

A KÍNAI ATOMENERGIA-IPAR FEJLŐDÉSE II. – ATOMERŐMŰVI TECHNOLÓGIAFEJLESZTÉS

Kirchkeszner Csaba, Dr. Hugyecz Attila – 2021. augusztus 4.

Legutóbbi anyagunkban bemutattuk, hogy Kínának milyen atomerőmű-építési tapasztalatai vannak, részletesen végig jártuk azt a majdnem négy évtizedig tartó utat, amit Kína az atomerőmű-építések során bejárt. **Elemző percek sorozatunk jelen számában a kínai atomerőművi technológiafejlesztés azon főbb lépéseit vesszük sorra, melynek során Kína mára eljutott oda, hogy saját 3. generációs atomerőművi technológiával rendelkezik (Hualong One reaktortípus).**

A kínai atomerőművi technológiafejlesztés alapvetően két fő szálon futott (**1. ábra**). Az egyik szál kiindulópontját a Franciaországból importált M310-es blokk típus jelentette, a másik szál a kínai tervezésű CNP-300-as blokkra épült.

Az egyik kínai fejlesztési vonulat

M310 → CPR-1000

Az egyik fejlesztési irány a francia **M310** nyomottvizes atomreaktorból indult ki, e blokk típus jelentős továbbfejlesztését jelentette. Ez lett a CPR-1000-es blokk típus (**C**hinese **P**ressurized **W**ater **R**eactor), amelyből összesen húsz blokk épült meg. **A CPR-1000-es fejlesztése során a reaktortartályon az aktív zóna magasságában megszüntették a hegesztési varratot, digitális irányítástechnikai rendszert vezettek be, és továbbfejlesztették a blokkvezénylőt**, melyek révén jelentősen csökkentették az emberi eredetű hiba kockázatát. Mindezek mellett a CPR-1000-es blokkokba már beépítésre kerültek **hidrogén-rekombinátorok** egy esetleges súlyos balesetnél nagy mennyiségben keletkező hidrogéngáz koncentrációjának csökkentésére.

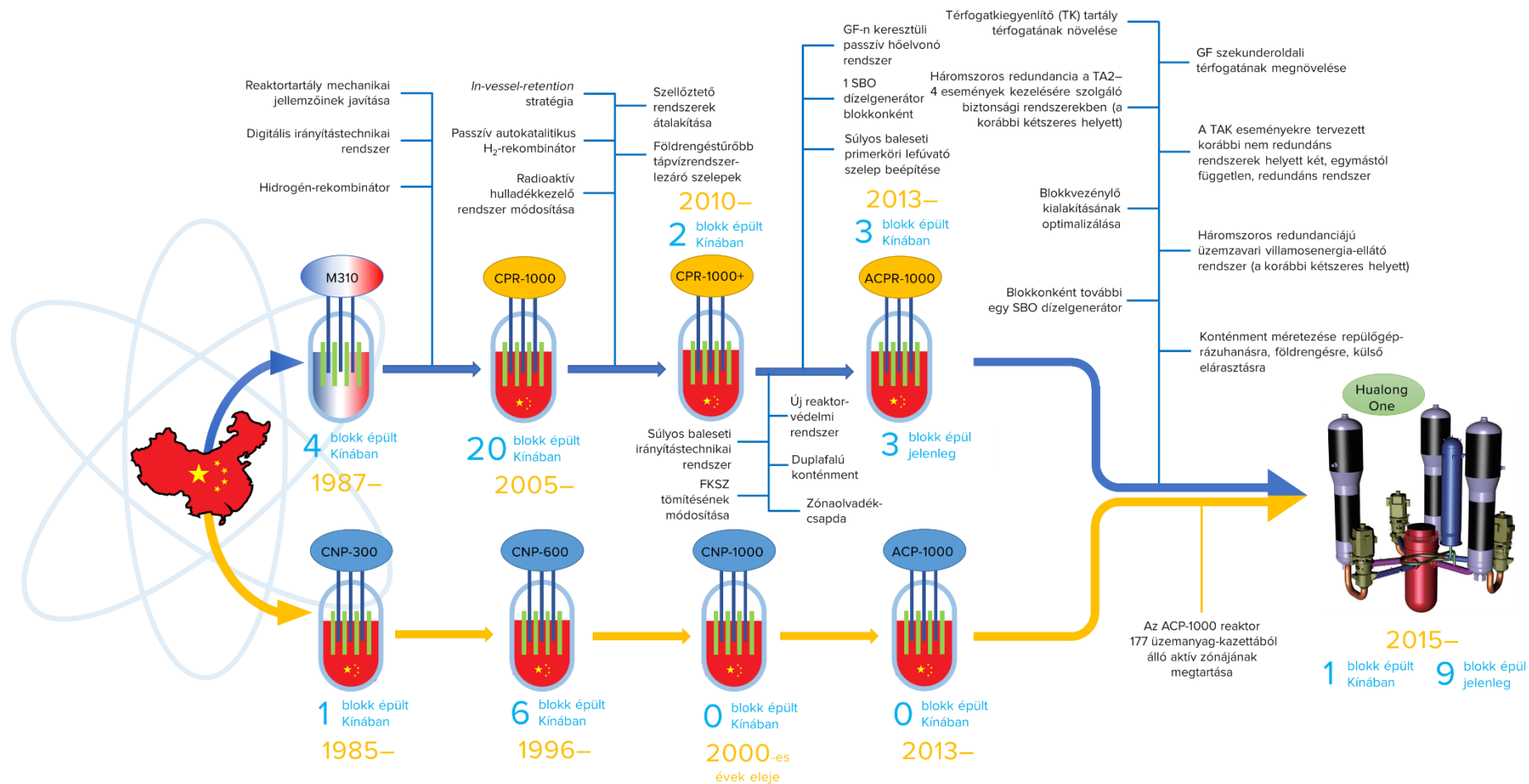
CPR-1000 → CPR-1000+

2009-re a CPR-1000-es blokk típust továbbfejlesztették, melynek eredményeként megszületett a **CPR-1000+**, melyet már úgy terveztek, hogy zónaolvadás bekövetkezése esetén elősegítse a zónaolvadék reaktortartályon belül tartását (**in-vessel-retention stratégia**), megelőzve ezzel a tartályból kiömlő zónaolvadékhoz kapcsolódó folyamatokat. A CPR-1000 esetén bevezetett H₂-rekombinátorok kialakításának optimalizálása révén eljutottak a **passzív autokatalitikus rekombinátorokhoz**. További fontos biztonsági fejlesztés **volt a földrengéseknek nagyobb mértékben ellenálló tápvízrendszerek lezáró szelepeinek beépítése** is, annak érdekében, hogy a tápvízvezeték törése esetén a primer kör hűtésével ne növeljük a reaktivitást.

CPR-1000 → ACPR-1000

A 2011-es fukushima-i atomerőmű-balesetet követően a CPR-1000+ blokkok biztonságát – akárcsak más típusú blokkokét is – a valószínűségi biztonsági elemzések felülvizsgálatával újraértékelték. A háromhurkos CPR-1000+ továbbfejlesztésével jött létre a már 3. generációs számító ACPR-1000 blokk típus (Advanced Chinese Pressurized Water Reactor). A 2. generációs CPR-1000+ technológiához képest a főbb változások a következők voltak:

- ➔ **egyszeres, nem redundáns extra hőelvonó-rendszer beépítése** a reaktor, a konténment és a pihentető medence hűtésére a végső hőelnyelő elvesztése esetére. **Ez túlnyomóan aktív biztonsági rendszereket tartalmaz, de a reaktorakna elárasztására szolgáló hőelvonó-rendszer passzív**, vagyis ennek működtetése nem igényel külső energiaforrást, működése a fizika törvényszerűségein (pl. gravitáció) alapul.
- ➔ **A tervezési alapon túli (TAK) balesetek és a súlyos balesetek kezelésére a gőzfejlesztőn keresztüli passzív hőelvonó-rendszert**, valamint súlyos baleseti **primerköri lefúvató szelepet** építettek be.
- ➔ A blokkok **teljes telephelyi feszültségvesztésének** esetére ún. SBO (station black-out) **dízelgenerátort** telepítettek.
- ➔ **Módosították a főkeringtető szivattyú (FKSZ) tömítését** a primerkör integritásának fenntartása érdekében a teljes telephelyi feszültségvesztés (SBO) esetére.
- ➔ **Új, diverz reaktorvédelmi-rendszer** kiépítése, mellyel elkerülhetők a közös eredetű meghibásodásokból eredő problémák.



1. ábra: A kínai atomerőmű-fejlesztések főbb vonatai és a Hualong One evolúciós atomreaktor fejlődési útja (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

- ➔ Beépítésre került egy **súlyos baleseti irányítástechnikai rendszer** és egy **szünetmentes villamosenergia-betáplálási rendszer** a súlyos baleseti monitorozó és beavatkozó rendszerek működtetéséhez.

A blokk a korábbi szimplafalú konténment helyett **duplafalú konténmenttel** rendelkezik, melyek közül a külső fal a környezeti behatásoktól védi a reaktort és az ott található egyéb főberendezéseket, míg a belső fal a környezetet védi a radioaktív anyagok kikerülésétől. Emellett az az ACPR-1000 már rendelkezik **zónaolvadék-csapdával** is.

A másik kínai fejlesztési vonulat

CNP-300→ CNP-600→ CNP-1000→ ACP-1000

A kínai atomerőművi technológia másik fejlesztési iránya az egykori kínai tervezésű, egyhurkos **CNP-300-as** blokkra épült, melyet a '90-es években a kínai mérnökök továbbfejlesztettek. E fejlesztés eredményeként született meg a **második generációs, kéthurkos CNP-600-as** blokk, ami az alapját jelentette a későbbi **2+ generációs, háromhurkos és 1000 MW_e névleges teljesítményű CNP-1000** blokknak. Ennek fejlesztésébe a kínai fejlesztők az amerikai székhelyű Westinghouse-t és a francia Framatome-ot is bevonták. A tervek a 2000-es évek elejére készültek el, és a szállító társaság, a kínai CNNC már egy kétblokkos projektet is előkészített (*Fangjiashan* projekt), amely végül két CPR-1000-es blokkal valósult meg, a CNP-1000-es technológia fejlesztését pedig 2007-ben felfüggesztették. A CNNC viszont mindenképpen törekedett arra, hogy rendelkezzen **3. generációs** blokk típussal, és a korábbi CNP technológia alapjaiból kiindulva 2013-ra el is jutott az **ACP-1000**-es modell kifejlesztéséig.

Egy atomerőmű-fejlesztési út, amin Kína nem haladt tovább

Az amerikai AP1000-es blokk típus a 2000-es évek elején került Kínába, ennek során a technológia Kínának történő átadására is sor került (technológia-transzfer). Kína a Fukushima-i atomerőművi balesetet követően a blokk technológiáját továbbfejlesztette (vízzáró ajtók, 72 órás autonóm vízellátás, új monitoring rendszerek a pihentető medencébe, tartalékvezénylő kialakítása). A fejlesztés fő célja az volt, hogy a kínai ipar minél nagyobb beszállítói részarányt tudjon elérni. A tervek egy nagyobb, kb. 1500 MWe névleges teljesítményű blokk, a **CAP-1400**-as irányába haladtak. A CAP-1400 műszaki tervei 2010-re elkészültek. Kína azonban végül nem az amerikai blokk típus, illetve annak továbbfejlesztett változatai megépítése felé vette az irányt, a kínaiak által továbbfejlesztett CAP-1400-as blokkból végül egy sem épült.

Időközben azonban a kormányzat a két kínai tervezésű, 1000 MW_e-os teljesítmény körüli blokk típus-fejlesztések (a fent részletezett ACPR-1000 és az imént említett ACP-1000) ésszerűsítését rendelte el, így a két kínai fejlesztési ág végül összeolvadt – ez lett a Hualong One.

A két fejlesztési vonulat összeolvadása: a Hualong One blokk típus

A Hualong One átfogóbban alkalmazza a mélységi védelem elvét, s az egyes rendszerek fizikai szeparációjának, megnövelt redundanciájának és diverzitásának köszönhetően javítja a súlyosbaleset-megelőző és -kezelő rendszerek hatékonyságát.

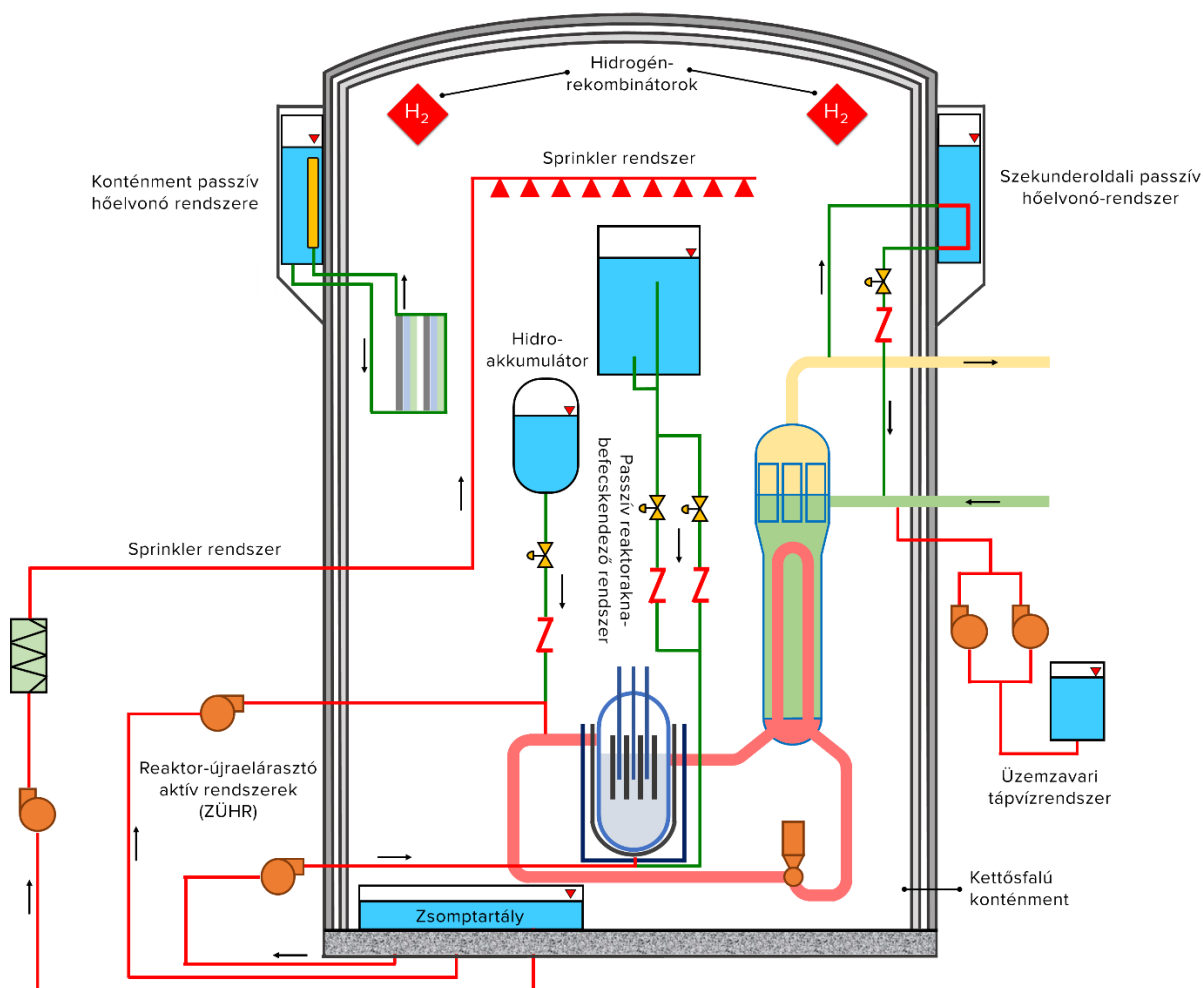
A Hualong One egy háromhurkos (hurkonként egy gőzfejlesztővel rendelkező), **60 év tervezési élettartammal rendelkező, 1170 MW névleges elektromos teljesítményű 3+ generációs atomreaktor**. Aktív zónáját az ACP-1000-es blokk típustól örökölte, így 177 darab négyzet-keresztmetszetű, 17×17-es kiosztású üzemanyag-kazettából és 68 darab szabályozórúd-kötegből áll. Egy kazetta 264 üzemanyag-pálcát, 24 vezetősövet és 1 mérősövet tartalmaz. Üzemanyagként 4,45%-os dúsítású uránt (kiegő méregként pedig gadolínium-oxidot) használ, melynek a maximális kiegészése 52 GW-nap/tU. A reaktor reaktivitásának szabályozása – ahogy már az orosz VVER reaktortoknál is megszokhattuk – szabályozórudakkal, bórsavoldattal és kiegésző mérgekkel történik.

A Hualong One blokk típus fejlesztése során a primerköri hűtőrendszer komoly átalakításon esett át, melynek során a térfogatkiegénylítő (TK) tartály és a gőzfejlesztők (GF) szekunderoldali térfogatát megnövelték. Előbbi jelentősen hozzájárul a primerköri nyomásszabályozási képesség javulásához csökkentve ezzel a primerköri integritásvesztés és a primerköri túlnyomás kialakulásának kockázatát. A GF szekunderoldali térfogatának megnövelése által javult a hőmérsékletszabályozási képesség, valamint egy esetleges hőátadócső-törés esetén ez elősegíti a gőzfejlesztők túltöltődésének elkerülését, így javul a blokk tranziensekkel és balesetekkel szembeni ellenállóképessége. Mindezek mellett, amíg az ACPR-1000-es reaktoroknál a neutronfluxust és a hőmérsékletet csak időszakosan és manuálisan mérték a reaktortartály fenekén kialakított mérőcsatornákon keresztül, addig a Hualong One esetében ezeket a fenékrészen lévő penetrációkat megszüntették, s a mérőműszerek bevezetését a

Hualong One esetén már a tartályfedélen keresztül oldják meg. Ezzel lehetővé vált a zóna neutronfluxusának és hőmérsékletének folyamatos és valós idejű monitorozása.

Az ACPR-1000-hez képest a Hualong One blokk típusba számos, a tervezési alapba (TA2–4) tartozó és az azon túli (TAK) esemény kezelésére szolgáló aktív és passzív biztonsági rendszert átalakítottak. A HPR-1000 néven is ismert Hualong One blokk típusnál a TA2–4 eseményekre tervezett biztonsági **rendszereket (2. ábra) egymástól térben elszeparálták**, s a korábbi kétszeres redundanciájú (de egymástól térben nem elválasztott) rendszereket **háromszoros redundanciájú rendszerekké alakították**. Ezek a változtatások egyaránt érintették a következő aktív biztonsági rendszereket:

- ➔ **az üzemzavari zónahűtőrendszert (ZÜHR)**, mely TA 2–4 és TAK-1 esetén bórsav vizes oldatát juttatja a primer körbe;
- ➔ **a vérszűrő rendszert**, mely TA 2–4 és TAK-1 esetekben nagy bórsavkoncentrációjú vizes oldatot fecskendez a primerkörü hideg ágba a reaktivitás csökkentésére;
- ➔ **az üzemzavari tápvízrendszert**, mely a normál üzemi tápvízrendszerek elvesztése esetén a remanens hő elvezetésére tápvizet szivattyúz a gőzfejlesztőkbe.



2. ábra: A Hualong One aktív (piros vonal) és passzív (zöld vonal) biztonsági rendszerei (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

A tervezési alapon túli eseményekre szolgáló korábbi, nem redundáns biztonsági rendszereket két, egymástól független, redundáns rendszer váltotta fel. Az ACPR-1000-es blokk típusból megtartották a gőzfejlesztőn keresztüli passzív hőelvonórendszert annyival módosítva, hogy ezt egy nagy térfogatú víztartállyal egészítették ki, így elérhetővé vált a blokk 72 órás autonómiája üzemzavar esetén. A Hualong One blokkban a **pihentető medencéből és a reaktorból történő remanenshő-elvonást kétszeresen redundáns aktív rendszerekkel** oldották meg. Ezek az ún. **extra hűtőrendszerek**. A konténment védelmét szolgálja a **konténment passzív hőelvonó rendszere**, beépítésre kerül egy (a konténmentben kialakuló túlnyomás csökkentésére szolgáló) **sprinkler rendszer**, egy a reaktoraknába vizet fecskendező aktív rendszer, a konténmentben elhelyezett reaktor-úraelárasztó tartály és egy passzív reaktorakna-befecskendező rendszer. Az aktív rendszerek az üzemzavari és SBO dízelgenerátorokról

működtethetők és különálló hűtéssel rendelkeznek. Mindezen aktív és passzív védelmi rendszerek mellett a konténmentben még helyet kapott egy **29 passzív, autokatalitikus hidrogén-rekombinátorból álló rendszer és egy hidrogéngáz-monitorozó rendszer** is, mely a cirkónium (majd a króm) és víz magas hőmérsékleten történő reakció során képződő H₂ kémiai megkötésére, ezáltal a hidrogénrobbanás elkerülésére szolgál.

Az aktív és passzív biztonsági rendszereket érintő fejlesztések mellett a Hualong One blokk esetén a korábbi kétszeres redundanciájú **üzemzavari villamosenergia-ellátó rendszereket háromszoros redundanciájú, egymástól független** rendszerekre cserélték. **Így a villamosenergia-ellátó rendszer a normálüzemi rendszerből, az üzemzavari rendszerből, 3 üzemzavari dízelgenerátorból, 2 SBO dízelgenerátorból, valamint egy kétórás és egy tizenkétórás szünetmentes tápegységből áll.**

Míg az ACPR-1000-nél a földrengés által okozott legnagyobb talajfelszíni gyorsulás méretezési értéke 0,2 g volt addig a Hualong One esetén ez 0,3 g. **A Hualong One blokkhoz egy átfogóbb, részletesebb és szisztematikusan felépített veszélyelemzést végeztek, különösen igaz ez a repülőgép-rázuhanásra, a földrengésveszélyre és a külső elárasztásra. A külső konténment falát külső veszélyekre, így repülőgép-rázuhanásra is méretezik.**

Összefoglalva elmondható, hogy az elmúlt három évtizedben Kína egyrészt a saját (CNP-300-as) technológiájára építve, másrészt a francia M310-es atomerőművi blokk technológiáját megismerve a CPN-600-as, a CPR-1000-es, kisebb mértékben az ACP-1000 és az ACPR-1000 blokk típusokon keresztül eljutott oda, hogy kifejlesztette és megépítette saját 3. generációs atomerőművi technológiáját, a Hualong One-t, amelyet jól átgondolt aktív és passzív biztonsági rendszerekkel szerelt fel.