

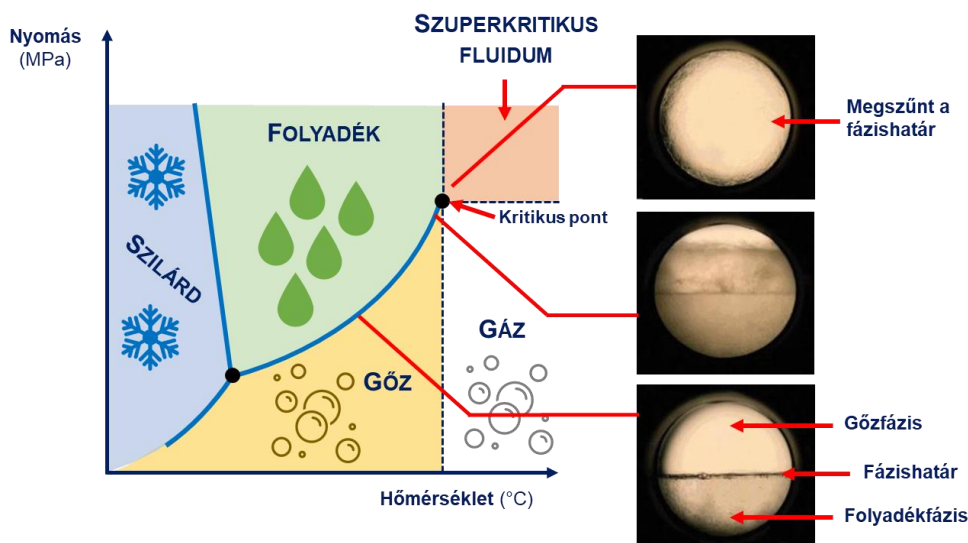
A szuperkritikus vízhűtésű reaktorok

Kirchkeszner Csaba – 2022. szeptember 27.

Az Elemző percek korábbi számaiban bemutattuk a gázhűtésű, a sóolvadékos, az ólom-, és a nátriumhűtésű negyedik generációs reaktorokat. Jelen számunkban a szuperkritikus vízhűtésű reaktorokkal (SCWR, Supercritical Water Reactor) folytatjuk.

A szuperkritikus állapotú víz

Ahhoz, hogy megértsük a szuperkritikus erőművek működését először is meg kell ismerkednünk a szuperkritikus fluidállapottal. Ezt legkönnyebben úgy érthetjük meg, ha egy bizonyos nyomás- és hőmérséklet-tartományban megvizsgáljuk a víz állapotábráját (**1. ábra**). Ezen első közelítésben három – **kék** színnel jelölt – görbét láthatunk, melyek a síkot a három jól ismert halmazállapotra bontják, ezek a szilárd (víz esetén a jég), a folyadék és a gázhalmazállapot. Az ábrán jól látható, hogy a kék színnel jelölt görbék egyfajta határként választják el az egyes halmazállapotokat egymástól. Ez nem olyan meglepő: gondoljunk csak arra, hogy egy fazékban vizet forralunk. Egy idő után azt fogjuk tapasztalni, hogy a melegített folyadék halmazállapotú víz fölött megjelenik a vízgőz, vagyis egy adott időpontban a víznek kétféle állapota van jelen a vizsgált rendszerben. Ugyanez a helyzet áll elő akkor is, amikor a jég elkezd olvadni: egy ideig jelen van a szilárd jég és a folyékony víz is a rendszerben. Amikor pedig a vizsgált rendszer éppen a kék vonalon van (adott hőmérsékleten és nyomáson), akkor beszélünk fázisegyensúlyról (pl. ugyanannyi jég olvad el, mint amennyi megfagy). Azonban maradjunk a forrás példájánál. Képzeljünk el egy speciális kuktát, ami nagyon magas hőmérsékletet és nyomást képes elviselni. Kezdjük ebben a kuktában vizet melegíteni. Ha egy kamerával betekintünk a kuktába, akkor azt látjuk, hogy van egy folyadékfázis és egy gőzfázis, valamint a két fázis között megtalálható a fázishatár (**1. ábra**). A hőmérséklet és a nyomás megfelelő mértékű növelése után azt fogjuk látni, hogy a fázishatár elkezd elmosódni, s az egykori gőzfázis „felhősödésnek” indul, majd ha még tovább növeljük a rendszer hőmérsékletét és nyomását, akkor hirtelen megszűnik a korábbi két fázis közötti fázishatár, s egyfázisú lesz a rendszer. Erre mondjuk azt, hogy a víz szuperkritikus állapotba került.



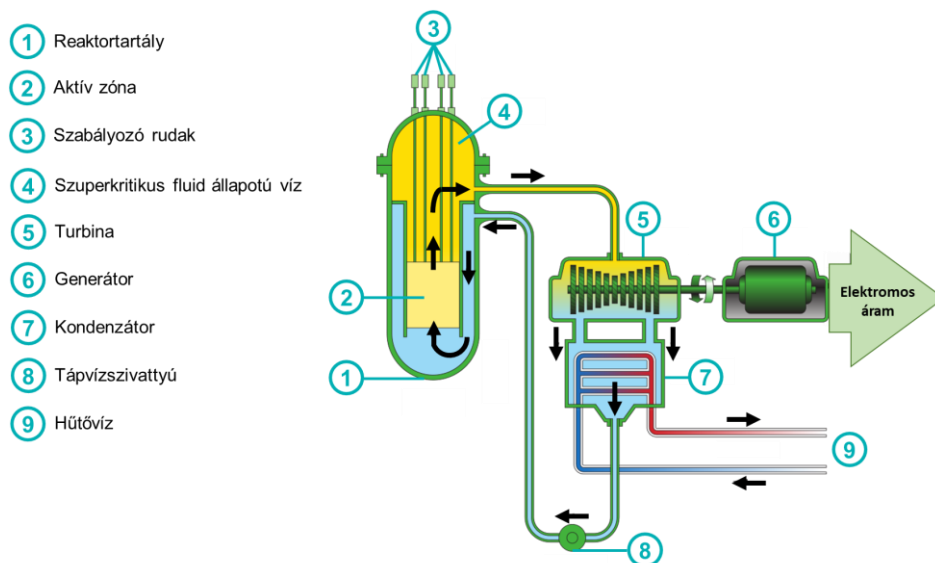
1. ábra: A víz nyomás-hőmérséklet (p - T) állapotábrája. (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

A kritikus állapot egy jól definiált nyomáson és hőmérsékleten, az ún. kritikus nyomáson (22,05 MPa = 220,5 bar víz esetén) és kritikus hőmérsékleten (374 °C szintén a víz esetén) alakul ki. A szuperkritikus fluid állapotban az anyagok többsége nagyon érdekes fizikai-kémiai viselkedést mutat. **Sűrűségük inkább a folyadékokéhoz, míg viszkozitásuk inkább a gázokéhoz áll közelebb.** Ezért ezt a szuperkritikus állapotot gyakran illetik úgy a köztudatban, hogy „folyadékszerű gáz” állapot. Mindemellett valamennyi tulajdonságuk nagyon érzékenyen függ a nyomástól és a hőmérséklettől. Erre talán a legjobb példa a víz, mely atmoszférikus körülmények között jól oldja a poláris, ionos vegyületeket (pl. a konyhasót), míg a szuperkritikus víz inkább apoláris tulajdonságokat mutat, így például a konyhasót rosszul oldja.

A szuperkritikus víz felhasználása különböző ipari folyamatokban elsőre elrugaszkodott ötletnek tűnhet, azonban ma számos **modern széntüzelésű erőmű szuperkritikus** (üzemi nyomás kb. 25 MPa = 250 bar, kimenő hőmérséklet: 500–600 °C, termikus hatásfok: ~45%) **vagy ultra-szuperkritikus tartományban** (üzemi nyomás >250 bar, 700 °C körüli kimenő hőmérséklet, termikus hatásfok: ~50%) **működik**, hiszen ezzel jelentősen növelhető a termikus hatásfokok. **Nemcsak az energetikában, hanem a modern vegyiparban és az élelmiszeriparban is nagyon fontos szerepe van bizonyos szuperkritikus fluidumoknak.** Többek között a koffeinmentes kávé úgy állítják elő, hogy a kávéból szuperkritikus szén-dioxiddal kivonják (extrahálják) a koffeint. De hasonló módszerrel lehet például koleszterinmentes tojásport előállítani, sőt, szuperkritikus extrakciós eljárásokkal lehet gyógynövényekből különféle hatóanyagokat kivonni, melyeket aztán a gyógyszeripar felhasznál. Használják szuperkritikus fluidumot a modern hulladékkezelésben is: a szuperkritikus víz – apoláris jellegénél fogva – felhasználható különböző szerves vegyületek lebontására is, így hatékony a különféle hulladékok kezelésében és feldolgozásában is.

A szuperkritikus vízhűtésű reaktorok

A szuperkritikus vízhűtésű reaktorban a víz kritikus pontja (374 °C és 221 bar) felett tartott szuperkritikus víz a moderátor és a hűtőközeg is egyben. A magas üzemi hőmérséklet (500–625 °C 250 bar nyomáson) elősegíti a hatásfok jelentős mértékű javulását (44–50% termikus hatásfok). Az SCWR felépítését a **2. ábrán** mutatjuk be.



2. ábra: A szuperkritikus vízhűtésű reaktor sematikus felépítése (Forrás: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr)

A **2. ábrán** alapján az egyik leginkább szembevetendő különbség az SCWR-eknél a PWR atomerőművekhez képest, hogy itt **a reaktorban előállított és felmelegített szuperkritikus víz közvetlenül kerül a turbinára**. Tehát akárcsak a forralóvízes reaktorok esetén, itt is egy **egykörös rendszerről** van szó. Így az SCWR esetén **nincs szükség gőzfejlesztőkre**, ami hozzájárul a hatásfok növeléséhez és a költségek csökkentéséhez. Ugyanakkor egyúttal magában hordozza a forralóvízes reaktorok azon hátrányát, hogy nincs meg a PWR-eknél megszokott, elkülönülő primer- és szekunderkör, a turbinára radioaktív gőz kerül, így a turbinaházat árnyékolni kell (a radioaktív sugárzás miatt). A másik szembevetendő érdekesség, hogy **a PWR-eknél megszokott főkeringtető szivattyú szerepét az SCWR-eknél a szakirodalom által fűtápvízszivattyúnak nevezett főberendezés látja el, vagyis** a turbinából érkező fűtádgőz a kondenzátorban lecsapódik, ahonnan a főkondenzátum szivattyúk továbbítják a tápvizet a tápvíz-előmelegítő rendszerbe (ezt a **2. ábrán** nem rajzoltuk be), majd onnan a fűtápvízszivattyú juttatja a vizet vissza a reaktorba. Az SCWR-ek további érdekessége, hogy a nagynyomású turbinára vezetett közeg igen nagy entalpiája miatt (mely a PWR-ekben szokásos vízgőz entalpiájánál számottevően nagyobb) a szekunderköri főberendezések kialakítása némileg különbözik a PWR-ek szekunderkörétől.

További érdekessége a szuperkritikus vízhűtésű reaktoroknak, hogy az üzemi nyomás a reaktorban meghaladja a víz kritikus nyomását, így **nem történhet fázisátalakulás, a nyomás fennmaradása esetén nincs forráskrízis¹. A szuperkritikus víz kiváló hőátadási tulajdonságokkal rendelkezik. Ugyan sűrűsége kisebb a folyékony víznél, ezért kevésbé moderál, így az SCWR-ek aktív zónájában a hűtővízen kívül egyéb moderátort is felhasználnak**, mint például a nukleáris üzemanyag-kazetták közötti résekben található vizet és a moderátorcsőben áramló vizet (részletesen lásd a későbbiekben). Természetesen ezekre a moderálási megoldásokra csak a termikus, vagyis lassú neutronokkal működő SCWR-ek esetén van szükség, az SCWR-ek funkcionálhatnak azonban gyorsreaktorként is, ez esetben – ahogy korábban láttuk más gyorsneutronos reaktoroknál – nem alkalmaznak moderátort.

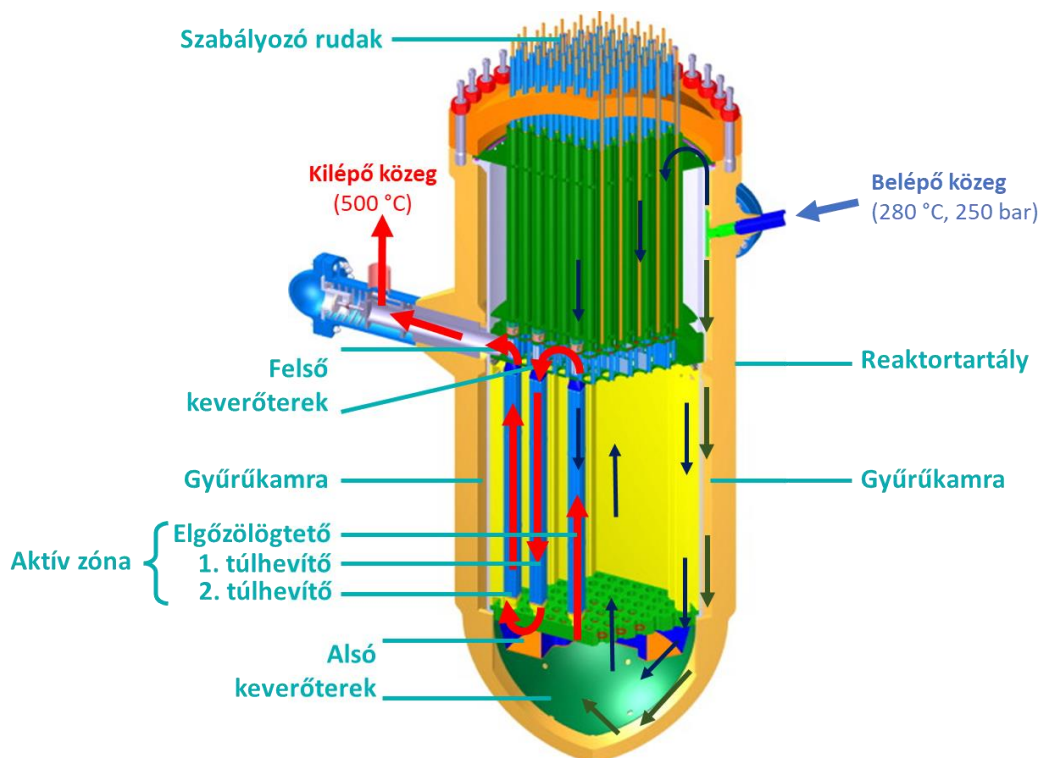
A szuperkritikus hűtésű reaktorok tervezésénél figyelembe kell venni, hogy a nagy kilépő hőmérséklet miatt **a cirkóniumalapú nukleáris üzemanyag-pálcaburkolatok helyett rozsdamentes acél burkolatokat** kell használni. Ez azt is jelenti, hogy (a rozsdamentes acélban található nikkel nagy neutronbefogó-képessége miatt) **jellemzően 2%-ponttal magasabb dúsítási fokú uránalapú nukleáris üzemanyag szükséges az SCWR-ekben**, mint a hagyományos PWR-ekben.

A szuperkritikus vízhűtésű reaktorok ma még csak inkább a tervezőasztalon léteznek, mintsem megépült, kereskedelmi üzemben termelő blokkokként. **Az SCWR-ek tervezésében igen fontos szerepet vállalt az Euratom, Kanada, Japán és Kína egyaránt.** Elemző percünk jelen számában az Euratom által kidolgozott, reaktortartállyal rendelkező, valamint a kanadai nyomottcsöves SCWR koncepciókat mutatjuk be.

Az Euratom által kidolgozott termikus SCWR koncepciót, a **High Performance Light Water Reactor-t** (HPLWR-t) (**3. ábra**) 2006 és 2010 között dolgozták ki. A reaktor hőteljesítményét 2300 MW_t-ra, villamos teljesítményét 1000 MW_e-ra tervezték. Az erőmű termikus hatásfoka a számítások szerint 43,5%. A reaktorba belépő víz hőmérséklete 280 °C, nyomása 250 bar. A belépő víz tömegáramának

¹ Egy bizonyos (kritikus) hőmennyiség elérést követően leromlik a hőátadás a nukleáris üzemanyag-pálca burkolata és a hűtőközeg között, aminek hatására a pálca burkolata túlhevül, deformálódik, de össze is olvadhat, ezzel az üzemanyag-pálca inhermetikussá válik. Alapvetően két fajta forráskrízisről beszélünk: az első- és a másodfajtról. Az **elsőfajú forráskrízis** során az történik, hogy a nukleáris üzemanyag-pálca felületén keletkező nagyszámú gőzbuborék egy összefüggő filmmé alakul, ezzel elzárja a fémfelületet a hűtőközegetől. A **másodfajú forráskrízis** esetén a folyadékfilm-gőz határfelületen a hő hatására megtörténik az elgőzölgés. S a filmfelületről kis folyadékcseppek szakadnak ki a gőzáramba, ami a film fokozatos elvékonyodását, majd eltűnését okozza.

fele felfelé indul el a reaktorban (ez tölti be a moderátor szerepét), míg a másik fele az ún. gyűrűkamrában lefelé indul el. Ahogy korábban említettük, az SCWR-eknél többféle moderálási eljárást alkalmaznak. A HPLWR esetén a moderátorként szolgáló könnyű víz egy részét, a reaktorba lépés után felfelé induló részét (ábránkon lásd a **kék** nyilat) a moderátorcsövekben és az acélreflektor csövekben áramoltatják lefelé. A víz lefelé tovább haladva belép a nukleáris üzemanyag-kazetták közötti résekbe, ezt nevezzük résvíznek, ennek fontos moderátor szerepe van. Most nézzük meg, mi történik a belépő víztömegáram másik felével, a reaktortartályba történő belépéskor lefelé áramló vízzel. A **3. ábrán** a **sötétzöld** nyilat kövessük: ez a gyűrűkamrában áramló víz a gyűrűkamrából az alsó keverőtérbe érkezik, ahol keveredik a moderátorként használt vízzel. Az alsó keverőtér perforált lemezén keresztül a víz elindul felfelé, ahol a kazettasoron áthaladva elgőzölög. A felső keverőtérben a közeget visszafordítják – ekkor lefelé indul el az áramlás, hogy megtörténjen az első túlhevítés, majd az alsó keverőtérben még egyszer visszafordítják a hűtőközeget az aktív zóna irányába (felfelé). Ezt nevezik második túlhevítésnek. Az ilyen felépítésű aktív zónát **háromutas zónának** nevezik. A második túlhevítést követően az 500 °C hőmérsékletű szuperkritikus víz kilép a reaktorból, s rávezetik a turbinára. A reaktor szabályozórudjait – akár a PWR-eknél – felülről helyezik be. A reaktor magassága 14,29 méter, belső átmérője 4,46 m. A reaktortartály palástjának falvastagsága 0,45 m, míg az íves fenékrész vastagsága 0,30 m. A reaktortartályt a PWR-ekhez hasonló (20MnMoNi55 típusú) acélból készítenék, azonban a kilépő csontot olyan acélból (P91), amely elviseli az 500 °C-ot.

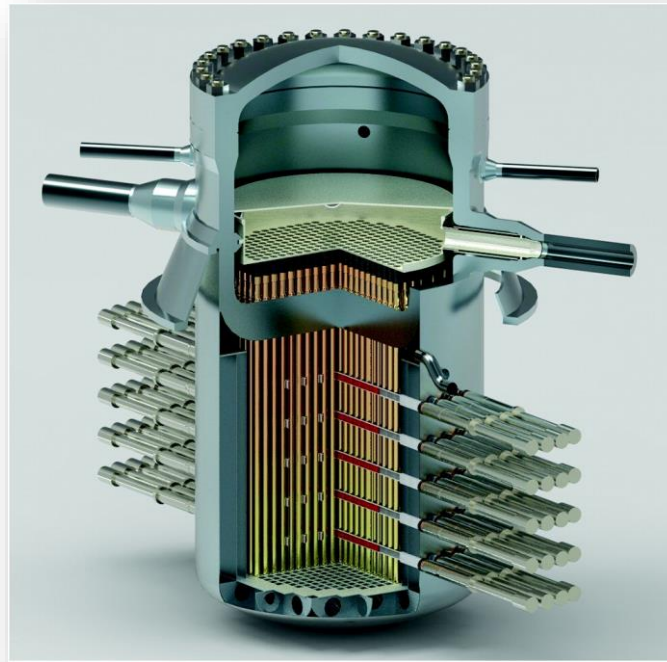


3. ábra: Az európai szuperkritikus vízhűtésű reaktor (High Performance Light Water Reactor – HPLWR) sematikus felépítése és az áramlási viszonyok szemléltetése (Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.039>)

A másik jelentős szuperkritikus vízhűtésű reaktorkoncepciót a kanadai szakemberek dolgozták ki a CANDU (**CAN**ada **D**euterium **U**ranium) mintájára, hiszen ez is egy a CANDU-hoz hasonló nyomottcsöves reaktor, csak éppen szuperkritikus vízhűtésű. A kanadai SCWR reaktorának felépítése a **4. ábrán** látható. A kanadai SCWR modell fejlesztése a következő követelményeknek megfelelően történt:

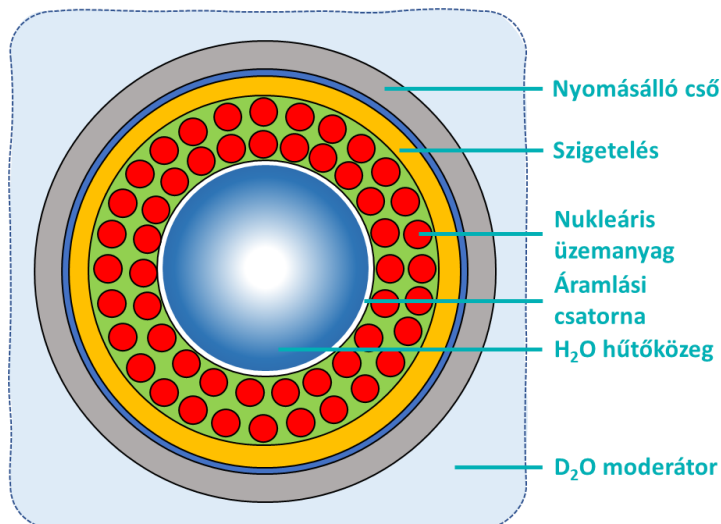
- a reaktorban 224 barnál nagyobb nyomáson (250 bar üzemi nyomáson) 625 °C hőmérsékletű szuperkritikus fluidumot állít elő;
- a reaktor tervezési élettartama 40 év (mint a CANDU reaktorok tervezett élettartama);
- a reaktortartály helyett – akárcsak a CANDU reaktoroknál – a nyomottcsöves koncepciót alkalmazzák;
- moderátorként nehézvizet (D₂O) használnak, akárcsak a CANDU reaktoroknál;
- a zóna főbb részeinek cseréje lehetséges legyen, akár üzem közben is (bár ez szuperkritikus víz esetén nehezebben kivitelezhető, mint a CANDU reaktoroknál).

Ahogy a **4. ábrán** látható, magát a reaktort a kisnyomású kalandriatartály jelenti (ezt már a CANDU-nál megszokhattunk), amely tartalmazza a nehézvíz moderátort és a függőlegesen beépített nyomottcsöveket, melyekben megtalálhatók a nukleáris üzemanyag-kazetták. A **4. ábrán** a reaktor függőleges osztósíkjához képest merőlegesen elhelyezkedő rudak a szabályozórudak. Tehát itt a szabályozórudak és a nukleáris üzemanyagot tartalmazó nyomottcsövek elrendezése fordítottja a CANDU reaktoroknál megszokott elrendezéshez képest, ahol vízszintesek az üzemanyagot tartalmazó csövek, és fentről, függőlegesen juttathatók be a szabályozórudak.



4. ábra: A kanadai nyomottcsövek szuperkritikus vízhűtésű reaktor
(Forrás: <https://doi.org/10.12943/CNR.2016.00042>)

Érdekes megvizsgálni a kanadai SCWR koncepciónál a nyomottcső felépítését, melyet annak keresztmetszeti ábráján keresztül mutatunk be (**5. ábra**). A tápvíz-előmelegítő rendszeren áthaladó víz a belépőcsonton keresztül belép a reaktorba, ahol a **4. képen** látható performált lemez nyílásai a nyomottcsövek áramlási csatornáihoz vezetik azt. Az áramlási csatornákon keresztül a víz elindul lefelé, majd a reaktor alsó részében található áramlásterelő rácsok visszafordítják, így az újra áthalad a nukleáris üzemanyag-pálcák között. Ezt követően a szuperkritikus fluidum a reaktor felső részén lép ki. A HPLWR-rel összevetve a kanadai SCWR-nél tehát nem háromutas, hanem **kétutas zónát** terveztek.



5. ábra: A nyomottcső felépítése (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

A kanadai tervezésű SCWR termikus teljesítménye 2540 MW_t. A tápvíz belépő hőmérséklete 315 °C, míg a kilépő hőmérséklet 625 °C. Az üzemi nyomás 250 bar. Az erőmű villamos teljesítménye a tervek szerint 1255 MW_e, termikus hatásfoka 49,4%.

Ahogy jelen összefoglalónk is mutatja, a szuperkritikus vízhűtésű reaktoroknak számos előnyük van (elsősorban a nagy nyomás, magas hőmérséklet és hatásfok), ugyanakkor a nagy nyomás és a magas hőmérséklet miatt a fejlesztőknek számos anyagtechnológiai és anyagtudományi feladatot és problémát kell megoldania ahhoz, hogy azok hosszútávon és biztonságosan üzemeltethetők legyenek. Arról sem szabad megfeledkezni, hogy számos olyan alapkutatás várat még magára, amelyek a szuperkritikus víz radioaktív sugárzás hatására bekövetkező változásainak felderítését célozza. Mindezek a kutatások még előttünk vannak, és csak a jövő dönti majd el, beérik-e valaha is ez a reaktorkonceptió kereskedelmi reaktorrá, vagy pedig a többi negyedik generációs reaktorkonceptió között háttérbe szorul majd.

Ez volt az Elemző percek sorozatunk 129. tagja.