

Megsokszorozták és fejlesztették a környezetfigyelő rendszereket az erőművek körül. A TMI-2 helyreállítása közben sok javítást eszközöltek a sugárzáselhárító rendszeren, a személyi dozimetrián és a robotikán.

Az erőművek tervezésének jövője a szabványosítás és a kisebb méretek felé halad. Csökkentik a pumpák és szelepek számát, a csövek mennyiségét, felhasználják a gravitációt és a konduktív hűtést is. A cél, hogy megszüntessék, vagy legalább minimalizálják a reaktortartály aljának terhelését.

A TMI-2 fő tanulsága, hogy soha nem szabad azt hinni: "velem úgysem történik meg". Ne váljunk kényelmessé. Balesetek igenis történnek, emberi hibák, a rendszer összetettsége és váratlan reakciói potenciális problémákat eredményezhetnek. A biztonsági rendszerek csak egy előre látott eseménysorozat elhárítására jók. Ha egy speciális meghibásodás olyan eseménysorozatot indít el, amire a biztonsági rendszerek nem voltak előkészítve, akkor a jól betanított operátor dolga a helyzet megítélése és a baleset

elhárításához szükséges lépések megtétele. De az operátorok sem tévedhetetlenek, ők is elkövethetnek hibákat. A legtöbb, amit tehetünk, hogy tanulunk a múlt hibáiból és olyan módon oldjuk meg a problematikus helyzeteket, hogy a káros következményeket a lehető legkisebbre csökkentjük.

IRODALOM

- [1] The lessons of the TMI-2 Accident, E.R. Frederick, TMI-1 HPES Coordinator, GPU Nuclear Corporation, June 1989
- [2] The Three Mile Island Accident, Diagnosis and Prognosis, American Chemical Society Symposium Series, 293
- [3] Behling, Hans. U. 1986. Radioactivity Released to the Environment, p. 21. in Radiation and Health Effects, A Report on the TMI-2 Accident and Related Health Studies. GPU Nuclear Corporation, Middletown, PA
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1979. Dose Assessment From External Exposure. pp 12-43. In Population Dose and Health Impacts of the Accident at the Three Mile Island Nuclear Station. Washington, D.C.
- [5] American Nuclear Society, Plenary Session, November 1988 Meeting, Washington, D.C., Lessons Learned from the TMI-2 Accident.

CSERNOBIL LECKÉJE

Fűtőelem, lassítóközeg, hűtőközeg

Az urániumnak két izotópja van. Egyiknek (^{238}U) a felezési ideje összemérhető a Föld életkorával (4,5 milliárd év). A másik (^{235}U) felezési ideje sokkal rövidebb (0,7 milliárd év), ez ma már csak 0,7 % arányban van jelen a természetes uránban.

Ha uránt besugároznak lassú neutronokkal, a befogott neutron felszabaduló kötési energiája ^{238}U atommagban nem képes fedezni a hasadás aktiválási energiáját, de az ^{235}U hasítására elegendő. Az ^{235}U atommagot 1 neutron hasítja el, és a hasadás során 2-3 neutron keletkezik. Ez teszi lehetővé a nukleáris láncreakciót.

A hasadásban gyors neutronok keletkeznek. Mozgási energiájuk rugalmas ütközések során fokozatosan csökken. Sajnos, az ^{238}U izotóp hasadás nélkül befogja a közepes energiájú neutronokat, ezért a hasa-

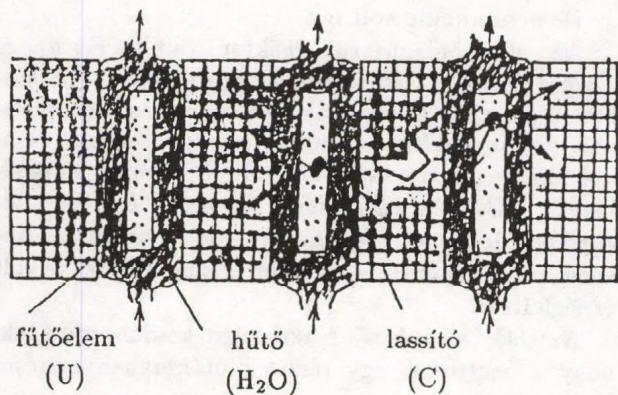
dási neutronok természetes uránban elnyelődnek a túlnyomó részt kitevő ^{238}U magokban, mielőtt a hőmozgás energiája lelassulva képesek lennének ^{235}U atommagokat jó hatásfokkal hasítani. Egyedül természetes uránt használva nincs mód láncreakció kifejlődésére.

A probléma megoldását az inhomogén atomreaktor adja. Az urán *fűtőelem*-rudakat rácsszerűen rendezik el, azokat olyan anyaggal veszik körül, amelynek atommagjaival rugalmasan ütköznek a neutronok. Ha az uránrúd átmérője kisebb a neutron szabad úthosszánál, a hasadás alkalmával keletkező neutronok elhagyják az uránrudakat, a *lassítóközeg* (moderátor) atommagjaival ütköznek, így lelassulnak a hőmozgás termikus energiájára. Ezután bolyongásuk során eljutnak valamelyik uránrúddhoz. Lassú neutronokat az ^{238}U kis hatáskeresztmetszettel nyeli el, de rájuk az ^{235}U hasadási keresztmetszete nagy, így legtöbbjük további hasítást idéz elő: a láncreakció továbbfut (1. ábra). A lassítóközeg atommagjainak nyilván eleget kell tenniük a következő feltételeknek:

A. Könnyű atommagoknak kell lenniük, hogy rugalmas ütközés során a neutron mozgási energiájának jelentős hányadát átvegyék.

B. Neutronelnyelési valószínűségük (hasadás nélkül) legyen kicsi a teljes energiatarományban.

Például a könnyű hidrogén (H) kielégíti az A feltételt, de csak gyengén felel meg B-nek, mert H neutron befogva nehéz hidrogénné (D) alakulhat. A He és O atommagok kiválóan megfelelnek a B követelménynek: zárt héjszerkezetük miatt gyakorlatilag nincs neutron-abszorbciónuk. A D és C atommagok



1. ábra Neutron útja inhomogén reaktorban

Marx György

ELTE Atomfizikai Tanszéke

jó kompromisszumot képviselnek: viszonylag könnyűek és gyengén abszorbeálnak neutronot. Így a He-gáz, a grafit (C), a nehézvíz (D₂O) jó lassítóközeg. A könnyűvíz (H₂O) szintén lassít, de $n+H \rightarrow D$ szerint neutronokat is fogyaszt. Természetes urán fűtőelem és könnyűvíz lassítóközeg nem vezethet önfenntartó láncreakcióra, csak majdnem: a rendszer neutronsokszorozási tényezője elérheti a 0,98 értéket. Ha azonban az uránban kissé feldúsítjuk az ²³⁵U izotópot (az eredeti 0,7 %-ról 2–3 %-ra), az így nyert dúsított urán fűtőelem és könnyűvíz lassítóközeg fenntarthatja a hasadási láncot.

A hasadási láncreakció által termelt hő *hűtőközeg* áramlása vezeti el a reaktorból a turbinához hasznosítás végett. Lehetséges hűtőközegek a He, D₂O, H₂O, folyékony Na. Kompromisszumot kell kötni a nukleáris tulajdonságok, műszaki előnyök és gazdasági megfontolások között. Pl. He és D₂O jó hűtőközegek magfizikai szempontból, de a hélium műszakilag előnytelen (gáz lévén kicsi a hőkapacitása), a nehézvíz pedig drága. Ma az atomreaktorok 90 %-a *dúsított uránt* alkalmaz fűtőelemként, *könnyűvizet* lassítóközeggé és hűtőközeggé, annak ellenére, hogy a H₂O gyenge reaktorméreg: a neutronok egy részét elnyeli.

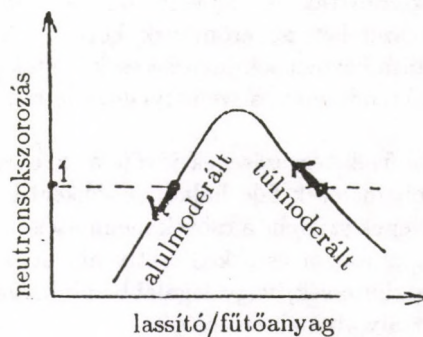
Üregtényező

Tekintsünk egy adott mennyiségű fűtőanyagot, és adjunk mellé egy kevés lassítóközeget. A lassítóanyag nem elegendő arra, hogy a neutronokat termikus energiára lassítsa. A neutronok közepes mozgási energiával érik el a másik uránrudat, így az ²³⁸U haszontalanul elfogyaszthatja őket. Ha növeljük a *lassítóközeg/fűtőanyag* arányt, mind több neutron termalizálódik az uránrúd elérése előtt, így a neutronok egyre nagyobb aránya válthat ki ismét hasadást: a neutronsokszorozás fokozódik.

Egy bizonyos *lassítóközeg/fűtőelem* aránynál elérjük azt a pontot, amelynél már minden hasadási neutron lelassul termikus energiákra, mielőtt újra belépne egy másik uránrúdba. Ilyen *lassító/fűtőelem* aránynál a neutronsokszorozás maximális. Nem érdemes tovább növelni a lassítóközeg mennyiségét: a neutronok így is, úgy is termalizálódtak, további ütközések már nem lassítják őket, de a lassítóközegben való hosszabb bolyongásuk közben már az uránrúd elérése előtt haszontalanul elnyelődhetnek.

Amíg a *lassító/fűtőanyag* arány növelése fokozza a sokszorozási tényezőt, a reaktort *alulmoderált*nak mondjuk. Ha a *lassító/fűtőelem* arányának további növelése már mérsékli a neutronsokszorozást, a reaktort *túlmoderált*nak mondjuk.

Tekintsünk egy urán-fűtésű, grafit-lassítású, víz-hűtésű reaktort (1. ábra). Képzeljük el, hogy a reaktor véletlen ingadozás folytán túlhevül. A hűtővíz felforr, a csövekben gőzbuborékok képződnek. A víz mennyisége (ami nemcsak hűt, hanem lassít is, egyúttal gyenge reaktorméreg) csökken (2. ábra). Ha



2. ábra Alulmoderált és túlmoderált reaktor stabilitási viszonyai

a reaktor kritikus állapotú (sokszorozási tényező=1) és alulmoderált, a víz távozása (a lassítóanyag csökkenése) az 1 érték alá ejti a sokszorozást: a reaktor automatikusan leáll. Üregképződés lefojtja a neutronsokszorozást! Azt mondjuk, hogy *az alulmoderált reaktor üregtényezője negatív, az ilyen rendszer szerkezetileg stabil: a lassítóközeg (részleges vagy teljes) elvesztése a sokszorozást csökkentve megszakítja a láncreakciót.* (Az üregtényező a neutronsokszorozási tényezőnek lassítóközeg-térfoghat szerint képezett differenciálhányadosa.)

Ezek után tekintsünk egy túlmoderált urán-grafit-víz rendszert (amelyben a *lassító/urán* arány túl magas). Ha a reaktor állapota kritikus (sokszorozási tényező=1), és külső zavar vagy statisztikus ingadozás következtében túlhevül, a hűtővíz felforrhat, üregek képződhetnek. A víz távozása kevesebb lassítást és kevesebb reaktorméregt jelent: üregképződés folytán fokozódik a neutronsokszorozás, a láncreakció megszalad (2. ábra). *Túlmoderált reaktor üregtényezője pozitív, ezért az szerkezetileg instabil: a lassító- és hűtőközeg vesztese növeli a sokszorozási tényező értékét, gyorsítja a láncreakciót.*

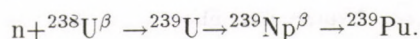
Túlmoderált reaktorok

Manapság a legtöbb erőművi reaktor fűtőanyaga *dúsított urán*, lassító- és hűtőközege pedig *könnyűvíz*. A reaktorok alulmoderáltak, ezért szerkezetileg stabilak. (Ilyen Magyarország összes atomreaktora.)

De nem mindig volt így.

Az első önfenntartó reaktor (amit *Fermi* és *Szilárd* épített Chicagóban, és amely 1942. december 2-án vált kritikussá) természetes uránt használt fűtőanyagként és grafitot lassítóközeggé. Nem volt hűtve, ezért csak kis teljesítménnyel működhetett. Csupán rövid ideig üzemelt, először Chicagó belvárosában, majd az Argonni Erdőben. — Hasonló volt az Oak Ridge reaktor: kis teljesítménye volt és léghűtésű.

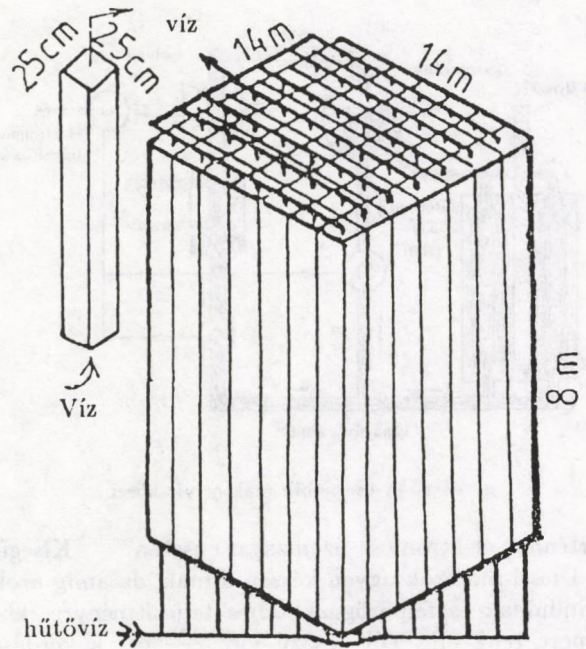
Az első "hivatásos" reaktorokat később építették, hogy a neutronok egy részét plutóniumtenyésztésre hasznosítsák:



Ezeknek magas teljesítménnyel kellett működniük, hogy még a háború vége előtt elegendő plutóniumot állítsanak elő atomfegyverek céljára. (Plutóniumban lassítóközeg nélkül futhat láncreakció, ezért az megfelelő töltet atombombához.) Ezeket a reaktorokat Wigner Jenő tervezte. Fűtőanyaguk természetes urán, lassítóközegük grafit volt. Hűtőközegül eleinte hélium-gázt javasoltak a magfizikusok, de ennek gyakorlati nehézségeit látta a vegyészmérnök képesítésű Wigner Jenő, ezért ő hűtőközegül természetes (könnyű) vizet tervezett. Akkor még azt hitték, hogy kevés az urán a Földön (20000 tonnára becsülték a teljes készletet), így olyan kevés uránból akartak reaktort építeni, amilyenből csak lehetséges. A Hanfordban (az Egyesült Államok északnyugati sarkában) megépített reaktorokban korlátozott mennyiségű urán fűtőelem volt, viszont hatalmas mennyiségű volt a grafit lassítóközeg. Túlmoderált szerkezetek voltak, de simán működtek. Megtermelték a plutóniumot az újmexikói kísérleti robbantáshoz és a nagaszaki atombombához.

A háború után az Egyesült Államokban Reaktorbiztonsági Bizottság létesült, amelynek első elnöke Teller Ede volt. Teller a következő álláspontot foglalta el: ha valamit egyszer feltaláltak, azt az ipar előbb-utóbb realizálni fogja. A mérnökök majd csak az első baleset után kezdenek gondolkodni a kockázatról. De az atomreaktor túlságosan veszélyes szerkezet ahhoz, hogy e minta szerint járjanak el. A Reaktorbiztonsági Bizottság elkezdett gondolkodni az elképzelhető legrosszabb baleseten, még mielőtt az bekövetkezett volna. 1950-ben ez a bizottság felismerte a túlmoderált reaktorok szerkezeti instabilitását, majd azt javasolta, hogy állítsák le a túlmoderált reaktorokat. A javaslatot csakhamar határozat követte: Hanfordban lezárták a reaktorokat. Mindez azonban a hidegháború idején történt, nem volt róla semmi nyilvános vita. 1955-ben (a genfi "Békés Atom" Konferencia idején, amikor a villamosenergiát termelő atomerőművek működni kezdtek) a téma nyilvánossá vált, de a nukleáris optimizmus éveiben senki nem figyelt rá.

Később a Szovjetunió nagy és még nagyobb atomerőműveket kezdett építeni, többet nyugati határai közelében, hogy az ország iparosodott európai részének energiaigényét fedezze, és, hogy villamos energiát szállíthasson a többi kelet európai ország, köztük Magyarország részére. Az egyik leggazdaságosabb konstrukció a grafit-lassítású csatornareaktor volt. Ezt különálló egységekből rakták össze. Mindegyik egység 25cm-25cm vastag, 3,5 méter magas oszlop volt. Az oszlopban grafit volt, ebben 1,8 %-ra dúsított drótszerű urán fűtőelemek voltak beágyazva, valamint vízvezető csövek hűtés céljára. A fűtőelemek burkolata cirkónium-fémből készült, mert a cirkóniumfém nem nyeli el a neutronokat. Az erőmű-reaktor felépítése ilyen oszlopok egymás mellé helyezését és a vízvezetékek bekötését jelentette. Az erőmű



3. ábra Az 1693 egységből felépített csernobili reaktor vázlata

teljesítménye további oszlopok hozzáadásával növelhető volt. A fűtőelemeket üzem közben is cserélni lehetett: csak egy oszlop vízvezetékét kellett lekapcsolni és az oszlopot újra cserélni.

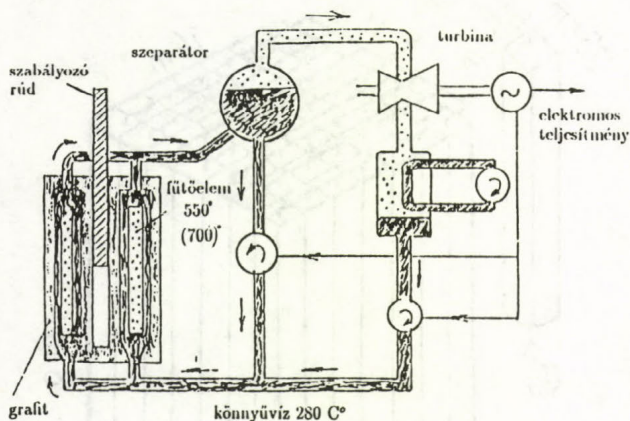
Kievtől 100 km-re északra Csernobilban négy ilyen erőművi reaktort építettek. Egy reaktor 1693 oszlopot, összesen 180 tonna dúsított uránt és 2500 tonna grafitot tartalmazott. A csövekben a könnyűvíz 6,5 atmoszféra nyomáson áramlott. Ily módon a víz 280 °C-ra volt hevíthető a nélkül, hogy felforrjt volna, ami az erőmű termikus hatásfokát 30 % közelébe emelte. A reaktor 3,2 GW hőt termelt. (1 GW=10⁹ watt.) E hőt az áramló könnyűvíz a hőcserélőhöz szállítja. Onnan egy másik kör két turbinához vezet. Egy reaktor mellett két turbina 1 GW elektromos teljesítményt szolgáltat (3. ábra).

Ha az oszlopokból kis rácsot építünk össze, a reaktor felületén át a neutronok jelentős hányada megszökik. Mind több oszlopot illetve egymás mellé a reaktor üzemeltetése egyre gazdaságosabb lesz. Így Csernobil reaktorai túlmoderáltakká váltak.

A reaktorok szerkezeti instabilitását járulékos biztonsági rendszerek ellensúlyozták, amelyek a neutronszorzószám vagy hőmérséklet gyors emelkedése esetén elnyelőrudak betolásával vagy neutronelnyelő bórosvízzel történő elárasztás révén leállítják a reaktort.

1986 április

Csernobilban mindegyik reaktor 3,2 GW hőt termelt, így feltétlenül szükség volt intenzív hűtésre. Az elektromos szivattyúk másodpercenként 10000 liter vizet nyomtak át a reaktoron (6,5 atmoszféra nyomáson, 280 °C hőmérsékleten 4. ábra). — "De mi



4. ábra A csernobili reaktor víz-körei

történne elektromos üzemzavar esetén? Kisegítő Diesel-motorok ugyan készen állnak, de amíg azok beindulnak és felpörögnek teljes teljesítményre, kb. 1 perc telik el! Túl hosszú idő!” — ezt a kérdést tették fel fiatal villamosmérnökök és reaktoroperátorok. Azon töprengtek, hogy áramkimaradás esetén a hatalmas turbinakerekek forgási energiáját használják villamosenergia előállítására a Diesel-beindítás egyperces holtideje alatt. Ragyogó ötlet, érdemes utánajárni! Már korábban is végeztek valós kísérleteket ez irányban, de még meg kellett oldani egy utolsó problémát. Amint a turbinakerekek lassulni kezdtek, az indukált elektromos feszültség csökkent, és a szivattyúk idő előtt lefulladtak. Kiküszöbölhető-e ez a nehézség az áramkörök megfelelő átkapcsolása által? Az utolsó kísérlet elvégzésére kiváló alkalom kínálkozott. A téli csúcsgyógyasztás múltával, a Csernobili Erőmű 4. számú reaktorának leállítását péntek reggelre (1986. április 25.) tervezték, szervizellenőrzés céljából. Az ezt követő eseménysorozatot a Szovjet Atomenergia Bizottság így rekonstruálta:

Péntek, 1.00 óra: A reaktor teljes 3,2 GW hőteljesítménnyel üzemel. Csökkenteni kezdik a teljesítményt.

13.05 óra: A teljesítmény 1,6 GW-ra csökken. A két turbina egyikét lekapcsolják.

14.00 óra: A vészleárasztó rendszert (amely bóros vízzel árasztaná el a reaktort) lekapcsolják. (Az operátor maga kíván a reaktor ura lenni, anélkül, hogy buta automaták zavarnák.)

14.05 óra: Az energiafelügyelet kívülről nemvárt villanyfogyasztást jelez, további villamos teljesítményt kér a hálózatra. A reaktor teljesítményének csökkentését megszüntetik. A reaktor 1,6 GW hőteljesítménnyel, egy turbinával tovább üzemel, 0,5 GW elektromos teljesítményt juttatva a hálózatra (szabályellenesen: aktív vészleárasztó automatika nélkül).

23.10 óra: A külső villamos energiaigény lecsökken. Az operátor engedélyt kap a reaktor leállítására. Elkezd csökkenti a teljesítményt a kísérlethez szükséges 0,7 GW-ra.

Szombat 0.28 óra: A kísérlet 24 óras késéssel, egy nemszándékolt fárasztó nap után elkezdődhet. A neutronsűrűség lokális ellenőrzését lekapcsolják. A biztonsági automatika csak globális szabályozást szolgáltat. Biztos, ami biztos: az operátor a víz-áramlás sebességét felfokozza a szabály által megengedett maximális érték fölé. A gyors körforgás miatt a primer hűtőkör vizének nincs ideje lehűlni, hőmérséklete megközelíti a forráspontot. A reaktoron az instabilitás jelei mutatkoznak: ahelyett, hogy simán 0,7 GW-ra csökkenne a teljesítménye, az hirtelen 0,03 GW-ra esik.

1.07 óra: A reaktor végre 0,2 GW hőteljesítményen stabilizálódik. Az operátor mérsékli a (forrásponthoz közel került) hűtővíz cirkulálását.

1.22 óra: A számítógép kinyomtatja a reaktor állapotjelzőit. A termikus teljesítmény 0,2 GW. De néhány probléma mutatkozik. A tartalék reaktivitás a megengedhető minimális értéknek mindössze 50 %-a, ami azt jelenti, hogy a neutronelnyelő rudak magasra ki vannak húzva. (Alig lehet még jobban kihúzni őket, ezt jelenti a tartalék reaktivitás alacsony volta.) A neutronelnyelő rudak kihúzására azért kényszerültek, mert a hosszú alacsony teljesítményű üzem során xenon-méreg halmozódott fel. (Az ^{235}U hasadása jelentős arányban termel ^{135}I izotópot. Ez 6,7 óra felezési idővel ^{135}Xe -ra bomlik. Ez a xenon-izotóp — hiányos neutron-héja miatt — a neutronokat rendkívül hatékonyan elnyeli, így az erős reaktorméreg. Amíg a reaktor nagy teljesítménnyel üzemel, a sok neutron $n + ^{135}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Xe}$ reakció révén eltünteti a ^{135}Xe mérget. Ha azonban leesik a reaktorteljesítmény, a felhalmozódott ^{135}I izotóp bomlása tovább termeli a ^{135}Xe izotópot, de nincs elég neutron annak kiküszöbölésére, ezért a reaktorméreg felhalmozódik. Ezért kellett nagyon kihúzni a neutronelnyelő szabályozórudakat. Az erősen xenon-mérgezett reaktor állapota viszont instabil. Ha ilyen állapotban megugrik a neutronsűrűség, az eltünteti a xenon-mérget, a neutronsokszorozás megnő, ami a neutronsám további emelkedését eredményezi. Ez a pozitív visszacsatolás a reaktort instabillá teszi neutroningadozásokkal szemben. — Ha a neutronelnyelő szabályozórudak magasan vannak, 5 méteres letolásukhoz (vagy leesésükhöz) szükséges idő hosszabb, mint 1 másodperc. Az instabillá tett (túlmoderált, xenon-mérgezett, automata-kontrolltól megfosztott) reaktor reakcióideje a pozitív visszacsatolással szemben kisebb, mint 1 s. Ilyen állapotban a reaktorvezérlési szabályzat minden akciót tilt. Mint a szovjet vizsgálat képviselője kijelentette: "Ilyen állapotban még a miniszterelnöknek sem volna joga a tervezett kísérlet engedélyezésére."

1.23, 04 másodperc: A hőteljesítmény 0,2 GW. A kísérlet elkezdődik. Az operátor kíván a reaktor kizárólagos irányítója lenni, ezért a vészleállási automatikát is kikapcsolja. A második turbinához vezető szelepeket lezárja.

1.23, 20 másodperc: A szelepek lezárása folytán emelkedik a hőmérséklet. Ilyen helyzetben a vészleállási automatika a szabályozórudak beejtésével lefojtaná a reaktort, de ezt az automatikát korábban kikapcsolták.

1.23, 21 másodperc: A szabályozórudakat kézi vezérléssel lefelé mozgatják, de túl lassan. A szabályozórúd alsó része grafitból készült, felső része pedig neutronelnyelő bór-acél ötvözet. Amint a grafit-rész behatol a reaktorba, vizet szorít ki. Így az enyhén reaktormérgező víz helyét a neutron el nem nyelő grafit foglalja el. Ennek folytán a neutronsokszorozási tényező néhány százalékkal emelkedik.

1.23, 31 másodperc: A növekvő neutronsokszorozás miatt helyileg gyorsan emelkedik a neutronsűrűség, de a lokális ellenőrző rendszer ki van kapcsolva.

1.23, 40 másodperc: A reaktor hőteljesítménye fél perc alatt 0,32 GW értékre nőtt fel. Az operátor vészleállítás mellett dönt, megnyomja az AZ5 jelű gombot, hogy beejtse a neutronelnyelő szabályozórudakat.

1.23, 43 másodperc: A termikus teljesítmény 1,4 GW és másodpercenként megduplázódik. A reaktor lokálisan prompt-kritikussá válik. (Nem csak az összes keletkező neutron, de már a közvetlenül a hasadásból származó prompt-neutronok is elegendőek a láncreakció gyorsuló fenntartásához. Bármely ember vagy automata által vezérelt szabályozás csak a bétabomlásokat követően késve kilépő neutronokat foghatja el. Prompt-kritikus állapotú reaktor függetlenül bármiféle külső szabályozástól.) Megszólal a túteljesítmény-riadó. A hirtelen felmelegedés egyenlőtlen hőtágulást okoz, minek folytán a szabályozórudak csatornái elgörbülnek, eltörnek. A szabályozórudak nem érnek le a reaktor aljára.

1.23, 45 másodperc: A hőteljesítmény 3 GW. A láncreakció a 4. számú reaktor mindkét oldalán globálisan megszabad.

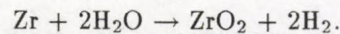
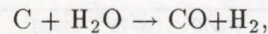
1.23, 46 másodperc: A hűtővíz elforr, buborékok képződnek. A (enyhén-neutronelnyelő) könnyűvíz távoztával a pozitív üregtényező miatt a neutronsokszorozás tovább fokozódik.

1.23, 47 másodperc: A magas hőmérséklet és a hőtágulás miatt az urán fűtőelem-rudak felrepednek. (A láncreakció leáll.)

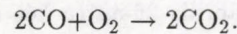
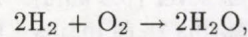
1.23, 48 másodperc: A vízvezeték-csövek felrepednek.

1.23, 49 másodperc: 45 másodperccel a kísérlet megkezdése után: A víz forrása termikus robbanást okoz. A reaktor belseje kinyílik (5. ábra).

1.24 óra: Normális körülmények között a lassító-grafit, a hűtővíz és a fűtőelemek cirkónium-burkolata nem érintkezik egymással. Most kapcsolatba lépnek. 1000, ill. 1200 °C felett kémiai reakciók indulnak be:



A gyúlékony hidrogén és szén-monoxid keveredik a külső levegővel, ez pedig egy második (most már kémiai) robbanáshoz vezet:

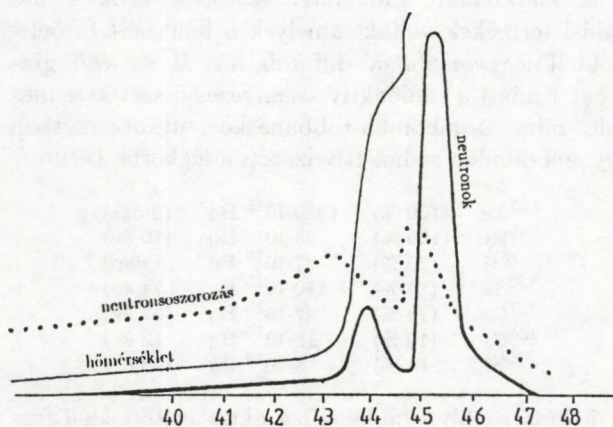


A csernobili reaktor nem volt biztonsági épületbe zárva. A robbanás hatására beomlik a tetőszerkezet. Radioaktivitás kerül a légkörbe.

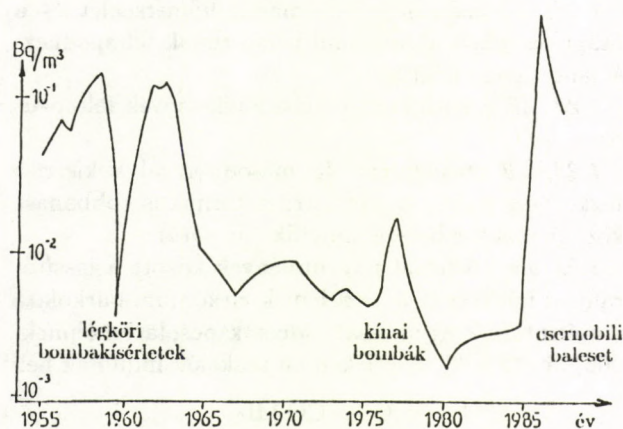
Április 26 – május 5: Az épületben keletkező tüzet csakhamar eloltják, de a felnyílt reaktorban a tűz a grafit mind nagyobb hányadára terjed ki. A magas hőmérsékleten a fűtőelemekből a grafitba diffundál minden illékony hasadási termék (Xe, Kr, I) és a könnyen mozgó fémek is (Cs, Te). A grafit égése során ezek a füsttel a légkörbe jutnak. Végül május 5-én a reaktort homokkal, ólommal takarják le, a tüzet elfojtják, a radioaktivitás kiáramlása gyakorlatilag megszűnik. Ez a tragikus hét rövid története. A belső operátor és a kívülről jött villamosmérnök, a tragédia eme két fiatal "hőse" a reaktor biztonságát szerette volna fokozni azáltal, hogy megfejlik a turbínakerekek forgási energiáját, ezért csak az elektromos adatokra figyeltek, azokat tekintették fontosnak kísérletük szempontjából. (Nem törődtek a nukleáris láncreakció dinamikáját jelző változókkal.) A robbanás folytán mindketten azonnal meghaltak a helyszínen. Nevük: Valerij Hodjemszik és Valdimir Szasjonok volt. A következő héten 28-an haltak meg a 4. számú reaktor közelében szenvedett sugárzástól, köztük tűzoltók is. Még többen foglalkoznak meghalni Európa-szerte az elszenvedett alacsony-szintű besugárzás késő hatásai (leukémia, rák) következtében.

Az aktivitás egysége 1 Bq=1 Becquerel=1 bomlás másodpercenként. A 20. század történetének nagy radioaktív szennyezései a következők voltak:

Hirosimai bomba (1945)	0,1·10 ¹⁸ Bq
Modern hidrogénbomba	0,1·1·10 ¹⁸ Bq
Windscale reaktorbaleset (Anglia, 1957)	0,04·10 ¹⁸ Bq
Harrisburgi reaktorbaleset (USA, 1980)	0,001·10 ¹⁸ Bq
Csernobil reaktorbaleset (SzU, 1986)	4·10 ¹⁸ Bq



5. ábra Az utolsó másodpercek eseményeinek számítógépes rekonstrukciója

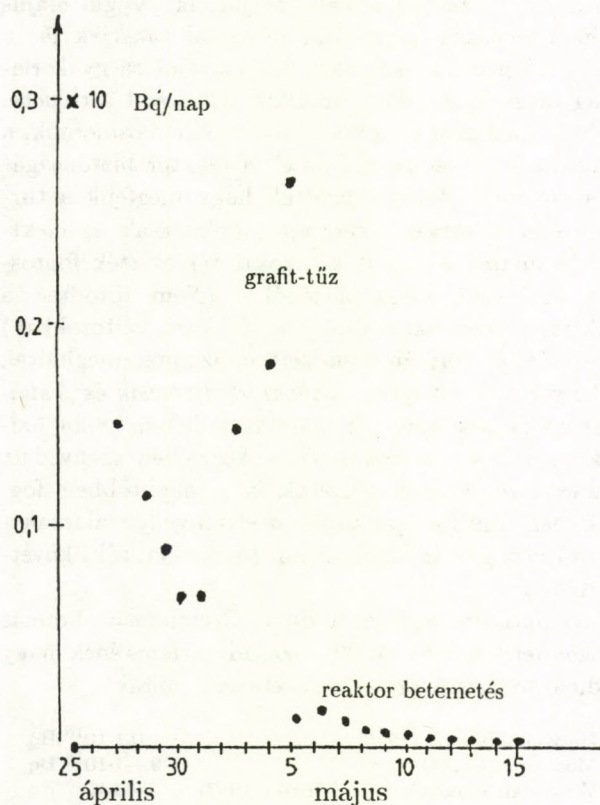


6. ábra Éves levegőszennyezés Magyarországon

Látjuk innen, hogy a csernobili léghőrszennyezés összemérhető nagyságú a léghőrsi atomfegyver-kísérletek együttes szennyezésével (6. ábra). A radioaktivitás kiszabadulása április 26 és május 4 közt történt, és két csúcsa volt: április 26-án (a két robbanás) és május 4-én (a grafitűz maximuma, közvetlenül annak elfojtása előtt) (7. ábra).

Minden reaktorbaleset a hétvégeken következik be hajnalban. Április 26-a az ortodox húsvét nagy-szombatja volt. A főnökök a dácsáikban pihentek. A jelenlévő közegek fő törekvése az eltussolás volt:

gázrobbanás



7. ábra Csernobil aktivitás-kibocsátása

a balesetet épülettüzként értelmezték, amit pár óra alatt sikerült eloltani. Ez napokkal késleltette a széleskörű riadót és kitelepítést.

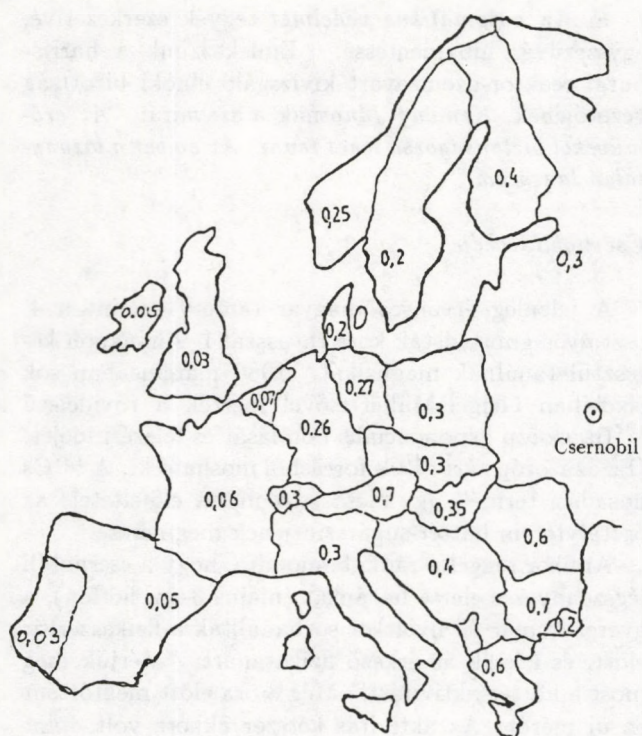
Szerencsére, április 26-án, szombaton reggel a szél északnyugat felé fúj, el Kievtől, lakatlan mocsarak fölé sodorva a radioaktivitást. A szennyezés Finnországot és Svédországot is érte, ahol az első nyilvános riadó történt. Szombat este nyugati irányba fordult a szél, Lengyelország, Skandinávia, Skócia felé. Vasárnapra csökkent a radioaktivitás kibocsátása, ez a szél fordultával Németország, Csehszlovákia, Észak-Olaszország fölé jutott el. (Innen származik az az aktivitás is, ami a május elsejei ünnepen esővel Északnyugat-Magyarországot érte.) Közben újra fokozódni kezdett a radioaktivitás kiáramlása, amint a grafitűz terjedt a reaktorban. Egy hét múlva végetért a Kievnél adott kegylmi idő: a szél dél felé fordult. Sajnos, a kievi hatóságok nem éltek az első hét adta lehetőséggel: a gyermekek kitelepítését csak a radioaktív szennyezés megérkezése után kezdték meg. A radioaktív szennyeződés második nagy hullámát Románia és Bulgária fölé sodorta az északi szél. (Ez Magyarországra nagy kerülővel délkelet felől lépett be. Magyarország szennyeződése — 8. ábra — mérsékelt volt, hála a Kárpátok koszorújának. A kihullás a csapadéktól függően egyenlőtlenül oszlott el. A legszennyezettebb Budapest lett, ami nem a szélnek és esőnek tulajdonítandó, hanem a városi füstködnek. A radioaktív ionok az aeroszolra tapadnak, ami a város fölött lebegett. Leülepedése kb. 50000 Bq/m² felületi szennyeződést okozott. A Csernobiltól kb. 800 km-re eső Magyarország átlagos felületi szennyeződése 5000 Bq/m²-t tett ki.) A levegőt a májusi és júniusi esők mosták tisztára, no meg az illó aktív anyagok elbomlása. Az év végére a helyzet lassan normalizálódott. (Hazánk léghőrének Csernobil okozta átmeneti szennyeződése ugyanolyan nagyságrendű volt, mint a korai 1960-as években, a léghőrsi atomfegyver-kísérletek tetőfokán, 6. ábra.)

A következő évek

A kiszabadult radioaktív izotópok azok a hasadási termékek voltak, amelyek a felhasadt fűtőelemekből leggyorsabban diffundáltak át az égő grafitba. Emiatt a radioaktív szennyezés összetétele más volt, mint atombomba-robbanáskor, utóbbi esetben ugyanis minden radioaktív izotóp a léghőrsbe kerül.

¹³⁵ Xe	(100 %)	1680·10 ¹⁵ Bq	(9 óra)
⁸⁵ Kr	(100 %)	35·10 ¹⁵ Bq	(10 év)
¹³¹ I	(20 %)	37·10 ¹⁵ Bq	(8 nap)
¹³² Te	(15 %)	150·10 ¹⁵ Bq	(3 nap)
¹³⁷ Cs	(13 %)	47·10 ¹⁵ Bq	(27 év)
¹³⁴ Cs	(10 %)	18·10 ¹⁵ Bq	(2 év)
⁹⁰ Sr	(4 %)	8·10 ¹⁵ Bq	(28 év)

Legfontosabb a biológiailag aktív izotópokkal foglalkoznunk. Ilyen a jó d (amit állat és ember a pajzsmirigybe épít be), a cézium (amit a szervezet a



8. ábra Európai dózis-elkötelezettségek

káliummal összetévesztve gyűjt össze), a stroncium (ami a kalciummal összetévesztve került a csontokba). Légköri atomrobbantások esetén a fővesélyt a ^{90}Sr képezi, amely a $\text{Ca}_3(\text{PO}_3)_2$ -at tartalmazó csontokban gyűlik össze, a csontvelő közelében, ahol a vörös vérszövet képződnek, így az leukémiára vezethet. Szerencsére a stroncium lassú diffúziója miatt Csernobil ^{90}Sr kibocsátása a vártnál kisebb volt. Ez volt az egyik bizonyíték, amiből megtudtuk, hogy a fűtőelemek teljes anyaga nem kerül a légkörbe. (A grafiból mintegy 10 % égett el.)

Rövidtávon a ^{131}I volt a legveszélyesebb. Májusban gyorsan nőtt a fű, magábaszívva az esővízből a ^{131}I -ot. A tél múltával már legelőre hajtották a teheneiket, azok tejükbe sűrítették a jódot, hogy így fedezék növekvő borjaik fokozott jódigényét. Ezt a tejet ember-gyerekek is megihatták, akiknek szervezete a növekvő pajzsmirigybe összpontosította a felvett jódot, vele a sugárzó ^{131}I izotópot. Ez a sugárterhelés pajzsmirigy-rákokat okozhat egy évtized múltán. (Valóban, a tejben 2000 Bq/liter aktivitást, az emberi pajzsmirigyben 600 Bq/személy aktivitást ismertünk. De védekezni lehetett ilyen sugárterhelés ellen: májusban megtiltották az állatok legeltetését, megsemmisítették az érintett területekről származó aktív tejet, csökkentették a gyerekek friss-tej fogyasztását. Ez a veszély júniusra elmúlt: a ^{131}I lebomlott, hazánk a ^{131}I szennyezést kivédte.)

A hosszútávú, ma is ható biológiai szennyezés fő forrása a ^{137}Cs , ami a talajra kihullva ott 27 évig és még tovább megmarad, csak geológiai felhígulással csökkenve. Ez bekerült a zöldségbe, eperbe, gombába (amik gyorsan nőttek 1986 májusi esőinek hatására),

és bekerült a legelő állatok (rénszarvas, őz, nyúl) szervezetébe is. Ezért a zöldség és hús kereskedelmét, importját, fogyasztását erősen ellenőrizték egész Európában (és ellenőrzik mindmáig). Északon a rénszarvas, nyugaton a birka fogyasztása soká tiltott volt. (Ez kereskedelmi trükkökre is módot adott. Például Ausztria, Németország, Olaszország korlátozni próbálta a magyar eredetű zöldség és gyümölcs bevitelét, hiszen az Keletről származik. Nehéz volt meggyőzni az ottani hatóságokat, hogy a radioaktív kihullás Magyarországot kevésbé érte el, mint őket. Tanszékünk is erőteljesen résztvett a friss élelem radioaktív szintjének ellenőrzésében.)

A dózis egysége 1 mSv=1 millisievert. Ez olyan biológiai hatásnak felel meg, ami egyenértékű testkilogrammonként 0,001 Joule ionizációs energiát keltő gamma-sugárzással. Ezt az egységet használjuk, hogy leírjuk Csernobil biológiai hatását.

A lakosságot évente átlagosan 3 mSv sugárterhelés éri. (Ebből kb. 1 mSv a radon belélegzett bomlástermékeiktől ered. A radon a talajban és építőanyagban lévő urán bomlástermékeként szivárog ki a levegőbe. Róla a Fizikai Szemle májusi tematikus számában lesz szó.) Az orvosi röntgenvizsgálatok átlagos sugárterhelése Európában kb. 0,7 mSv évente. (Fogröntgen 0,2 mSv, mellkasröntgen 1 mSv, bélröntgen még több.) A nukleáris balesetekből adódó sugárterhelések a következők:

Hirosima, a fekete esőben	400 mSv
Windscale (Anglia), 10 km távol	80 mSv
Harrisburg (USA), a városban	46 mSv
Pripjat (SzU), város Csernobil mellett	200 mSv
Európa erősen fertőzött területe SzU-n kívül	1 mSv
Magyarország (átlag), Csernobiltól 800km-re	0,25 mSv

Az átlagos európai dózis 0,3 mSv/fő, Délnyugat-Ázsiában és Északamerikában 0,07 mSv/fő, máshol elhanyagolható. Nem zérus érték, de a csernobili eredetű sugárterhelés a legtöbb országban a természetes háttér értéke alatt marad.

A hirosimai atombomba késleltetett (leukémiát, rákot okozó) hatását tanulmányozó japán-amerikai bizottság következtetése szerint a halálos kockázat $30 \cdot 10^{-6}/\text{mSv}$, legalábbis ezt észlelték a 100 mSv mértékű sugárterhelés esetében. Általában feltételezik, hogy a kockázat/dózis összefüggés lineáris, így a $30 \cdot 10^{-6}/\text{mSv}$ arány alapján számítható az alacsonyabb sugárterhelés kockázata is. — Ezt a nézetet ma többen támadják. Szaporodik a tapasztalat, hogy olyan helyeken, ahol a talaj radioaktívabb, nem magasabb a rák-halandóság. Ha így van, akkor a sugárkockázatnak van egy érzékenységi küszöbe: a rák kockázat csak kb. 10 mSv dózis felett kezd növekedni. E küszöböt az magyarázhatja, hogy néhány mSv dózis aktiválhatja a szervezet immunrendszerét (így a hibajavító enzimeket), mint a védőoltás teszi. Az így aktivált védőrendszer jobban ellenállhat további károsodásnak, mint a felkészületlen szervezet. Ezt a felfogást még nem fogadták el általánosan. —

A kockázat/dózis extrapoláció alapján azt mondhatjuk, hogy az alacsony sugárterhelés kockázati aránya 0 és $30 \cdot 10^{-6}$ /mSv közt lehet. Így annak valószínűsége, hogy egy átlag európai Csernobil folytán kapott rákban hal meg, $10 \cdot 10^{-6}$ vagy kisebb. Északamerikában és Délnyugat-Ázsiában $2 \cdot 10^{-6}$ /fő vagy kisebb. Ezt az értéket azzal kell egybevetni, hogy az ember 10–20% valószínűséggel fog leukémiában vagy rákban meghalni. (Magyarországon a csernobili katasztrófa által okozott többlet-kockázat $7,5 \cdot 10^{-6}$ /fő vagy kisebb. Az idézett felső érték kb. egy csomag cigaretta elszívásával, egy tüdőrontógennel, egy Budapest-New York repülőúttal összemérhető kockázatot jelent.)

Úgy tűnik, nyugodtan alhatunk Közép-Európában. Valóban nyugodtan? 10/millió fő valóban alacsony, de ha figyelembe vesszük, hogy százmilliókat ért el ekkora kockázat (8. ábra), akkor az átlag személyes dózis és népességszám szorzataként számított kollektív dózis többeszerre fel nőhet. (500 millió európai kollektív dózisa 150 mSv-millió fő, az ennek megfelelő késleltetett veszteség többeszer tehet ki. Ha a csernobili nukleáris katasztrófa vagy a bhopali kémiai katasztrófa, vagy az egyhetes londoni füstköd 1952 decemberében, vagy az Egyesült Államok útjain egy hónap alatt bekövetkező autóbalesetek többeszer ember életét követelik, akkor ebbe aligha lehet belenyugodnunk, még akkor is, ha e számok eltörpülnek a hirosimai és nagaszaki bombák áldozatai, vagy a jelen békeévek ázsiai háborúinak áldozatai száma mellett.)

A nukleáris energia jövője

Nem vállalkozhatunk itt arra, hogy megtárgyaljuk a csernobili katasztrófa közvéleményre gyakorolt hatását. A nukleáris erőművek építésére vonatkozó tanulságok így foglalhatók össze:

A. Ne üzemeljenek *túlmoderált* reaktorok. A működő túlmoderált reaktorokban meg kell növelni a ^{235}U dúsítási arányát, ilymódon lenyomva a *lassítóközeg/fűtőelem* arányt, ami a rendszert alulmoderáltá alakítja.

B. Inkább épüljenek *kisebb* reaktorok, ahol a radioaktív szennyeződést legrosszabb kimenetelű üzemi zavar esetén is bezárva tartja a túlnyomás ellen megerősített épület.

C. Le kell *rövidíteni* a védelem reakcióidejét azáltal, hogy üzemi zavar esetén gáznemű neutronelnyelő anyagot fújnak be vagy bórsavas vízzel árasztják a reaktort. Az elárasztásra inkább a gravitációt használják, mint szivattyúkat.

D. A reaktorokat esetleg helyezték *föld alá*, ahogy azt *Andrej Szaharov* és Teller Ede ajánlotta. Ez az eljárás reaktor-üzemi zavar esetén éppúgy megakadályozhatja a légkör elszennyeződését, mint azt a földalatti atomrobbantásoknál teszi.

E. Az *automatikus védelmet* tegyék szerkezetivé, egyszerűvé, hibamentessé. Emlékezzünk a harrisburgi reaktor-üzemi zavart kivizsgáló elnöki bizottság vezetőjének, *Kemény János*nak a szavaira: "Az erőműveket biztonságossá lehet tenni. Az ember a bizonytalan láncszem."

Csernobil leckéje

A jelenleg érvényes magyar tanterv szerint a 4. osztályos gimnazisták kora tavasszal 1–2 hónapon keresztül tanulnak magfizikát. 1986 márciusában sok iskolában Geiger-Müller-csővel mérték a rövidéletű ^{137}Ba izotóp exponenciális bomlását és felezési idejét. (Ez az izotóp zárt ^{137}Cs forrásból mosható ki. A ^{137}Cs hasadási termék, így olcsó.) A mérés előfeltétele az osztályterem háttér-sugárszintjének megmérése.

Amikor reggel a rádió bementa, hogy a csernobili légszennyezés elérte hazánkat (május 3-án, hétfőn), a gyerekek már fél nyolckor sorbanálltak a fizikaszertár előtt, és kérték az érkező fizikatanárt: "Mérjük meg most a háttér-aktivitást!" Még 8 óra előtt megtörtént az új mérés. Az aktivitás kétszer akkora volt, mint márciusban az osztályban! "Nyissuk ki az ablakokat, hadd jöjjön be a radioaktív levegő!" Az aktivitást újra mérték, most már nyitott ablak mellett. Az jóval kisebbnek adódott mint ablaknyitás előtt!

A magyarázat: az éj folyamán az épület téglafalából kiáramló radon felszaporodott a szobában. (A téglában mindig jelen van urán a bomlástermékeivel együtt.) A házban belüli radont távolította el a szellőztetés. Ezt a leckét aligha felejtik el diákok: együtt élünk a radioaktivitással, és az évente belélegzett radon dózisa (kb. 1 mSv/év) felülmúlta a Csernobiltól kapott teljes dózist (0,25 mSv).

Azokban a napokban a diákok szemében a fizikatanárok voltak a legfontosabb és legmegbízhatóbb személyek. Tanszékünk a katasztrófát követő 4 napon belül (a szovjet hírzárlat teljes feloldása előtt) elmondta nekik: milyen a csernobili reaktor, miben különbözik a paksi reaktoroktól, mi lehetett az események valószínű menete, mekkorára becsülhető a kiszabadult aktivitás, és mit mérhetnek az iskolában. Így a diákok mérték a cipőtalp aktivitását (és hazaérve maguktól papucsra cserélték utcai cipőjüket). Megmérték a talaj és fű aktivitását az esővíz-lefolyónál, a saláta aktivitását megmosás előtt és után (majd megkérték anyut, hogy jól mossa meg a zöldséget). Kevesebb gombát és epret ettek, de megvásárolták az (akkor érhetően csökkent árú) spenótot, ha előzőleg azt tapasztalták, hogy lemosható róla a radioaktív ürlepedés. Bíralták a hatóságot a ^{131}I által szennyezett tej kiöntéséért. ("Miért nem csinálnak belőle sajtot, amiből három hónap múlva kibomlott volna a ^{131}I ?") Figyelték az aktivitás fokozatos lecsökkenését júniusban. Végül pedig 0,25 mSv adatot hozzáadtak fizika munkafüzetük táblázatához,

amelynek ez volt a felirata: "Mekkora sugárterhelést kaptam ebben az évben?"

Ma a magfizika az egyik legnépszerűbb fejezet a gimnáziumi fizikában. A Geiger-Müller-cső a tanárok kedvenc demonstrációs eszközévé vált. A savanyú-esőfigyelő iskolahálózat mellett kiépült a radon-figyelő iskolák hálózata is.

Csernobil több volt, mint üzemzavar. Katasztrófa volt. A kiszabadult ^{137}Cs évtizedekig velünk lesz, akárcsak a légköri fegyverkísérletek által szétszórt

^{90}Sr . De legalább látjuk, hogy a nyíltság és megértés inkább kifizetődik, mint az eltussolás vagy pánik. Látjuk, hogy a magfizikai alapfogalmak, a pozitív és negatív visszacsatolás, szerkezeti stabilitás és instabilitás, valószínűség és kockázat, végül pedig a globális felelősség megtanítható az ifjúság széles rétegeinek. Ez is feltétele a demokráciának, az állampolgári döntőképeségnek. Reméljük, hogy a következő nemzedék döntéseiben jobban bízhatunk majd, mint sajátunkéban az elmúlt évtizedek folyamán.

A MAGYAR MAFFIA CHICAGÓBAN

Alvin Weinberg

Oak Ridge, USA

Wigner Jenő és a Hanford Reaktor

1939-ben, a háború kitörése táján biofizikus voltam, az orosz *Nicolas Reskoskivel* dolgoztam a matematikai biofizikában, meg *Karl Eckhardt* professzorral. Ő volt az, aki 1941 nyarán megkért, segítsék neki egy számításban, ami az Uránium Tervvel volt kapcsolatos. (Ez még a Manhattan Terv előtt volt.) A neutronok diffúziós hosszát kellett kiszámolni berilliumban. E feladatra Chicagó volt kijelölve, akkor még érdekelték őket a berillium, mint egy lehetséges moderátor. Eckhardt professzor ezt mondta nekem: — "Gyere és dolgozz ezen velem félidőben egy darabig." — Azt érezte, hogy az egész nem fog menni, így később visszatérhetek a reális munkához: a biofizikához. A támadás Pearl Harbor ellen hat hónappal később következett be, így én ezután tovább dolgoztam a témán.

Akkortájt — 1941 végén — döntöttek úgy, hogy az egész munkát Chicagóba összpontosítják. Ez *Arthur Compton* döntése volt, mert ott volt az ő tanszéke is, és mert testvére az M.I.T. elnöke volt, mint ilyen, jó befolyással bírt a kormánynál. Így Chicagóba mentünk. Ide jött *Fermi* csoportja a Columbia Egyetemről, meg *Wigner Jenő* Princetontól. Eckhardt csakhamar abbahagyta a nukleáris munkát, mert szonár (tengeralatti hang) kutatásra tért át (a tengeralatti hadviselés céljaira), így Kaliforniába ment. Később kompetens ocnográfus vált belőle. Távozásakor megkérdeztem: — "Mihez kezdjek Ön nélkül?" — Eckhardt nagylátókörű ember volt, és így válaszolt: — "Sohse aggódj, majd jön *Wigner*!" — Addig soha nem találkoztam *Wigner Jenő*vel, de hallottam róla, amikor molekulafizikával foglalkoztam. Így azután 1942 januárjában találkoztam először *Wigner*rel. Még nem telepedett meg teljesen Chicagóban: egy hétre jött Chicagóba, a másik héten Princetontban működött. Időpontokban állapodott meg leendő munkatársaival. Soha nem felejttem el: az én időpontom éjjel volt. Éjjel érkeztem dolgozószobájába. Megkérdezte, mit csinálok. Elmondtam, utána *Wigner* javasolta: csináld így és így. Jobban megértette a problémámat, mint én magam. Semmi kétség:

Chicagóban két domináló tudományos elme volt a Tervben: *Fermi* és *Wigner*. *Fermi* vezette a kísérleti munkát, *Wigner* az elméleti kutatást.

Az elméleti csoport nagyon fiatal volt, *Wigner* sem volt idősebb 39 évesnél. Mostanról visszatekintve látom, hogy egész munkát nagyon fiatal emberek végezték. *Wigner* mellett a legkiválóbb elméleti fizikus *John Archibald Wheeler* volt, ő szintén Princetontól jött. *Robert Christy* később érkezett, belőle a Cal Tech provostja lett. Egy másik fiatalember, aki az elméleti csoporthoz csatlakozott, *Maurice Goldberger* volt. Őt elvitték a hadseregbe, de mivel résztvett a Manhattan Tervben, visszaküldték hozzánk, és akkortájt nekem dolgozott.

Nagyon hamar, 1942 elején megtörtént a döntés, hogy plutónium termelésére reaktort kell építeni. Az első *Fermi*-féle reaktornak nem volt hűtése. A plutóniumtermelő reaktort héliummal kívánták hűteni. *Szilárdnak* nem tetszett a hélium, ő bizmutot ajánlott. (A bizmut neutron befogási keresztmetszete nagyon alacsony.) De *Wigner* gyakorlatiasabb volt, mint *Szilárd*. Majdnem mindig támogatta *Szilárd* javaslatait, de most ragaszkodott hozzá, hogy az első plutóniumtermelő reaktort vízzel hűtsük. Az egész Tervben *Wigner* volt az egyetlen, aki teljesen áttekintette annak fizikáját, egyúttal magabiztos volt műszaki tekintetben is. Ismerte az anyagokat, jó érzéke volt a kémiához. Magába egyesítve minden képességeket, vizet javasolt a reaktor hűtőközegéül. Ez nagy merészség volt, mert a víz (könnyű hidrogén) neutronelnyelése 1,5 %-ot elvett a neutronsokszorozási tényezőből. Abban az időben ez valós gond volt!

A központi feladat 1942-ben Chicagóban az volt, hogy bizonyítsuk: urán-grafit-máglyában lehetséges önfenntartó láncreakció. *Fermi* vezette az *exponenciális kísérleteket*. Csináltak egy 2m x 2m x 4m méretű urán-grafitrácsot, fenekére neutronforrást helyeztek el, majd mérték a neutronok eloszlását. Ezt a módszert *Fermi* találta ki. A neutronforrástól távolodva a neutronok sűrűsége exponenciálisan csökkent. Minél nagyobb volt a neutronsokszorozási tényező, annál messzebb jutnak el a neutronok. Így a tapasztalt neutroneloszlásból az elméleti csoportnak kellett kiszámítani a neutronsokszorozási tényezőt. Persze