes biztonsági rendszert magába foglalja
 - A mérnöki gátakat a hármaskövetelmény megfelelő szintjéhez kapcsolja
 - Nagyobb hangsúlyt fektet a megelőzésre → a baleset bekövetkeztét próbálja megakadályozni.



Ellenpélda, 2010.10.04., Kolontár, Vörösiszap



Ellenpélda, 2010.10.04., Kolontár, Vörösiszap



Fenntartható fejlődés és atomenergia

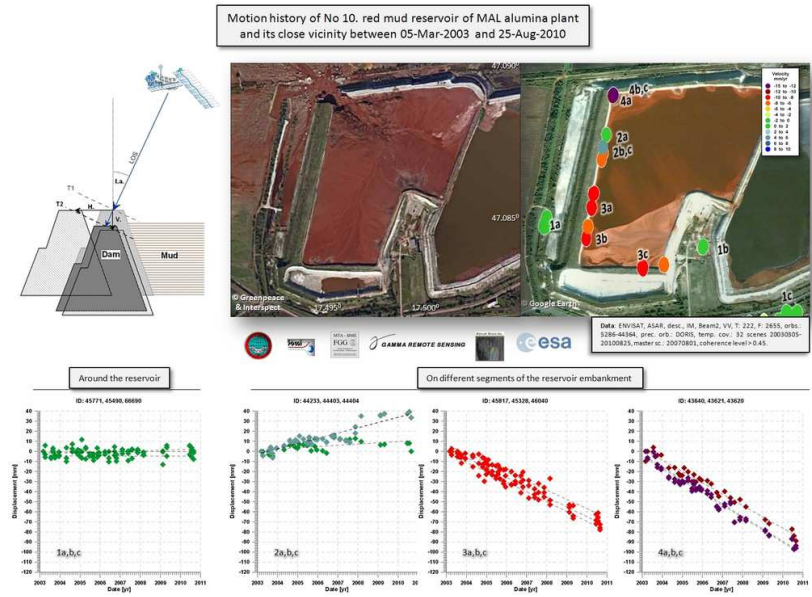


Dr. Aszódi Attila, BME NTI

Forrás: Index.hu

25

Ellenpélda, 2010.10.04., Kolontár, Vörösiszap



26

Tervezés

- Statikus üzemállapotok
- Tranziensek, tervezési üzemzavarok

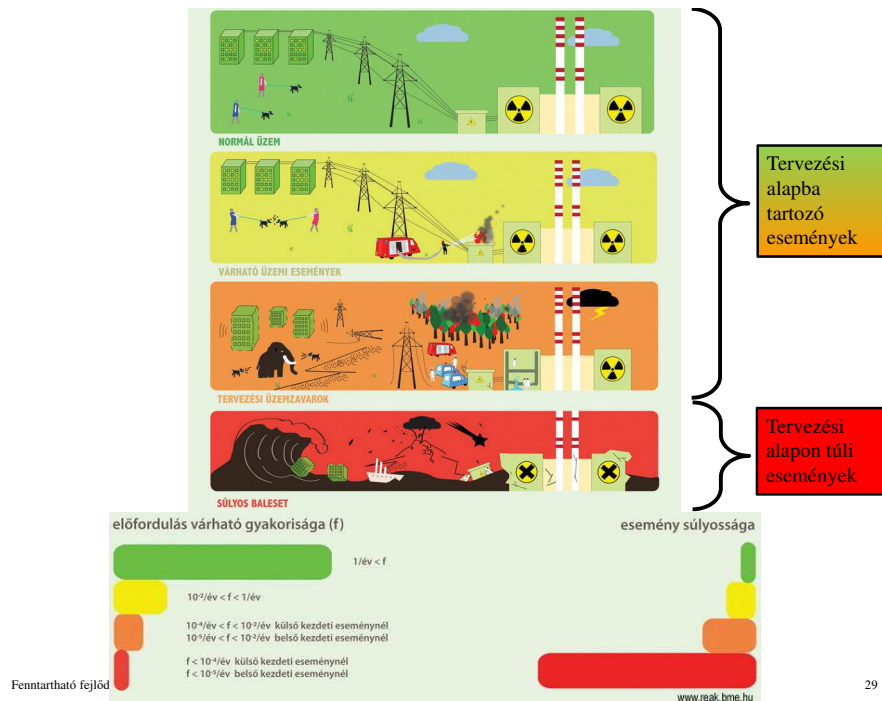
Az atomerőmű lehetséges állapotai és tranziens folyamatai

- Normál üzemi állapot
a legvalószínűbb, leggyakoribb állapot
- Üzemi tranziensek
nagy valószínűséggel bekövetkező tranziensek, hatásuk kicsi, reális esély van az élettartam alatti többszöri bekövetkezésükre
- Tervezési üzemzavarok (Design Basis Accidents)
kis valószínűségi üzemzavarok, a tervezés alapjául szolgálnak
- Tervezési alapon túli (súlyos) üzemzavarok (Beyond Design Basis Accidents - Severe Accidents)
extrém kis valószínűségi üzemzavarok, ezért a legtöbb mai blokk tervezésénél nem tartoztak a tervezési alapba

Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai

- **Normál üzem:**

A nukleáris létesítménynek a Hatóság által jóváhagyott üzemeltetési feltételek és korlátok betartása melletti üzemeltetése, beleértve a **terhelésváltoztatást, leállást, indítást, fűtőelem cserét, karbantartást, próbákat, stb.**



Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai

- **Tervezési alap:**

A nukleáris létesítmény azon jellemzői, amelyek megléte szükséges a **várható üzemi események és feltételezett üzemzavarok ellenőrzött módon történő kezeléséhez** a meghatározott sugárvédelmi követelmények kielégítése mellett. A tervezési alap magába foglalja a várható üzemi állapotokat és a feltételezett kezdeti események által előidézett üzemzavari körülményeket, a fontosabb feltételezéseket, és bizonyos esetekben a speciális elemzési módszereket. **A tervezési alap részét képezik azok a várható üzemi események, amelyek valamely biztonságvédelmi működés elmaradásának feltételezéséből származtathatók.**

Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai

- **Tervezési üzemzavar:**

Nukleáris létesítmény rendszereinek, rendszerlemeinek meghibásodása, **kedvezőtlen külső hatások és/vagy helytelen/téves emberi beavatkozások eredményeként ritkán bekövetkező esemény, amelyek során a biztonsági funkciók a tervezettnek megfelelően működnek** és az esemény nem vezet az üzemeltető személyzetnek és a lakosságnak a hatóságilag előírt értéknél magasabb sugárterheléséhez.

Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai

• Súlyos baleset:

A tervezési alapot meghaladó, olyan igen kis valószínűségű, hipotetikus esemény, amely a radioaktív kibocsátás szempontjából a legsúlyosabb következményekkel járhat.

Atomerőművi állapotok korábbi blokkokra

Tervezési alaphoz tartozó események			Tervezési alaphoz kívüli események	
Normál üzem	Várható üzemi események	Tervezési üzemzavarok	Tervezési alaphoz túli üzemzavarok	Súlyos balesetek
Gyakoriság:				
$f = 1/\text{év}$	$f \geq 10^{-2}/\text{év}$	$10^{-2}/\text{év} \geq f \geq 10^{-5}/\text{év}$	$f \leq 10^{-5}/\text{év}$	
Biztonsági relevancia:				
Nincs	Nincs (üzemi rendszerek kezelik)	Korlátokon belül (üzemzavar/biztonsági rendszerek kezelik)	Ezekre korábban nem méretezték az atomerőműveket!	

Atomerőművi állapotok új blokkokra

Tervezési alaphoz tartozó események			Tervezési alaphoz kívüli események	
Normál üzem	Várható üzemi események	Tervezési üzemzavarok	Tervezési alaphoz túli üzemzavarok	Súlyos balesetek

Új atomerőművi blokkok esetén:
kiterjesztett tervezési alap

Atomerőművi állapotok új blokkokra

• A tervezésben figyelembe vett állapotok

Tervezési alaphoz tartozó események (DBC)				Tervezési alap kiterjesztése (DEC)	
Normál üzem	Várható üzemi események	Kis valószínűségű tervezési üzemzavarok	Nagyon kis valószínűségű tervezési üzemzavarok	Tervezési alaphoz túli balesetek	Súlyos balesetek
TA1 (DBC1)	TA2 (DBC2)	TA3 (DBC3)	TA4 (DBC4)	TAK1 (DEC1)	TAK2 (DEC2)
Ide vezető események gyakorisága:					
$f=1/\text{év}$	$f \geq 10^{-2}/\text{év}$	$10^{-2}/\text{év} \geq f \geq 10^{-4}/\text{év}$	$10^{-4}/\text{év} \geq f \geq 10^{-6}/\text{év}$		

Követelmények TAK állapotokra is:
 •A reaktort TAK1 állapotra is tervezni kell
 •TAK2 állapotra is követelmények (pl. konténment integritás megőrzése)

Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai

- **Biztonsági elemzés:**
Vizsgálatok annak eldöntése céljából, hogy egy nukleáris létesítmény rendszereinek, rendszerlemeinek biztonsága megfelelő szintű vagy sem.
- **Biztonsági jelentés:**
A nukleáris létesítmény létesítéséhez, üzembe helyezéséhez, üzemeltetéséhez és megszüntetéséhez kapcsolódó engedélyezéshez szükséges, a biztonsággal összefüggő információkat összefoglaló és értékelő dokumentum.

Biztonsági elemzések

Biztonsági elemzések (1)

- Determinisztikus biztonsági analízisek
 - analizált kezdeti eseménysorok osztályozása
 - mérnöki megfontolások
 - számítógépi kódok, a tranziens szempontjából fontos berendezések és fizikai folyamatok leírása
 - kódok validáltsága szükséges
 - konzervativizmusok „hagyományos” alkalmazása
 - újabban „best estimate” kódok + a bizonytalanságok becslése

Biztonsági elemzések (2)

- Valószínűségi alapú biztonsági analízisek (PSA)
 - minden kezdeti eseménysort hibafa analízissel vizsgálunk, figyelembe véve a berendezések megbízhatóságát és az emberi tényezőt;
 - cél: megbecsülni, hogy **melyik kezdeti eseménysor milyen valószínűséggel vezet egy bizonyos végállapothoz** (tipikusan zónaolvadáshoz);
 - determinisztikus elemzéseket alkalmazunk bizonyos hiba kombinációk eredményeinek meghatározására.

Determinisztikus biztonsági analízisek

- Alapul vett kezdeti események
 - kívülről indukált események:
 - földrengés
 - meteorológiai hatások (tornádó, hurrikán, tűz, extrém magas vagy alacsony hőmérséklet, extrém hóesés)
 - áradás
 - külső, ember általi hatások
 - repülőgép rázuhanás, tűz, robbanás,
 - terrortámadás, szabotázs
 - veszélyes anyagok kibocsátása (pl. szomszédos ipari üzemből)

Determinisztikus biztonsági analízisek

- Alapul vett kezdeti események
 - belső események:
 - hőelvonás intenzitásának csökkenése vagy fokozódása
 - hűtőközeg-áram csökkenése vagy növekedése
 - reaktor hűtőkör nyomásának csökkenése vagy növekedése
 - hűtőközeg mennyiségének csökkenése vagy növekedése, ide értve a primer kört határoló fémszerkezet sérülését
 - reaktivitás vagy teljesítmény-eloszlás anomáliái, amelyek a zóna teljesítményüzemét befolyásolják
 - tűz, robbanás, elárasztás, emberi hibák az üzemeltetés vagy a karbantartás során
 - külső események belső hatással (hálózatról való leszakadás)

Tervezési üzemzavarok - DBA

- Ritkán előforduló események, de a biztonsági rendszereket és berendezéseket úgy kell kialakítani, hogy azok képesek legyenek a tervezési üzemzavarokat úgy lekezelné, hogy a lakosságot ne érhesse a hatósági határokat meghaladó sugárterhelés.
- Alapjában véve nem számolunk azzal, hogy ilyen esemény ténylegesen fel is lép az élettartam során, de a berendezések készek az ilyen tranziensek lekezelésére.

A zónaolvadás valószínűsége



Nyugati könnyűvízes blokkok:
néhányszor 10^{-5} /reaktorév

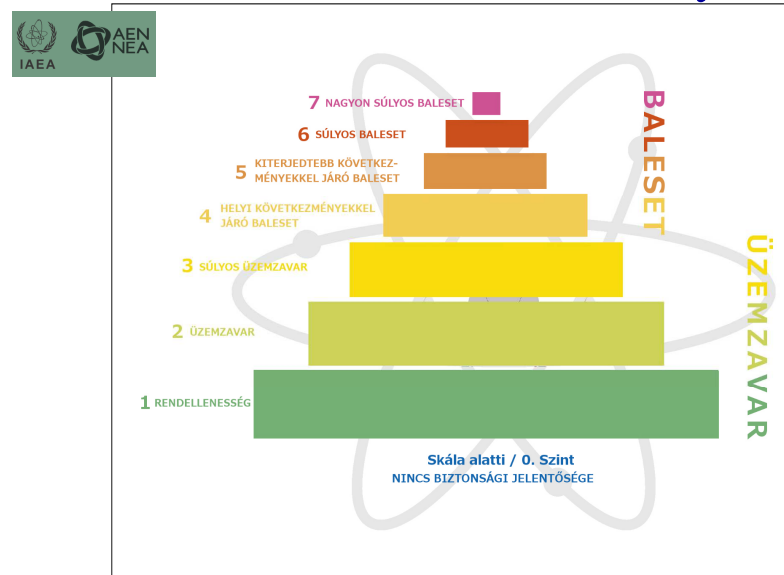


Paks (VVER440/213):
néhányszor 10^{-5} /reaktorév



Újgenerációs típusok:
 10^{-6} - 10^{-7} /reaktorév

INES - nemzetközi eseményskála



INES - nemzetközi eseményskála

Szint, megnevezés	Kritériumok	Példák
3. Súlyos üzemzavar	<p>Radioaktivitás környezeti kibocsátása, a megállapított korlátnál nagyobb mértékben, amely a környezetben a legjobban veszélyeztetett személynél néhány tized mSv dózist eredményez. A telephelyen kívüli védelmi intézkedésre nincs szükség.</p> <p>A berendezéshibák vagy üzemviteli zavarok következtében magas sugárterhelés és/vagy szennyeződés a telephelyen. A dolgozóknak a korlátnál nagyobb mértékű sugárterhelése (50 mSv-et meghaladó egyéni dózisok).</p> <p>üzemzavarok, amelyekben a biztonsági rendszerek egy további hibája baleseti körülményeket teremthetett volna, vagy olyan helyzetek, amelyekben a biztonsági rendszerek nem tudták volna megakadályozni a balesetet, ha bizonyos kiváltó események felléptek volna.</p>	<p>Vandellós, Spanyolország, 1989</p> <p>Paks, 2003. április 10.</p>
2. Üzemzavar	Műszaki üzemzavarok, vagy rendellenességek, amelyek ugyan közvetlenül vagy azonnal nem befolyásolták az erőmű biztonságát, de a biztonsági intézkedések újraértékeléséhez vezethetnek.	
1. Rendellenesség	Működési vagy üzemviteli rendellenességek, amelyek nem járnak kockázattal, de a biztonsági intézkedések hiányosságát jelzik. Ez adódhat berendezéshibából, emberi tévedésből, vagy eljárásrendi hiányosságból. (Ezeket a rendellenességeket meg kell különböztetni azokról a helyzetektől, amikor az üzemviteli korlátokat és feltételeket nem sértik meg, és amelyeket a vonatkozó eljárás szerint megfelelően kezeltek. Ezek jellemzően "Skála alattiak".)	

0. Skála alatti szint

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

45

INES - nemzetközi eseményskála

Szint, megnevezés	Kritériumok	Példák
7. Nagyon súlyos baleset	A reaktor zónájában lévő anyag nagy részének környezetbe való kibocsátása, beleértve jellemzően a rövid és hosszú élettartamú radioaktív hasadási termékek keverékét (több tízezer TBq jód-131 egyenérték mennyiségben). Akut egészségkárosodás lehetséges fennáll. Késői egészségi hatások nagy területen, feltehetőleg több, mint egy országot érintően. Hosszú távú környezeti következmények.	Csemobil, Szovjetunió, 1986 Fukushima, 2011
6. Súlyos baleset	Hasadási termékek kibocsátása a környezetbe (ezer-tízezer TBq jód-131 egyenérték mennyiségben). A helyi balesetelhárítási terv teljes körű alkalmazására nagy valószínűséggel szükség van a súlyos egészségi hatások korlátozása érdekében.	
5. Telephelyen kívüli kockázattal járó baleset	<p>Hasadási termékek kibocsátása a környezetbe (száz-ezer TBq jód-131 egyenérték mennyiségben). A balesetelhárítási terv részleges végrehajtása (pl. helyi elzárkóztatás, kitelepítés) szükséges egyes esetekben az egészségi hatások valószínűségének csökkentésére.</p> <p>A zóna nagy részének súlyos károsodása mechanikus hatások és/vagy megolvadás következtében.</p>	<p>Windscale, Nagy Britannia, 1957</p> <p>Three Mile Island, USA, 1979</p>
4. Elsősorban létesítményen belüli hatású baleset	<p>Radioaktivitás környezeti kibocsátása, amely a környezetben a legjobban veszélyeztetett személynél néhány mSv dózist eredményez. Általában nem valószínű, hogy a telephelyen kívül védelmi intézkedésre legyen szükség, kivéve esetleg az élelmiszerek helyi ellenőrzését.</p> <p>A reaktor zónájának károsodása mechanikai hatások és/vagy megolvadás következtében.</p> <p>A dolgozók sugárterhelése olyan mértékben, ami akut egészségi hatásokkal járhat (1 Sv nagyságrendben)</p>	<p>Saint Laurent, Franciaország, 1980</p> <p>Tokai Mura, Japán, 1999</p>

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

46

Főbb ellenőrző kérdések

1. A biztonság fogalma
2. Biztonság erőműveknél, az atomerőmű különlegessége
3. Mi a remanens hő? Hogyan alakul a reaktor leállítása után?
4. A mérnöki gátak, szerepük, felépítésük
5. Mérnöki gátak nyomottvízes reaktoroknál
6. A mélységi védelem hármas követelménye, elve
7. A mélységi védelem öt szintje
8. Egy atomerőmű lehetséges üzemállapotai és tranzien্স folyamatok
9. Mi a normál üzem?
10. Mi a tervezési alap?
11. Mi a tervezési üzemzavar?
12. Mi a súlyos baleset?
13. Ismertesse a biztonsági elemzés és a biztonsági jelentés fogalmát!

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

47

Főbb ellenőrző kérdések

14. Ismertesse a determinisztikus biztonsági elemzés fogalmát!
15. Ismertesse a valószínűségi alapú biztonsági elemzés fogalmát!
16. Milyen belső kezdeti eseményeket vesznek alapul determinisztikus elemzéshez?
17. Milyen külső/kívülről indukált kezdeti eseményeket vesznek alapul determinisztikus elemzéshez?
18. Tervezési üzemzavarok
19. A Nemzetközi Nukleáris és Radiológiai Eseményskála (INES), példák

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Aszódi Attila, BME NTI

48