



A magyar nukleáris kutatás-fejlesztési program jövőképe

Budapest, 2010. április-június

A magyar nukleáris kutatás-fejlesztési program jövőképe

Készítették:

Gadó János, Horváth Ákos, Végh János, Vidovszky István

MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet

Véglegesítették:

Gadó János, Aszódi Attila és Holló Előd, az OAH TT tagjai

Jóváhagyta az OAH Tudományos Tanács 2010. június 10-i ülése

Budapest, 2010. április-június

Előszó

A magyar nukleáris kutatás-fejlesztés céljainak, koordinálásának újragondolása nyilvánvalóan aktuális feladat, de a közelmúlt több történése ezt az újragondolást mindenképpen szükségessé teszi.

A kormány illetékes kabinetje 2009. szeptemberében határozatot hozott az új paksi blokkokkal kapcsolatos kormányzati teendőkről. A határozat egyik pontja a K+F erősítésére vonatkozik. Ennek nyomán az Országos Atomenergia Hivatal Tudományos Tanácsa (OAH TT) külön ülésen foglalkozott a teendővel. Az OAH TT határozata szerint

- A hazai nukleáris K+F-et erősíteni kell.
- A nukleáris K+F program előkészítésére, az érdekek egyeztetésére magyar nukleáris Technológia Platformot kell létrehozni.
- A munkálatok előkészítésére programjavaslat készül.

A magyar nukleáris kutatás-fejlesztési program jövőképe a programjavaslat első lépése. Az OAH TT ezt a dokumentumot 2010. június 10-i ülésén jóváhagyta.

Megjegyzendő, hogy a 2009. szeptemberi határozat kiemelten foglalkozik az oktatással és a szakemberképzéssel. Az ezzel kapcsolatos munkálatok előkészítése nem tárgya jelen dokumentumnak, bár a kutatás-fejlesztés és az oktatás természetesen szoros kapcsolatban állnak egymással.

Tartalomjegyzék

Előszó	1
1. A nukleáris energetika általános helyzete	3
1.1. Az atomerőművek generációi	3
1.2. A 4. generációs reaktortípusok fejlesztése	5
1.3. Mai fejlődési tendenciák	6
1.4. Az európai helyzet	7
2. A nukleáris energetika hazai helyzete és perspektívái	9
2.1. A kezdetek és a paksi blokkok	9
2.2. Új blokkok létesítése	14
3. Nemzetközi nukleáris energetikai kutatások	16
3.1. Világtendenciák	16
3.2. A fő európai kutatási irányok	18
4. A hazai nukleáris K+F program	21
4.1. A hazai nukleáris K+F fontossága	21
4.2. A kutatás fő céljai	22
4.3. A kutatás és a K+F program fő területei	24
4.3.1. Reaktoranyagok kutatása	24
4.3.2. Szimuláció és modellezés	25
4.3.3. A fűtőelemciklus zárása, a negyedik generációs atomerőművek fejlesztése	27
4.3.4. A kutatási infrastruktúrák fejlesztése	28
4.3.5. A nukleáris szakértelem megújítása a képzés és a tréning fejlesztése által	29
4.3.6. Lakossági tájékoztatás	29
4.4. A K+F program szervezése	29
5. Összefoglalás	32
6. Hivatkozások	33
7. Rövidítések jegyzéke	34

1. A nukleáris energetika általános helyzete

A maghasadáson alapuló atomenergetika műszakilag némileg ellentmondásos két fő célkitűzése az, hogy egyrészt a fenntartható fejlődésben fontos szerepet játszó energiaforrássá váljék, másrészt védett legyen a nukleáris anyagok és technika katonai vagy terrorista célú felhasználásától. Az atomenergetika egyéb célkitűzései, azaz a biztonság magas foka és a versenyképesség biztosítása, az iparág elmúlt időszakban elért eredményei alapján viszonylag könnyen teljesíthetőek.

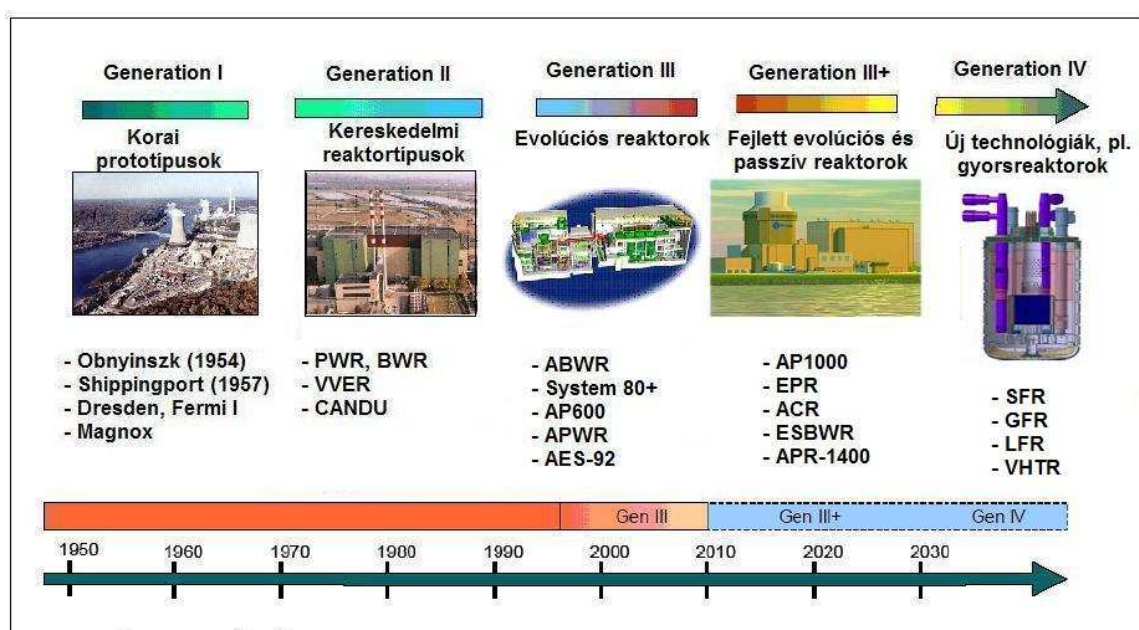
Az ezredfordulón a maghasadáson alapuló energiatermelést a szakmai hozzáértés elvesztése, a biztonság csökkenése és hosszabb távon a jelentéktelenné válás veszélye fenyegette. Mára – bár a kompetencia-vesztés veszélye továbbra is fennáll – ez a helyzet lényegesen megváltozott, az atomerőművek reneszánszáról szokás beszélni és kétségtelenül számos új atomerőmű megrendelése megtörtént, építésük folyamatban van. Ennek a változásnak az okai az alábbiak:

- terjed az a felismerés, hogy mind az üvegházhatású gázok kibocsátásának korlátozása, mind az ellátásbiztonság szempontjából előnyös az atomenergia használata, amint azt számos ország energiapolitikai nyilatkozatában deklarálta,
- a többi energiatermelési mód összességében egyelőre nem biztosítja a Föld lakosságának fenntartható fejlődését (főképpen ha a gyorsan fejlődő, de viszonylag még szegény országokra, mint Kína vagy India gondolunk),
- az atomenergia lényegében mentes az első számú közellenségnek kikiáltott, a feltételezett éghajlatváltozást feltehetőleg kiváltó üvegházhatású gázkibocsátástól (ugyanúgy, mint a legtöbb megújuló energiafajta),
- az atomenergetika biztonsági problémáit, amelyek a korábbi balesetekre vezettek, megoldották, ma már a technikai rendszerek biztonsága és az erőműveket működtető szervezetek biztonsági kultúrája sokkal jobb, mint a korábbi balesetek előtt,
- a fiatal tudományos-műszaki gárdának vonzó, izgalmas új feladatokat kell adni,
- az atomenergetika társadalmi elfogadottsága az elmúlt időszakban (a balesetek emlékének elhalványulásával) sokat javult, és így az atomenergetikai beruházások megtérülését a társadalmi ellenállás miatt esetleg megemelkedő engedélyezési idő kevéssé veszélyezteti.

1.1. Az atomerőművek generációi

Az atomerőművek még nem tekinthetnek vissza hosszú múltra, félévszázados történetük során azonban igen jelentősen fejlődtek, valamint a jövő erőműveinek a jelenleginél nagyobb kihívásokkal is szembe kell nézniük, ezért indokolt az erőművek generációkba sorolása. Négy markáns generáció különböztethető meg, amelyek az 1. ábrán bemutatott típusokból állnak:

- Az 1. generációt az 50-es és 60-as években épített prototípus energiatermelő reaktorok alkották, de ezek döntő hányadát ma már bezárták és leszerelték.
- A 2. generációba tartozik a világon ma üzemelő atomerőművi blokkok többsége, ezeket a 70-es és 80-as években építették. 2010-ben a világon 436 atomerőművi blokk működött, ezek összesen kb. 370 GW villamos teljesítményt képviseltek. A blokkok döntő többsége a nyomottvizes (PWR) és a forralóvizes (BWR) típusba tartozott, de számos blokk üzemelt a kanadai CANDU technológiával is [1]. Léteznek még egyéb, az előzőektől eltérő technológiával működő (pl. gázhűtésű) reaktorok is, de ezek súlya nem számottevő. A kiadott villamos teljesítményt tekintve a ma üzemelő reaktorok 65%-a PWR, 23%-a BWR, 12%-a pedig egyéb (főleg CANDU) típusú.



1. ábra: Az atomerőművek négy generációjának áttekintése

- A 3. generációt a 90-es években dolgozták ki a 2. generációs BWR, PWR és CANDU blokkok evolúciós továbbfejlesztésével. A fejlesztések legfontosabb célja a súlyos balesetek bekövetkezési valószínűségének, ill. a balesetek következményeinek jelentős mértékű csökkentése volt. Ide tartoznak a Japánban a 90-es években üzembe helyezett ABWR (forralóvizes) blokkok, a Mitsubishi nagyteljesítményű nyomottvizes APWR blokkja, a Westinghouse AP600 és az AES-92 jelzésű VVER-1000 blokk típus. A sehol meg nem épített AP600 utat mutatott a passzív rendszerek fokozott használata irányában.
- A 3+ generációra jellemző a passzív (külső energiabetáplálást nem igénylő) biztonsági rendszerek fokozott alkalmazása. Ebbe a kategóriába szokás pl. sorolni az EPR, AP1000, AES-2006 (VVER-1200) és az APR-1400 blokkot, valamint az AREVA-Mitsubishi közös fejlesztésű ATMEA1 típust.
- A 4. generáció kifejlesztését célul kitűző nagyszabású nemzetközi projekt 2000-ben indult az USA kezdeményezésére. A fejlesztések célja olyan inherensen biztonságos

reaktorok létrehozása, amelyek a jelenlegi típusokat meghaladják a nukleáris biztonság, a gazdaságosság, a katonai célokra történő fel nem használhatóság tekintetében, emellett jóval kisebb a bennük keletkező radioaktív hulladék fajlagos mennyisége (lásd [2]). Több típusnál célként jelentkezik a magas hőmérsékletű folyamathő előállítás és a hidrogéntermelés is. A jelenleg fejlesztés alatt lévő típusok közül néhány a század közepére alkalmassá válhat kereskedelmi üzemeltetésre.

Ma a 3. generációs blokkok néhány változatát építik a világon, mert 2. generációs blokkokat már nem, 4. generációs blokkokat még nem gyártanak, hiszen ez utóbbiak kutatása jelenleg folyik.

1.2. A 4. generációs reaktortípusok fejlesztése

A 4. generációs atomerőművek fejlesztésére irányuló Generation IV (Gen IV) projekt keretében az alábbi perspektivikusnak ítélt reaktortípusok szakmai megalapozását tűzték ki célul ([2], [3]):

- magas hőmérsékletű gázhűtésű termikus reaktor (VHTR)
- nátriumhűtésű gyorsreaktor (SFR)
- gázhűtésű gyorsreaktor (GFR)
- ólom-bizmut hűtésű gyorsreaktor (LFR)
- sóolvadékos reaktor (MSR)
- szuperkritikus nyomású vízhűtésű reaktor (SCWR)

A Gen IV valamennyi típusával szemben alapvető követelmény a magas szintű biztonság és megbízhatóság, a gazdaságosság, a jó hatásfok és a természeti erőforrások takarékos felhasználása, az energiatermelő folyamat során keletkező radioaktív hulladékok mennyiségének minimalizálása, továbbá a katonai célra való fel nem használhatóság. A Gen IV projekt alapvető célja olyan reaktortípusok kifejlesztése és üzembe állítása, amelyek zárt üzemanyagciklussal működnek. A fejlesztések mai állapota szerint a Gen IV reaktortípusok mindegyike a fejlesztés „prototípus előtti” stádiumában van. Reálisan ma az prognosztizálható, hogy a vizsgált Gen IV típusok körét a jövőben szűkíteni fogják, hogy a sikeresnek bizonyuló blokk prototípusa 2030 körül megépülhessen.

A 4. reaktorgeneráció fejlesztéséhez szorosan kapcsolódik a GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) nevű USA kezdeményezés (2006, lásd [2]). A GNEP az alábbi fontos problémák megoldását tűzte ki célul:

- a) *A nukleáris fegyverek terjedésének megakadályozása:* a koncepció szerint a nukleáris üzemanyag gyártása és újrafeldolgozása csak egy megbízható, de fejlett technológiával rendelkező országokból álló klubban történhetne.
- b) *Az ellátás folyamatos biztosítása:* egy globális nukleáris üzemanyagbank jönne létre, amely minden országnak biztosítaná a friss üzemanyagot.

- c) *Hosszú távú hulladékkezelés megoldása*: a fenti globalizált nukleáris piac működtetése csak a kiégett üzemanyagok kezelésének egy új, a mainál fejlettebb technológiájával lehetséges. A kiégett üzemanyag újrafeldolgozásával, a hasadási termékek és az aktínidák továbbégetésével kevesebb hulladék képződne, így a kiégett üzemanyag tárolók is hosszabb idő alatt telítődnének, sőt rövidebb idő alatt csökkenne aktivitásszintjük a természetes uránélfordulások szintjére.
- d) *A nukleáris energiához történő széleskörű hozzáférés biztosítása*: az USA kisméretű nyomottvízes termikus reaktorokkal látná el a fejlődő országokat, amelyektől a kiégett üzemanyagot visszavenné és feldolgozná.

A GNEP megvalósításához olyan üzemanyagciklusra lesz szükség, amely lehetetlenné teszi a plutónium katonai célokra való kinyerését a kiégett üzemanyagból. A kiégett üzemanyag központi újrafeldolgozása során a plutóniumot (és a másodlagos aktínidákat) szeparálják a többi radioaktív izotóptól és gyorsreaktorokban használják fel, ezzel mintegy zárják az üzemanyagciklust. A GNEP kezdeményezést az Amerikai Egyesült Államok kormánya ugyan gyakorlatilag befagyasztotta, de céljai mindenképpen iránymutatók az atomenergetika jövőképe szempontjából. A GNEP kezdeményezés gondolkodásra sarkallta mind Oroszországot, mind pedig a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséget egy nemzetközi, zárt nukleáris üzemanyag ciklus létrehozása ügyében.

1.3. Mai fejlődési tendenciák

A nukleáris energetika a 60-as és 70-es években világszerte gyorsan fejlődött, de ez a fejlődés a Three Mile Island (USA) atomerőmű 2. blokkján 1979-ben bekövetkezett, a zóna részleges megolvadásával járó súlyos baleset után megtorpant, majd a csernobili katasztrófa (1986) után megállt. Ez összefüggésben áll azzal is, hogy az atomenergetikai fejlesztéseknek kezdetben nagy lendületet adó olajválságokon sikerült úrrá lenni, és az olajár egy olyan szinten stabilizálódott, amely mellett a nagy beruházási költségű atomenergia versenyelőnye nem volt egyértelmű. Több jelentős ipari ország (pl. Németország) feladta nukleáris programját, világszerte atomerőművi blokkokat zártak be, vagy már elhatározott atomerőmű létesítésekről mondtak le (csak az USA-ban kb. 50 blokk építését törölték). Hazánkban és a volt szocialista országokban az átmenetet követő gazdasági nehézségek, valamint a VVER primerköri berendezések szinte kizárólagos szállítójának számító szovjet atomipar gyártási problémái miatt az atomenergetikai fejlesztések hosszú ideig álltak és kb. 2005-ig csak a már 1989 előtt megkezdett építkezések befejezésére törekedtek (lásd pl. Csehország és Szlovákia).

A stagnálási fázis a XXI. század elején elmúlt, alapvetően két fontos körülmény miatt. Az egyik tényezőt az olaj- és gázárak jelentik: energiapiaci elemzők szerint a 90-es éveket jellemző visszafogott olaj- és gázárak hosszú időre elmúltak, az árak – a jelentős ingadozások ellenére – tartósan magasak maradnak. A magas átlagár mellett felléptek az ismert politikai és ellátásbiztonsági problémák is, tovább növelve a gáz- és olajimportőr országok energetikai kiszolgáltatottságát. Ha a problémát európai szinten vizsgáljuk, akkor kezelése stratégiai gondolkodást és hosszú távú energiapolitikát igényel, mind nemzeti, mind EU keretekben.

A másik körülményt a globális klímaváltozással kapcsolatos aggodalmak és nemzetközi kötelezettségek jelentik. A szakemberek számára ma már nyilvánvaló, hogy a fenntartható fejlődéshez szükséges "tiszta" (azaz CO₂-kibocsátással nem járó) energiatermelésre az újfajta energiaforrások (megújulók és fúzió), illetve az új energiahordozók (pl. hidrogén) rövid- és középtávon nem jelentenek megoldást. Emiatt világszerte újból előtérbe került az atomerőművek alkalmazása, annál is inkább, mert a piacon ma kapható 3. generációs blokk típusok biztonsági mutatói olyan jók, hogy nagyszámú atomerőmű működtetése is biztonságosnak tekinthető.

A világhelyzet általános értékeléséhez az alábbi három fontos tényezőt még meg kell említeni:

- A fejlett országokban új atomerőműveket főleg a leszerelt fosszilis- és atomerőművek pótlására, de részben a növekvő energiaigények miatt is terveznek építeni. Nagy új kapacitásokra igény főleg a fejlődő országokban (különösen Kínában és Indiában) jelentkezik (lásd [4]), ahol a gyorsan fejlődő ipar és a modernizálódó, egyre több energiát használó háztartások igényével már ma sem képesek lépést tartani az erőmű beruházások.
- A világ mai ismeretek szerint felhasználható (feltárt és elvileg kitermelhető) uránkészletei végesek: a becslések szerint a jelenlegi bányák a ma működő és a 2030-ig üzembe helyezendő atomerőműveket még kb. 80-100 évig zavartalanul el tudják látni uránnal [4]. Ellátásbiztonság szempontjából megnyugtató körülmény, hogy ma a világtermelés kb. 50%-át két politikailag és gazdaságilag stabil ország, Kanada és Ausztrália adja. Az uránkészletek mellett a dúsítási kapacitás is korlátozhatja az atomerőművek elterjedését. A dúsítók jelenlegi összteljesítménye 54 millió SWU (itt a Separation Work Unit a szokásos mértékegység), ami mintegy 15 %-kal haladja meg a jelenlegi erőműpark szükségleteit. A gázdifúziós elven működő gyárakat fokozatosan leállítják és centrifugás berendezésekkel építenek új dúsítókat. 2015-re a várható kapacitás eléri a 69 millió SWU értéket. Az előrejelzések (lásd [14]) szerint, ha a világ atomerőművi összteljesítménye a 2020-ra tervezett 400 GW fölé megy, akkor a dúsítási kapacitást 80 millió SWU-ra kell növelni, ami technikailag lehetséges.
- A harmadik tényező a kiégett üzemanyag kezelése: ma ez jelenti az atomenergia általános társadalmi elfogadásának legnagyobb akadályát. A zárt üzemanyagciklus kialakítása a mai fejlesztések egyik legfontosabb célja, de ez a technológia a közeljövőben (kb. 20 éven belül) nem lesz gazdaságosan alkalmazható (a transzmutációval is hasonló a helyzet). Emiatt fontos, hogy a ma épülő atomerőművekben keletkező kiégett üzemanyag és nagyaktivitású radioaktív hulladék kezelésére és elhelyezésére legyen olyan stratégia, amely megfelelő választ ad a felmerülő biztonsági, környezetvédelmi és társadalmi kérdésekre.

1.4. Az európai helyzet

A világtendencia fokozatos változása nem maradt hatás nélkül az Európai Unióban sem. Az EU fokozottan érzékeny a fosszilis energiahordozókkal kapcsolatos problémákra, hiszen saját termelése gázból és olajból csak a fogyasztás egy részét fedezi. 2007 elején az EC (Európai

Bizottság) kiadta az EU energiapolitikájára tett javaslatát, ez lényeges elmozdulást jelentett az atomenergia alkalmazásával kapcsolatban [5]. A korábbi – lényegében elutasító – álláspont helyett az új politika megengedő, sőt támogató, azaz a nukleáris energia alkalmazását lehetséges alternatívának tekinti és EU támogatást helyez kilátásba a nukleáris biztonság fokozását célzó közösségi erőfeszítésekhez.

Az új európai energiapolitika középpontjában három fontos kritérium áll: **versenyképesség, ellátásbiztonság, fenntarthatóság**. A fenti három kritérium segítségével bármely potenciális energiaforrásról egyértelműen el lehet dönteni, hogy mennyiben képes hozzájárulni a kívánt alacsony szénfelhasználású („low-carbon”) gazdaság kialakításához, vagyis képes-e a gazdasági növekedést garantálni, miközben magas energiafelhasználási hatékonyságot biztosít és alacsony CO₂ kibocsátással jár.

A SET-PLAN (Strategic Energy Technology Plan, [6]) stratégiai terv az energiaszektor fenntartható fejlődéséhez szükséges és az EU által megvalósítandó intézkedéseket, illetve fejlesztéseket definiálja. Az alapvető cél, hogy növeljék az alacsony CO₂ kibocsátással járó energiatermelési technológiák kidolgozására és alkalmazására irányuló K+F+I erőfeszítéseket és a kapcsolódó pénzügyi ráfordításokat. A terv két időskálán vázolja fel a teendőket: az első fázis a 2020-ig, a második pedig a 2050-ig tartó időszakot öleli fel. A SET-PLAN több ún. technológiai platform (TP) létrehozását irányozza elő (pl. szélenergia TP), ezek egyike a Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNE-TP, [7]), amelyben az EURATOM a fenntartható nukleáris energiatermelés biztosításához szükséges rövid-, közép- és hosszú távú fejlesztési feladatokat, azok kereteit, valamint a K+F+I feladatok megvalósításához szükséges infrastruktúrát definiálta. Egy másik, a témakörhöz kapcsolódó európai technológiai platform az IDG-TP (Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste TP).

A SET-PLAN tervhez kapcsolódva jelenleg már hét European Industrial Initiative (EII) ipari kezdeményezés működik: szél, napenergia (fotovillamos), napenergia (hőtermelés), CO₂ megkötés és tárolás (CCS, carbon capture & storage), bioüzemanyagok, intelligens villamos energia átviteli hálózatok, nukleáris energia (maghasadáson alapuló technológia). Az SNE-TP-hez kapcsolódva ma egy EII létezik, ebben nagy iparvállalatok és kutatóintézetek vesznek részt. Ez a nukleáris EII alapvetően a nátriumhűtésű gyorsreaktor (SFR) prototípus kidolgozását tűzte ki célul, de alternatív technológiaként két másik gyorsreaktor típust is meg fog vizsgálni (a gázhűtésű GFR és az ólomhűtésű LFR típusokat). A GFR és az LFR közötti választás 2012 körül történik, majd a tervek szerint 2018 és 2020 között megépítik a kiválasztott alternatív típus demonstrációs reaktorát. 2007-ben emellett megalakult az Európai Nukleáris Energia Fórum (ENEF, [8]) is, melynek kifejezett célja a nukleáris energia európai alkalmazásának elősegítése.

Az új európai megközelítést részletesebben elemezve az alábbi fontos megállapítások tehetők (lásd a [9], [10] és [11] anyagokat). Az Európai Bizottság meghirdette a **20/20/20** célkitűzést, ez 2020-ig három fontos, javító hatású intézkedést irányoz elő:

- 1) az üvegházhatású gázok kibocsátásának **20%-os** mérséklése (az 1990-es kibocsátási szinthez képest),
- 2) a megújuló energiaforrások **20%-os** arányának elérése az összenergia-felhasználásban (Magyarország 2020-ra 13% megújuló energia részarány elérését vállalta),
- 3) az energiafelhasználás hatékonyságának **20%-os** növelése.

Az intézkedések végső célja az, hogy az átlagos globális felmelegedés mértéke **2 °C** alatt maradjon. Az ambiciózus célokkal az EU egyrészt a világ energiafelhasználás szempontjából leghatékonyabb régiója kíván lenni, másrészt fenn kívánja tartani globális vezető szerepét a megújuló energiaforrások felhasználásának terén. Ha távolabbra tekintünk, akkor 2030-ra 35 %-os, 2050-re pedig 60-80 %-os csökkentést irányoztak elő az üvegházhatású gázok kibocsátására.

A maghasadáson alapuló nukleáris energia már jelenleg is olyan energiatermelési eljárás, amely jelentősen hozzájárul az "alacsony szénfelhasználású" gazdaság kialakításához, mivel lényegében CO₂-mentes technológia (a felhasznált és beépített anyagok előállításánál keletkező CO₂-terhelés figyelembe vétele mellett is), költséghatékony és emellett megbízható energiaellátást nyújt. Jelenleg Európa villamos energia felhasználásának kb. 30 %-át atomerőművek termelik, a szélenergiához hasonlóan kis mértékű CO₂ kibocsátás mellett. További fontos körülmény, hogy a teljes üzemanyag ciklus biztosítható európai forrásokból.

Összefoglalva megállapítható, hogy a XXI. század első évtizedében a nukleáris energetika világ- és európai megítélése kedvező, az energiapolitikai légkör kedvez a nukleáris energia alkalmazásának, illetve az ehhez kapcsolódó kutatásoknak.

2. A nukleáris energetika hazai helyzete és perspektívái

2.1. A kezdetek és a paksi blokkok

Mihelyt az 1950-es évek közepén megnyílt az út az atomenergia békés felhasználása előtt, Magyarországon azonnal megvolt a szándék erre. Ennek jegyében létesült a KFKI reaktora (1959), az ország legjelentősebb kutatási nagyberendezése. Az atomerőmű üzembe lépésére 1982-ig kellett várni. Az előkészítés során kutató- és tervező intézetek, egyetemi tanszékek foglalkoztak atomenergetikával, és a Műegyetemen létrejött az atomenergetikai szakemberek oktatásának központja, az Oktatóreaktor is (1971).



A Budapesti Kutatóreaktor (BKR) látképe

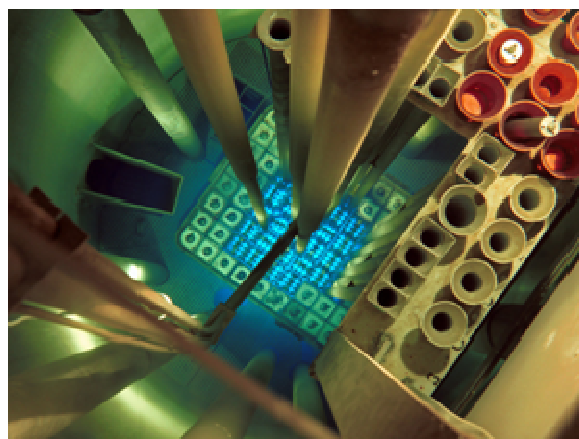


A BKR csarnok képe a kísérleti csatornákkal

A paksi atomerőmű szovjet tervezésű négy blokkját 1982 és 1987 között helyezték üzembe. A négy blokk, amelynek eredetileg $4 \times 440 \text{ MW}_e$ teljesítményét a közelmúltban emelték $4 \times 500 \text{ MW}_e$ -ra, a magyar villamosenergia-termelés 38 %-át és a -fogyasztás közel 32 %-át szolgáltatja. A blokkok tervezett üzemideje 30 év, de már megtörtént az 50 évre elképzelt üzemidő-hosszabbítás műszaki előkészítése és jelenleg zajlik az engedélyeztetés. A blokkok termelése várhatóan a 2030-as években fog megszűnni. Tekintettel a magyar erőműpark általános előregedésére, és a környező országok hasonló problémáira, teljes egyetértés van abban, hogy az üzemidő-hosszabbítás nélkül a magyar villamosenergia-szolgáltatás rövid időn belül ellehetetlenülne.



A BME Tanreaktor épülete (© BME NTI)



A BME Tanreaktor aktív zónája (© BME NTI)

A paksi VVER-440/V213 blokkok az atomerőművi blokkok 2. generációjához tartoznak, csakúgy, mint az Európában működő atomerőművi blokkok döntő többsége. A blokkok biztonsága európai mércével mérve is megfelelő, Magyarország EU-csatlakozási tárgyalásain ezzel

kapcsolatban érdemi kérdés nem merült fel. E pozitívan értékelhető helyzetnek az okai között említendő

- a VVER-440/V213 blokkok konzervatív tervezése
- a blokkok építése során alkalmazott minőségbiztosítási követelmények érvényesítése
- a szovjet tervezés gyenge pontját jelentő ember-gép kapcsolatnak időben történt kiváltása megfelelő eszközökre
- a hozzáértő üzemvitel kialakítása és fenntartása
- a blokkok biztonságának időben történt értékelése nemzetközi szinten elismert eszközökkel
- a törvényi háttér kialakítása, korszerű nukleáris biztonsági hatóság működtetése
- a blokkokon megvalósult biztonságnövelési program.

Az atomerőmű üzemeltetését kiegészítő technológiában 2003-ban egy INES-3 besorolású, ún. súlyos üzemzavar lépett fel. Az egészségkárosodással nem járó üzemzavar fő oka az erőmű rendszereitől függetlenül üzemeltetett, egy időközben felmerült probléma megoldására készült ún. tisztítótartály tervezési hibája volt, de az üzemzavarhoz jelentős mértékben hozzájárultak az erőmű üzemeltetőjének hibái is. Az üzemzavar következményeit felszámolták, és az esetből megfelelő következtetéseket vontak le a biztonsági kultúra fejlesztése vonatkozásában.

A paksi atomerőmű társadalmi elfogadottsága kiemelkedően jónak mondható, a lakosság (a 2003-as üzemzavar ellenére is) megbízik az erőmű működésében. Ennek számos tényezője van, amelyek elemzése nem tárgya jelen anyagnak.

Az erőmű blokkjaiban kiégetett fűtőelemeket öt évig a reaktor melletti vizes pihentető medencében tárolják és hűtik. A paksi atomerőmű kiégetett fűtőelemeit egy ideig visszaszállították Oroszországba. A későbbiekben létrehozták a Kiégetett Kazetták Átmeneti Tárolóját (KKÁT), amely a kiégetett fűtőelemek legalább 50 évig tartó befogadására szolgál. Itt a fűtőelemeket passzív módon, a levegő természetes cirkulációs áramlásával hűtik.



A Kéregt Kazetták Átmeneti Tárolója (KKÁT, © RHK Kht.)

Bátaapátiban most kerül üzembe a kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok tárolója, amely magába fogadja a paksi atomerőmű négy blokkjában keletkező ilyen hulladékokat.



A Bátaapáti Nemzeti Hulladéktároló fogadóépületének (NRHT, © RHK Kht.)

A Nyugat-Mecsekben megkezdődött egy olyan képződmény, a Bodai Aleurolit Formáció kutatása, amely alkalmasnak tűnik a nagyaktivitású hulladékok (kiégett fűtőelemek, azok reprocessálásának hulladéka, leszerelési hulladék) végleges mélygeológiai elhelyezésére. Ez a tároló legkorábban a XXI. század harmadik harmadában léphet működésbe. Természetesen a Nyugat-mecseki tároló létesítése mellett alternatív megoldásokat is vizsgálnak.

A leszereléssel és a hulladékokkal kapcsolatos problémák megoldása Magyarországon az állami tulajdonban lévő Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. feladata. A szükséges pénzügyi fedezet biztosítására az atomerőmű(vek) évente befizet(nek) a Központi Nukleáris Pénzügyi Alapba.

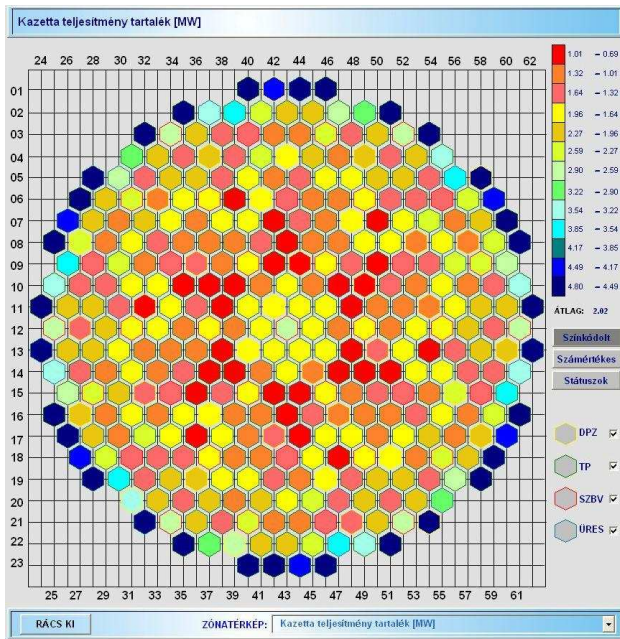
A paksi atomerőműben felmerülő problémák megoldásában (a szovjet-orsz intézetekkel fenntartott kapcsolatok meggyengülésével) mind nagyobb szerepet kaptak a hazai kutató és

tervező intézetek. Bár az orosz kapcsolat ma is rendkívül fontos, hiszen pl. az orosz OAO TVEL cég a paksi üzemanyag kizárólagos szállítója, a magyar intézeteknek egyre több feladat jut. Elég megemlíteni a fenti stratégiai fontosságú biztonsági feladatok közül kettőt: a szovjet tervezés gyenge pontját jelentő ember-gép kapcsolatnak időben történt kiváltását megfelelő eszközökre (VERONA zónamonitorozó rendszer, 3-4. blokki irányítórendszer, teljesléptékű szimulátor) és a blokkok biztonságának időben történt felmérését korszerű, általánosan elismert eszközökkel (AGNES projekt), de joggal említhető a tanulmány elején említett, jelentős anyagi haszonnal járó teljesítménynövelés és üzemidő-hosszabbítás tudományos-műszaki megalapozása is.

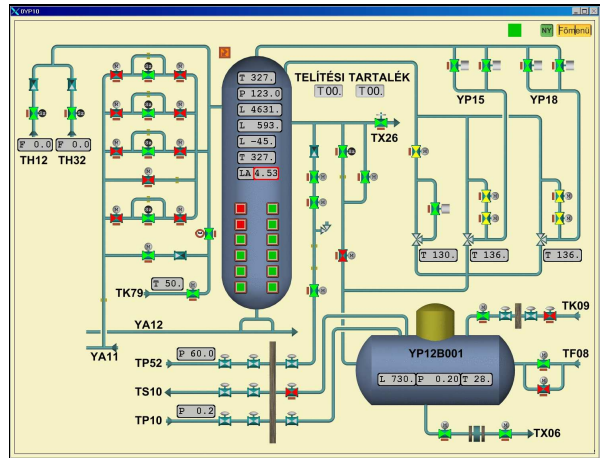


A Paksi Atomerőmű teljesléptékű szimulátorának vezénylője (© PA Zrt.)

A Magyar Tudományos Akadémia és intézetei, valamint az ipari kutatóintézetek fontos szerepet vállaltak az atomenergetikai problémák megoldásában. A fenti feladatok megoldásában a kutatóintézetek közül a korábbi Központi Fizikai Kutató Intézet és a mai KFKI Atomenergia Kutatóintézet említendő, de meg kell említeni az informatikai kérdések fő szakértő intézményét, a SZTAKI-t, valamint az azóta sajnálatosan eltűnt VEIKI Villamosenergiaipari Kutató Intézetet és a Vasipari Kutatóintézetet is, amely utóbbi kiemelkedő szerepet játszott a minőségbiztosításban. Említeni kell az erőmű generáltervezőjét, az ERŐTERV-et, és beruházóját, az ERBÉ-t is. Sajnos, számos intézet a változások során megszűnt vagy lényegesen meggyengült. Újabb részben a BME Nukleáris Technikai Intézete, valamint magánkézben lévő vállalkozások (pl. NUBIKI Kft., SOM Systems Kft.) is fontos szerepet kapnak a különböző K+F feladatok elvégzésében.



A VERONA zónaellenőrző rendszer képernyője



Simulátor modellező eszköz képernyője (© AEKI)

2.2. Új blokkok létesítése

2007. júliusában új fejezet kezdődött a magyar atomenergetikában: a Magyar Villamos Művek Zrt. ekkor indította el a Teller projektet. A projekt alapvető célja az volt, hogy az Országgyűlés elvi döntését előkészítő fázisban, az Atomtörvény szerint elvégzendő kormányzati előkészítő munka háttéranyagait megfelelő szakmai színvonalon elkészítse. A projekt során elkészült

- az új blokkok megvalósíthatósági tanulmánya
- a környezeti hatások előzetes felmérését tartalmazó tanulmány
- a radioaktív hulladékok kezelésére vonatkozó tanulmány.

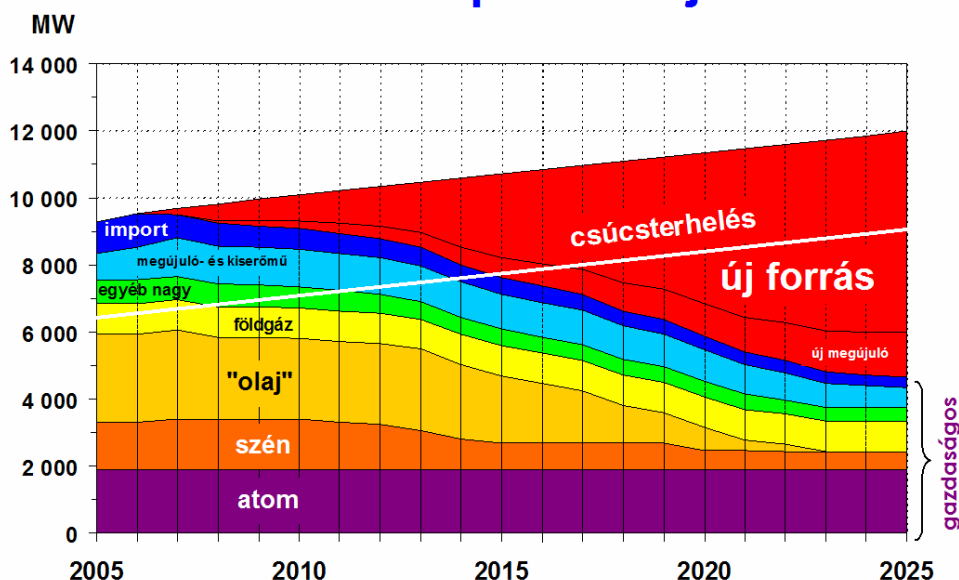
Jelen anyagnak nem feladata ezeknek a tanulmányoknak az ismertetése, azok hozzáférhetőek. A tanulmányok fő következtetései az alábbiak voltak:

- az új blokkokat Pakson, ezen az ismert, jól megkutatott telephelyen érdemes megépíteni, azért is, mert itt a társadalmi elfogadás és a helyi szakmai kultúra nagyon kedvező;
- a két blokk optimális kapacitása egyenként kb. 1000-1200 MW_e, kisebb blokkok nincsenek a piacon, a nagyobb blokkok építése jelentős hálózati és rendszer-szabályozási beruházásokat igényel;
- a piacon megtalálható blokkok biztonsága közel azonos színvonalú, így egy versenyben nyilván az ajánlott pénzügyi konstrukció határozza meg a preferencia sorrendet;

- minden szempontból célszerű, hogy az MVM meghatározó szerepet játsszon az új blokkok létesítésében;
- újra át kell gondolni a nagyaktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésének stratégiáját.

A tanulmányok alapján készült kormány-előterjesztést a Parlament 2009. március 30-án elfogadta, és így megkezdődhetett az új blokkok létesítésének tényleges előkészítése.

Forrásoldali kapacitásfejlesztés



2. ábra: Az erőmű létesítési igény 2025-ig várható alakulása (forrás: MVM Zrt.)

Meg kell jegyezni, hogy új atomerőművi blokkok létesítése nem valami más lehetőség alternatívájaként, hanem a többi lehetőséggel együtt jelenik meg Magyarországon. Az MVM adatai szerint évente kb. 1,0-1,5 %-kal növekvő fogyasztás, az erőművek előregedése, a környező országok hasonló helyzete mind-mind jelentős új erőművi kapacitások létesítését igényli (lásd a 2. ábrát). Természetesen erőfeszítéseket kell tenni intenzív energiatakarékosági programok bevezetésére, amivel a szükségleteket csökkenteni lehet. Tudomásul kell venni azonban, hogy egy fejlett gazdaságnak – amelynek eljövételét mindannyian annyira óhajtjuk Magyarországon – előfeltétele a villamosenergia-ellátottság magas színvonala.

Az új kapacitások egy részét megújuló energiaforrásokból lehet és kell fedezni, de ez távolról sem elegendő. Gazdaságossági megfontolásokból előnyös lehet földgáz-tüzelésű, kombinált ciklusú erőművek létesítése, amire nyilván sor fog kerülni, de ezek fejlesztésének gátat kell, hogy szabjon a megkérdőjelezhető ellátás-biztonság és a várhatóan növekvő gázár. Így az üvegházhatású gázok kibocsátásától mentes, versenyképes áron termelő atomenergetika a mainál nagyobb részarányt képviselhet a jövőben.

3. Nemzetközi nukleáris energetikai kutatások

3.1. Világtendenciák

A huszonegyedik században a világban folyó nukleáris energetikai kutatásokat alapvetően a negyedik generációs atomreaktorok létrehozására irányuló kezdeményezés határozta meg [13]. Ezzel az atomenergetika történetében példátlan együttműködés vette kezdetét. A negyedik generációs atomerőművek létrehozására nemzetközi projekt alakult, GENERATION-IV International Forum (GIF) néven, 2000. januárjában. A projektben szinte kezdettől fogva részt vesznek a nukleáris fejlesztésekben jelentős szerepet játszó országok (Argentína, Brazília, Dél-afrikai Köztársaság, Egyesült Államok, Egyesült Királyság, Franciaország, Japán, Kanada, Koreai Köztársaság és Svájc). 2003-ban a projekt két irányban is kibővült: az Európai Unió (az EURATOM) a nemzetközi projekt tagjává vált, továbbá az OECD Nuclear Energy Agency (NEA) látja el a nemzetközi projekt titkársági teendőit. Azóta Oroszország és Kína is a GIF tagjává vált. Az EU valamennyi tagországát képviseli, de Franciaországot és az Egyesült Királyságot csak azokban az ügyekben, amelyekben e két ország közvetlenül nem játszik szerepet a projektben.

A projekt indításakor a kezdeményező Amerikai Egyesült Államok Energetikai Minisztériuma (US DOE) hangsúlyozta, hogy az atomenergia részarányának a növelése a fenntartható fejlődés elengedhetetlen feltétele. Ez – figyelembe véve, hogy a negyedik generációs erőművek termelése abban az időben lesz meghatározó, amikor az emberiség létszáma a jelenlegi közel hét milliárdról még tovább növekszik –, jelentős erőműépítést tételez fel. A projekt lényegesen nagyobb szerepet szán a gyorsreaktoroknak, mint amekkorát azok eddig játszhattak. A gyorsreaktorok biztonsága több figyelmet érdemel, mint a termikusoké, de továbbfejlesztésük elengedhetetlen, ha zárni akarjuk az üzemanyagciklust.

Az üzemanyagciklus zárása két szempontból igen lényeges. Az első szempont az uránkészletek végessége. Igaz ugyan, hogy az uránon kívül tórium-bázison is elképzelhető az atomenergetika fejlesztése, de kézenfekvőbbnek tűnik a gyorsreaktorok alkalmazása, amelyek lehetővé teszik az urán döntő részét alkotó ^{238}U izotóp hasadóanyaggá, plutóniummá való átalakítását. Ezzel a megoldással az energiatermelés során az ún. gyors tenyésztőreaktorok kb. annyi hasadóanyagot tudnak előállítani, mint amennyit elfogyasztanak. Ez az átalakítás a ma alkalmazott termikus reaktorokkal nem oldható meg, viszont a gyorsreaktorok által előállított plutóniumot hasznosítani tudják, így a két reaktortípus megfelelő arányával egy szimbiotikus atomerőmű-rendszer hozható létre.

A világ tóriumkészletei igen jelentősek. A tóriumból neutronbesugárással az urán 233-as hasadó izotópja keletkezik, és ez a maiakhoz hasonló atomreaktorokban hasznosítható. A tóriumciklus bevonása az energiatermelésbe további évszázadokra biztosítaná a fenntarthatóságot, de a technológia még nem tekinthető kiforrottnak. A tóriumciklus kidolgozásában elsősorban India érdekelt nagy tóriumkészletei miatt. India jelenleg olyan gyorsreaktort épít, amelynek köpenyében tóriumot helyeznek majd el, amiből azután a keletkezett hasadóanyagot kivonják és felhasználják.

A másik szempont a nagyaktivitású radioaktív hulladékok mennyiségének radikális csökkentése, amely szintén gyorsreaktorok alkalmazását és a kiégett fűtőelemek reprocessálásának (újrafeldolgozásának) továbbfejlesztésével (a másodlagos aktinidák, azaz a Np, Am és Cm izotópok leválasztásával) oldható meg. Az így kialakítható fenntartható atomenergetika műszakilag megvalósítható, ez a 4. generációs fejlesztések lényege.

Természetesen ennek a megoldásnak is vannak még nem teljesen megoldott elemei. Ezek az újrafeldolgozáshoz kapcsolódnak, mivel az mai formájában az atomenergetika illetéktelen nem-békés felhasználásának fokozott veszélyét rejt magában. A világ sajnos ma sem egységes nukleáris szempontból sem, hiszen minden törekvés ellenére ma is vannak nukleáris fegyverek kifejlesztésére törekvő, az atomsorompó-egyezményt el nem fogadó országok (pl. Észak-Korea, Irán). Ráadásul minden ismert újrafeldolgozási technológia többlet környezeti kockázat megjelenésére vezet.

Az Amerikai Egyesült Államok nukleáris hatósága (Nuclear Regulatory Commission, NRC) meghatározta a legfontosabb területeket, ahol kutatási feladatok jelentkeznek az Egyesült Államok számára:

- a roncsolásmentes anyagvizsgálatok (elsősorban tartály) megbízhatóságának növelése,
- öregedésvizsgálat (a hatvan éven túli reaktor-élettartam kutatása az Energetikai Minisztériummal (DOE) és az iparral közösen) kiterjesztése,
- új reaktortípusok fejlesztése (AP1000, US APWR, US EPR, ESBWR, ABWR),
- új reaktorgeneráció (elsősorban igen magas hőmérséklet a hidrogén technológiához) létrehozása.

Az igen magas hőmérsékletű reaktorok (GFR, VHTGR) érdekében a következő kilenc kulcsterületen kell kutatásokat folytatni az NRC megítélése szerint:

- a hatósági munka korszerűsítése, ideértve a valószínűségi elemzések felhasználását az engedélyezésben, a rendszerek osztályba sorolását és a mélységi védelem kérdéseit,
- balesetelemzés (valószínűségi kockázatelemzés, módszertani és alkalmazási útmutató, emberi tényező, irányítástechnika)
- reaktor/erőmű analízis (hő- és áramlástechnikai, reaktorfizikai, mechanikai elemzések, a hasadási termékek terjedésének vizsgálata),
- fűtőelemviselkedési analízis (beleértve a mechanikai vizsgálatokat és a hasadási termékek terjedésének elemzését),
- anyagvizsgálatok (elsősorban a grafit és a fémek tulajdonságainak elemzése),
- szerkezetvizsgálatok (az épületek és a reaktorszerkezetek vizsgálata különös tekintettel egy közeli hidrogéntermelő vagy hőtermelő egység esetleges balesetére)

- következményelemzés (ideértve a dózisszámítást és a környezeti hatások tanulmányozását),
- a nukleáris anyagok és hulladékok biztonsága (dúsítás, gyártás, szállítás, tárolás, végleges elhelyezés),
- safeguards és fizikai védelem.

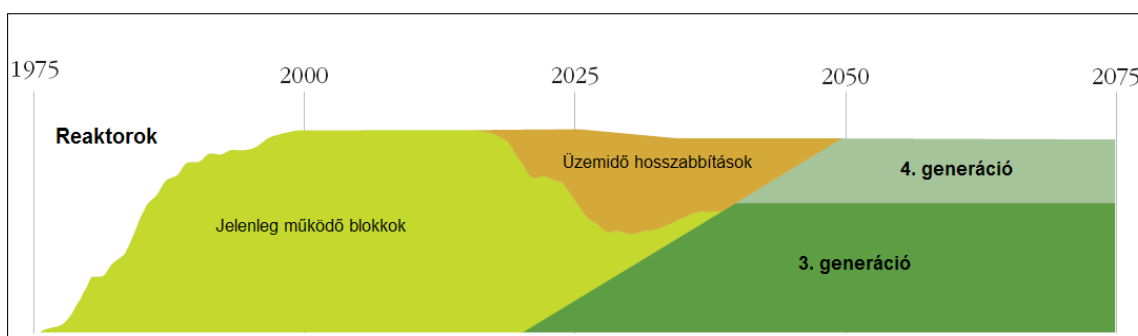
3.2. A fő európai kutatási irányok

Az európai kutatási célokat az 1.4. fejezetben lefektetett alapelveknek megfelelően fogalmazták meg, vagyis a „fenntartható, versenyképes és biztonságos ellátást nyújtó” energiatermelés elérése érdekében a jövőben az EU nukleáris K+F támogatási politikája két fő irányra fog koncentrálni:

- Támogatja a fejlett módszereket használó, alacsony szénfelhasználású technológiák alkalmazását, ezzel párhuzamosan 2020-ig legalább a jelenlegi szinten fenn kívánja tartani a nukleáris energia részarányát.
- Támogatja az alacsony szénfelhasználású technológiák* kutatását, hogy a 2050-re előirányzott vízió (a CO₂ kibocsátás 60-80%-os csökkentése) teljesíthető legyen.

* Megjegyzés: Az utóbbi időben sokan a nukleáris energetikát is „low-carbon” technológiának tekintik.

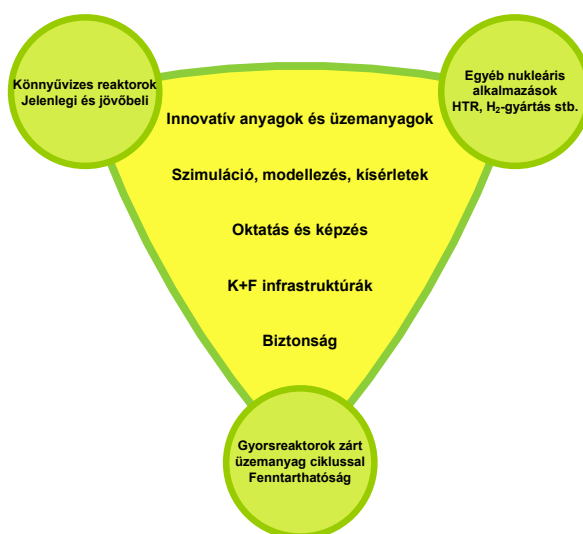
A kitűzött fejlesztési célok eléréséhez az ipar aktív bekapcsolása elengedhetetlen, ennek megfelelően a nukleáris energetika terén az EU támogatni fogja azokat a projekteket, amelyek a 4. generációs reaktorok fejlesztésének terén gyors előrehaladást ígérnek. A nukleáris energia részarányának fenntartására javasolt XXI. századi EU stratégiát illusztrálja a 3. ábra:



3. ábra: Stratégia a nukleáris energia részarányának szinten tartására ([7] alapján)

A nukleáris energetika fejlesztésével összefüggő európai kutatási célokat a legvilágosabban az SNE-TP 2009-ben kiadott stratégiai kutatási terve (SNE-TP SRA 2009, lásd [12]) foglalja össze. A kutatások három fő terület körül koncentrálnak (lásd a 4. ábra „mágikus háromszögét”):

- 1) A jelenleg működő 2. generációs, és a jövőben létesítendő 3. generációs könnyűvízes (LWR) atomerőművek biztonságosságának, versenyképességének hosszú távú fenntartása, hosszú távú hulladékkezelési megoldásokkal társítva.
- 2) „Fenntartható” reaktortípusok fejlesztése a Gen IV projektben, amely zárt üzemanyag ciklussal működő gyorsreaktorok (FNR) kidolgozását tűzte ki célul.
- 3) Egyéb atomenergetikai alkalmazások fejlesztése: ipari hő termelése (a HTR reaktorról), hidrogén ipari méretű előállítása, tengervíz sótalanítás stb.



4. ábra: Az SNE-TP kutatási céljainak „mágikus háromszöge” ([7] alapján)

A fenti három fő terület olyan közös témák (angolul „cross-cutting issues”) kötik össze, amelyek mindhárom területen szükségesek és eredményeiket mindhárom terület hasznosítja.

A legfontosabb közös témák az alábbiak: innovatív szerkezeti anyagok fejlesztése; újfajta üzemanyagok és az üzemanyag ciklusok fejlesztése; nagy pontosságú szimuláció és modellezés; biztonsági elemzések; oktatás és képzés. A K+F munkákat olyan nagy kutatási infrastruktúrák fogják támogatni, mint pl. a Jules Horowitz anyagvizsgáló reaktor, a PALLAS izotópgyártó reaktor és a MYRRHA gyors-spektrum besugárzó berendezés.

A 4. ábrán feltüntetett három fő kutatási területen az alábbi fontos altémák azonosíthatók:

- 2. generációs atomerőművek
 - a) öregedési folyamatok vizsgálata: a folyamatok megértése, kezelése, megelőzése
 - b) üzemidő-hosszabbítások: a megalapozás és engedélyezés EU harmonizációja
 - c) tökéletesített, jobban használható kezelői felületek kidolgozása
- 3. generációs atomerőművek

- a) a tervezés és az engedélyezés EU harmonizációja
- b) jobb rendszer- és komponens tervezési módszerek kidolgozása és bevezetése
- *Radioaktív hulladékok kezelésének javítása*
 - a) "fejlett" üzemanyag ciklusok bevezetése: a radioaktív hulladékok minimalizálása, optimális üzemanyag felhasználás, az urán- és plutónium-felhasználás javítása
 - b) a nagyaktivitású kiégett üzemanyag végleges tárolásának egyik opcióját jelentő mélygeológiai tárolók tökéletesítése
 - c) particionálási és transzmutációs (P&T) módszerek kutatása: ADS rendszerek és a gyorsreaktorok alkalmazhatóságának vizsgálata
- *4. generációs gyorsreaktorok zárt üzemanyag ciklussal*
 - a) alapvető cél az FNR technológia biztonságosságának növelése
 - b) a másodlagos aktinidák égetésének és a P&T lehetőségének kidolgozása
 - c) a nátriumhűtésű FNR prototípusának üzembe helyezését 2020 körül tervezik
 - d) a két „versenytárs” (LFR és GFR) közötti döntés 2012 körül történik meg
- *Egyéb atomenergetikai alkalmazások fejlesztése*
 - a) a cél az ipari hőtermelésben a fosszilis üzemanyagok fokozatos helyettesítése
 - b) hidrogéntermelés (pl. műtrágyagyártáshoz, közlekedéshez)
 - c) nehézolaj kéntelenítése (olajfinomításhoz)
 - d) szintetikus szénhidrogén-alapú üzemanyag kidolgozása (pl. szénből)
 - e) tengervíz-sótalanítás
 - f) a prototípus HTR/VHTR üzembe helyezését kb. 2020 körül tervezik

A fentiekben vázolt ambiciózus célok eléréséhez elengedhetetlen a magas színvonalú oktatás és képzés, mely biztosítja a nukleáris szaktudás megőrzését, szinten tartását és fokozatos emelését. Enélkül Európában nem fog rendelkezésre állni az a fiatal kutató- és mérnök generáció, amely egyrészt sikeresen képes elvégezni a stratégiai kutatási tervben előírányzott munkát, másrészt biztonságosan képes üzemeltetni a fejlesztések eredményeképpen létesített atomerőműveket.

A magyar nukleáris K+F program részleteinek kidolgozásakor figyelembe kell majd venni az atomenergiát használó kisebb európai országok (Finnország, Svédország, Spanyolország, Belgium, Hollandia, Csehország, Szlovákia) gyakorlatát a hasonló programok céljai és feltételei tekintetében.

4. A hazai nukleáris K+F program

4.1. A hazai nukleáris K+F fontossága

A hazai nukleáris szakértelem, hozzáértés fenntartása nemzeti érdek, hiszen az ország villamosenergia-szükséglete nem elégíthető ki nukleáris energia nélkül, a hozzáértés pedig elengedhetetlen az esetenként felmerülő problémák szakszerű, gyors megoldásához. A nukleáris kompetencia fenntartásának és újratermelésének legfőbb letéteményesei a független kutatóintézetek és a nukleáris műszaki felsőoktatási intézmények, amelyek mind az üzemeltető, mind az engedélyező hatóság számára el tudják látni a műszaki tudományos háttérintézmény szerepét, továbbá képesnek kell lenniük a politika és a társadalom által felvetett kérdések megbízható megválaszolására. Egy jól működő atomenergetikai kutatóintézeti hálózat hármas célt kell, hogy kielégítsen:

- választ kell adnia mind az atomerőmű, mind a nukleáris hatóság műszaki-tudományos kérdéseire, amelyek a működő atomerőművi blokkokkal kapcsolatban felmerülhetnek,
- támogatnia kell szakértelmével új atomerőművi blokkok kiválasztását, engedélyezését, építését, üzembe helyezését,
- részt kell vállalnia az atomenergetika közvetlen és távlati céljainak megvalósításában, azaz kutatásokat kell folytatnia mind a jelenleg alkalmazott és a közeljövőben alkalmazásra kerülő 2. és 3. generációs atomerőművi technológia területén, mind pedig a világ érdeklődésének homlokterében lévő területeken (jelenleg ez a Gen IV rendszerek kutatása).

A szakértelem nyilvánvalóan nem tartható fenn az utánpótlás folyamatosságának biztosítása nélkül, ezért a kutatóintézeteknek hatékony együttműködésben a műszaki felsőoktatással célszerű szerepet vállalniuk a szakirányú felsőoktatásban és bizonyos mértékig a középszintű szakemberképzésben is. Az oktatás színvonalának fenntartásához elengedhetetlen, hogy kellő számú (a betöltendő egyetemi helyeket meghaladó számú) jelentkező legyen a szakirányú képzésre. Ehhez a képzés vonzerejét növelni kell, ami a XXI. század Magyarországon nem könnyű feladat. Ennek számos oka van:

- a pénz jelentős motiváló tényező, a legjobban fizető ágazatokkal (bankok, biztosítók) nem tud a műszaki élet versenyezni,
- a természet- és műszaki tudományok elveszítették korábbi presztízsüket,
- ezen belül a nukleáris technika presztízse világszerte alacsonyabb, mint korábban volt,
- demokratikus viszonyok között az emberek nehezen irányíthatóak, a természetes emberi érdeklődés pedig gyakrabban fordul humán irányba (történelem, irodalom) mint a nehezebb természettudományi stúdiumok felé,
- az utóbbi húsz évben a közoktatásban a természettudományos szerepe lényegesen csökkent; az oktatáspolitikai következtében olyan nemzedék nőtt fel, amelynek természettudományos műveltsége sokkal szegényebb a korábbi nemzedékekénél.

A nukleáris szakma vonzerejének növelése csakis az egyetemek és kutatóintézetek együttműködésével lehetséges, és feltehetőleg úgy is csak igen lassan.

A nukleáris szakmának nem kizárólag nukleáris szakemberekre van szüksége, azaz nem csak reaktorfizikusokra, termohidraulikusokra, sugárvédelmi szakemberekre, hanem nagy szüksége van olyan gépészmérnökökre, villamosmérnökökre, vegyészmérnökökre is, akik kellő nukleáris szakértelemre is szert tettek. Ezért a szakmérnök képzésre is jelentős szerep vár.

A hazai nukleáris K+F természetesen nem független a világ többi részén folyó hasonló tevékenységtől. Sem a kutatás, sem a fejlesztő munka nem képzelhető el jelentős nemzetközi együttműködés nélkül. A nemzetközi kapcsolatok ma megvannak, fenntartásuk azonban erőfeszítéseket igényel a jövőben is. A nemzetközi együttműködés szervezéséhez az EU a keretprogramjai által bizonyos lehetőségeket biztosít. Volt idő, amikor ez elegendő is volt, azt azonban tudomásul kell venni, hogy az egymást követő keretprogramok (5., 6. majd 7.) egyre szűkülő lehetőségeket biztosítanak Magyarországnak számára a nukleáris területen (ez nem így van pl. a fúzió területén). Mindent meg kell tenni annak érdekében, hogy ez a tendencia a 8. keretprogram során ne folytatódjon. Fontosak az Európán kívüli kapcsolatok is. Ezek fejlesztése új irányokba kívánatos lenne, bizonyos fontos régiókban (pl. Japán) megvan a fogadókészség. Az együttműködés kiváló formái lehetnek a két- vagy többoldalú kormányközi szerződés kereteiben folytatott közös kutatások.

4.2. A kutatás fő céljai

Az atomenergia hosszú távú biztonságos alkalmazásának és a társadalom általi elfogadottságának előfeltétele a megfelelő nukleáris biztonsági kultúra jelenléte. A megfelelő hazai nukleáris szakértelem folyamatos fenntartása elengedhetetlen egy olyan bonyolult nagyberendezés létesítéséhez és biztonságos üzemeltetéséhez, mint egy atomerőmű. A hangsúly a folyamatosságon van, hiszen a szakértelmet a blokk teljes várható üzemidejére kell biztosítani. Szakértelmen itt egy teljes nemzeti „kompetencia infrastruktúrát” kell érteni, amely az egyetemektől a mérnökirodákon, a kutató- és fejlesztő intézeteken át a hatósági feladatok ellátásáért felelős szakintézményekig és az Engedélyes szakmai és üzemeltető szervezetéig terjed.



5. ábra: A hazai nukleáris K+F céljainak elképzelt „mágikus háromszöge”

A hazai nukleáris energetikai kutatási programok céljait rövid és középtávon a meglévő paksi blokkok biztonságos üzemeltetésének műszaki-tudományos háttérének biztosítása, illetve az új blokkok létesítésére való felkészülés határozzák meg.

A reaktorbiztonsági kutatások folytatása, a kísérlet-alapú ismeretek bővítése előfeltétele a nukleáris szakértelem hazai megőrzésének. Magyarország nem maradhat ki az európai biztonsági elemzési eszközök továbbfejlesztését és egységesítését célzó erőfeszítésekből; a magyar kutatóknak továbbra is részt kell venniük az európai keretprogramok által részben finanszírozott nukleáris biztonsági projektekből, valamint az OECD Nuclear Energy Agency és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség önfinanszírozó projektjeiben.

A nemzetközi trendekkel összhangban – és szorosan kapcsolódva a hazai fűtőelem-problémák hosszú távú stratégiájának szakmai megalapozásához – közép és hosszútávon részt kell venni a fűtőelem-ciklus zárásával és az atomerőművek új generációjával kapcsolatos kutatási programokban. A magyar kutatóknak az eddiginél nagyobb mértékben kell foglalkozniuk a fűtőelem-ciklussal kapcsolatos kutatásokkal. Eredményeik nemzetközi felhasználásán túl lényeges a felhalmozott tudás felhasználása a fűtőelem-gazdálkodásra, a kiégett fűtőelemek tárolására és a nagyaktivitású hulladék végleges elhelyezésére vonatkozó hazai döntések előkészítésében.



Magas hőmérsékleten felfűvódott fűtőelemek (© AEKI)

A negyedik generációs atomerőművekkel kapcsolatos kutatások lehetőséget adnak arra, hogy a fiatalok bekapcsolódjanak a nukleáris szakértelem megőrzésébe és alkotó módon fejlesszék tovább a vonatkozó ismereteket. Ezen túlmenően a magyar vállalkozások hozzájárulása esetenként akár technológiai értelemben is jelentős lehet, különösen a tudásintenzív területeken.

A kutatási programok távlati céljai között szerepel a nukleáris energia felhasználásának előmozdítása olyan területeken is, mint az ipari méretű hidrogéntermelés. Ha sikerül a jelenlegieknél lényegesen magasabb hőmérsékleten üzemelő reaktorokat építeni, akkor megnyílik annak a lehetősége, hogy a fosszilis tüzelőanyagot más területeken (pl. közlekedés) is kiváltsák. A közeljövő egyik kihívása a nukleáris energetikai szakemberek számára az ipar érdeklődésének felkeltése, és bevonása a kutatás-fejlesztésbe.

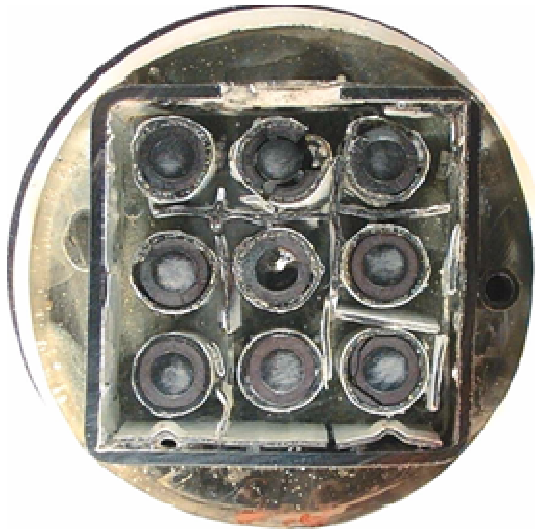
4.3. A kutatás és a K+F program fő területei

4.3.1. Reaktoranyagok kutatása

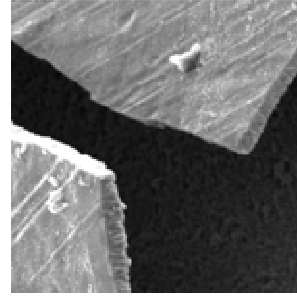
Az atomerőművek jelenlegi generációját közel 50 évvel ezelőtt tervezték, azóta az anyagtudomány és a mérnöki tervezői eszközök jelentős fejlődésen mentek keresztül. A tervezéskor a szerkezeti anyagok öregedésének mértékét konzervatív számításokkal vették figyelembe, tekintettel a korlátozott ismeretekre. Az öregedésre, azon belül is a sugárkárosodásra vonatkozó ismeretek bővülésével lehetségessé vált a tervezett üzemidő hosszabbítása. A reaktoranyagok sugárkárosodásának kutatását - ugyanúgy, mint más területeken - az a praktikus igény motiválja, hogy az atomreaktorok biztonságos üzeme minden körülmény esetén biztosított legyen. A jelenlegi reaktortípusokban az anyagok öregedését a mérnöki gyakorlat (szerkezeti integritás-számítások) megfelelően kezeli, de a következő generációs reaktorok tervezésekor a szerkezetek élettartamát nem lehet egyszerűen levezetni a jelenlegi tapasztalatokból.

A jövőben építendő reaktortípusoknál, amelyek a gazdaságosabb üzemanyag-felhasználás érdekében lényegesen magasabb hőmérsékleten és/vagy hosszabb ideig égetik az üzemanyagot, a megvalósítás ütemét lassítja a megfelelő szerkezeti anyagok hiánya. Az anyagtudomány nagy kihívása az adott alkalmazás számára optimális tulajdonságú szerkezeti anyagok tervezése és előállítása.

A szisztematikus építkezés a sugárzás és anyag kölcsönhatásának leírásánál kezdődik. Ahhoz, hogy a fundamentális elvek tisztázásától eljussunk a gyakorlati alkalmazásig, a ma még egymástól függetlenül dolgozó kutatócsoportoknak célszerű összefogni, és aktívan bekapcsolódni az európai kutatási programokba. Az európai PERFORM60 projekt egy példa arra az ambiciózus összefogásra, amelyben egyetemi és ipari kutatócsoportok dolgoznak együtt, az anyag öregedését leíró – az atomi szintű folyamatoktól a makroszkopikus viselkedésig integráló – modell megalkotásában.



Üzemanyag köteg keresztmetszete légbetöréses baleset modellezése után (CODEX, © AEKI)



Leváló oxidréteg cirkónium burkolaton



Felhasadt burkolat a felhasadás helyével

Az elmúlt időszakban kifejlesztett kísérleti berendezések és szuperszámítógépek alkalmazásával áttörést érhetünk el a következő évtizedekben az anyagok sugárállóságának javításában, a fizikai alapok jobb megértésével. A számítógépek kapacitásának bővülésével lehetővé válik a valós fizikai folyamatok egyre komplexebb modellezése. Az egyre összetettebb modellek ellenőrzése, validálása a kísérleti programok eredményeivel történik.

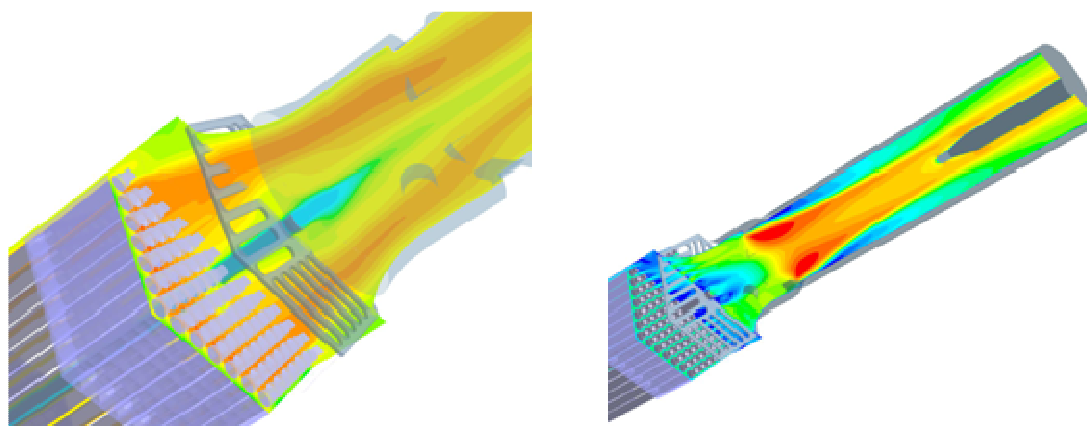
Ez a kutatási terület mind a mai paksi blokkok meghosszabbított üzemidejű működése, mind pedig a leendő reaktorok szempontjából alapvető.

4.3.2. Szimuláció és modellezés

Az atomerőművekben és azok berendezéseiben lejátszódó folyamatok vizsgálatának fő módszere a számítógépes modellezés, amelyet minden esetben kísérletekkel ellenőrzött eszközökkel végeznek. A számítógépes modellezés alapja a folyamatok lényegi viszonyainak megértése, főbb paramétereinek megismerése, azaz a kísérletekből nyerhető ismeretek és a megbízható elméleti alapok. A folyamatokat bonyolultságuk ellenére úgy kell modellezni, hogy a számítások mintegy szimulálják az atomerőműben és berendezéseiben ténylegesen lejátszódó események egymásutánját. A szilárd tudományos alapokon nyugvó szimuláció és modellezés alapvető fontosságú a reaktorok biztonságának megítélésében, az engedélyezési eljárásban szükséges biztonsági elemzések során.

Részben a folyamatok bonyolultsága, részben az egyes jelenségek önálló tudományos diszciplínaként való kezelése, részben pedig a korábban igencsak szűkös számítógépi

lehetőségek miatt a legfontosabb számítógépes modellek önállóan jöttek létre a reaktorfizika, a termohidraulika és a fűtőelemviselkedés területén, és más kapcsolódó területeken. Az egyes területek közti tényleges csatolások modellezése ezért nehéz feladat. A számítógépes lehetőségek mostanra teremtették meg annak lehetőségét, hogy a komplex folyamatokat a maguk komplexitásában lehessen modellezni, anélkül, hogy az egyes jelenségek vizsgálata során a többi jelenséget csak elnagyoltan lehessen figyelembe venni. Nemzetközi kutatási erőfeszítések történnek az ún. multiphysics modellek létrehozására (pl. NURISP EU projekt), a munkákból a magyar kutatók is kiveszik részüket. A problémakör további aspektusa egyes olyan bonyolult problémák háromdimenziós számítása, amelyeket korábban csak egyszerűbb geometriákban lehetett kezelni, vagy a korábban már említett összefüggések feltárása az anyagszerkezet mikroszkopikus és makroszkopikus tulajdonságai között.



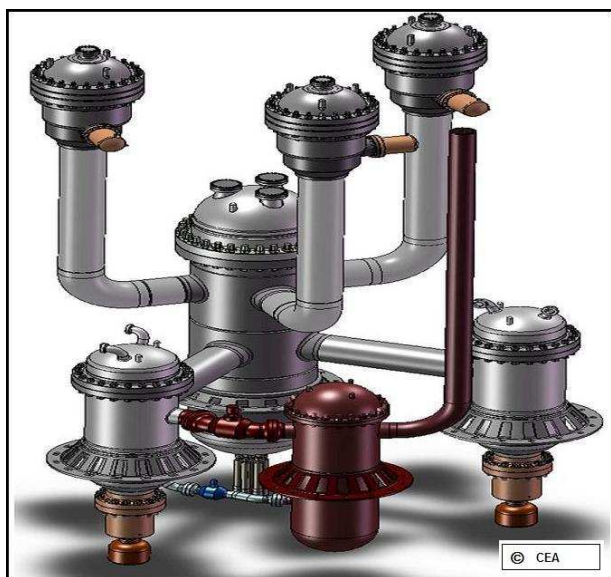
Hűtőközeg áramlási viszonyainak tanulmányozása a kazetta fejrészében CFD számítással (© AEKI)

A biztonsági elemzések célja a nukleáris berendezések biztonságára veszélyt jelentő folyamatok számítógépes elemzése. A determinisztikus és valószínűségi elemzések eszközbázisa és az elemzések elfogadási kritériumainak rendszere a ma használatos 2. és 3. generációs reaktorok tekintetében lényegében adottnak tekinthető. A tudomány folyamatos fejlődése, az új generációs atomerőművekben zajló lényegesen újszerű, a korábbi atomerőművi folyamatoktól különböző folyamatok, a számítógépi lehetőségek gyorsütemű fejlődése szükségessé és lehetővé teszik a biztonsági elemzések eszközbázisának megújítását, pontosságának fokozását és így a nukleáris biztonság egészének további javítását.

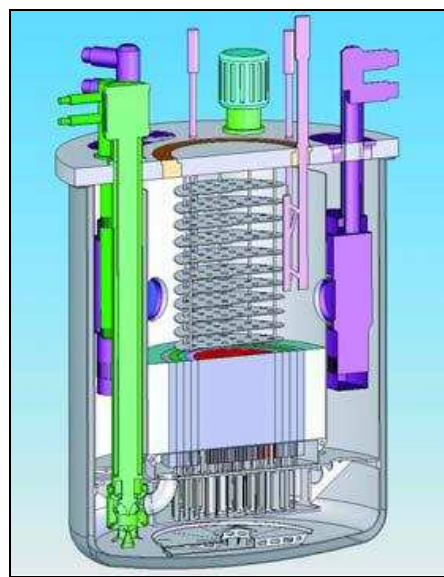
A létező és az építendő hazai atomerőművi blokkok szempontjából a korszerű biztonsági elemzési eszközbázis folyamatos rendelkezésre állása kulcskérdés. Az új elemző eszközök validációjához új kísérleti bázis biztosítása válhat szükségessé, amelyen a meghatározó fizikai folyamatok – különös tekintettel a háromdimenziós jelenségekre – tanulmányozhatók. Ezen kísérletek egy részét hazai bázison, másik részét külföldi partnerekkel közösen külföldi kutatóhelyeken érdemes létrehozni és használni.

4.3.3. A fűtőelemciklus zárása, a negyedik generációs atomerőművek fejlesztése

Magyarországnak világos stratégiával kell rendelkeznie a hazai atomerőművek fűtőelemciklusa tekintetében. A stratégia magában foglalja a fűtőelemellátás biztonságával összefüggő kérdéseket, a kiégett fűtőelemek tárolásának és végleges elhelyezésének problematikáját és nem függetleníthető a radioaktív hulladékokkal kapcsolatos általánosabb stratégiai kérdésektől.



Az ALLEGRO gázhűtéses gyorsreaktor képe (© CEA)



A nátriumhűtésű gyorsreaktor képe (© CEA)

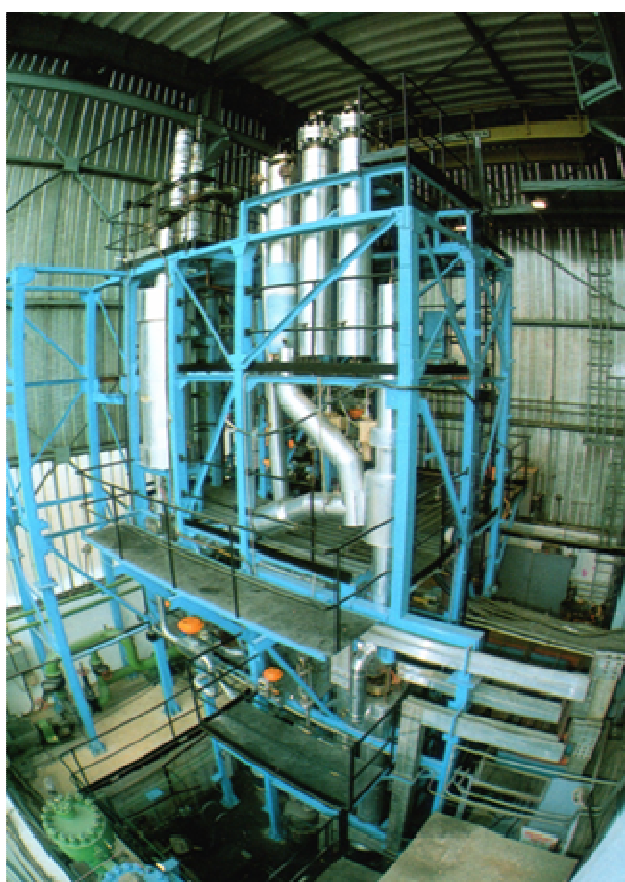
A kiégett fűtőelemek hosszú idejű biztonságos tárolása igen lényeges kérdés, mert egy gyorsan meghozott stratégiai döntés a későbbi tudományos fejlődés szemszögéből azután elhibázottnak minősülhet. Az ideiglenes tárolás módját adhat a legjobb megoldás kialakítására. Mint fentebb kifejtettük, a hosszú távú megoldásban kulcsszerep juthat a 4. generációs gyorsreaktoroknak, amelyek ma még gyakorlatilag nem állnak rendelkezésre, de amelyek fejlesztése a nemzetközi nukleáris kutatási erőfeszítések jelenlegi legfőbb célja. A nemzetközi kutatási munkamegosztásban való magyar részvétel, a hazai ilyen irányú kutatómunka intenzifikálása záloga lehet annak, hogy az ország a lehető legjobb hosszú távú megoldást válassza a kiégett fűtőelemek végleges elhelyezése szempontjából.

A gyorsreaktorok majdani alkalmazása kettős célú: egyrészt az uránkészletek végelessége miatt a XXI. század vége felé várhatóan felmerülő problémák elkerülése, az atomenergetika fenntarthatóvá tétele, másrészt a nagyaktivitású radioaktív hulladékok mennyiségének minimalizálása. Ezeket a kutatásokat a hazai nukleáris kutatási program egyik legfőbb területének kell tekintenünk.

Mindezek mellett nem szabad megfeledkezni arról, hogy a mélygeológiai formációban való végleges elhelyezés a fűtőelemciklus zárásának legtöbb változatában lényeges rendszeresem. A végleges elhelyezés megvalósíthatóságának reális értékeléséhez a biztonsági értékelés módszertani fejlesztésére, az események és folyamatok leírásának jobb elméleti megalapozására van szükség.

4.3.4. A kutatási infrastruktúrák fejlesztése

A képzés és oktatás szerepének elismerése mellett ki kell emelni a kutatási infrastruktúrák, kísérleti berendezések jelentőségét. Ezek közül kiemelendő a Budapesti Kutatóreaktor, az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet egyéb kísérleti eszközei, valamint a BME Nukleáris Technikai Intézet Oktatóreaktora. Az infrastruktúra elemeinek továbbfejlesztésére, új elemek bekapcsolására, a régiak bezárására stratégiai tervet kell készíteni és végrehajtani. Ennek a tervnek ki kell terjednie az Európai Unió, az OECD Nuclear Energy Agency és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség, valamint a kétoldalú kutatási kapcsolatokban rejlő lehetőségek kiaknázására is.



Termohidraulikai kísérleti berendezés a paksi blokkok jellemzőinek vizsgálatára (PMK-2, AEKI)



Kísérleti berendezés a paksi tartály külső hűtésének vizsgálatára (CERES, AEKI)

A nukleáris kutatási infrastruktúra fejlesztése kiterjedhet európai értelemben is jelentős nukleáris kutatási infrastruktúra Magyarországra való telepítésére is. Ebből a szempontból különös figyelmet érdemel az ALLEGRO gázhűtéses gyorsreaktor felépítése a magyar-szlovák-cseh térségben. Az ALLEGRO az egyik negyedik generációs atomreaktor demonstrátoraként épülhetne meg, lehetőséget adva a ma még kísérleti fázisban lévő innovatív technológiai elemek kipróbálására. Ilyenek például a magas hőmérsékletű gázhűtés és annak alkalmazása

folyamathó előállítására, a fejlesztés alatt álló kerámia fűtőelemek, magas hőmérsékletű sugárzásálló szerkezeti anyagok és a hidrogén ipari méretű előállításának technológiája.

4.3.5. A nukleáris szakértelem megújítása a képzés és a tréning fejlesztése által

A hazai nukleáris szakembergárda megújulása a paksi blokkok üzemidő-hosszabbításának és az új atomerőművi blokkok magyarországi telepítésének előfeltétele. Fokozni kell a felsőfokú és a doktori képzésből kikerülő, az atomerőműhöz jól értő kifejezetten nukleáris szakemberek, valamint a különböző műszaki szakirányokat választó, de nukleáris ismeretekkel is bőven rendelkező mérnökök számát. Lehetővé kell tenni a nukleáris szakemberek továbbképzését és rendszeres tréningjét; mindegyikre mind az atomerőművi blokkok üzemeltetőinek, mind a nukleáris hatóságoknak, mind pedig a háttér-intézményeknek szükségük van.

4.3.6. Lakossági tájékoztatás

A lakosságot feltétlenül megilleti, hogy hitelt érdemlő tájékoztatást kapjon az atomenergetika biztonságával kapcsolatos minden fontos kérdésről, valamint az atomenergetika és más energiatermelési módok egymáshoz viszonyított előnyeiről és hátrányairól. Amennyiben az országban a nukleáris energetikai kutatások jelentős állami támogatást kapnak, akkor a kutatóközösség kötelessége az is, hogy ezeknek a kutatásoknak az eredményeiről a lakosság értesüljön és a lakosságot képviselő szervezetek meg tudják ítélni, hogy az eredmények arányosak-e a ráfordításokkal. Ezek miatt az okok miatt a hazai nukleáris kutatási programnak komoly tájékoztatási tervvel kell rendelkeznie és kellő gondot kell fordítania ezeknek az igényeknek a kielégítésére.

Bár a közoktatás nem ennek a tanulmánynak a tárgya, mégis kötelességünk jelezni, hogy a természettudományos közoktatás visszaerősítése nélkül a hazai nukleáris ipar és K+F lakossági elfogadása, valamint a műszaki szakemberek utánpótlása egészen biztosan veszélybe kerül. Amennyiben a lakosság általános természettudományos műveltsége – és ezen belül a nukleáris és sugárvédelmi alapismeretekben való jártassága – továbbra is alacsony szintű marad, vagy még tovább csökken, akkor a tájékoztatás hatástalan marad. Egy átlagos állampolgár alapismeretek hiányában nem tudhat különbséget tenni műszaki-természettudományos törvények és tények, valamint szubjektív vélemények között, ilyenkor pedig az érvek elfogadása vagy elutasítása nem racionális, hanem érzelmi és bizalmi alapon történik.

4.4. A K+F program szervezése

Mivel Magyarország szempontjából az atomenergetika tartós alkalmazása alapvetően fontos, ezért az a célszerű, ha a magyar nukleáris K+F program a jelenlegi blokkok meghosszabbított üzemidejű működtetését, az új blokkok építését és a hazai blokkok fűtőelemciklusára vonatkozó optimális stratégia kialakítását tűzi ki célul. Ezeknek a céloknak az elérése, a fiatal kutatók motiválása akkor lehetséges, ha Magyarország részt vállal az európai és világméretű K+F erőfeszítésekben is, amelyek az egész iparágon belül tervezett technológiai áttörés elérését

célozzák a negyedik generációs innovációs nukleáris rendszerek kidolgozása révén. Mindehhez komoly állami szerepvállalásra van szükség.

A szándékok szerint a hazai nukleáris K+F kezdeményezésének alapidokumentuma ez a Jövőkép. Ennek az Országos Atomenergia Hivatal Tudományos Tanácsa általi elfogadása után a második lépés a Stratégiai Terv elkészítése, ami egyben már a program működésének első fázisát is jelenti. A Stratégiai Terv célja a program tartalmának kifejtése, a fő kutatási célok, várható eredmények és a határidők leírása. Bár azt a Stratégiai Tervnek nem kell tartalmaznia, párhuzamosan az eredmények eléréséhez szükséges költségeket is meg kell határozni. A Stratégiai Terv alapján készíthető el évente a program annotált terve és a Stratégiai Terv alapján ellenőrizhető a program sikeres működése.

Az anyagot területenként működő munkabizottságoknak kell létrehozniuk, a munkát a munkabizottságok elnökeiből és egy kijelölt felelős vezetőből álló szervezet koordinálja. A munkabizottságokban a kutatóhelyek munkatársainak kulcsszerepet kell betölteniük. A munka az OAH TT pozitív döntése után érdemben elindulhat, befejezése a program kormányzati jóváhagyásának időpontjától függ, de várhatóan 2011 közepére befejezhető.

Az átfogó hazai nukleáris K+F program nem szükségképpen jelenti egyetlen nagy hierarchikus program indítását. Célszerű lenne egymással párhuzamosan futó, lényegében önállóan szervezett (menedzselte és finanszírozott) programokat indítani, amelyek laza koordinációját valósíthatná meg az „átfogó” program szervezete. Ez azért tekinthető ésszerűnek, mert

- bizonyosan több finanszírozóról kell beszélni, akik mind a saját szabályaik szerint követelik meg az általuk finanszírozott program pénzügyi ellenőrzését,
- a program nagyon sokszínű lesz a rengeteg nemzetközi kapcsolat miatt, ezért a tematikus áttekintés nagyon nehéz,
- az egyes részfeladatok súlya és pénzügyi háttere nagyon különböző lehet, pl. az ALLEGRO önmagában hatalmas tétel lehet.

A K+F program alprogramjainak nagy önállósággal kell rendelkezniük és hierarchikus alárendeltségüknek szinte nem is szabad megjelennie a gyakorlatban. Az alábbi alprogramokat kellene elindítani:

- Reaktoranyagok kutatása (mai és leendő blokkok, újgenerációs atomerőművek)
- Multiphysics szimuláció és modellezés (reaktorfizika, termohidraulika, fűtőelemviselkedés, egyéb szakmai területek, biztonsági kérdések), kódvalidációhoz szükséges kísérletek
- Kiegészítő fűtőelemek és radioaktív hulladékok kezelésének K+F feladatai
- Újgenerációs atomerőművek kutatása (gyorsreaktorok, SCWR)
- Hazai nukleáris kutatási infrastruktúrák fejlesztése, ALLEGRO fejlesztés
- A nukleáris kutatóintézetek és oktatóhelyek kapcsolatainak fejlesztése

- A lakosság tájékoztatása a kutatási eredményekről, az atomenergia használatának előnyeiről és hátrányairól.

Az alprogramok vezetőinek projektvezetőként kellene működniük, igen széleskörű felhatalmazással. A program munkáját egy ún. Operatív Testület fogja össze, amelynek tagjai a program vezetője, az alprogramok vezetői és néhány meghívott szakember. Ez a Testület hivatott a program finanszírozóival és szakmai ellenőrzőivel való magas szintű kapcsolattartásra, az alprogramok munkájának operatív összehangolására, a beszámolók, összefoglaló jelentések és újabb tervek elkészítésére. E szűkebb testület mellett szükség van egy bővebbre is (pl. Tudományos Tanács néven), amely a szakmai viták lebonyolításának lehet a fóruma. A működési mód meghatározásakor célszerű a finn SAFIR rendszer tapasztalatait felhasználni. Célszerűnek tűnik az NKTH bevonása a csatlakozó pályázati rendszer működtetésére.

A program stratégiájának kidolgozása idején a fentiek szem előtt tartásával ki kell dolgozni a program szervezeti-intézményi és jogi kereteit, mivel a program jóváhagyása természetesen ezeknek a kereteknek a meghatározását is jelenti.

A K+F program szervezésében az alábbi szervezetek közreműködése nagyon fontosnak ítélné:

- o Létre kell hozni egy nukleáris Technológia Platformot, amelynek tagjai a program résztvevői és finanszírozói. A Platform feladata lesz a program kutatási tervének meghatározása és a program finanszírozásának megszervezése. A Platformnak nem lesz operatív feladata, a program munkájába nem avatkozhat bele, de időről időre értékelné a program eredményeit és aktualizálná a célokat.
- o Az Országos Atomenergia Hivatal Tudományos Tanácsának feladata a K+F program kormányzati elfogadtatásra való előterjesztése, az ezt megelőző szakmai ellenőrzés, majd a program évenkénti legfelsőbb szakmai szintű ellenőrzése.
- o A Magyar Tudományos Akadémia projektet kíván szervezni a 4. generációs atomerőművekre vonatkozó kutatások céljából. Ez az átfogó program része, esetleg egyik alprogramja lehet. Ugyanakkor bizonyos önállósága azért lehet célszerű, mert egyrészt a magfúziós kutatások, másrészt más akadémiai intézetek bekapcsolódása mindenképpen további megfontolások tárgyát fogja képezni.
- o Az NKTH-val és az új blokkok kapcsán tervezett ún. klaszterrel való kapcsolat később, 2010 folyamán elemzendő.

A hazai K+F programban valamennyi olyan kutatót tekintetbe kell venni, akik jelenleg is ezen a területen dolgoznak. Ezek száma mintegy 150 főre tehető, finanszírozásukat mintegy egyharmad részben a Magyar Tudományos Akadémia, részben a Budapesti Műszaki Egyetem költségvetése fedezi, a másik kétharmad rész fedezetét pályázati, illetve szerződéses megbízások adják. Az előzetes becslések szerint a fentiekben vázolt hazai K+F program valóra váltásához a kutatók számát meg kellene kétszerezni, hiszen a kutatások eddig igen nagy

mértékben a három célkitűzés egyikére, a meglévő paksi blokkok biztonságos működésére és üzemidejük meghosszabbítására irányultak, ezután pedig a másik két célkitűzés elérésére is koncentrálni kell.

A hazai K+F program költségeinek becslésekor külön kell foglalkozni a kutatási infrastruktúra finanszírozásával, mind a beruházási, mind az üzemelési és leszerelési fázisokban. Ha megvalósul, akkor az ALLEGRO projekt Magyarországra jutó költségei önmagukban is igen magasak lesznek, jóllehet e költségek magyar cégeknél jelentkező megtérülését mindenképpen biztosítani kell. A kutatóreaktor és az oktatóreaktor működtetése műszaki szempontból még kb. 10-15 évig biztosítható, de esetleges pótlásukról időben kell határozni. A program költségeinek meghatározásakor figyelembe kell venni a külföldi infrastruktúrák igénybe vételét is, amely korántsem jelent mindig ingyenes hozzáférést.

5. Összefoglalás

A XXI. század folyamán az atomenergetika az egész világon, Európában és Magyarországon is meghatározó mértékben fog hozzájárulni az energiaellátáshoz és az éghajlatváltozást feltehetőleg kiváltó tényezők mérsékléséhez. Az atomenergia használata csúcstechnológia, amelynek magas színvonalú, biztonságos használatához jelentős szellemi koncentrációra van szükség az adott országban mind az atomerőművek üzemeltetőinél, mind az illetékes hatóságoknál, és ennek a kompetenciának a háttérét csakis az országban működő kutatóintézetek és kutatóegyetemek munkája és az oktatás biztosíthatja.

Az atomenergetika akkor őrizheti meg hosszabb távon is mai kulcsfontosságú szerepét, ha jelentős kutatás-fejlesztés alapján világviszonylatban megvalósul a fűtőelemciklus zárása és a keletkező radioaktív hulladékok mennyiségi és veszélyességi minimalizálása, azaz az atomenergetika használata a fenntartható fejlődés elemévé válik. Ennek előfeltétele az atomerőművek 4. generációjának, a gyorsreaktoroknak a kifejlesztése. Ma nem láthatóak olyan energiaforrások, amelyek az atomenergetika tartós használatát feleslegessé tennék, ezért elmondható, hogy az atomenergetika hosszú távú kutatás-fejlesztési elképzelései az egész emberiség jövőjét szolgálják. A hazai nukleáris kutatás-fejlesztésnek ezekre a távlati kérdésekre is koncentrálnia kell, mivel

- a hazai fűtőelemciklus optimalizálása alapvető fontosságú kérdés az atomenergetika hosszú távú hazai használata szempontjából,
- a kutatóintézetek, a kutatók nem állhatnak meg az aktuálisan felmerülő kérdések megoldásánál, az igazi intellektuális kihívást a távlati célokból eredő feladatok megoldása jelenti, így ezek biztosítják a folyamatosan szükséges szellemi háttér, szakértelem magas színvonalát,
- Európa vezető szerepe az atomenergetikai fejlesztésekben igen lényeges az EU versenyképessége szempontjából, ezért Magyarországnak ugyanúgy, mint az EU többi tagállamának ki kell vennie részét ezekből a közös erőfeszítésekből.

Mindezek miatt a hazai atomenergetikai kutatás-fejlesztés hiteles jövőképpel rendelkezik. Ennek a jövőképnek meghatározó elemeit elemzi ez az anyag, továbbá egy olyan javaslat kereteit fogalmazza meg, amely előírányozza egy koordinált hazai nukleáris kutatás-fejlesztési program céljait, fő területeit és alapvető szervezési elveit.

6. Hivatkozások

- [1] IAEA PRIS (Power Reactor Information System) Database, <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.charts.htm>
- [2] <http://nuclear.gov/genIV/neGenIV1.html>
- [3] <http://gif.inel.gov> (Gen IV International Forum)
- [4] World Energy Outlook 2008, OECD International Energy Agency, 2008
- [5] An energy policy for Europe, European Commission, COM(2007) 1, January 2007
- [6] A European Strategic Energy Technology Plan (SET-PLAN), „Towards a low carbon future”, European Commission, COM(2007) 723
- [7] The sustainable nuclear energy technology platform (SNE-TP), Euratom, EUR 22842, 2007
- [8] European Nuclear Energy Forum, <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/forum/>
- [9] U. Blohm-Hieber: Europe’s Strategic Vision, IAEA Bulletin 49-2, March 2008
- [10] M. A. Fütterer, U. Blohm-Hieber, M. Deffrennes: The Role of Nuclear Energy in the European Union, Today and Tomorrow, Nuclear Power Generation Forum, Budapest, 17 November 2009
- [11] Directive 2009/28/EC of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union 5.6.2009
- [12] Strategic Research Agenda (SNE-TP SRA 2009), May 2009 (<http://www.snetp.eu>)
- [13] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, US DOE, 2002
- [14] S. Saint-Pierre, WNA Worldwide Overview of Front-End Nuclear Fuel Cycles, URAM-2009, Vienna, June 22-26, 2009 (<http://www.world-nuclear.org/info/inf28.html>)

7. Rövidítések jegyzéke

ABWR	= Advanced Boiling Water Reactor
ACR	= Advanced CANDU Reactor
ADS	= Accelerator Driven System
AES-92	= VVER-1000 reaktortípus
APWR	= Advanced Pressurized Water Reactor
APR	= Advanced Pressurized Reactor
AP600	= Advanced Pressurized Water Reactor 600
AP1000	= Advanced Pressurized Water Reactor 1000
BWR	= Boiling Water Reactor
CANDU	= CANada Deuterium Uranium (természetes urán, nehézvíz moderátor + hűtés)
EC	= European Commission
ENEF	= European Nuclear Energy Forum
EPR	= European Pressurized water Reactor (az USA-ban „Evolutionary Power Reactor”)
ESBWR	= Economic Simplified Boiling Water Reactor
EURATOM	= European Atomic Energy Community
FNR	= Fast Neutron Reactor
GEN IV	= az energiatermelő atomreaktorok 4. generációja
GFR	= Gas-cooled Fast Reactor
GNEP	= Global Nuclear Energy Partnership
HTR	= High Temperature Reactor
LFR	= Lead-cooled Fast Reactor
LWR	= Light Water Reactor
MSR	= Molten-Salt Reactor
PWR	= Pressurized Water Reactor
P&T	= Partitioning and Transmutation
SCWR	= Supercritical Water Reactor
SET	= Strategic Energy Technology
SFR	= Sodium-cooled Fast Reactor
SNE-TP	= Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
VHTR	= Very High Temperature Reactor
VVER	= Víz-Vizes Energetikai Reaktor