

A VVER reaktorcsalád új fejlesztési iránya: a spektrális szabályozású VVER-S

Dr. Vámos Gábor Antal

7030 Paks, Jókai Mór u. 2/a

A VVER reaktoroknál a spektrális teljesítményszabályozás új koncepció, fő előnye a takarékos természetes urán felhasználás mellett a bóros szabályozás visszaszorítása, ami a folyékony radioaktív hulladék mennyiségének csökkentését eredményezi. Ez elsőként a közepes teljesítményű VVER-S-600 típusban valósul meg, amelyhez a jó gyártási és üzemeltetési referenciával rendelkező VVER-1200 főberendezéseit alkalmazzák kéthurkos kialakítással. A Kolai Atomerőműben létesülő VVER-S-600 prototípus a tervezett 2035. évi üzembehelyezés okozta időkényszer miatt kompromisszumos, átmeneti megoldásokkal valósulhat meg. A VVER-S-600 blokkok beruházásának gazdaságossága a VVER-1200-hoz és a VVER-TOI-hoz viszonyítva – publikus adatok hiányában – nehezen megítélhető. Építésük fő indoka a villamoshálózati korlátokkal rendelkező, távoli gazdasági körzetek energiaellátásának biztosítása.

Bevezetés

Az orosz tervezésű és gyártású nyomottvizes reaktorok általános típus-megnevezése a „víz moderátorú és víz hűtőközegű energetikai reaktor”, röviden VVER. A VVER reaktorcsalád az első ilyen reaktor 1964. évi üzembehelyezése óta komoly fejlődési pályát járt be. A VVER-440 típus óta az egyes típusváltozatok nagy szériaszámú gyártása valósult meg következetesen alkalmazva a korábbi típusokkal kapcsolatban szerzett tapasztalatokat (1. táblázat).

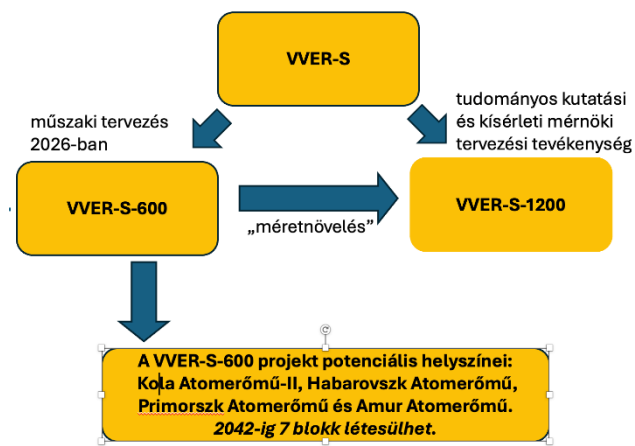
Generáció	Típus	Jellemzők	Teljesítmény
I. Generáció	VVER-210 (V-1)	Az első VVER reaktor Kezdeti, demonstrációs típus. (Novovoronyezs-1, 1964).	210 MW _e
	VVER-365 (V-3M)	Továbbfejlesztett korai típus. (Novovoronyezs-2, 1969).	365 MW _e
II. Generáció	VVER-440 (V-230)	Az első sorozatgyártású típus. Korlátozottabb biztonsági rendszerek, hiányzó konténment. (Már csak 3 blokk üzemel)	440 MW _e
	VVER-440 (V-213)	Továbbfejlesztett VVER-440. Megerősített biztonsági rendszerek, pl. lokalizációs torony a baleseti túlnyomás csökkentésére. (Paksi Atomerőmű 1-4. blokkjai is ilyenek)	440 MW _e
II./III. Generáció	VVER-1000 (V-320)	Jelentős ugrás a teljesítményben és a biztonságban. Teljes, kettős falú konténment épület, modernizált biztonsági rendszerek. (A legelterjedtebb VVER típus.)	1000 MW _e
III.+ Generáció	VVER-1200 (AES-2006)	Evolúciós, továbbfejlesztett VVER-1000. Passzív és aktív biztonsági rendszerek kombinációja. Megfelel a fukushimai baleset utáni szigorúbb nemzetközi biztonsági követelményeknek. (Paksi II. blokkjai is ilyenek)	1150-1200 MW _e
III.+ Generáció	VVER-TOI (AES-2010)	„Optimalizált és Információs”. Még jobban optimalizált tervezés és építés, továbbfejlesztett gazdaságossági és biztonsági paraméterek, digitális irányítási és vezérlőrendszerek. (Kurszk II-1 első hálózatra kapcsolása 2025. 12.31-én)	1255 MW _e

1. táblázat: A VVER reaktorcsalád fejlődése

A VVER reaktorcsalád fejlődéséről és a különböző reaktortípusok elterjedtségéről több áttekintés is rendelkezésre áll [1], [2].

Az 1. táblázatban szereplő, már működő típusok mellett a 2010-es évek közepén felemerült egy új típusváltozat fejlesztése, amelynél a reaktivitás szabályozásában fontos szerepet játszik a neutronspektrum energiaeloszlásának változtatása a kampány során. A Nukleon 2017. májusi számában egy MTA EK cikkben [3] már bemutatták a koncepció lényegét, amely szerint az üzemanyagciklus elején a reaktor kemény neutronspektrummal üzemel, majd a kampány során a neutronspektrum eltolódik a termikus energiatartományba. A spektrális szabályozásra utal az új reaktortípus megnevezése: VVER-S.

Azóta új fejlemény, hogy a Gidropress (a VVER reaktorok főkonstruktőre) és a Kurcsatov Intézet (a VVER reaktorok aktív zónájának tervezője) a VVER-S fejlesztését két változatban végzi közepes (600 MW_e) és nagy (1200 MW_e) teljesítménnyel [4]. Elsőként a VVER-S-600 reaktor tervezése, gyártása és létesítése történik meg, és az így szerzett tapasztalatok alapján később valósulhat meg a VVER-S-1200 reaktor (1. ábra).



1. ábra: A spektrális szabályozású VVER-S fejlesztési változatai

A VVER-S-600 műszaki tervezését 2026-ban fogják elvégezni a következők alapján:

- az üzemeltető szervezet (Rosenergoatom) követelményei,
- a korábbi engedélyezési tapasztalat figyelembevétele,
- a modern biztonsági követelmények figyelembevétele,
- a Kolai Atomerőmű telephelyének környezeti feltételei,
- kipróbált műszaki megoldások alkalmazása.

A közepes teljesítményű VVER-S tervezési céljai és feltételei

Az orosz atomerőművek üzemeltetője, a Rosenergoatom még 2014-ben meghatározta a műszaki és gazdasági követelményeit a közepes teljesítményű atomerőművi blokkokra vonatkozóan [5]. Az Orosz Föderáció kormánya 2016-ban határozatban jelölte ki az első két VVER-S-600-as blokk telephelyét a Kolai Atomerőmű bővítéseként. Ezekből kiindulva kezdte meg a Gidropress és a Kurcsatov Intézet a VVER-S-600 vázlatos tervezését.

A közepes teljesítményű VVER-S blokk főbb műszaki célkitűzései:

- két blokk építése a Kolai Atomerőmű telephelyén 2027-2037 között,
- villamos teljesítmény a generátor kapcsain:
 $\geq 600 \text{ MW}_e$,
- hatásfok: $\geq 37\%$,
- üzemanyagciklus időtartama: 12, 18 és 24 hónap,
- üzemanyag típusa: urán, valamint urán-plutónium,
- napi terhelésszabályozási üzemmód –
100–40(50)*–100% (* különböző forrásokban eltérő adatok szerepelnek),
- biztonsági szint: nem alacsonyabb, mint a 3+ generációs atomerőművekkel szemben támasztott követelmények,
- a reaktor tervezett üzemideje: 80 év.

A közepes teljesítményű VVER-S blokk főbb tervezési feltételei:

- hagyományos bóros szabályozás és spektrális szabályozás együttes alkalmazása: bóroladat bevittelt csak lehűtőskor és leálláskor alkalmaznak, nincs bóros szabályozás a manőverező üzemmódokban, sem a reaktivitástartalék kompenzálása során, ezúton megvalósul a folyékony radioaktív hulladék mennyiségének csökkentése,
- referencia megoldások megőrzése: a VVER-S-600 reaktor kialakításához a VVER-1200 főberendezéseit alkalmazzák, de a hurkok száma 4 helyett 2,
- Aktív zóna kifejlesztése 100% U-Pt üzemanyag-töltettel, 0,7 Pu tenyésztési tényező elérése (a korábbi VVER-ekre jellemző 0,35-0,4 helyett),
- az olvadékcspada alkalmazása helyett olvadék-visszatartás és -hűtés a reaktortartályban,
- a tervezési és műszaki megoldások későbbi „méretarányos” átvitele 600-ról 1200 MW-ra, figyelembe véve a VVER-S-600 tervezése és létesítése során szerzett tapasztalatokat,
- Oroszországban gyártott turbógenerátor-egységek alkalmazása 37% hatásfokkal,
- 4x100%-os biztonsági rendszer alkalmazása (alválozat: 2x200%-os rendszer),

- a VVER-TOI (Kurszki Atomerőmű II. kiépítés) passzív maradványhő-elvezető rendszerének alkalmazása,
- a reaktorépület fokozottan szeizmikus régiókban történő alkalmazásra való tervezése az esetleges export lehetőségének érdekében,
- a villamos kábelkapcsolatok rövidítése azáltal, hogy az elektrotechnikai berendezéseket a fogyasztók közelében helyezik el,
- az üzemeltetés biztonságának növelése: A 10 kV-os és 0,4 kV-os berendezések szétválasztása, külön helyiségek kijelölése a tervezési alapon túli üzemzavarok biztonsági rendszerei számára,
- a reaktorépület villamos helyiségeinek kivitele a szabad hozzáférésű zónába,
- kezdetben átmenetileg U, távlatban U-Pu üzemanyag használata,
- TUK 137.E típusú konténer alkalmazása a telephelyen belüli üzemanyag-szállításra, a friss és a kiégett üzemanyagra egyaránt.

Bár a tervezési feltételek között szerepel a Rosatom export potenciáljának bővítése közepes teljesítményű atomerőművi blokkal, az export potenciált az urán-plutónium üzemanyag valószínűleg korlátozni fogja az Oroszországgal határos országokra.

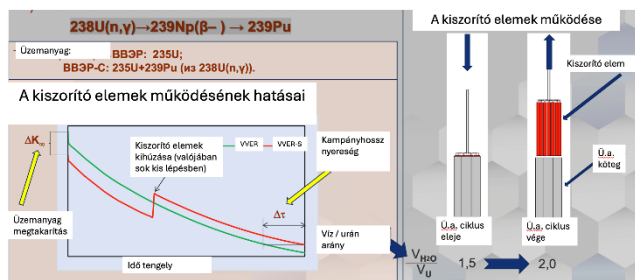
A spektrális szabályozás koncepciója a VVER-S reaktorokban

A spektrális szabályozás alapja, hogy az üzemanyagciklus kezdetén a neutron spektrumot keményebbre alakítják, emiatt:

- a páratlan tömegszámú izotópok hasadási keresztmetszete alacsonyabb,
- az ^{238}U izotópok hasadásának részaránya magasabb,
- a $^{238}\text{U}(n,\gamma) \rightarrow ^{239}\text{Np}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ reakciók eredményeként az ^{238}U izotópok neutronbefogása, és így a Pu felhalmozódás magasabb.

Az üzemanyagciklus folyamán a neutronspektrumot lágyabbra változtatják, emiatt a ciklus vége felé a Pu intenzívebben kiég. A cél nem plutóniumtermelés, hanem az ^{238}U nagyobb mértékű felhasználása egyrészt az intenzívebb hasadás, másrészt a ^{239}Pu -má történő átalakulás révén. Összességében a célkitűzés a természetes urán igényének csökkentése 130 t/(GW_e*év) értékig a jelenlegi 140-160 t/(GW_e*év)-ről.

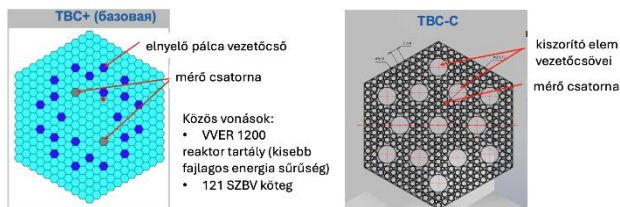
A neutronspektrum változtatását kizorító elemekkel végzik, amelyek a ciklus elején moderátort szorítanak ki az üzemanyagkötegekből, ami keményebb neutronspektrumot eredményez. Az üzemanyagciklus során a kizorító elemeket a neutronspektrum lágyítása érdekében folyamatosan kihúzzák az aktív zónából. Mindez a 2. ábrával szemléltethető [6]:



2. ábra: A spektrális szabályozás elve vízkiszorító elemekkel

A spektrális szabályozású VVER-S reaktorok aktív zónájának tervezési megoldásai

A VVER-S-600 reaktorokhoz jelenleg két üzemanyagköteg fejlesztési változat áll kidolgozás alatt: a Kolai Atomerőmű két blokkjához a TVS-M+, a későbbi blokkokhoz pedig a perspektivikus TVS-S (3. ábra).



3. ábra: A VVER-S-600 üzemanyagának két fejlesztési változata

A VVER-S távlatban TVS-S (spektrális) típusú üzemanyagkötegekkel fog működni. A perspektivikus TVS-S köteg sűrű rácsosztású (11,64 mm), 305 db 9,1 mm átmérőjű üzemanyagpalcát tartalmaz, és 13 vezetőcsővel rendelkezik a kiszorító elemek számára. A kiszorító elemek neutron nem elnyelő anyaggal (SiO_2/MgO) kitöltött Zr csövek, amelyek segítségével a víz-urán arány a 1,5-2,0 tartományban lesz változtatható. A spektrális szabályozás eredményeként a természetes urán felhasználása urán üzemanyaggal kb. 5%-kal, urán-plutónium üzemanyaggal kb. 10%-kal csökkenthető az eddigiekhez képest [7]. Mivel a 600 MW_e teljesítményszinthez el akarták kerülni egy új reaktor fejlesztésével és gyártásával járó kockázatokat, az aktív zóna a VVER-1200-as blokkéval azonos reaktortartályban fog elhelyezkedni, ezáltal a zóna fajlagos energiasűrűsége kisebb lesz.

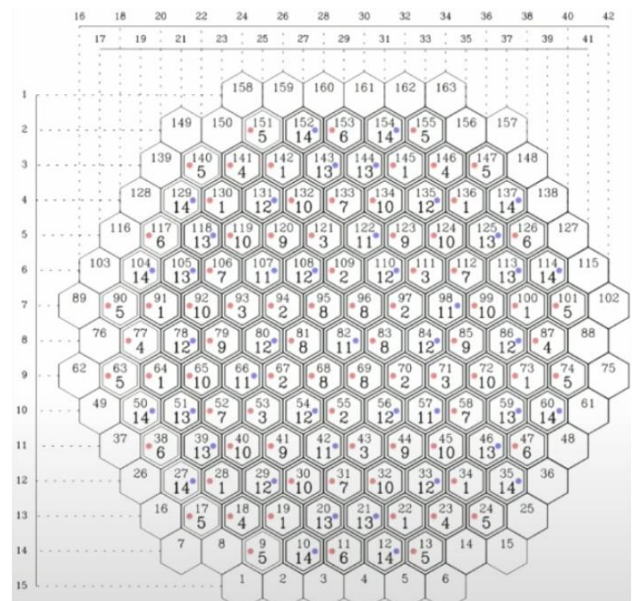
A reaktivitásszabályozás koncepciója a TVS-M üzemanyagkötegekkel a következő:

- A VVER-S-600 reaktivitásszabályozását a kiszorító és elnyelő elemek együtt végzik.
- A második független reaktivitásszabályozó rendszer a folyékony elnyelő (bórsav) bevitelével.
- A bóros szabályozás a reaktor teljesítményüzeme során nincs használatban, csak a reaktor átrakásra

történő leállításakor és a teljesítményüzembe történő felvitel során.

- Az üzemanyagciklus kezdetén a bórsav-koncentráció kb. 0,3 g H_3BO_3 / kg H_2O . A ciklus során a bórsav-koncentráció csökken (kb. 100 nap alatt 0-ra) a szervezetlen szivárgások tiszta kondenzátummal történő pótlása miatt. Így ioncserélő szűrők használata nem szükséges, ami a folyékony radioaktív hulladék mennyiségét csökkenti.
- Teljesítményüzemben a teljesítmény $\pm 2\%$ tartományban történő változtatása a hőmérsékleti effektus segítségével történik a gőzfejlesztő nyomásának változtatásával.
- A teljesítmény 10%-ig történő változtatáshoz a kiszorító elemek külön csoportja van kijelölve.
- 10%-nál nagyobb teljesítményváltoztatás és a reaktor leállítása meleg állapotba az elnyelő és a kiszorító szabályozó elemek együttes használatával történik. Ehhez bóros szabályozás nem szükséges.
- A kiszorító elemek mozgatása a mért teljesítményeloszláson és optimalizáló számításon alapuló algoritmus szerint történik a kiszorító elemek miatt kiegészítőleg jelentkező egyenlőtlenségi tényező csökkentése érdekében.

A VVER-S-600 aktív zónájának egy lehetséges kialakítása TVS-M üzemanyag kötegekkel a 4. ábrán látható [7]:



4. ábra: VVER-S-600 aktív zónája TVS-M üzemanyagkötegekkel.

Piros: szabályozó elem, kék: kiszorító elem,

felső szám: a köteg száma, alsó szám: a szabályozócsoport száma

A Kolai Atomerőműben létesülő két VVER-S-600 reaktor még nem a TVS-S, hanem a TVM+ üzemanyagkötegekkel lesz ellátva. A TVM+ köteg műszaki megoldásai azonosak a VVER-1200-as reaktorokban használt TVS-M köteggel, de a szabályozókötegekben használt elnyelőpalcák számát 22-re növelik, ezáltal az elnyelőköteg hatékonysága 25%-kal

nagyobb lesz. A reaktivitás szabályozása az elnyelőkötegekkel történik.

A Kolai Atomerőműben átmenetileg urán, távlatban urán-plutónium üzemanyag használatát tervezik:

- Időhiány miatt kezdetben U üzemanyagra történik az engedélyeztetés, de a tervezés már az U-Pu üzemanyag feltételei szerint történik, az U-Pu üzemanyag használata egy későbbi lépésként lesz engedélyeztetve.
- A frissüzemanyag-tároló tervezése eleve az U-Pu üzemanyag figyelembevételével történik, vagyis a tárolóban átrakógép is elhelyezhető, a távműködtetett kezelés kialakítható.
- A frissüzemanyag-tároló sugárvédelemi tervezése is az U-Pu üzemanyagra történik.
- A pihentető medence kapacitása 10 éves tárolást tesz lehetővé.
- Az üzemanyag erőművön belüli mozgatására a TUK-137.E típusú nehéz konténert használják, az ehhez tervezett szállítóberendezések az U-Pu üzemanyagra később készülő konténert is nagy valószínűséggel kezelni tudják.

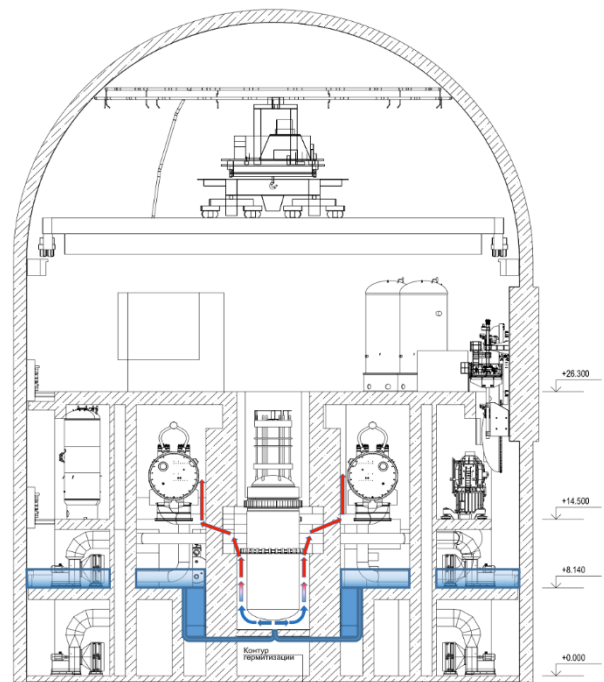
A zónaolvadék kezelése a VVER-S-600 reaktorban

1200 MW_e és ennél nagyobb teljesítményű 3+ generációs reaktoroknál – így a VVER-1200-nál és a VVER TOI-nál is – a tervezési alap kiegészítéseként súlyos baleseti helyzetekre a zónaolvadék kezelésére általánosan elterjedt megoldás olvadékcsapda alkalmazása.

Ezzel szemben a VVER-S-600 reaktorban a zónaolvadék kezelésére a reaktortartályon belüli megtartás és hűtés koncepcióját tervezik alkalmazni, amelynek célja, hogy a zónaolvadék ne jusson ki a reaktortartályból, miközben külső hűtést biztosítanak a tartály számára [8]. Mivel az olvadék felületén kerámiaszzerű anyag képződik, amely akadályozza a hőelvezetést, ezért a reaktortartályt körülvevő aknát árasztják el vízzel, amely a tartály külső felületét közvetlenül hűti. Az elgőzölgő víz pótlását a konténment padlósíntjéről biztosítják, a gőz eltávozásához az aknából pedig megfelelő keresztmetszetet biztosítanak a reaktorakna felső szerkezetében (5. ábra). A koncepció nem igényli a primerköri főberendezések elrendezésének módosítását.

A zónaolvadék tartályon belüli megtartásának két előnye van az VVER-1200-as blokkban alkalmazott olvadékcspadához képest:

- egyrészt a reaktor alatti tér magassági igénye (és végeredményben a konténment magassága) legalább 6 m-el kisebb,
- másrészt megtakarítható a 700-800t tömegű olvadékcspada fémszerkezetének gyártása, szállítása és beépítése.



5. ábra: A zónaolvadék reaktortartályon belüli megtartása és hűtése

Kék szín: a víz útja, piros szín: a gőz útja

A zónaolvadék reaktortartályon belüli megtartásának több referenciája is van:

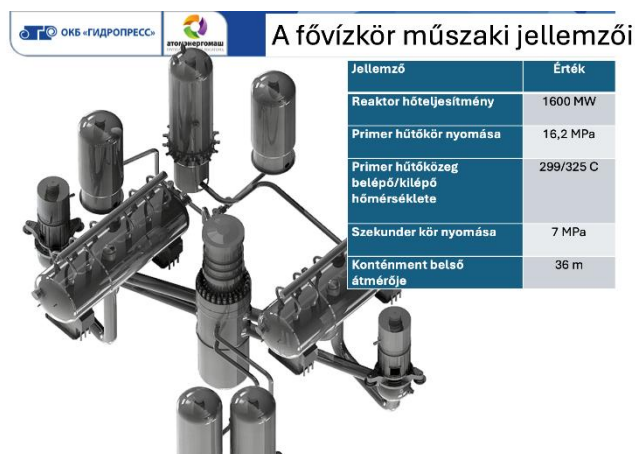
- A Westinghouse AP600 reaktort az NRC 1999-ben ezzel a koncepcióval engedélyezte, bár ilyen blokk soha nem épült meg.
- Az AP600 esetében alkalmazott megközelítést később kiterjesztették az AP1000-re is, 6 ilyen blokk üzemel: Vogtle 3&4, Sanmen1&2 és Haiyang 1&2.
- VVER-440-es blokkok biztonságnövelő átalakítása: Loviisa, Paks, Dukovani, Mohovce.
- Az SMR-ek több típusa: NuScale (USA), CAREM (Argentína), SMART (Korea), ACP100 (Kína).

A koncepció vizsgálatával foglalkozó IRSN jelentés [9] következtetése is alátámasztja ennek a megoldásnak a megfelelőségét: a 600 MW_e vagy annál kisebb teljesítményű reaktorok esetében a jelenlegi ismeretek lehetővé teszik a tartályon belüli olvadék-visszatartási stratégia alkalmazását feltéve, hogy a tartály környezetének geometriája és a külső hűtőrendszer kialakítása megfelelő.

A VVER-S-600 technológiai rendszereire alkalmazott megoldások

A tervezői megközelítés alapelve, hogy a VVER-S-600 reaktor és fővízkör kialakításához a megfelelő gyártási és üzemeltetési tapasztalattal rendelkező VVER-1200 főberendezéseit alkalmazzák elfogadva egyes fajlagos

mutatók emiatti romlását. A kisebb teljesítmény miatt a fővízkör kéthurkos kialakítású, amit a 6. ábra szemléltet [5].



6. ábra: A VVER-S-600 főberendezései és jellemzői

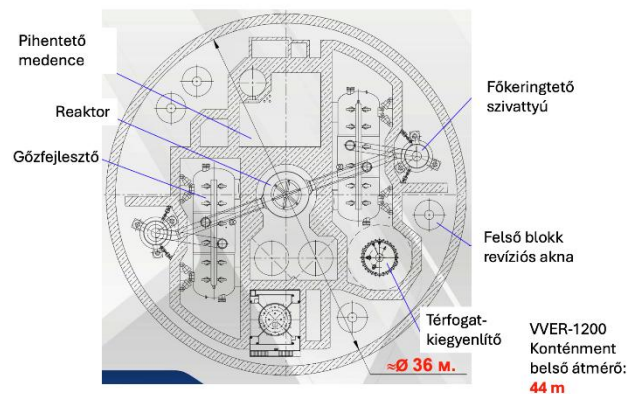
A 6. ábrán szereplő főberendezéseket vagy a VVER-1200 vagy a VVER-TOI blokkoknál alkalmazott berendezésekből választották ki, amint az a 2. táblázatban látható.

Berendezés	Típus / Jellemzők
Gőzfejlesztő	PGV-1000MKP, mint a VVER-1200-nál
Főkeringtető szivattyú	GCN-1753, mint a VVER-TOI-nál
Főkeringtető vezeték	NÁ 850, mint a VVER-1200-nál és TOI-nál
Térfogatkiegyenlítő	mint a VVER-1200-nál és TOI-nál
Hidroakkumulátor 1. fokozat	mint a VVER-TOI-nál
Hidroakkumulátor 2. fokozat	mint a VVER- VVER-1200-nál és TOI-nál

2. táblázat: VVER-S-600 fővízköri berendezéseinek kiválasztása

A kéthurkos kialakítás miatt a VVER-S-600 fővízköri berendezései kisebb helyen elférnek, mint a VVER-1200 bloknál, így a konténment belső átmérőjében 8 méter megtakarítás érhető el, mint a 7. ábrán látható [10].

A VVER-S-600 tervezési feltételei szerint Oroszországban gyártott turbógenerátor-egységet terveznek alkalmazni 37% hatásfokkal. Ez a Leningrádi Fémművek (LMZ) K-600-5.9/50 típusú turbinája lehet, amit eredetileg a nem megvalósult kozmotromai VVER-600-as blokkhoz terveztek. Bár az LMZ sok referenciával rendelkezik a nagyobb (1000-1200 MW) és kisebb (440 MW) turbinák terén, ez a konkrét K-600-5.9/5 változat jelenleg tervezési és előkészítési fázisban van, így referenciaként egyelőre csak a tervek és a gyártói kapacitás szolgál. Ugyanakkor az atominfo.ru 2025.12.11-én a Kommersant c. folyóiratra hivatkozva azt írta, hogy a Kolai II. Atomerőmű 3. és 4. blokkjaira a turbinát a kínai Dongfang Electric szállíthatja, mert az olcsóbb lehet, mint az LMZ turbinája.



7. ábra: A VVER-S-600 primerköri főberendezések elrendezése a konténmentben

A VVER-S-600 blokk prototípusának telephelye a Kolai Atomerőmű

A Kolai Atomerőműben jelenleg négy blokk üzemel, amelyek közül az első két blokk üzemidejét már kétszer hosszabbították meg 15-15 évvel. Bár ezeken a blokkokon jelentős biztonságnövelő átalakításokat végeztek, a 60 éven túli további üzemidő hosszabbításuk nagyon valószínűtlen, mivel V-230 típusúak, és az ezen típus biztonsági megoldásainak szintje elmarad a V-213 típusú blokkokétól. Szükséges lesz tehát a 2033-2034-ben kieső teljesítmény pótlása, amit két VVER-S-600 blokkal terveznek megoldani (3. táblázat). A Kolai-félsziget északi részén – kihasználva a fagymentes tengeri kikötő közelségét – egy 20,4 Mt/év kapacitású, úszó földgáz-cseppfolyósító üzemet építenek. Az első üzemrész indítása 2027-re várható, ami kb. 900 MW-ra növeli a villamosenergia iránti igényt. Ennek megfelelően bővíti a Kola atomerőmű villamos kapcsolóállomását, és Murmanszkig egy 330 kV-os távvezeték építenek 2029-ig [11].

Blokk	Típus	Üzembe helyezés	Várható leállítási
Kola-1	VVER-440/230	1973	2033
Kola-2	VVER-440/230	1975	2034
Kola-3	VVER-440/213	1981	2036
Kola-4	VVER-440/213	1984	2039
Kola II-1	VVER-S-600	2035 <i>terv</i>	
Kola II-2	VVER-S-600	2037 <i>terv</i>	

3. táblázat: A Kolai Atomerőmű működő és tervezett blokkjai

A két új blokkot a Kolai Atomerőmű II. kiépítésén tervezik felépíteni kb. 10 km-re az 1-4. blokkoktól és az erőmű Poljarnije Zori nevű lakótelepétől. A legközelebbi nagyváros Murmanszk, ami innen 170 km-re helyezkedik el [12].



8. ábra: A Kolai Atomerőmű I. és II. kiépítésének elhelyezkedése

Mivel a Kola-félsziget Oroszország észak-nyugati „sarkában” helyezkedik el, a félsziget kevésbé hurkoltan kapcsolódik az országos villamosenergia-hálózathoz, ezért a félsziget energiarendszere legfeljebb 800 MW teljesítményű blokk befogadására alkalmas (8. ábra). E feltétel miatt született a döntés közepes teljesítményű atomerőművi blokkok létesítésére a következő ütemezéssel [4]:

- 2025: A Főkonstruktor műszaki-tudományos tanácsának döntése a Kola-II. Atomerőmű jellemzőinek kiválasztásáról,
- 2026: telephely-engedély, a reaktorberendezés műszaki terve,
- 2027: tervezési dokumentáció, komplex mérnöki felmérések,
- 2028: a tervezési dokumentáció állami szakértői vizsgálata, létesítési engedély az 1. és 2. Kola-II Atomerőmű blokk építésére,
- 2030: első betonöntés az 1. bloknál,
- 2032: első betonöntés az 2. bloknál,
- 2035: az első blokk indítása.

Az 1. és 2. blokk 2033-2034-re tervezett leállítására számos kompromisszumos megoldást tett szükségessé a VVER-S-600 blokk perspektivikus tervéhez képest, amelyek közül a legfontosabb a kizorító elemek nélküli TVS-M+ üzemanyag-kazetták alkalmazása a távlati TVS-S helyett, és az üzemidő első szakaszára urán üzemanyag engedélyeztetése a távlati urán-plutónium üzemanyag helyett. Egyes publikációk további két VVER-S-600 blokk építését is feltételezik ezen a telephelyen.

Érdekes, hogy bár az 1-4. blokkot az Imandra tó vizével hűtik, az 5. és 6. blokk hűtését jelenleg hűtőtornyokkal tervezik. Ugyanis az Orosz Föderáció Vízügyi Törvénye szerint „közvetlen vízkivételű vízellátó rendszerek tervezése nem megengedett”. A Rosatom lobbizik a törvény szigorának olyan enyhítéséért, ami megengedné a frissvizet hűtés kialakítását az Imandra tóból, és mintegy 10%-os

megtakarítást tenne lehetővé az erőmű beruházási költségéből.

Közepes teljesítményű atomerőmű beruházásának gazdaságossága

Általánosan ismert, hogy az atomerőművi blokkok fajlagos beruházási költsége a teljesítmény növelésével csökken. Felmerül tehát a kérdés, hogy megéri-e VVER-S-600-as blokkot építeni a VVER-1200-hoz, vagy VVER-TOI-hoz viszonyítva. A közepes és nagy teljesítményű blokk típus egymáshoz viszonyított költségeiről a következő információk láttak napvilágot:

- A Főkonstruktor egy 2017. évi közleménye [5] szerint a VVER-600-S szériabloknál a beruházási költség-megtakarítás 27% a VVER TOI-hoz képest, ami fajlagos beruházási költségben kb. 50%-kal rosszabb értéket jelent.
- A Főkonstruktor egy 2010. évi közleménye [10] szerint a VVER-600 üzemeltetési és karbantartási költségeiben 20-25%-os előny várható a VVER-1200-hoz képest.

A VVER-S-600 bloknál előnyt jelent a kisebb átmérőjű és magasságú konténment alkalmazása, továbbá az olvadékcsapda elhagyása, viszont hátrányos a mérethatásból adódó különbségi faktor sok tételnél (pl. reaktor, blokkvezénylő).

VVER-S-600 blokk beruházási költségére két nyilvános adat volt elérhető. Vaszilij V. Omelcsuk, a Kolai Atomerőmű igazgatójának 2025. decemberben adott nyilatkozata szerint a két VVER-S-600 blokk becsült beruházási költsége 800 milliárd rubel (akkori árfolyamon kb. 10,4 Mrd USD). Dmitrij Demesin, a Habarovszki körzet kormányzója ugyancsak 2025. decemberben azt nyilatkozta, hogy a körzetébe tervezett egy VVER-S-600 blokk beruházási költsége legalább 250 milliárd rubel (3,25 Mrd USD) lesz. (Bár a harmadik szériablokk létesítése valószínűleg olcsóbb, mint a maguk nemében első blokkoké Kolán, de ekkora költségszökkenés a sorrendben harmadik bloknál valószínűtlennek tűnik.)

Oroszországi VVER-1200-as blokk beruházási költségére publikus adat nem áll rendelkezésre, de van elérhető adat Magyarországon és Egyiptomban épülő VVER-1200-as blokkokra vonatkozóan. A VVER-S-600 és VVER-1200-as blokkok fent említett beruházási költségadatait a 4. táblázat tartalmazza.

Az összehasonlítást nehezíti, hogy az adatok különböző pénznemekben állnak rendelkezésre, és a rubel 2025-ben például 44%-ot erősödött az US dollárhoz képest. Emellett a beruházási költséget nyilván befolyásolja az adott ország nukleáris szabályozási, gazdasági és társadalmi környezete. Valószínűleg ezek a hatások összemérhetők a VVER-S-600 és VVER-1200-as blokkok technológiai különbségeiből eredő hatásokkal, így a 4. táblázat adatai nem igazolják egyértelműen a tankönyvi tételt, hogy a fajlagos beruházási költség a teljesítmény növelésével csökken. A VVER-S-600 blokkok Oroszországban kijelölt potenciális telephelyei arra utalnak, hogy a közepes teljesítményű atomerőművi blokkok építésének fő indoka a villamoshálózati korlátokkal rendelkező, távoli gazdasági körzetek energiaellátásának

biztosítása, ami prioritás a fajlagos beruházási költségekben valószínűleg megjelenő hátránnyal szemben.

Magyarország szempontjából 2008 körül lett volna kedvező, ha 600 MW-os VVER blokk beruházását is lehetett volna mérlegelni a VVER-1200-as blokk mellett, de ma a VVER-S-600 számunkra már nem létesítési opció, inkább csak szakmai érdekesség.

Erőmű	Beruházási költség	Forrás /megjegyzés	Fajlagos beruházási költség
2x VVER-S-600, Kola II	800 Mrd RUB (10,4 Mrd USD)	2025.12.25. TASS/Reddit (Forrás: V. Omelcsuk nyilatkozata) 2025-ben a Rubel 44%-ot erősödött az USD-hez képest	8,7 Mrd USD/GW
1x VVER-S-600, Habarovszki körzet	minimum 250 Mrd RUB (3,25 Mrd USD)	2025.12.24. TASS (Forrás: D. Demesin nyilatkozata)	5,4 Mrd USD/GW (minimum)
2x VVER-1200, Paks-II	12,5 Mrd EUR	Forrás: 2015. évi szerződés (azóta módosult, az új ár nem közismert)	5,2 Mrd EUR/GW (?)
4x VVER-1200 El-Dabaa, Egyiptom		Forrás: Kommersant 2022.01.19.	6,25 Mrd USD/GW

4. táblázat: VVER-S-600 és VVER-1200-as blokkok beruházási költsége

Összefoglalás

A VVER reaktoroknál a spektrális szabályozás bevezetése komoly technológiai váltás, amelynek minden részlete ma még nincs kidolgozva. Az új koncepció fő előnye a természetes urán takarékos felhasználása mellett a bóros szabályozás visszaszorítása, ami a folyékony radioaktív hulladék mennyiségének csökkentését eredményezi.

Elsőként a közepes teljesítményű VVER-S-600 típus valósul meg, amelyhez a jó gyártási és üzemeltetési referenciával rendelkező VVER-1200 főberendezéseit alkalmazzák, kéthurkos kialakítással. A Kolai Atomerőműben létesülő VVER-S-600 prototípus blokk a tervezett 2035. évi üzembe helyezés okozta időkénsyszer miatt kompromisszumos, átmeneti megoldásokkal valósulhat meg, de megalapozza a közepes teljesítményű blokkok későbbi, szériászerű létesítésének lehetőségét.

A VVER-S-600 blokkok beruházásának gazdaságossága a VVER-1200-hoz és a VVER-TOI-hoz viszonyítva publikus adatok hiányában nehezen megítélhető, építésük fő indoka a villamoshálózati korlátokkal rendelkező, távoli gazdasági körzetek energiaellátásának biztosítása lehet. A VVER-S-600 blokkok létesítési és működési tapasztalatai hasznosak lesznek a VVER-S-1200 jövőbeni fejlesztéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Géczy Gábor, Dr. Hugyecz Attila: A VVER reaktorcsalád fejlődése, Paks II. Zrt., 2020. szeptember
<https://www.paks2.hu/documents/20124/286244/Elemző%20perc%20047.%20rész%20-%202020.%2009.%2021.%20-%20VVER-technológia%20fejlődése.pdf/ad412528-7f1f-b936-22e4-309f5036b950>
- [2] Uvarov A.: Continuing Innovation: The Second Century of Russia's VVER Nuclear Technology, Power, 2025. október
<https://www.powermag.com/continuing-innovation-the-second-century-of-russias-vver-nuclear-technology/>
- [3] Szabó András, Maráczy Csaba, Hegyi György, Pataki István: A Szuper-VVER reaktorokról, MTA EK, Nukleon, 2017. május
- [4] Мохов В.А.: Проект 2-х блочной Кольской АЭС-2 с „спектральными” реакторами ВВЭР-С, Росэнергоатом, ROSATOM, 2024. szeptember <https://www.youtube.com/watch?v=dfTJuPcPjvE>
- [5] Вахрушин В. М.: Реакторная установка средней мощности ВВЭР-600, GIDROPRESS, 2017. június. <http://sng-atom.com/files/news/files/109/582/fd57aee6080b8431f67e66b0d576047b.pdf>
- [6] Осипов А. М.: Разработка активной зоны РУ ВВЭР-С средней мощности для энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС-2, Kurcsatov Intézet, 2023. szeptember <https://nsrus.ru/files/ppt/20230915/Osipov.pdf>
- [7] Теплов П.С.: Топливные циклы реакторов ВВЭР-С со спектральным регулированием реактивности, Kurcsatov Intézet, 2024. szeptember https://video.search.yahoo.com/search/video?fr=mcafee_uninternational&p=ВВЭР-С&type=E211HU885G0#id=1&vid=b4371cb8de1b456d5a6023677e00e8d6&action=click
- [8] Пантюшин С. И.: Разработка системы удержания расплава и охлаждения корпуса для проектов ВВЭР-С-600 и ВВЭР-600 на стадии эскизного проектирования, GIDROPRESS, 2024. szeptember
- [9] Considerations concerning the strategy of corium retention in the reactor vessel, IRSN, 2015. július. https://research-assessment.asnr.fr/sites/en/files/2023-12/IRSN_Considerations-strategy-corium-retention_07-2015.pdf
- [10] Рыжов С.Б.: Эволюционное и инновационное развитие реакторных установок водо-водяного типа, GIDROPRESS, Atomexpro, 2010
- [11] РОСАТОМ построит четыре инновационных 600-мегаваттных энергоблока ВВЭР-С на Кольской АЭС-2, Атомная энергия 2.0, 2025. június <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/07/02/157237>
- [12] Омельчук В.В.: Кольская АЭС, как основа энергетики региона: настоящее и перспективы, Кольская АЭС, 2016. május https://web.archive.org/web/20190414195621/https://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/IX_reg_forum_2016/4._OmelchukVV_Forum_dialog120516.pdf