

## 2.8 | Az atomerőművek fejlesztéseiről 4.4

*Tárgyszavak: nyomott vizes reaktor; gázhűtésű reaktor; grafit-moderátor; héliumhűtés.*

### Koreai fejlesztések

Évek óta beszélnek sok országban az ún. továbbfejlesztett nyomott vizes reaktorokról (PWR), de csak kevés országban tettek konkrét lépéseket a megvalósításra. Közéjük tartozik Dél-Korea, amelynek atomerőmű-építési programja (1. táblázat) eddig is meghatározó volt, így az ország villamosenergia-termelésének 43%-át már ezek az erőművek adják.

A koreai reaktorok következő nemzedékének (KNGR<sup>1</sup>) továbbfejlesztett, nyomott vizes reaktorát (APR), az APR1400-ast már jövőre építeni kezdik. Az első két egység fő elemeit 2003–2006 között gyártják le, és a kereskedelmi üzem a Shin-Kori 3 és 4 egységnél várhatóan 2010-ben, ill. 2011-ben kezdődik. További kettőt akarnak még egyelőre nem meghatározott helyen ebből a típusból felépíteni. Bár ezzel három évet csúszik az eredetileg 1998-ban indult KNGR-program, mégis ez lesz az első működő továbbfejlesztett, nyomott vizes reaktorú egység a világon.

Az új egység villamos teljesítőképessége 1400 MW. Ez a típus az 1000 MW-os, ún. szabványos koreai atomerőműnek (KSNP<sup>2</sup>) a továbbfejlesztése, amelyből már kettő működik az országban, és négy további üzembe kerül még az évtized első felében. Van ennek egy javított változata (KSNP+) is, amelyből az évtized második felében szintén négyet fognak a tervek szerint üzembe helyezni. Az első két egység építése idén ősszel kezdődik. Két KSNP egység építését készítették elő Észak-Korea részére az ún. KEDO-program<sup>3</sup> keretében amerikai támogatással.

Az APR1400-as számos tekintetben továbbfejlesztése a KSNP-nek, így a biztonság és a gazdaságosság vonatkozásában. Az amerikai terminológia szerint megfelel a passzív biztonság tekintetében a reaktorfejlesztés harmadik nemzedékének. Gazdasági tekintetben az a cél, hogy mintegy 20%-kal legyen

<sup>1</sup> KNGR = Korean Next Generation Reactor

<sup>2</sup> KSNP = Korean Standard Nuclear Power Plant

<sup>3</sup> KEDO = Korean Peninsula Energy Development Organization

olcsóbb a szénműveknél, ezért növelték meg például a korábban tervezett 1300 MW-ról a villamos teljesítőképességet is.

1. táblázat

Dél-Korea atomerőművei

Atomerőművek	Üzembe helyezés éve	Teljesítőképesség, MW	Típus
<b>Működő egységek</b>			
Kori 1	1978	587	PWR
Wolsung 1	1983	679	Candu
Kori 2	1983	650	PWR
Kori 3	1985	950	PWR
Kori 4	1986	950	PWR
Yonggwang 1	1986	950	PWR
Yonggwang 2	1987	950	PWR
Ulchin 1	1988	950	PWR
Ulchin 2	1989	950	PWR
Yonggwang 3	1995	1000	PWR
Yonggwang 4	1996	1000	PWR
Wolsung 2	1997	700	Candu
Wolsung 3	1998	700	Candu
Ulchin 3	1998	1000	KSNP
Wolsung 4	1999	700	Candu
Ulchin 4	1999	1000	KSNP
<b>Épülő egységek</b>			
Yonggwang 5	2002	1000	KSNP
Yonggwang 6	2002	1000	KSNP
Ulchin 5	2004	1000	KSNP
Ulchin 6	2005	1000	KSNP
<b>Tervezett egységek</b>			
Shin-Kori 1	2008	1000	KSNP+
Shin-Kori 2	2009	1000	KSNP+
Wolsung 5	2009	1000	KSNP+
Shin-Kori 3	2010	1400	APR1400
Wolsung 6	2010	1000	KSNP+
Shin-Kori 4	2011	1400	APR1400
? 1	2013	1400	APR1400
? 2	2014	1400	APR1400

*Megjegyzés:* A Kori 1 és a Wolsung 1 egységeket 2008-ban, ill. 2013-ban leállítják.

Az új típus fejlesztése már 1992-ben megkezdődött, és a folyamat lényegében három lépcsőből áll. Az első fokozat, a koncepcionális tervezés 1994 decemberében zárult. A második szakaszban tervezték meg az alapvető rendszereket (ez 1999 februárjában volt kész). A harmadik lépcsőben zajlik jelenleg is a részletek megtervezése. Azt remélik, hogy az építkezések megkezdéséig a részlettervek 70%-ával készen lesznek.

Az APR1400-as tervezésekor számos alapkövetelményt támasztottak (2. táblázat). A szabványos koreai típushoz hasonló, bevált megoldásokat megtar-

tottak. Így például a reaktoronkénti két gőzgenerátort a négy fő keringető szivattyúval. Jelentősen megnövelték azonban 2815 MW-ról a reaktor hőteljesítményét. A passzív biztonsági elemeknél a következő fejlesztéseket vezették be: négyszeres biztonsági befecskendezés, közvetlen injektálás, a biztonsági tartályon belüli üzemanyag-tárolós víztartály, nyomásérzékelő lekapcsoló berendezés, cserélhető hűtőrendszer-leállító, kettősfalú nagy biztonsági tartály (containment), digitális műszerezés és ellenőrzés.

2. táblázat

Alapvető reaktortervezési mutatószámok

Nukleáris gőzfejlesztő hőteljesítménye	4000	MW
Tervezett élettartam	60	év
Építési idő	48	hónap
Rendelkezésre állás	90	%
Üzemanyag-ellátási időszak	18 - 24	hónap
Gazdaságossági előny a szénerőművekhez képest	20	%
Foglalkozási sugárveszély	< 1	man.Sv/reaktorév
Földrengési biztonsági lekapcsolás	0,3	g
Magsérülési valószínűség	< 10 <sup>-5</sup>	reaktorévenként
A biztonsági tartály hibavalószínűsége	< 10 <sup>-6</sup>	reaktorévenként
A kezelői beavatkozás időigénye veszély esetén	30	perc
A reaktor által elviselhető áramszünet nagysága	8	óra

### Dél-Afrikai fejlesztések

Bár Dél-Afrika nem az egyetlen ország, ahol a nagyhőmérsékletű, gázhűtésű, negyedik nemzedékes, ún. kavicságyas (golyós), modulus reaktort (PBMR<sup>4</sup>) fejlesztik a világon, hiszen Kínában 2000 decemberében indult a 10 MW hőteljesítményű kutatóreaktor, mégis ez az ország az, amely a legmészszebbre jutott a kereskedelmi típus megvalósításában. A fejlesztésben részt vesz az ország villamos társasága, az Escom, a Dél-Afrikai Ipari Fejlesztő Társaság (IDC), a British Nuclear Fuels (BNFL) és az amerikai Exelon Corporation. Koeberg közelében Fokváros mellett 120 MW villamos teljesítőképességű, demonstrációs modult építenek. Ez az egyetlen hely Afrikában, ahol atomerőmű működik.

Ebből a modulból akarják kialakítani a kereskedelmi PBMR típust, amely tíz modul tartalmazna, így a villamos teljesítőképessége elérné az 1200 MW-ot. A fajlagos beruházási költség mintegy 1000 USD/kW lenne, szemben a 900 USD/kW-ért megépíthető dél-afrikai szénerőművekkel. A cél az, hogy ezzel a fejlesztéssel a villamosenergia-termelési egységköltséget a világátlag 0,034 USD/kWh (kb. 10 Ft/kWh) alá csökkentsék.

<sup>4</sup> PBMR = Pebble Bed Modular Reactor

A terv első szakaszában részletes megvalósíthatósági tanulmányt dolgoznak ki, elkészítik a környezetvédelmi hatásvizsgálatokat és a közösségi elfogadtatás tervét. A kormány 2000 áprilisában jóváhagyta az indítást, és a tanulmányok készítése júliusban megkezdődött. A cél az, hogy a kormány 2002 februárjában elfogadja a környezetvédelmi hatásvizsgálat eredményét. A kiégetett üzemanyagot Vaalputs közelében tárolnák a föld alatt gránitkőzetben kialakított tárolóban.

A részvényesi jóváhagyás, a tanulmányok elfogadása és az engedélyek beszerzése után az építkezés 2002 második felében kezdődhetne el, így az első PBMR típus 2005 végére készen lenne, és az üzemeltetés 2006-ban már megkezdődhetne.

A technológia fő elemeit a korábbi években már fejlesztették. Így Németországban már foglalkoztak a THTR (tóriumos nagyhőmérsékletű reaktor) fejlesztésével, és a technológiaátadás feltételeit 1999-ben letárgyalták az eredeti tervezőkkel, az ABB-vel és a Siemens céggel.

A PBMR függőleges elrendezésű, nyomás alatti acéltartályból áll, amelynek átmérője 6 m, magassága 20 m. A tartályt 100 cm vastag grafitteglabevonattal látják el, amely részben reflektorként, részben passzív hőszállító közegként szolgál. Ebben a tartályban helyezkednek el a teniszlabda nagyságú üzemanyaggyölgők, amelyek szilícium-karbid és pirolitikus karbon-bevonatú, grafitba ágyazott, dúsított urán-oxidot tartalmaznak. A hűtésre héliumot használnak. Ez az energiaelvezető közeg, amely gázturbinás rendszert működtet.

Normál működési feltételek mellett a PBMR magjában 440 000 golyó van, amelyből 330 000 tartalmaz hasadóanyagot. A többlet moderátorként használt grafitgolyó. Ezek a mag közepén vannak, amelyet gyűrű alakban vesznek körül a hasadóanyag-golyók. Ez az elhelyezés korlátozza a maximális hőmérsékletet. A hélium mintegy 500 °C-on és 70 bar nyomáson lép be a reaktortartályba, és a golyókon átáramolva a tartály alján mintegy 900 °C hőmérsékleten lép ki.

A forró gáz három, sorba kapcsolt gázturbinába áramlik. Az első kettő hajtja a kompresszort, a harmadik pedig a villamos generátort. A kiáramló 530 °C hőmérsékletű és 26 bar nyomású héliumot lehűtik, és a kompresszorok visszavezetik a reaktortartályba. Az egész zárt körfolyamat a szokásos Brayton-ciklusnak felel meg, amelyben közbenső hűtés van. Jó hatásfokú rekuperátor gondoskodik a munkaturbina után a hő visszavezetéséről.

A nagy hőmérséklet és nyomás jó hatásfokot tesz lehetővé. Míg a szokásos vízhűtésű reaktorok kis hőmérsékleten működnek, ezért a hatásfokuk csak 33% körül van, az új reaktortípussal 40% feletti hatásfok elérhető, sőt később a nagyobb hőmérsékletek lehetővé teszik majd az 50% elérését is.

A friss üzemanyag-golyókat folyamatosan a reaktor tetején vezetik be, a kiégetteket pedig alul veszik ki. Amennyiben a kivett golyók még megfelelő aktivitású hasadóanyagot tartalmaznak, azokat visszavezetik a reaktor tetején át. Egy kiégetési ciklus mintegy három hónapig tart.

Egy üzemanyag-golyó átmérője 60 mm, és mindegyik 9 g urániumot tartalmaz. Az anyag mintegy egy milliméter átmérőjű grafitporral kevert, 15 000 labdácskából áll, amelyet összepréselnek 50 mm-es golyóvá, és ezt veszi körül az 5 mm-es karbon bevonat. Egy töltetben összesen 2,79 tonna uránium van. A töltet 8%-ra dúsított U-235-ből áll. Egy golyó teljes tömege 210 g. A gyártási technológia Németországból származik.

A kiégett üzemanyagot tíz tartályban tárolják, mindegyikben 500 000 golyó tárolható. A tároló mindig száraz, hűtéséről természetes huzat gondoskodik.

A PBMR inherens biztonságú, ami azt jelenti, hogy a legrosszabb esetben sincs szükség rövid vagy középtávon emberi beavatkozásra. A reaktormag energiasűrűsége kicsi (csak 1/30-ad része a nyomott vizes reaktorokénak), és a nagy hőmérsékletnek az anyagok jól ellenállnak. A magban a hőmérséklet akár 1600 °C-ig is megnövekedhet, a szilícium-karbid bevonat ennek is ellenáll. A reaktivitás negatív együtthatója miatt a nukleáris reakció úgylé a nagy hőmérsékleten, és a lehűtés természetes árammal is biztosított.

Az Exelon cég jelezte, hogy a PBMR konstrukció licencét használva az USA-ban is megvalósíthatnák ezt a berendezést.

**(Dr. Stróbl Alajos)**

Koreans prepare to build the first advanced PWR. = Modern Power Systems, 21. k. 8. sz. 2001. p. 37–41.

Ferreira, T.: PBMR: The future is now. = Modern Power Systems, 21. k. 8. sz. 2001. p. 43–44.