

BWR

2. és 3. generációs forralóvízes atomerőművi blokkok technológiája és biztonsága

Korszerű nukleáris energiatermelés 8. előadás

Dr. Yamaji Bogdán

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Nukleáris Technikai Intézet

Forralóvízes reaktorok – Boiling Water Reactor (BWR)

Tartalom

- A BWR-ek története, általános jellemzők
- Reaktortartály, tartályon belüli szerkezetek felépítése
- BWR üzemanyag felépítése
- Az SZBV rúdajtások felépítése
- BWR konténment evolúció
- BWR üzemeltetés, power-flow map
- Kisegítő és üzemzavari rendszerek
- Tervezési alapba tartozó balesetek, tervezési alapon túli balesetek
- Irodalomjegyzék

Világ atomerőművi blokkjai

- Üzemelő
- Épülő

Típus	Blokkok száma	Össz MW(e)
BWR	70	69 713
FBR	3	1400
GCR	14	7725
LWGR	13	9283
PHWR	49	24 557
PWR	300	286 209
Összesen:	449	398 887
Típus	Blokkok száma	Össz MW(e)
BWR	4	5253
FBR	1	470
HTGR	1	200
PHWR	4	2520
PWR	42	44 216
Összesen:	52	52 659

BWR-ek Európában (*)

- Finnország:
 - Olkiluoto 1 & 2
- Németország:
 - Brunsbüttel **leállítva**
 - Gundremmingen C, B **leállítva**
 - Isar 1 **leállítva**
 - Krümmel **leállítva**
 - Philippsburg 1 **leállítva**
- Spanyolország:
 - Cofrentes (1 blokk)
 - Santa María de Garoña **leállítva**
- Svédország:
 - Barsebäck 1, 2 **leállítva**
 - Forsmark 1-3
 - Oskarshamn 1-2 **leállítva**, 3
 - Ringhals 1
- Svájc:
 - Leibstadt (1)
 - Mühleberg (1)



a BWR-ek fejlesztése (*GE)

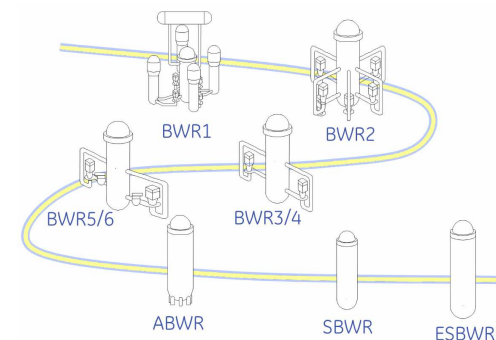
- Az 50-es években kezdte a General Electric.
- Első kereskedelmi blokkok:
 - 200 MW Dresden (1960-1978)
 - 650 MW Oyster Creek (1969)
 - 1250 MW Grand Gulf (1985)
- Legelterjedtebb típusok: GE BWR sorozat, Siemens-KWU BWR, ABB Atom (ASEA) BWR...
- Újgenerációs BWR-ek: ABWR, ESBWR

a BWR-ek fejlesztése (*)

BWR típus	Első kereskedelmi üzem	Erőmű/Jellemző
BWR/1	1960	Dresden 1 első kereskedelmi BWR kettős ciklus
BWR/2	1969	Oyster Creek befektetés pusztán gazdasági megfontolásból direkt ciklus kényszerített áramlás változtatható szivattyú sebesség a recirkulációs áram változtatására
BWR/3	1971	Dresden 2 belső sugárshivattyú fejlettebb ZÜHR (ECCS): spray és elárasztási kapacitás
BWR/4	1972	Vermont Yankee nagyobb teljesítménysűrűség (20%)
BWR/5	1977	Tokai 2 fejlettebb ZÜHR szelepes forgalomszabályozás
BWR/6	1978	Cofrentes kompakt vezérlő félvezetős elektronika

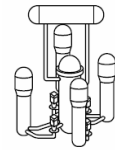
a BWR-ek fejlesztése (*)

BWR típus	Első kereskedelmi üzem	Erőmű/Jellemző
ABWR	1996	Kashiwazaki-Kariwa 6 belső recirkulációs szivattyúk finommozgású SZBV hajtások fejlettebb vezérlő, digitális és optikai kábeles tech. fejlettebb ZÜHR: nagynyomású és kisnyomású elárasztók
ESBWR	NRC típusengedély: 2014. okt. 15, COL: Grand Gulf 2015. május 1. (Fermi 3 2015. május 1.) North Anna 2017. június 2.	természetes cirkuláció passzív ZÜHR

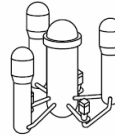


a BWR-ek fejlesztése

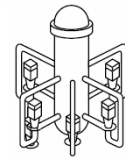
- Dresden-1 (USA)
 - kétciklusú BWR: a reaktorban gőz termelődött, ez egy magasabban lévő gőzdob/gőzfejlesztőbe került, ahonnan a szekunder gőz ment a turbinára
- KRB (Gundremmingen, Németo.)
 - kétciklusú, a külső gőzdob helyett belső cseplevlasztó, gőzszárító
- Oyster Creek
 - már nincsenek gőzfejlesztők, direkt ciklus
 - 5 recirkulációs hurok, melyek a zónán belüli kényszeráramot biztosították
- Dresden-2
 - belső sugárszivattyúk, ezzel együtt a külső recirkulációs hurkok számának csökkentése kettőre (öttről)
 - vezetékek, szivattyúk és szelepek számának csökkentése



Dresden 1



KRB



Oyster Creek

a BWR-ek fejlesztése

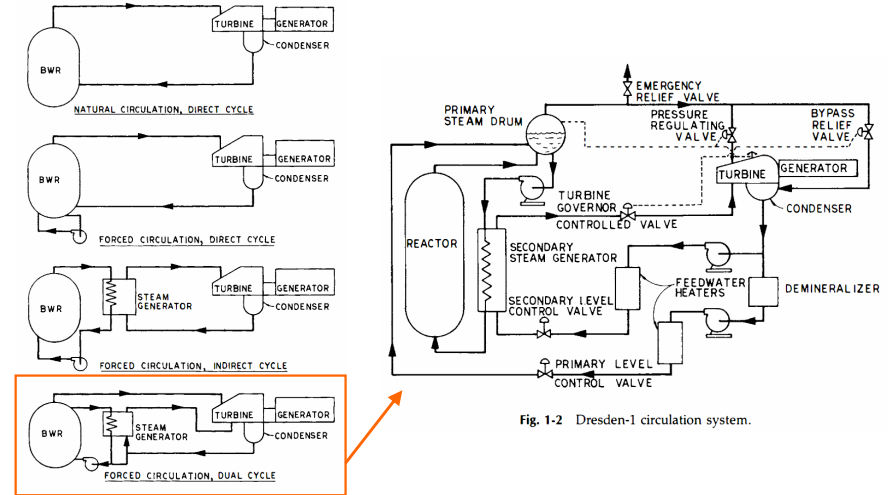
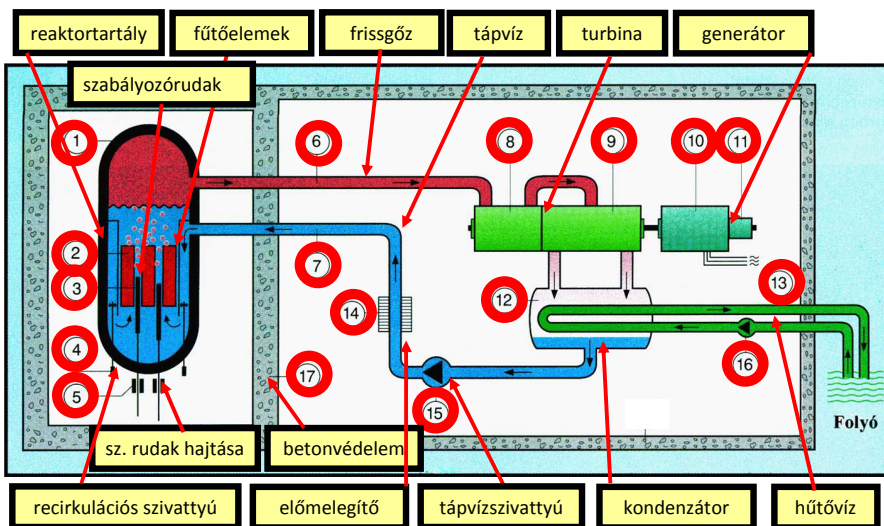


Fig. 1-2 Dresden-1 circulation system.

Forralóvízes reaktorral szerelt atomerőművek



A forralóvízes reaktor

- Egykörös atomerőművi kapcsolás
 - a turbinára jutó gőz az aktív zónában termelődik
 - a korszerű energetikai BWR-ekben nincs a PWR-eknél megszokott elkülönülő primer és szekunder kör, a primer körben alacsonyabb a nyomás (~6,9-7,2 MPa), a víz forráspontja ~285°C
 - alacsonyabb erőmű hatásfok (32-34%)
 - a reaktor úgy van megtervezve, hogy a zóna felső részében a kétfázisú hűtőközeg tömegének 12-15%-a gőz
 - alacsonyabb moderáltság,
 - alacsonyabb hasadási sűrűség,
 - alacsonyabb teljesítmény-sűrűség mint a zóna alsó részében.

BWR

- A víz-gőz keverék a zóna tetején történő kilépést követően kétlépcsős gőzleválasztó/cseppleválasztó rendszerbe kerül. Ezt követően jut a szárított gőz a gőzsínre.
- A szeparált víz visszafolyik a gyűrűs aknába, a gőz a gőzszárítóba kerül.
- **A száraz telített gőz nyomása mintegy 70 bar**
- A turbináról lejövő kisnyomású gőz (0,03-0,06 bar) a kondenzátorban kondenzálódik
- A kondenzátorból előmelegítőkön és gáztalanítón keresztül a nagynyomású előmelegítőbe kerül, innen nagynyomású (>70 bar) vízként távozik a reaktor felé.
- **A visszajutó víz keveredik a szeparált közeggel,** majd a sugárszivattyú beömlőnyílásához kerül, ahol a recirkulációs kör nagysebességű vízugarának szívó hatása révén a vízugárszivattyún keresztül jut a reaktortartály alsó részébe.
- A tartály alsó részéből az aláhűtött víz belép alulról az zónába.
- **A zónában részleges elgőzölés** történik.

BWR

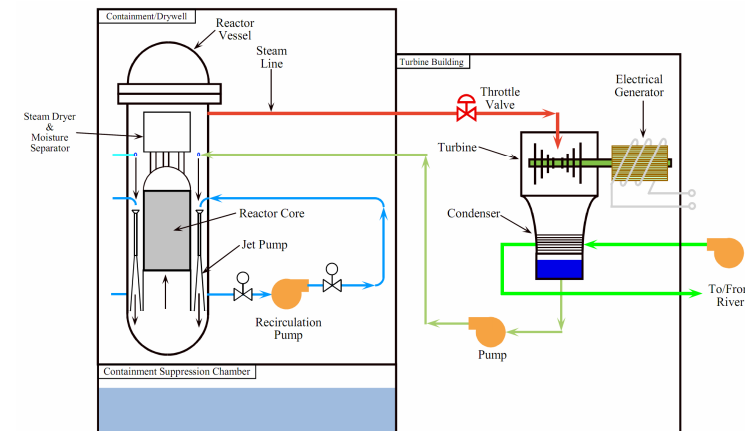
- **Azonos teljesítményű BWR zónája nagyobb térfogatú, mint egy PWR-é.**
- Az aktív zóna felső részében víz-vízgőz keverék van. Itt a moderátor mennyisége lényegesen kisebb, mint alul, azaz jelentős az alulmoderáltság.
- **A neutronfluxus axiális eloszlása nem szimmetrikus, a felső részben kisebb átlagfluxus alakul ki, mint az alsóban.**
- **A BWR-ekben lényegesen kisebb teljesítménysűrűség engedhető meg, mint a PWR-ekben.**
- **A fűtőelemek átmérője BWR-ek esetén nagyobb, mint a PWR-eknél,** így a lineáris teljesítmény-sűrűség (fűtőelem egységnyi hosszából kivehető teljesítmény) viszont közel azonos lesz.
- Emiatt **a BWR üzemanyag felületén kisebb a hőfluxus, mint a PWR-nél.** Erre szükség is van, mert a BWR-ekben a kritikus hőfluxus is kisebb.
- Az üzemanyag dúsítása 0,5-0,7%-kal alacsonyabb, mint a PWR-eknél, részben emiatt az elérhető kiegészi szint is alacsonyabb.

BWR vs. PWR

Paraméter	Westinghouse PWR 1150 MW	BWR/6
Hotell., MWt / Villamos telj., MWe	3411 / 1150	3579 / 1200
Bruttó erőmű hatásfok, %	33,7	33,5
Moderátor/Hűtőközeg	víz	víz
Üzemanyag	UO ₂	UO ₂
Szerkezeti ötvözet	Zircaloy	Zircaloy-2
Aktív zóna magasság, m	3,66	3,76
Aktív zóna átmérő, m	3,37	4,85
Aktív zóna térfogat, m ³	32,8	69,43
Átl. telj. sűrűség, kW/l	104	52
Üzemanyag tömege, kg	90 200	138 000
Fajlagos telj., kW/kgU	37,8	25,9
Átl. kiegészi szint, MWnap/kgU	33	27,5
Rendszeryomás, bar	155	72
Hűtőközeg tömegáram, t/óra	62 000	47 000
Átl. lin. telj. sűrűség, W/cm	178	206
Max. lin. telj. sűrűség, W/cm	426	440
Átl. hőfluxus, W/cm ²	68,5	50,3
Max. hőfluxus, W/cm ²	183	111,5
Hűtőközeg belépő hőmérséklet, ° C	300	269
Hűtőközeg kilépő hőmérséklet, ° C	332	286
Max. üzemanyag-hőmérséklet, ° C	1788	1829

BWR

- A recirkulációs és sugárszivattyúk segítségével az operátor módosítja a tartályon belüli és a zónán áthaladó forgalmat, ezzel változtatja a reaktor teljesítményét.



BWR teljesítmény-szabályozás

Teljesítmény-növelés:

A. Rúdhúzás

B. Recirkulációs forgalom

- növelni kell a hűtőközeg-forgalmat a zónában a recirkulációs/sugárszivattyúkkal
- ezzel csökken a zónában az átlagos gőzhányad
- nő a moderáció
- emelkedik a teljesítmény
- magasabb teljesítményen egyensúly áll be, melyhez magasabb recirkulációs forgalom és zónaforgalom tartozik, a gőzhányad visszaáll az előző állapothoz hasonló szintre.

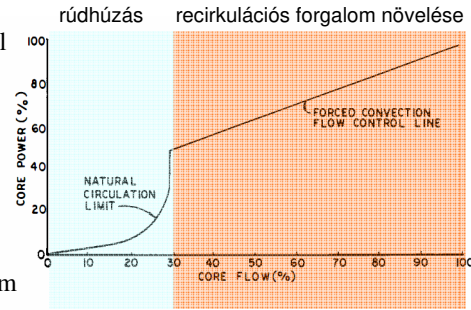


Fig. 1-6 Typical BWR flow control line.

BWR teljesítmény-szabályozás

• Teljesítmény-csökkentés:

- amennyiben a turbina sebessége nőne, ez a recirkulációs forgalmat csökkentő jelet generál
- emelkedik a gőzhányad a zónában
- romlik a moderáció, ezáltal csökken a reaktor teljesítménye
- alacsonyabb teljesítményen egyensúlyi állapotba kerül a reaktor

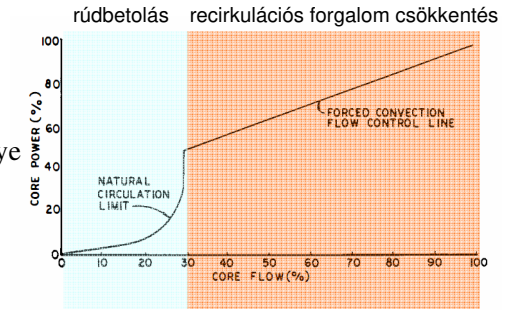
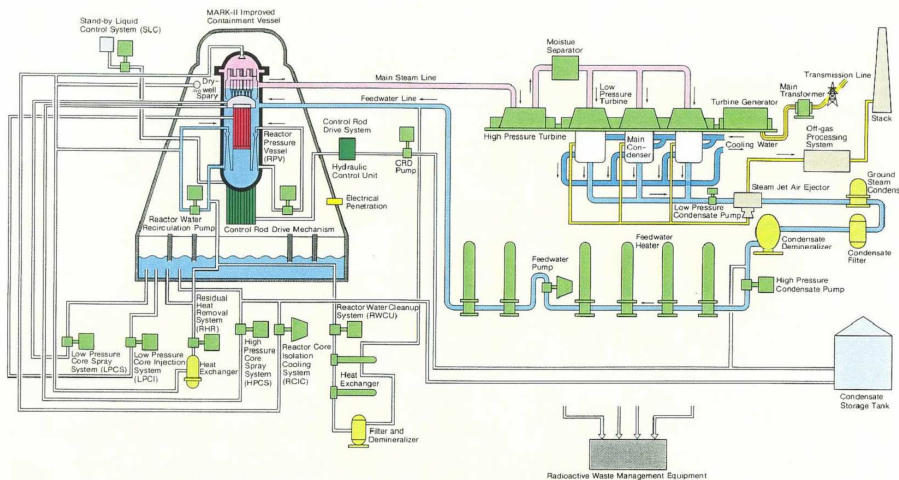


Fig. 1-6 Typical BWR flow control line.

BWR

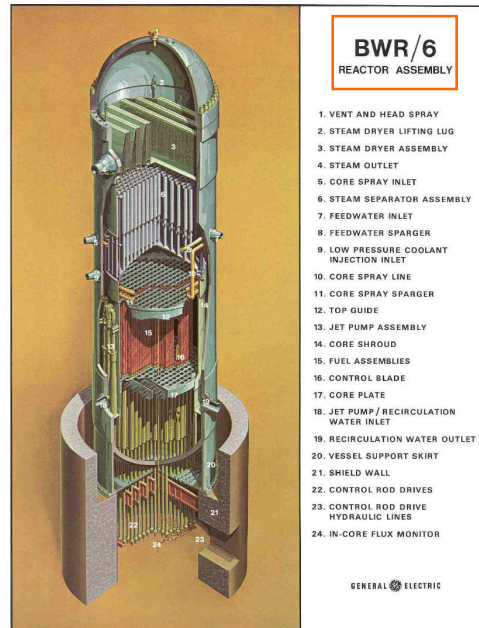


BWR

paraméter	BWR/2	BWR/5	BWR/6	ABWR	ESBWR
Teljesítmény (MWt/MWe)	1930/670	3293/1098	3900/1360	3926/1350	4500/1550
Tartály magasság/átmérő (m)	19,5/5,4	21,9/6,4	21,8/6,4	21,1/7,1	27,7/7,1
Fűtőelemkötegek száma	560	764	800	872	1132
aktív hossz (m)	3,7	3,7	3,7	3,7	3
Teljesítmény-sűrűség (kW/l)	40,5	50	54,2	51	54
Recirkulációs szivattyúk	5 (külső)	2 (külső)	2 (külső)	10 (belső)	0
SZBV meghajtások száma, típusa	137/ hidraulikus	185/ hidraulikus	193/ hidraulikus	205/ elektromotoros	269/ elektromotoros
ZÜHR szivattyúk	12	9	9	18	0
Dízelgenerátorok	2	2	3	3	0
Tartalék üzemi betáplálás/leállítás	2 standby szivattyú (SLC)	2 standby szivattyú (SLC)	2 standby szivattyú (SLC)	2 standby szivattyú (SLC)	2 standby hidroakkumulátor (SLC)
Szabályozás- és irányítástechnika	analóg egycsatornás	analóg egycsatornás	analóg egycsatornás	digitális többcsatornás	digitális többcsatornás
Zónasérülési gyakoriság (1/év)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	2x10⁻⁷	3x10 ⁻⁸
Konténment térfogat (m ³ /MWe)	110	120	170	180	130

BWR reaktortartály

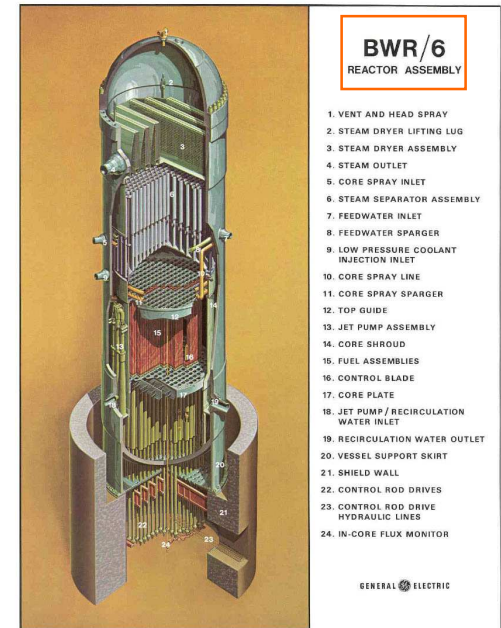
- Belső átmérő: ~ 3600-7200 mm
- Tartályfal vastagsága: 100-180 mm
- Magasság: ~ 16-22 m
- Tartályfedél vastagság: 70-170 (>200) mm
- **Tervezési nyomás: 7-12 MPa**
- Nyomástervezés: 1,3-1,5x(tervezési érték)
- **Tervezési hőmérséklet: ~ 290-310°C**



BWR 6 Reactor Vessel

BWR reaktortartály

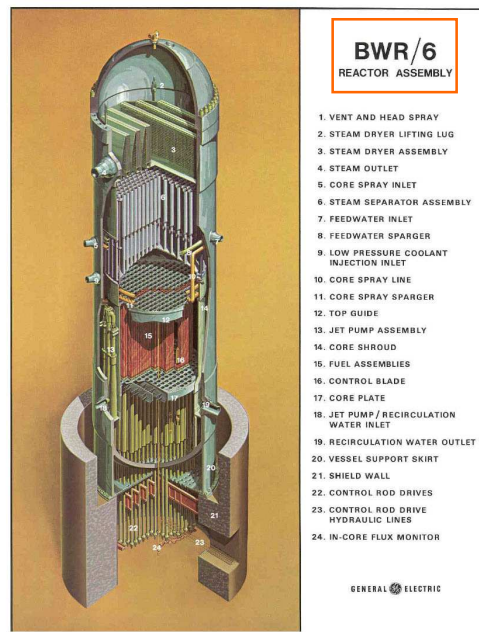
- Tartályon belüli fő elemek: zónatartó elemek, zónakosár, gőzleválasztó elemek és gőzszárítók, recirkulációs/sugárszivattyúk
- Függőleges reaktortartály a konténment szárazakna (drywell) [biológiai védelem] falra feltámasztva
 - hengeres héj, integrált belső elliptikus fenékkal
 - elliptikus, eltávolítható reaktorfedél
 - a tartályt a szoknya támasztja, mely a fal megfelelő peremére támaszkodik fel



BWR 6 Reactor Vessel

BWR reaktortartály

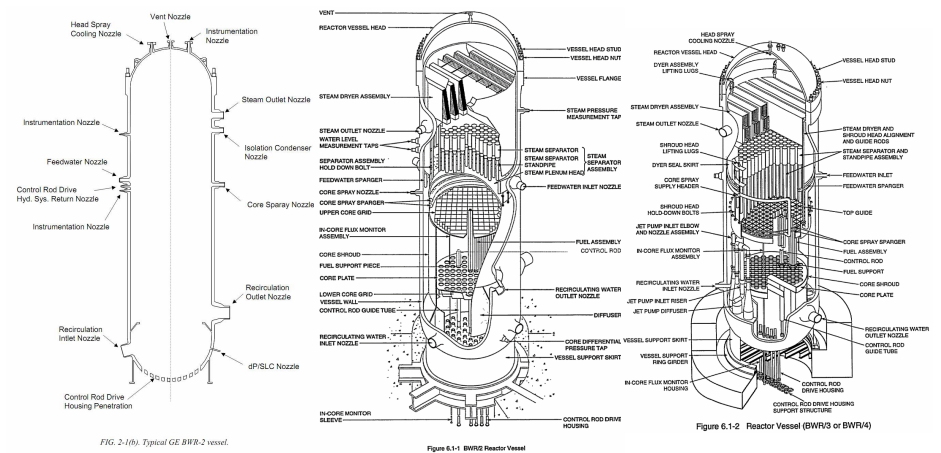
- Tartályon belüli elemek:
 - fűtőelemkötegek (15), szabályozórúd (16), neutrondetektorok (24).
 - Az aktív zónát a zónakosár (14), zónatartó lemez (17), felső távtartó (12) veszi körül.
 - Recirkulációs/sugárszivattyú szerkezetek (13), gőzszeparátorok (6), gőzszárítók (3), tápvíz permetező (8), zónapermetező (11).
 - A zónaüzemzavari hűtőrendszerek (5-ös, 9-es csatlakozások) elemei és a reaktoron belüli elemek kialakítása olyan, hogy biztosítani lehessen a zóna hűtését hűtőközegvesztéses (LOCA) balesetek esetén.



BWR 6 Reactor Vessel

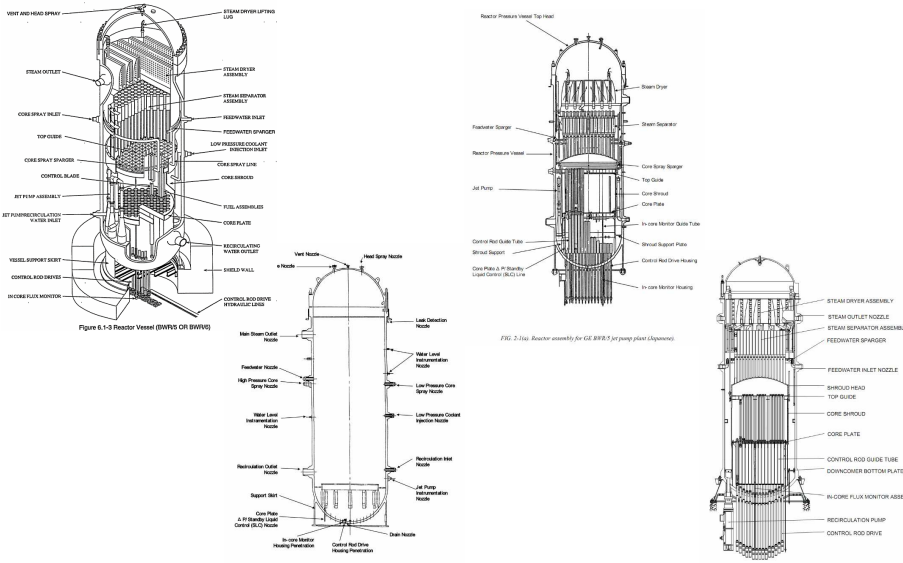
BWR reaktortartály

(*)



BWR reaktortartály

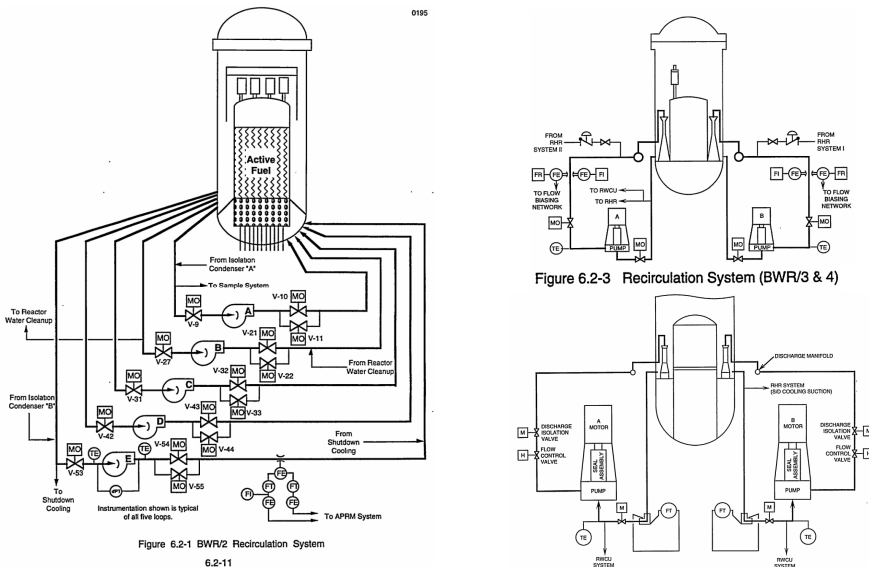
(*)



BWR reaktortartály belső szerkezet

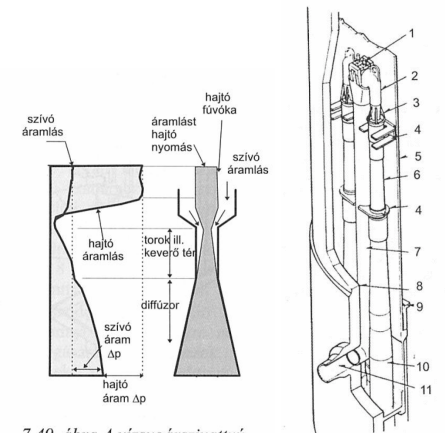
- **BWR-ek különlegessége: sugárszivattyúk, recirkulációs hurkok (GE).**
- **Feladatuk:**
 - Teljesítmény szabályozás – akár a névleges teljesítmény 25%-ával is (automatikusan) változtatható a teljesítmény pusztán a recirkulációs forgalom szabályozásával. Emiatt a BWR-ek előnyösek terheléskövetés szempontjából.
 - Külső vagy belső recirkulációs szivattyúk
- A sugárszivattyúk a zónakosár és a tartályfal közötti víz lepte térben helyezkednek el. Két félkörben tíz-tíz ilyen szivattyú veszi körbe a zónakosarat. Mindkét csoporthoz külső recirkulációs szivattyú tartozik (BWR/6).

BWR recirkulációs hurkok



BWR reaktortartály belső szerkezet

- A zónatartály és a zóna a zónatartó rácson nyugszik.
- A tartórács tartóoszlopokon keresztül a tartály alsó elliptikus fenékrészére támaszkodik.
- A vízsugárszivattyúk a tartályfal és zónatartály között helyezkednek el.
- A recirkulációs körből visszajövő víz a kis átmérőjű fúvókacsőben nagyon felgyorsul, így a kifúvó nyílásnál igen kis nyomás alakul ki. A fúvókacsövet körülvevő térben ennél sokkal nagyobb a nyomás, emiatt a kialakult nyomáskülönbség szívóhatást eredményez. Ez a gyűrűs akna felső részén lévő vizet átszívja a gyűrűs akna alatti alsó keverőtérbe.

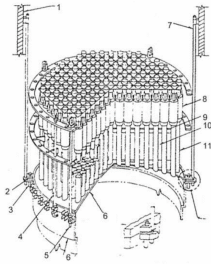


1 - leszorító szerkezet; 2 - belépőcső; 3 - sugárszivattyú fúvóka berendezése; 4 - rezgáscsillapító és alátámasztás; 5 - palást; 6 - keverő; 7 - belépő cső; 8 - reaktortartály fala; 9 - zóna-tartó; 10 - diffúzor és kivárató cső; 11 - recirkulációs belépő cső

7.48. ábra. A vízsugárszivattyú elrendezése

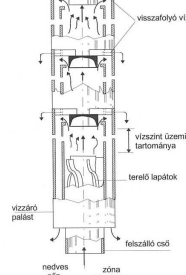
BWR reaktortartály belső szerkezete

- Az aktív zóna feletti gőzszeparátor egy domború alpra támaszkodó, hengeres szeparátoregységekből álló rendszer. A víz-gőz keverék alul lép be a csavarmentes szerű lapátokat tartalmazó szerkezetbe, a perdületet kapott közegben a centrifugális erő szétválasztja a fázisokat. Az elválasztás több lépcsőben, egymás felett zajlik. A gőz felül távozik, a víz visszafolyik, az egyes fokozatok alsó végén lép ki, és belép a csövet körülvevő víztömegbe.
- A gőz a szeparátorból a gőzsűrítőbe jut, ebben felfelé és kifelé áramlik. A terelőlemezek miatti irányváltások miatt a maradék nedvesség is kicsapódik, és visszacsorog a gyűjtőteknőbe.



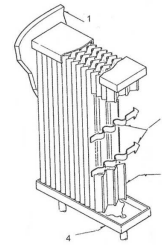
1 - reaktortartály fala; 2 - szerelési vezető kar; 3 - beállító rúd; 4 - leszorító csap; 5 - tartó láb; 6 - palást; 7 - vezető rúd; 8 - axiális gőzszeparátor; 9 - keresztmérés; 10 - merevítő; 11 - tartó csövek;

KoNET, 7.50. ábra. A gőzszeparátor konstrukciója



7.51. ábra. Az axiális átömlesztő szeparátoregység

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI



7.52. ábra. Gőzsűrítő egység

29

BWR reaktortartály belső szerkezete^(*)

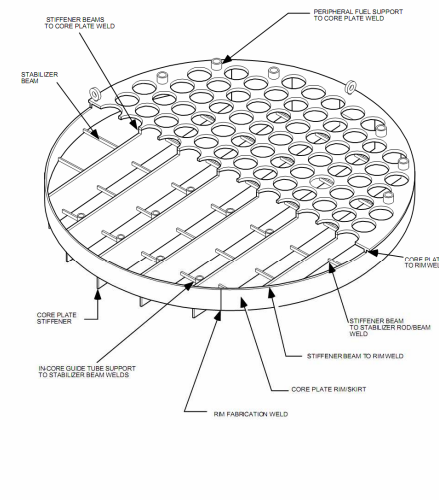


FIG. 2-6. Core plate.

KoNET, BWR

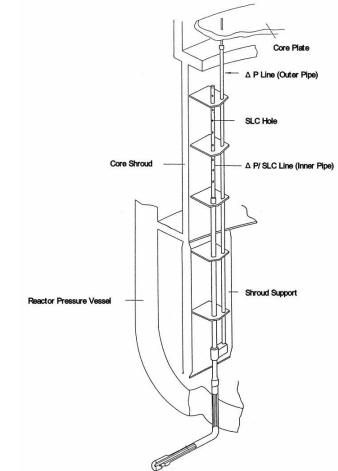


FIG. 2-7. Core plate dp/Standby Liquid Control (SLC) line.

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

30

BWR reaktortartály belső szerkezete^(*)

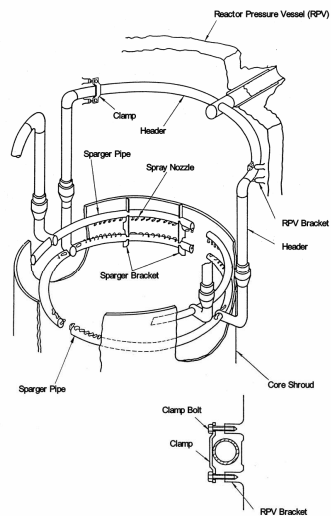


FIG. 2-8. Core spray internal piping.

KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

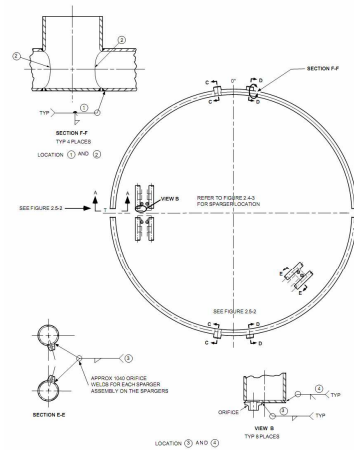


FIG. 2-9. Core spray sparger.

31

BWR reaktortartály belső szerkezete^(*)

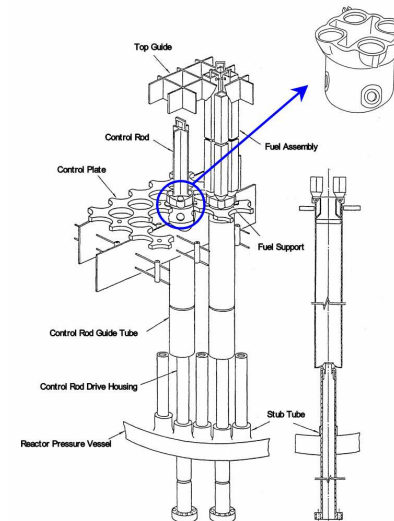


FIG. 2-10. Control rod guide tube and fuel support assembly.

KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

32

BWR reaktortartály belső szerkezet(*)

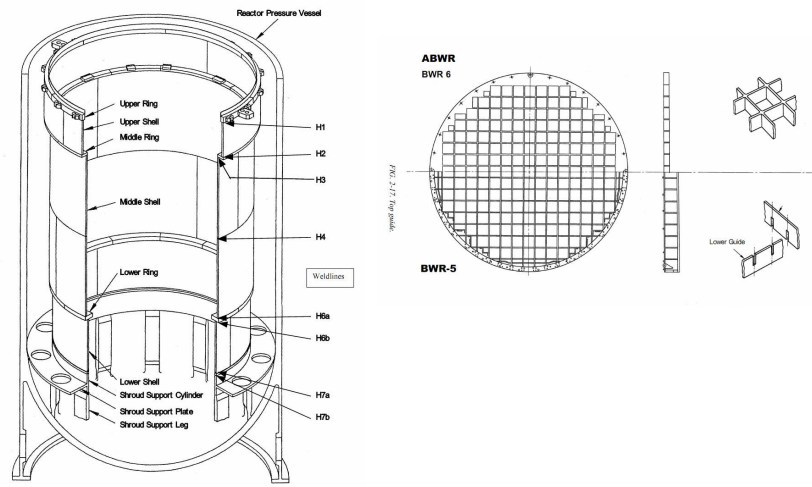


FIG. 2-15. Core shroud and core shroud support.

BWR reaktortartály belső szerkezet(*)

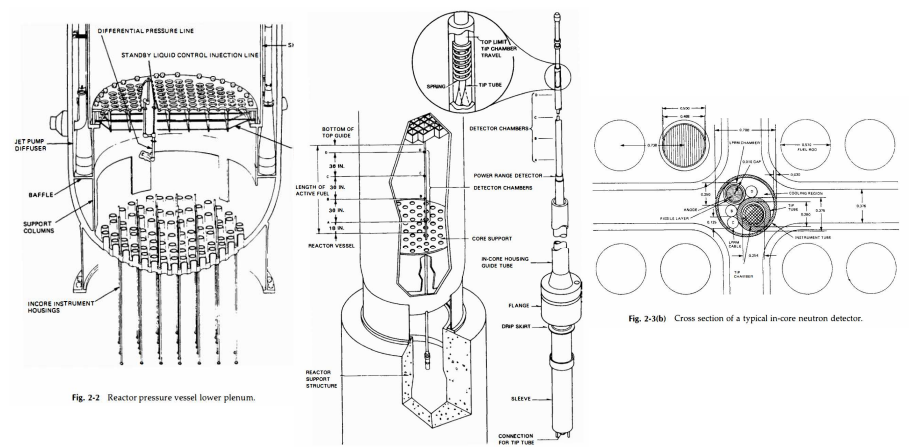


Fig. 2-2 Reactor pressure vessel lower plenum.

Fig. 2-3(a) In-core neutron detector assembly.

Fig. 2-3(b) Cross section of a typical in-core neutron detector.

BWR reaktortartály

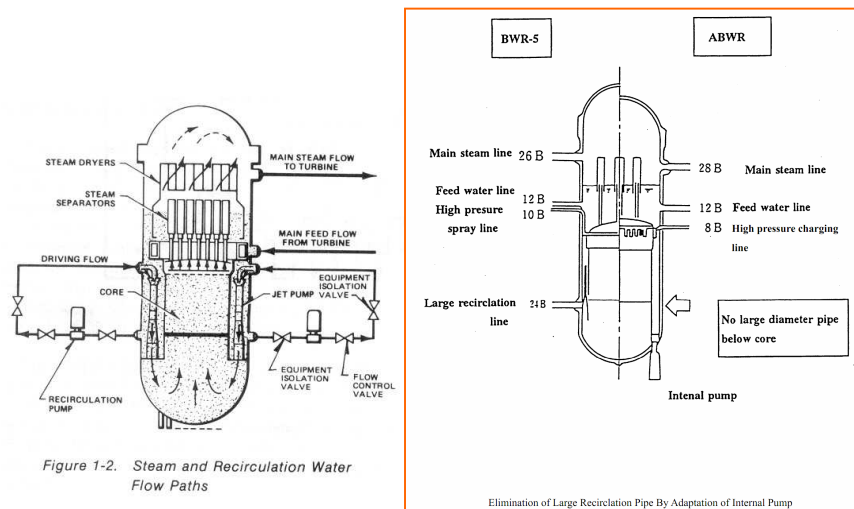


Figure 1-2. Steam and Recirculation Water Flow Paths

Elimination of Large Recirculation Pipe By Adaptation of Internal Pump

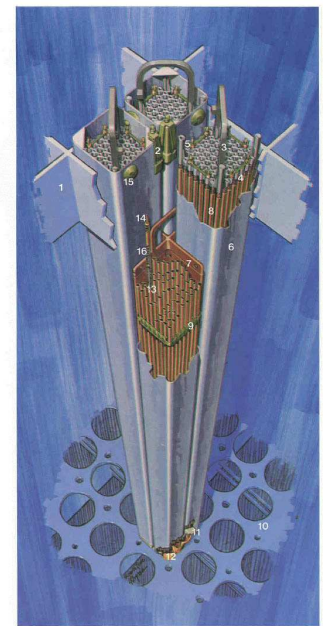
BWR fűtőelemköteg

- Szabályozórúd és környezete (1-6)
 - egy szabályozó cella (fűtőelemmodul) a szabályozórúdból (7) és a négy mellette lévő fűtőelemkötegből (5x5, 7x7, 8x8, 9x9, 10x10, stb) áll.
 - BWR fűtőelemköteg paláستtal rendelkező csatornában van (6), mely megvezeti az áramlást, illetve a szabályozórúdat.
 - A csatorna palást védi a fűtőelemköteget átrakás alatt. Az alulról bevezetett szabályozórúdak segítségével változtatható a reaktor teljesítménye.

BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.LIQUOR TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL ASSEMBLY
- 7.CONTROL ROD
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRINGS

GENERAL ELECTRIC



BWR 6 Fuel Assembly

BWR fűtőelemköteg

- Szabályozórúd és környezete (1-6)
 - Kihúzott szabályozórúd esetén a helyét víz foglalja el, ami jelentős termikusneutron-fluxuscsúcsot eredményez („neutroncsapda”), és a szomszédos fűtőelemekben is megemeli a termikusneutron-fluxust. Ezekben az elemekben alacsonyabb dúsítású (esetleg természetes) uránt alkalmaznak.
 - Fűtőelem nélküli pozíciók kazettán belül: víz moderátor

BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.UPPER TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL
- 7.CONTROL ROD ASSEMBLY
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRING

GENERAL ELECTRIC



BWR 6 Fuel Assembly

BWR fűtőelemköteg

(*)

	Framatome ANP				Westinghouse Sweden			AEC (India)		Nuclear Fuel Industries
	ATRIUM 9B	ATRIUM 10A or B	ATRIUM 10P	ATRIUM 10XP	SVEA-96+ ⁷	SVEA-96 Optima	SVEA-96 Optima 2	LEU	MOX	NFI 9x9B
Assembly geometry	9x9	10x10	10x10	10x10	4x(5x5-1)	4x(5x5-1)	4x(5x5-1)	6x6	6x6	9x9
No of rods per assembly	72	91	91	91	96	96	96	36	36	72
- Fueled	72	83-8 PLFR ¹	79-12 PLFR ¹	81-10 PLFR ¹	96	88-8PLFR ¹	84-12 PLFR ¹	36	35	Water channel (3x3 rod positions)
- Unfuelled	Water channel (3x3 rod positions)								1	
- Tie rods	8				8	8	8	8	8	8
Overall assembly length (mm)	4470 ²	4470 ²	4470 ²	4470 ²	4481	4420	4420	4245	4245	4470 ³
Overall assembly width (mm)	134 ²	134 ²	135 ²	134 ²	138.6	139.6	139.6			134 ³
Rod length (mm)	4074.5 ⁴	4081.4 ⁴	4081.4 ⁴	4081.4 ⁴	4152.6	3885.6	3985.3	110	110	4090 ³
Rod outside diameter (mm)	11.0	10.05	10.05	10.28	9.62	9.62/10.3	9.84	3954	3954	11.0
Pellet length (mm)	11.5	10.5	10.5	10.5	10	10	10	14.3	14.3	10
Pellet outside diameter (mm)	9.5	8.67	8.67	8.87	8.19	8.19/8.77	8.48	14.1	14.1	9.4
Pellet density (g/cm ³)	10.55 (liner) 10.45 (no liner)	10.55 (liner) 10.45 (no liner)	10.55 (liner) 10.45 (no liner)	10.4 (liner) 10.45 (no liner)	10.52	10.52	10.60	12.26 10.35	12.26 10.35	97%TD
Average linear fuel rating (kW/m)	15.8 ⁵	14.3 ⁵	14.3 ⁵	15.8 ⁵	12.8 ⁵	12.4 ⁵	13.1 ⁵	17.9	-	16 ⁵
Peak linear fuel rating (kW/m)	47.0 ⁴	47.0 ⁴	47.0 ⁴	46.0 ⁴	*	*	*	57.4	-	44
Clad material	Zy ²⁵ , LTP2, Fe enhanced Zr liner	Zy ²⁵ , LTP2, Fe enhanced Zr liner	Zy ²⁵ , LTP2, Fe enhanced Zr liner	LTP2/ Fe enhanced Zr liner	Zy ²⁸	Zy ²⁸	Zy2 liner	Zy ²⁸	Zr2 Zr2	Zy2 with Zr liner
Clad thickness (mm)	0.665	0.605	0.605	0.650	0.63	0.63	0.605	0.87	0.87	0.70
Grid material	Zy	Zy	Inc	Inc	Inc	Inc	Inc	Inc	Inc	Zy
Average discharge burnup (MWd/kgU or HW)	43	65 ⁶	65 ⁶	66 ⁶	41	48	58 ⁶	21	21	45
Maximum assembly burnup (MWd/kgU or HW)	55	71	70 ⁶	70 ⁶	45	60	60 ⁶			55

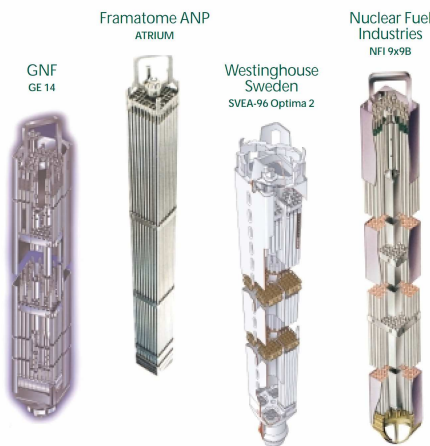
* As customers requirements. ¹PLFR = part length fuel rod. ²Channel inner width (mm). ³Figure varies depending on reactor design. ⁴Depends on plant licensing. ⁵Option: Fe-enhanced Zr liner. ⁶Maximum values licensed for delivered fuel. ⁷For Framatome ANP (ex-Siemens) and GE designed BWRs. ⁸Option: Zr-Sn Liner. ⁹Global Nuclear Fuel (GNF), a joint venture of GE, Toshiba and Hitachi, supplies in the following assembly geometries: 10x10 lattice, GE12 and GE14, 9x9 lattices, GE13, GE11. In Europe, GNF is represented by GNF ENUSA Nuclear Fuel. Customers in Japan are served through its operating company GNF-Japan (formerly Japan Nuclear Fuel). GNF-Japan provides 9x9 fuel (called Step III) to the Japanese BWRs.

BWR fűtőelemköteg

(*)

BWR design data (continued)

	Global Nuclear Fuel ⁹		
	GE 11	GE 12	GE 14
Lattice	9x9	10x10	10x10
# Fuel rods	7	92	92
# Part length rods	8	14	14
Part length rod length	2286 mm	2286 mm	2133.6 mm
Tie rods	8	8	8
# Spacers	7	8	8, new pitch
Rod to rod pitch	14.37 mm	12.95 mm	12.95 mm
Water rods	2 large central	2 large central	2 large central
Discharge exposure	45 GWd/MTU	45-55 GWd/MTU	45-55 GWd/MTU
Channel features	Interactive w trippers	Interactive w trippers	Interactive wo trippers
Active fuel length	3587.5 mm	3689.1 mm	3689.1 mm
Peak LHGR	14.4 kW/ft	11.8 kW/ft	13.4 kW/ft
CPR	Base	+6% over GE 11	+10% over GE 11



BWR fűtőelemköteg

- GE14

- a GE10-GE14 ÜA család legfejlettebb tagja, ABWR
- 10x10, 78 db teljes hosszúságú pálca, ebből 8 merevítő pálca (tie rod) 14 db részleges hosszúságú pálca, két nagy vízoszlop (4-4 pálca helyén)
- részleges hosszúságú pálca: csökkentett (kétfázisú) nyomásesés, ami fokozott zóna és csatorna stabilitást eredményez, valamint a zóna felső részében növeli a moderátor/üzemanyag arányt

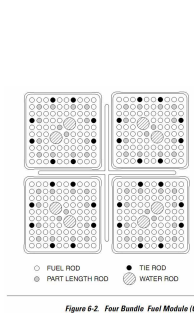


Figure 6-2. Four Bundle Fuel Module (Call)

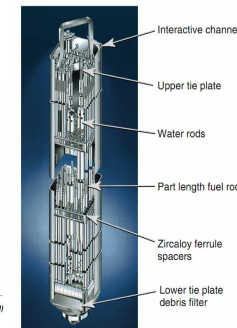


Figure 6-3. GE14 Fuel Assembly

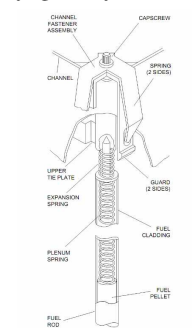


Figure 6-4. Channel Fastener Assembly

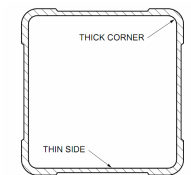


Figure 6-6. Cross-Section of Interactive Channel

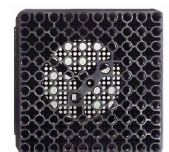


Figure 6-5. Top View of GE14 Debris Filter Lower Tie Plate

BWR szabályozórúd

- BWR szabályozórúd
 - B₄C por, reaktivitás szabályozás és teljesítményprofil-formálás
 - pálcák két síkba rendezve
 - alulról bevezetve

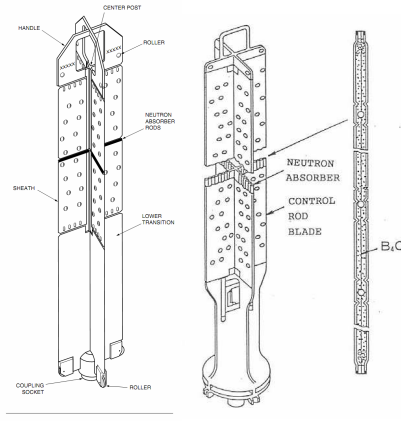


Figure 6-7. ABWR Control Rod

BWR szabályozórúd

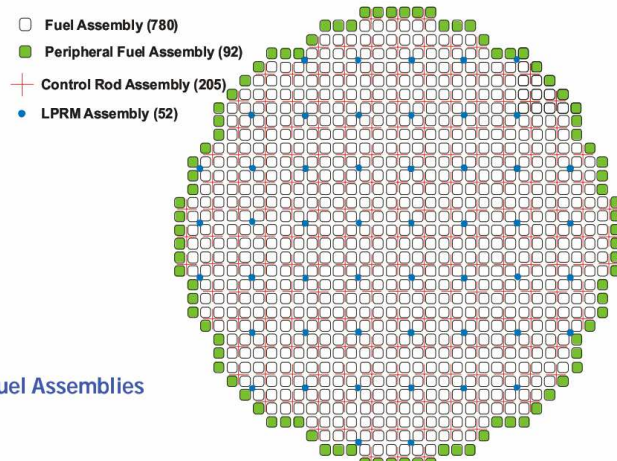
- BWR üzemanyag és szabályozórúd (ABB Atom makett, Forsmark)



(fotók: Yamaji)

BWR zóna

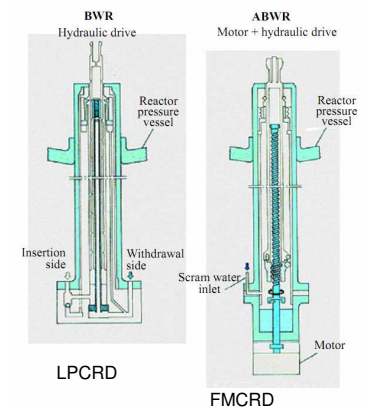
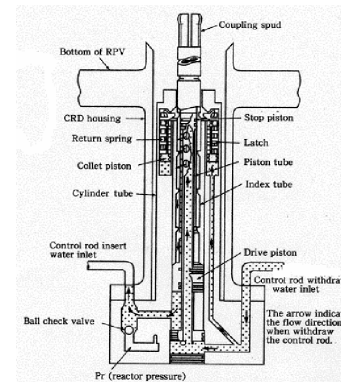
- ABWR zóna
 - LPRM – local power range monitor: in-core monitor mérőegységek, detektorok
 - négy fűtőelemköteg találkozásánál



872 Fuel Assemblies

BWR SZBV hajtás

- SZBV rúdhajtások
 - LPCRD: Locking Piston Control Rod Drive hidraulikus rúdhajtás munkaközeg: kondenzátum víz a kondenzátorból. Ez egyben hűti is az SZBV hajtást.
 - FMCRD: Fine Motion CRD finommotoros rúdhajtás, európai BWR-ek, ABWR



LPCRD

FMCRD

BWR hidraulikus SZBV hajtás

- **Munkaközeg: primerkörü víz; rúdmozgatás: a rúdhajtás dugattyújára adott megfelelő oldali nyomással; a hidraulikai munkaközeg egyben a rúdhajtás hűtőközege is; forrás: kondenzátum táptartály**
- Két szivattyú, egyik üzemel, másik tartalék; a többlet vizet (nem SZBV mozgatóra vagy a hajtás hűtésére használt viz) a reaktortartályba juttatják
- 1400 psig (100 bar) magas nyomású tartályok BV üzemhez; SZBV működéskor adott szelepek automatikusan zárnak így csökkentve a nyomásszabályozó szelepet megkerülő bypass forgalmat, az így megnőtt nyomással mozgatva a rudat

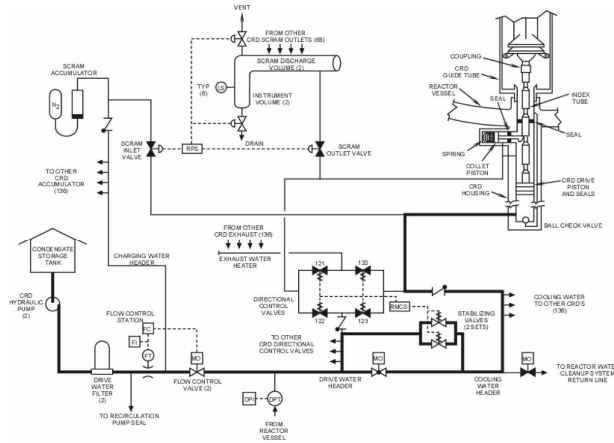


Figure 4.0-1, Control Rod Drive Hydraulic System

BWR hidraulikus SZBV hajtás

- **Hidraulikus egység**
 - energiátárolás SCRAM funkcióhoz: akkumulátor
 - normál üzemi mozgatóhoz szükséges szeleprendszer
 - a CRD hűtéséhez szükséges áramlási útvonal

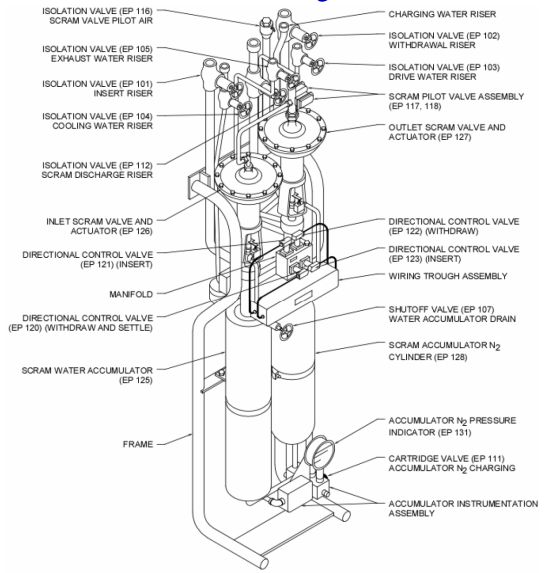


Figure 4.0-2, Hydraulic Control Unit

BWR hidraulikus SZBV hajtás

- Fő mozgó rész: fő hajtás dugattyú (main drive piston) és az index cső (pozicionáló rúd)
- Az SZBV rúd fogazott pozicionáló rúd és rugóval biztosított nyelv tartja a kívánt pozícióban
- A rúd mozgatása reaktornyomásnál nagyobb nyomással történik, melyet a meghajtó dugattyúra adnak
- SCRAM esetén nyitnak a SCRAM szelepek, ekkor a dugattyú feletti részből „elmegey a nyomás” a SCRAM kiömlő tartály felé, ahol végig atmoszferikus nyomás van
- A fogazás kialakítása olyan, hogy lentről felfelé akadálytalanul tud haladni a pozicionáló rúd
- Ahogy az akkumulátor nyomás lecsökken a reaktor nyomásának szintjére, egy golyós visszacsapószelep átállításával a reaktortartályban uralkodó nyomás segíti a ki a SCRAM funkciót

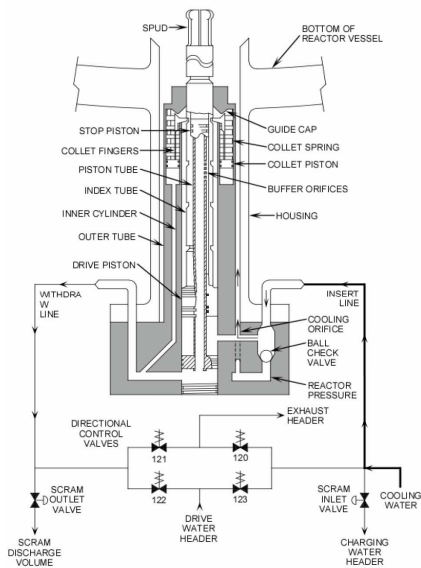


Figure 4.0-3, Control Rod Drive Mechanism

BWR hidraulikus SZBV hajtás

- Ha a reaktornyomás alacsony, pl. induláskor, az akkumulátorok teljes mértékben képesek a BV rudak betolására
- Rúdpozicionálás: a rúd valamivel a kívánt pozíció fölé megy, majd lassan visszaengedik a dugattyúra engedett nyomás csökkentésével, hogy a pozicionáló rúd felüljön a reteszre.
- Rúdhúzás: először enyhén felfelé mozgatják a rudat, hogy oldható legyen a retesz. A retesz oldása után a (rúd)toló szelepek zárnak, a (rúd)húzó szelep nyit, ekkor a hidraulika a dugattyúra (collet piston) adott nyomás tartja oldott pozícióban, amíg a rúdhúzás történik
- Amikor elegendő idő eltelt, hogy a dugattyú egységnyit mozogjon, a húzó szelep automatikusan zár, ekkor a reteszt tartó dugattyúról is elveszik a nyomást. Folyamatos (többlépéses) rúdhúzáshoz az ezt felülvezérlő kapcsoló alkalmazása szükséges

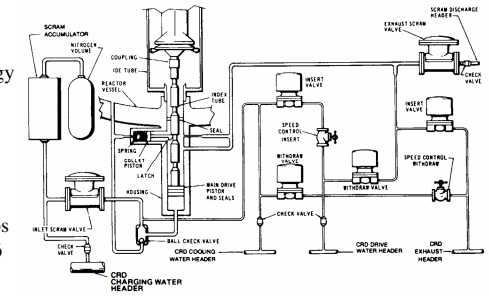
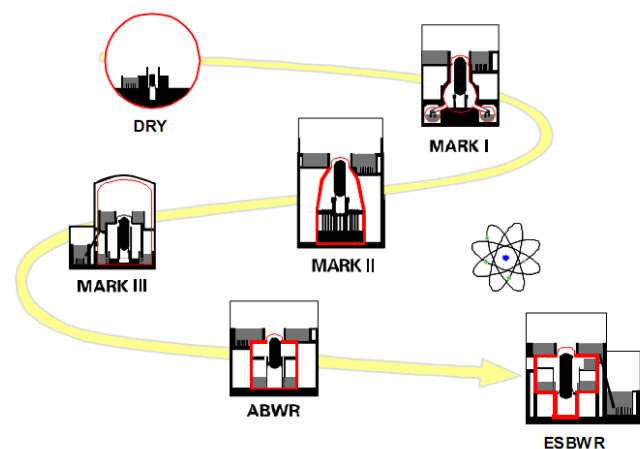


Fig. 2-12 Locking piston drive system.

BWR konténment evolúció



BWR konténment

- A legelterjedtebb a GE konténment sorozata: Mark I, II és III, és ezek altípusai
 - Szárazaknával (drywell) és nedvesaknával (wetwell/ suppression pool/suppression chamber) is rendelkeznek.
 - Mindegyik kialakítás célja a nyomáscsökkentés LOCA esetén.
 - A konténment fő feladata a reaktorból kijutó gőz kondenzációja és a primerkörből kijutó hasadási termékek visszatartása, hogy a telephelyen kívüli dózisterhelés ne érje el a hatósági szintet, illetve hogy hőnyelőt és vízforrást (betáplálási forrást) biztosítson adott biztonsági berendezéseknek.

TABLE 2.2. SOME DESIGN PARAMETERS FOR GE CONTAINMENTS

	Mark I	Mark II	Mark III
Drywell design overpressure (bar)	3.94–4.36	3.16–3.73	1.05
Drywell design temperatur (°C)	139–171	139–171	166
Drywell air volume (m ³) × 1000	3.7–5.0	5.7–8.6	7.1–7.9
Suppression chamber design overpressure (bar)	3.94–4.36	3.16–3.73	1.05
Suppression chamber design temperatur (°C)	139–155	100–139	74
Suppression chamber volume (m ³) × 1000	4.9–7.2	6.1–9.8	23.6–39.6

BWR konténment (*)

Type	Main Contractor	Material	Number of Units
MK I	GE	Steel	23
MK I	GE	Concrete	2
MK II	GE	Steel	1
MK II	GE	Concrete	7
MK III	GE	Steel	3
MK III	GE	Concrete	2
Baulinie 69	Siemens	Steel	6
Baulinie 72	Siemens	Prestressed Concrete	2
Type I	ABB	Prestressed Concrete	5
Type II	ABB	Prestressed Concrete	6
MK I	GE/Hitachi/Toshiba	Steel	10
Improved MK I	GE/Toshiba/Hitachi	Steel	5
MK II	GE/Hitachi/Toshiba	Steel	4
Improved MK II	Toshiba/Hitachi	Steel	7
MK III	Toshiba/GE/Hitachi	Concrete	2

BWR konténment (*)

paraméter	Mark I	Mark II	Mark III	ABWR	ESBWR
Teljesítmény (MWe)	1100	1100	1220	1371	1600
Reaktortartály belső átmérő, m	6,4	6,4	6	7,1	7,1
Szárazakna térfogat, m ³	4672	7872	7929	7350	7206
tervezési nyomás, MPa	0,43	0,31	0,17	0,31	0,31
Nedvesakna térfogat, m ³	4834	5318	32 904	5960	5467
vízterfogó, m ³	3480	3268	4332	3580	4383
tervezési nyomás, MPa	0,43	0,31	0,1	0,31	0,31
Átvezető csatornák tájolás	függőleges	függőleges	vízszintes	vízszintes	vízszintes
méret, m	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
szám	76	76	117	30	30

BWR száraz konténment

- Egyszerű hermetikus konténment a radioaktív anyagok visszatartására
- Nincs nyomáscsökkentő rendszer
- A nyomáscsökkenéshez vezető hűtadás csak a falakon keresztül történik.

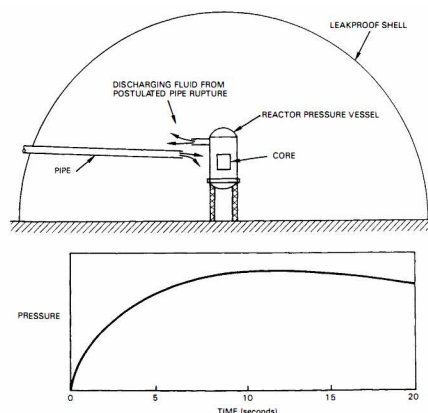


Fig. 1-7 Dry containment.

BWR nyomáscsökkentő konténment

- Szárazakna és nedvesakna
- nyomáscsökkentés nagy kondenzációs térfogatok segítségével
- LOCA esetekre és egyéb üzemzavari körülményekre is, pl. a biztonsági lefúvató szelepek (SRV) nyitásakor

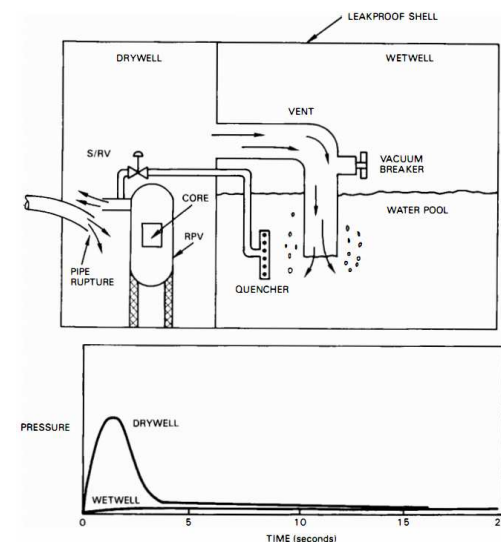
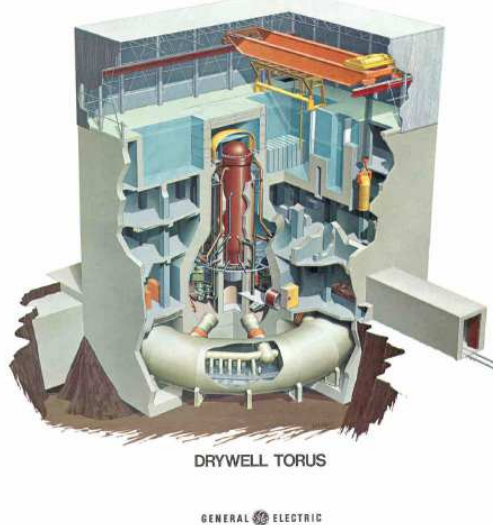


Fig. 1-8 Pressure suppression containment.

BWR Mark I konténment

Főbb részek

- Acél szárazakna, mely körbeveszi a reaktortartályt és a recirkulációs hurkokat.
- Az alsó gömbszerű rész átmérője 18-21 m.
- A szárazakna magassága 30-35 m.
- Eltávolítható fedél
- Nyomáscsökkentő kamra vagy medence nagy mennyiségű vízzel (nedvesakna),
- Az ezeket összekötő csatornarendszer, jellemzően 8-10 db csatorna a kerület mentén egyenletesen elosztva.
- A szekunder konténment, mely a primer falat (azaz a száraz és a nedves aknát) veszi körül. Ebben van a pihentető medence és a ZÜHR (ECCS) rendszer.



BWR Mark I konténment

- A szekunder konténment és a szárazakna fala közötti 50-75 mm rés rugalmas habbal (pl. poliuretán) van kitöltve. (Alapvetően ezt a kitöltő anyagot az építés során alkalmazták a megfelelő pozícionáláshoz, és egyes reaktoroknál eltávolították, másoknál meghagyták.)
- Nedvesakna: szénacél nyomástartó tartály.
- A tórusz nagytérője 29-34 m, kisátmérője 8-10 m. Kb. félmagasságig van töltve vízzel.
- Az átvezető csatornák átmérője 1,7-2,1 m.

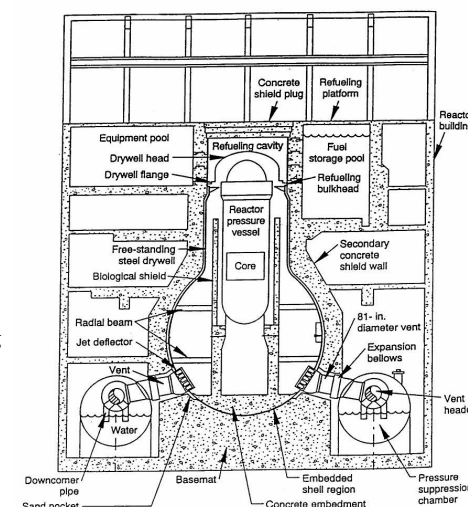


FIG. 2.1. GE-BWR Mark I design.

BWR Mark I konténment

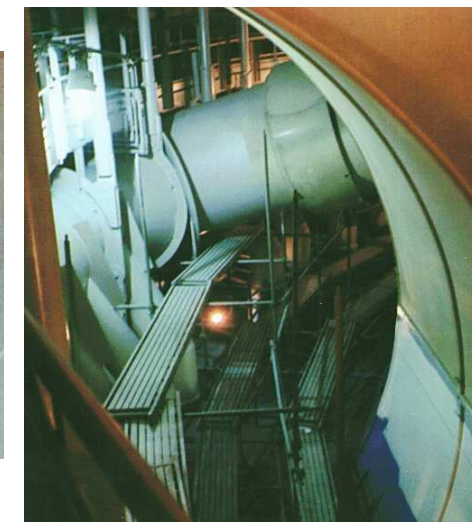
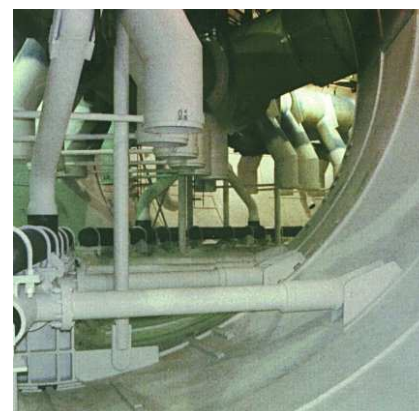
- A szekunder konténment és a szárazakna fala közötti 50-75 mm rés rugalmas habbal (pl. poliuretán) van kitöltve. (Alapvetően ezt a kitöltő anyagot az építés során alkalmazták a megfelelő pozicionáláshoz, és egyes reaktoroknál eltávolították, másoknál meghagyták.)
- Nedvesakna: szénacél nyomástartó tartály.
- A tórusz nagytérője 29-34 m, kisátérője 8-10 m. Kb. félmagasságig van töltve vízzel.
- Az átvezető csatornák átmérője 1,7-2,1 m.



Primary Containment Vessel Under Construction (Unit No.1)

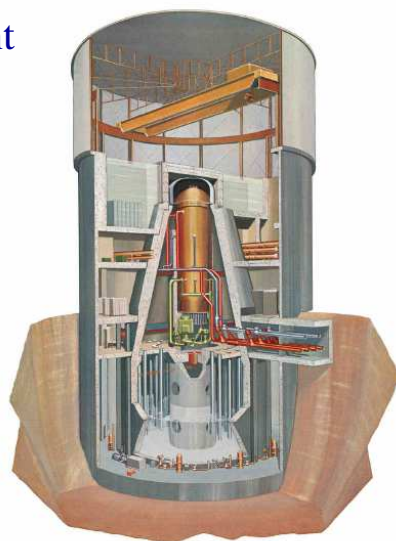
Fukushima Daiichi 1. blokk építése

BWR Mark I konténment



BWR Mark II konténment

- A száraz és a nedvesaknát egymás fölé helyezték.
- Acél kupola és vagy előfeszített beton fal, vagy vasbeton fal a vasbeton alapon (basemat).
- A primer konténment belső felülete hermetikus acél béléssel rendelkezik.
- A primer konténment falai adják az alátámasztást a szekunder konténmentnek (a reaktorépületnek) és a pihentető/átrakó medencéknek.



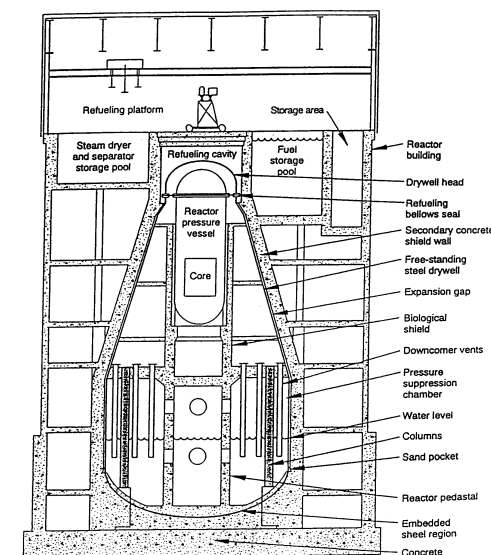
GENERAL ELECTRIC

4814000

Mark II Containmentment

BWR Mark II konténment

- A száraz akna csonkakúp alakú, közvetlenül a nyomáscsökkentő medence felett helyezkedik el. A nyomáscsökkentő kamra henger alakú, vasbeton falak választják el a száraz aknától. A száraz aknát egy elliptikus acélkupola zárja felül (drywell head). A szárazakna inert atmoszférával rendelkezik. Baleset esetén a kiáramló gőz függőlegesen kialakított csatornákon keresztül jut a nyomáscsökkentő kamrába.
- A nyomáscsökkentő medence átmérője 21-27 m, magassága 18 m.



GE BWR Mark II

BWR Mark III konténment

Mark III primer konténment

- A szárazakna (13) hengeres, vasbeton szerkezet leemelhető fedéllel. Visszatartja a csőtörés során keletkező gőzt és a nyomáscsökkentő medencébe (10) vezeti a bukófalon (weir wall - 11) és a vízszintes csatornákon (12) keresztül.
- A medence nagy mennyiségű vizet tartalmaz, gyorsan lekondenzálva a bevezetett gőzt.
- Hermetikus, hengeres acélfal (2) veszi körül a szárazaknát és a medencét. Ez megátalja a radioaktív nemesgázok, az illékony hasadási termékek és a radioaktív aeroszolok környezetbe jutását. Az acél konténment falat pedig még egy beton fal veszi körül (dupla fal)



BWR Mark III konténment

Mark III primer konténment

- A Mark I és Mark II-höz képest itt bukófal és ~125 db csatorna vezeti a nagynyomású gőzt a kondenzációs medencébe.
- A konténment méretéből és kialakításából adódóan (jóval nagyobb, mint az előző két típus) alacsonyabb a tervezési nyomás, illetve nincs szükség nitrogén atmoszférára.
- A pihentető-medencét a konténmenten kívül helyezték el, míg több üzemzavari hűtőrendszert, mely a Mark I és Mark II típusnál a konténmenten kívül helyezkedett el, bekerült a konténmentbe.

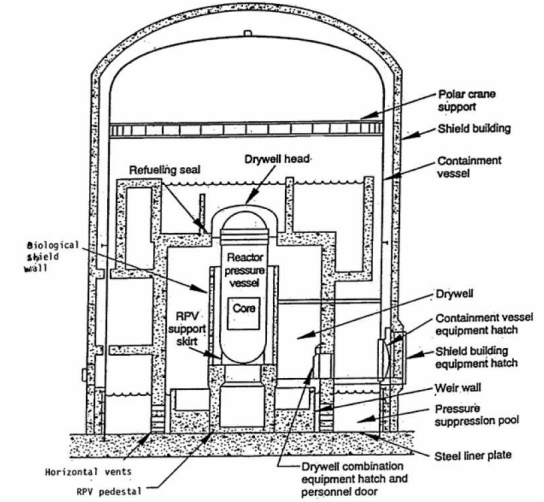
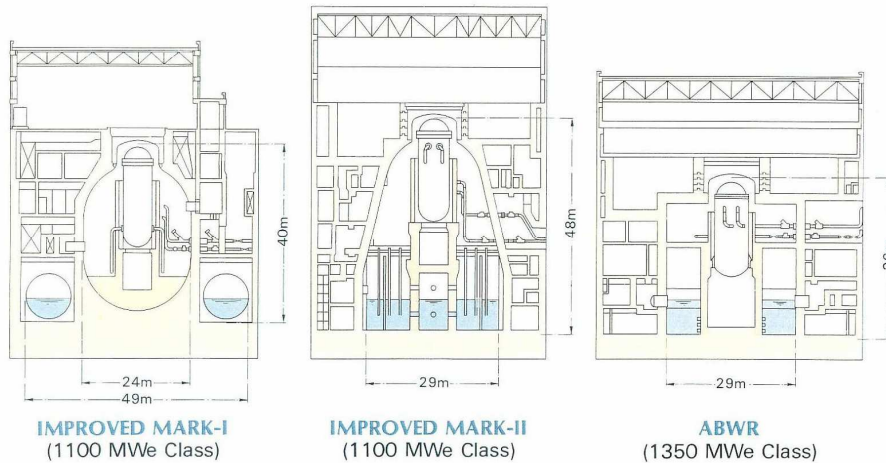


Figure 22. Mark III General Electric, GE BWR Containment.

BWR Mark I - III konténment (*)



BWR Mark I - III konténment (*)

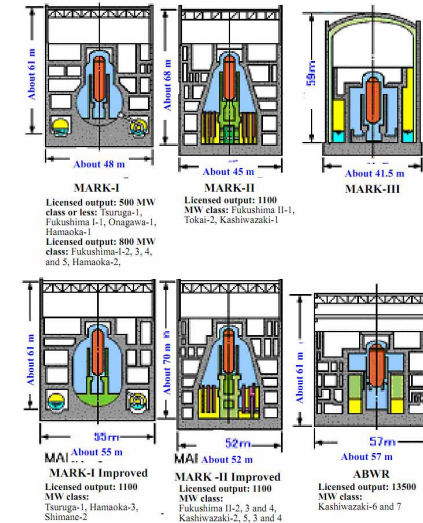


Figure 2. History of BWR Containment

ABB Atom BWR konténment

TABLE 2.4. DESIGN PARAMETERS FOR ABB ATOM PLANTS

	Type 1	Type 2
Design overpressure (bar) max	3.5–4.0	3.7–5.0
Design abs. pressure (bar) min	0.5	0.5
Design temperature dry well (°C)	150–170	172–175
Design temperature wet well (°C)	110–157	130–140
Dry well free volume (m ³) × 1000	3.68–4.98	4.55–5.86
Wetwell free volume (m ³) × 1000	1.86–2.96	2.85–3.03
Condensation pool water volume (m ³) × 1000	1.94–1.95	2.70–3.17

ABB Atom BWR konténment

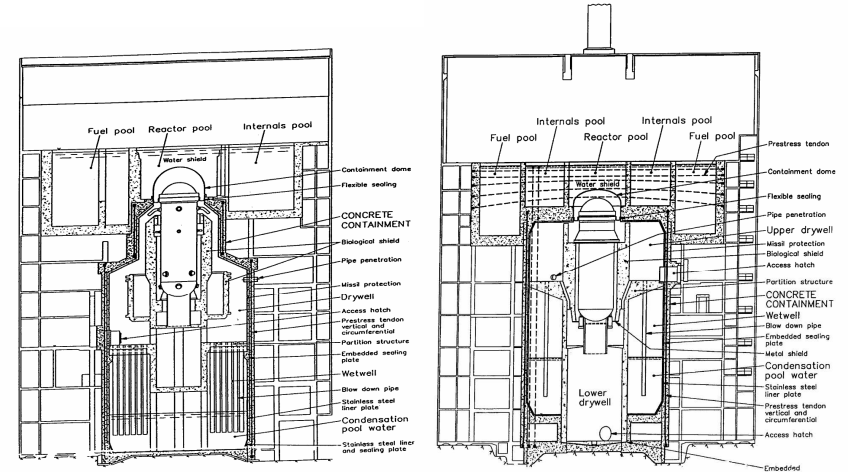


FIG. 2.6. ABB-Atom Type I design.

FIG. 2.7. ABB-Atom Type II design.

ABB Atom BWR konténment



(fotó: Yamaji)

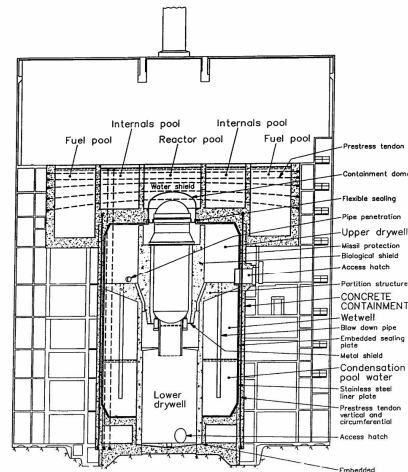


FIG. 2.7. ABB-Atom Type II design.

ABB Atom BWR konténment



Reaktor tankjának a reaktorinneslítésénél Forssmark 2 | november 1977.

Vattenfall/Forssmark

Siemens BWR konténment

TABLE 2.3. ATTRIBUTES OF SIEMENS-KWU PLANTS

	Baulinie 69 900 MW	Baulinie 69 1300 MW	Baulinie 72 1300 MW
Drywell design overpressure (bar)	3.25–3.40	3.50	3.30
Drywell design temperature (°C)	135–146	146	146
Drywell air volume (m ³) × 1000	3.70–3.85	4.97	8.64
Suppression chamber design overpressure (bar)	3.25–3.40	3.50	3.30
Suppression chamber design temperature (°C)	90	90	90
Suppression chamber air volume (m ³) × 1000	2.17–2.28	2.72	6.10
Suppression chamber water volume (m ³) × 1000	2.23–2.60	3.70	3.13

Siemens BWR konténment

Baulinie 69:

- 27 m vagy 29,6 m átmérőjű gömb acéltartály alul kitüremkedéssel
- peremes eltávolítható fedél (átrakás)
- A nedvesaknában a gömb középköréig nagy mennyiségű sótalanvíz
- vasbeton talpazat
- indítás előtt átszellőztetik az acél konténmentet és tiszta nitrogénnel töltik fel (hidrogén és oxigén felhalmozódásának és berobbanásának elkerülése)
- 900 MW és 1300 MW

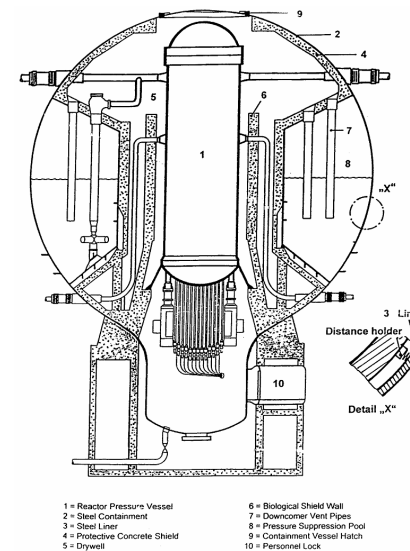


FIG. 2.4. Siemens-KWU Baulinie "69" design.

Siemens BWR konténment

Baulinie 72:

- vasbeton szerkezet
- hengeres előfeszített beton kamra eltávolítható fedéllel (szárazakna).
- gyűrűs alakú nedvesakna, mely körbeveszi a szárazaknát és a reaktortartályt.
- A teljes konténment, beleértve a nedvesaknát, belülről hermetikus acélburkolattal rendelkezik.
- A reaktortartályt hengeres beton biológiai védelem veszi körül.

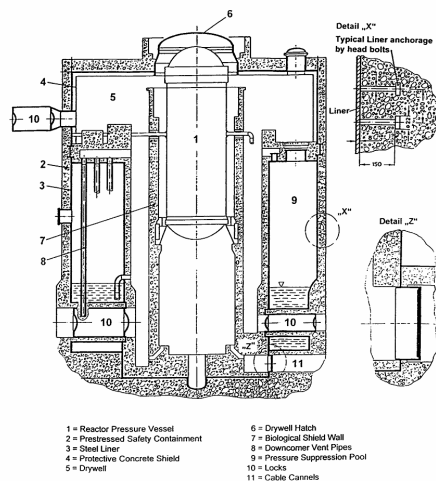


FIG. 2.5. Siemens-KWU Baulinie "72" design.

ABWR konténment

- Szárazakna: alsó és felső rész
- vasbeton szerkezet
- Független vezeték az szárazakna két része és a nedvesakna összekötésére, vezetéként három vízszintes kifűvővel
- hermetikus rozsdamentes acélburkolat

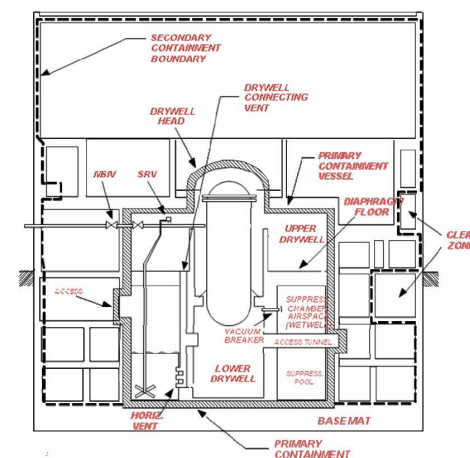


Figure 1: Schematic of Typical ABWR Containment

ABWR konténment

Typical ABWR Containment Parameters

Design pressure, MPa	0.41
Drywell free volume, m ³	7350
Upper drywell volume, m ³	5480
Lower drywell volume, m ³	1860
Area of drywell connecting vents, m ²	11.3
Wetwell free volume, m ³	5960
Suppression pool water volume, m ³	3580
Suppression pool water height, m	7.05
Vents	
Number of vertical vents	10
Vertical vent diameter, m	1.2
Number of horizontal vents/vertical vent	3
Horizontal vent diameter, m	0.7
Horizontal vent length, m	1.0
Initial submergence of top horizontal vents, m	3.5
Initial submergence of middle horizontal vents, m	4.9
Initial submergence of lower horizontal vents, m	6.2
Vent loss coefficient	2.5 - 3.5
Residual Heat Removal System (Pool Cooling Mode)	
Loops	3
Flow rate per loop at 275 kPa, m ³ /hr	950
Automatic initiation on pool temperature, K	322
Required NPSH, m	2.4
Residual Heat Removal System (Containment Spray Mode)	
Loops	2
Drywell Flow Rate (kg/hr)	0.84E6
Wetwell Flow Rate (kg/hr)	1.14E6
Residual Heat Removal System Heat Exchangers	
Type	U-tube
Overall heat transfer coefficient, kW/C	370
Reactor cooling water flow rate, kg/hr	1.2E6
Service water temperature, °C	30
Drywell Coolers	
Heat removal capability, MWt	1.25
Drywell pressure increase scram, kPa	13.6

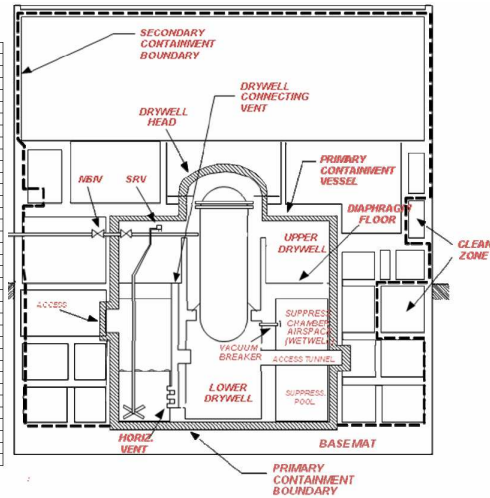


Figure 1: Schematic of Typical ABWR Containment

BWR konténment tranziensek (*)

LOCA/SRV lefűtás esetén a következő terhelések lépnek fel:

- medence duzzadás: mikor a szárazakna atmoszférája a medencé(k)be lép, lökészerű terhelések lépnek fel
- kondenzációs oszcillációk: a kondenzáció kezdeti szakaszában a gőz lobbanásszerűen lép ki az átvezető csatornákból, és ahogy a kondenzációs határ oszcillál, ez időben változó terhelést okoz a víz alatti szerkezeteknél
- pöfögés: alacsony gőzforgalomnál a víz ciklikusan ki- és beáramlik az átömlő csatornában. Ez szintén dinamikus terhelést jelent a víz alatti szerkezeteknek
- biztonsági lefűtató szelepek (SRV) levegő kifűtása: lefűtáskor először összenyomódik a vezetékben lévő levegő a vízzár előtt, majd nagy amplitúdójú oszcillációk kíséretében fűvódik ki a medencébe
- magas hőmérsékletű kondenzációs instabilitás: az SRV gőz lokálisan melegíti a kondenzációs vizet, és a buborékok csak távolabb haladva tudnak kondenzálódni

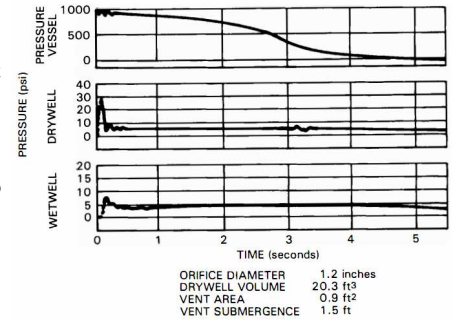


Fig. 1-15 Pressures recorded during a transient test.

BWR üzemeltetés

- **Fő üzemi paraméterek: termikus teljesítmény, nyomás és vízszint**
- **Termikus teljesítmény szabályozása: a szabályozórudak pozíciójával és a recirkulációs forgalommal**
- **Gőzdóm nyomás mindig azonos érték**, a fő turbina szelepek és a bypass szelepek nyitásával és zárásával
- **Reaktor vízszint: automatikusan van konstans értéken tartva a tápvízforgalom**, azaz a tápvízszivattyúk sebességén keresztül.
- a névleges teljesítmény 65%-a felett az automatikus teljesítménykövetés pusztán a recirkulációs forgalom változtatásával történik.

BWR instabilitások

- Lokális teljesítmény-felzabálás közvetlen kapcsolatban van a fluxussal, mely a reaktivitás függvénye.
- BWR-ekben a reaktivitás erősen függ az üreghányadtól.
- Amennyiben oszcilláció alakul ki az üreghányadban, az a reaktorfizikai visszacsatolás miatt teljesítmény-ingadozást okoz.
- Adott körülmények között ezek az oszcillációk lehetnek gyengén csillapítottak, a frekvencia elérheti a 0,5 Hz-t.
- A regionális (és lokális) oszcillációk problémát jelentenek az operátornak, mert nem (vagy csak nehezen) észrevehetőek, a műszerek zónaátlagokat mutatnak.
- Lokális oszcillációk is kialakulhatnak: egy-két üzemanyag-kazetta (csatorna) a zónától függetlenül oszcillál.
- A BWR-ek fejlődésével a konstrukciók mára olyanok, hogy normál üzemi körülmények között ilyenek nem alakulnak ki.

BWR instabilitások

- Ezek az instabilitások csak alacsony teljesítményen, pl. induláskor, valamint alacsony forgalommal és magas teljesítménnyel jellemezhető állapotok felé mutató teljesítmény-változáskor alakulhatnak ki
- az adott forgalomhoz tartozó névleges teljesítmény alatt
- lokálisan a paraméterek (teljesítmény) meghaladhatják a korlátokat
- teljesítmény-forgalom térkép (power-flow map)

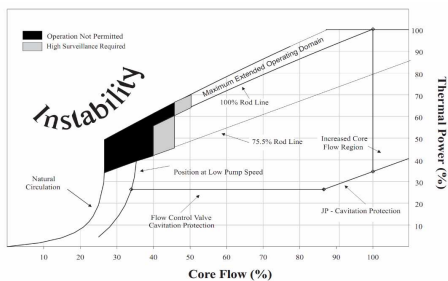


Figure 1.2: Instability Region in the Power-Flow Map

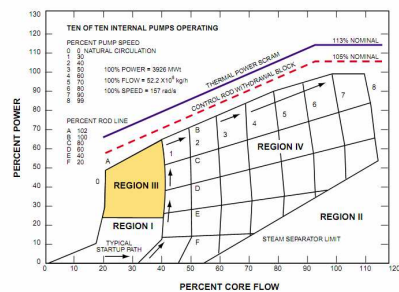


Figure 11-1 ABWR Power-Flow Map

Termikus korlátok BWR-nél

- konvektív forrás a fő folyamat
- gyűrűs áramlás
- a hőátadás számos jellemzőtől függ:
 - tömegáram
 - folyadék anyagtulajdonságai
 - geometria
 - hőfluxus nagyságrendje
 - hőfluxus eloszlás

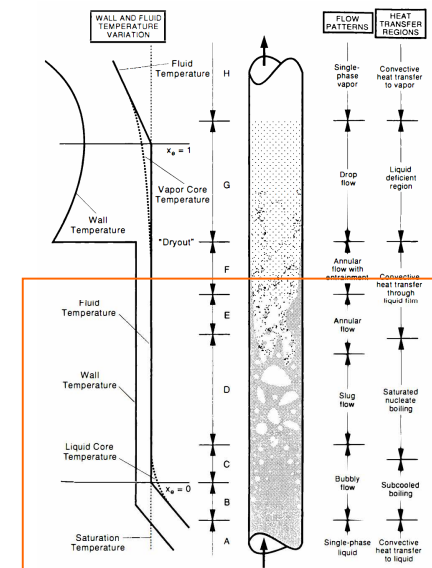


Figure 12-4 Regions of heat transfer in convective boiling. (From Collier [17].)

Termikus korlátok BWR-nél

- 1-2: egyfázisú konvektív hőátadás ΔT növelésével lassan nő a hőfluxus
- 2-3: aláhűtött buborékos forrás összetett hőátadás (egyfázisú konvektív+forrás)
- 3-4: buborékos forrás intenzív hőátadás, a pálcák felülete jól hűtött
- 4-5: gyűrűs áramlás normál üzem esetén BWR-eknél ez történik a nagy teljesítményű kazetták kilépésénél
- 5: kiszáradási pont a hőátadás nem nő tovább
- 5-6: átmeneti tartomány oscillációk, rendkívül instabil, a kiszáradt felület időnként újranedvesedik
- 6- : teljes kiszáradás utáni konvektív hőátadás

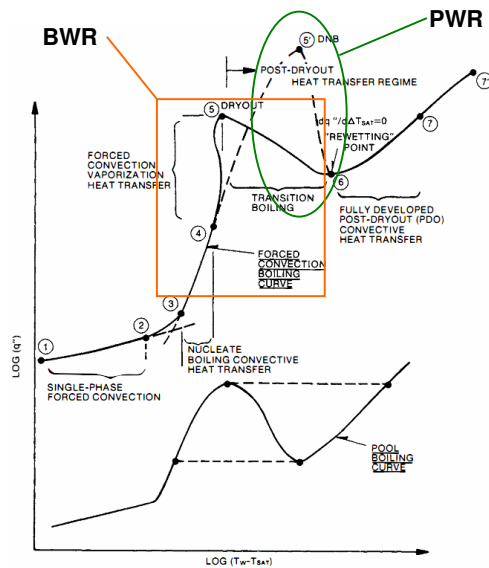


Fig. 4-17 Comparison of typical convective and pool-boiling curves.

Termikus korlátok BWR-nél

- A kiszáradási pont (5) (és a hőátadási görbe) ebben a formában egyenletes axiális teljesítményre adható így meg.
- (BWR) Reaktorok esetében a kazetta hosszában profillal rendelkeznek a teljesítmény, egy görbecsoport határozható meg, mely az axiális profil és belépésnél fennálló aláhűtés mértékének függvénye.
- A fajlagos áramlási gőztartalom (quality) határozza meg a kiszáradás helyét, nem (csak) a lokális hőfluxus.

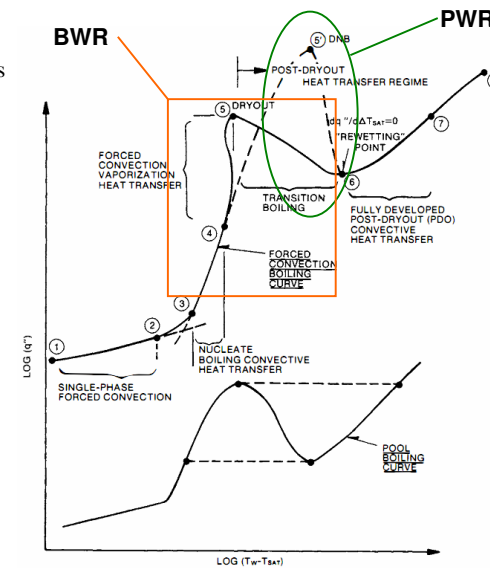


Fig. 4-17 Comparison of typical convective and pool-boiling curves.

Termikus korlátok BWR-nél

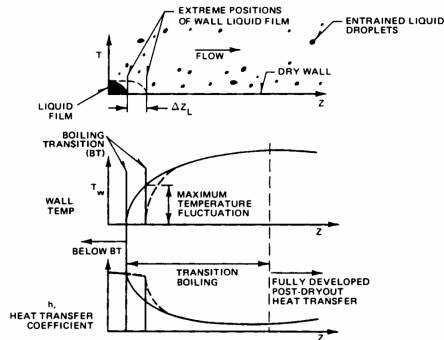


Fig. 4-22 Heat transfer behavior beyond BT for uniform axial heat flux (Quinn, Fig. 4-23 Typical temperature history beyond BT (Levy and Bray, 1963). 1966).

- A folyadékfilm határa – a kiszáradás pontja vándorol, fluktuál
 - a fali hőmérséklet hirtelen emelkedik
 - a hőátadási tényező leesik
- oszcillációk

Termikus korlátok BWR-nél

- Szinuszos axiális teljesítmény profil (Q/A)
- Hűtőközeg hőmérséklet a telítési értékig emelkedik, onnantól állandó
- Hűtőközeg entalpia-változása jobb jellemző (monoton nő)
- Pálca felületi hőmérséklet nagyjából a hűtőközeg hőmérsékletét követi
- A forrás eredményezte intenzív hőátadás alacsonyabb középvezonali hőmérsékletet eredményez, mintha csak egyfázisú hőátadás biztosítaná a pálca hűtését

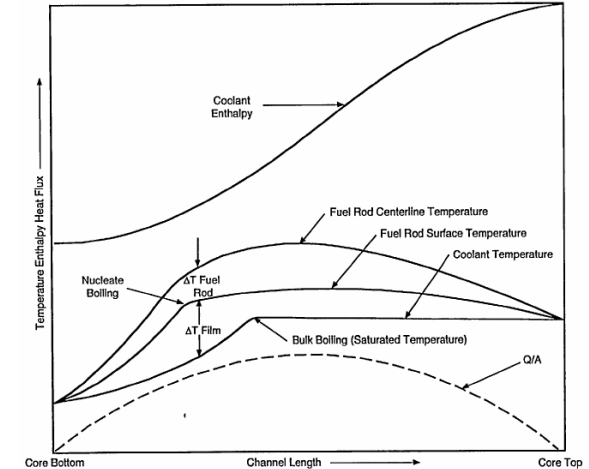


Figure 1.8-4 Plot of Coolant and Fuel Bundle Temperature vs. Flow Path Length

Termikus korlátok BWR-nél

- kritikus hőfluxus
 - PWR-nél: DNB
 - BWR-nél: DRYOUT (kiszáradás)
 - ennek a kialakulása jobbra a csatorna kiszáradás előtti szakaszának termohidraulikai állapotától függ, nem pedig a kiszáradás helyén kialakuló lokális jellemzőktől.
 - DNB lokális állapot
 - DRYOUT csatorna jellemző
 - DNB: hőfluxus arányokkal jellemzik
 - DRYOUT: teljesítmény arányokkal

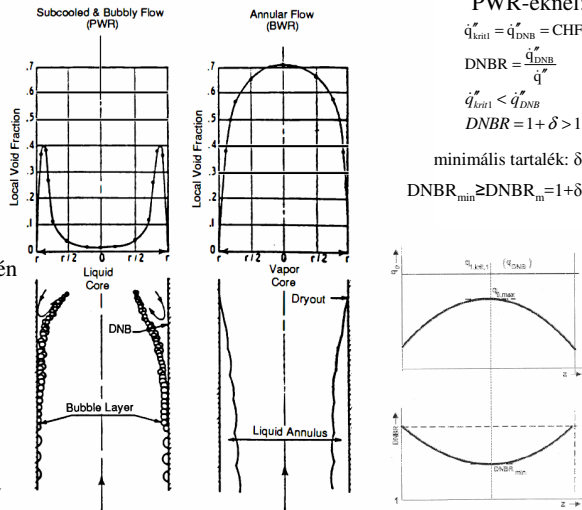
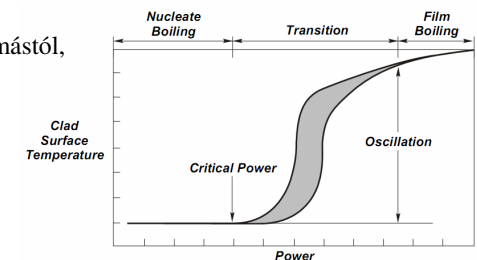


Figure 2-2 Critical heat flux mechanisms for PWR and BWR operating conditions. (From Tong [4].)

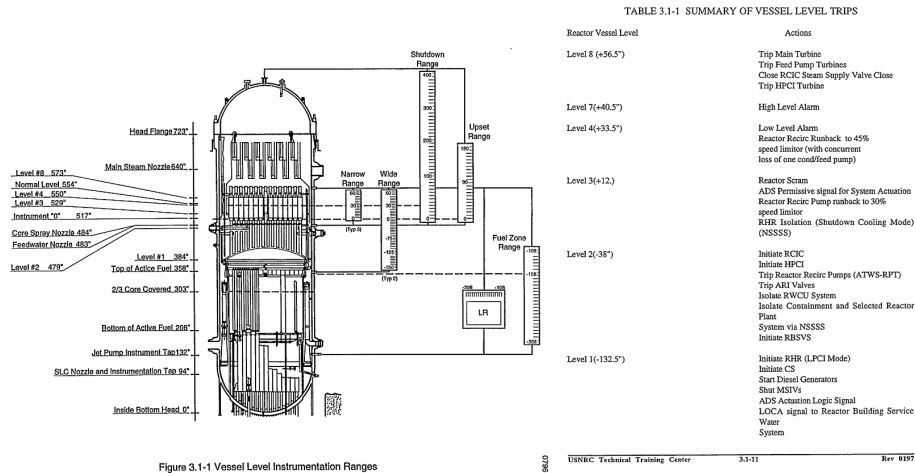
Termikus korlátok BWR-nél

(*)

- CPR: critical power ratio: kritikus teljesítmény (teljesítmény arány) korlát
 - cél a kiszáradás, illetve az átmeneti tartomány elérésének elkerülése
 - nem konstans, a termohidraulikai körülmények függvénye
 - megmutatja, hogy egy fűtőelemköteg mennyire jár közel a kiszáradáshoz
 - a kiszáradási front mozog, oszcillál, ezért a felületi hőmérséklet is ingadozik
 - az oszcilláció mértéke és a forrási átmenetet (boiling transition) követő hőmérséklet-ugrás mértéke az üzemi körülményektől függ
 - normál körülmények között a hőmérséklet emelkedése viszonylag lassú, az oszcillációk kis mértékűek
 - függ: tömegáramtól, kilépő nyomástól, axiális és radiális teljesítmény-eloszlástól

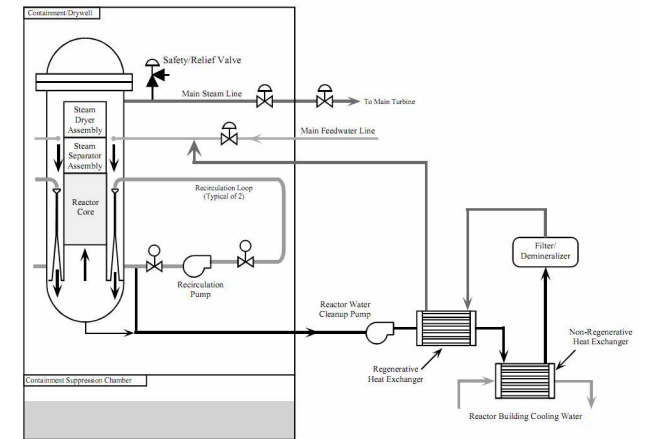


Reaktor vízszinhez kapcsolódó főbb védelmi jelek (*)



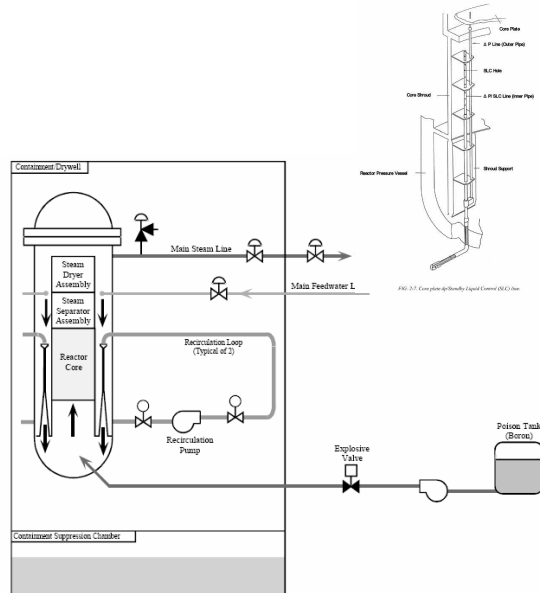
Víz tisztító rendszer - Reactor Water Cleanup System (RWCU)

- Hasadási termékek eltávolítása, korróziós termékek eltávolítása, egyéb oldódó és nem oldódó szennyezők eltávolítása.
- A recirkulációs körből és az alsó keverőtérből vesz el, hőcserélőkre juttatja a vizet.
- Szűrők, víztisztítók, sótlanítók
- A tisztított víz a fővízköri hidegágba kerül vissza (a primerkörbe).



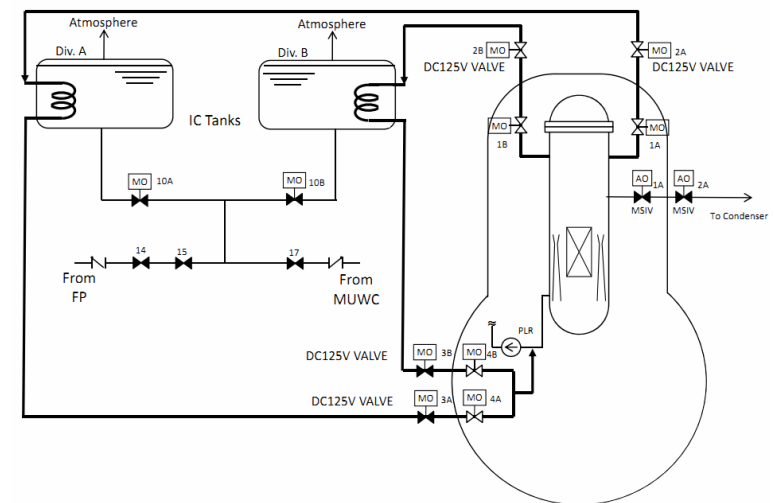
Leállási bórsavas szabályozás (SLC)

- Leállás esetén neutronmérget (bórsavat) juttat a reaktortartályba (standby liquid control system). A rendszer a szabályozórudaktól független. **Nukleáris értelemben leállított állapotban tartja a zónát, amíg karbantartási hőmérsékletre hűtik a rendszert.**
- Operátor indítja a rendszert, melynek segítségével egy viszonylag lassú módon lehet a reaktor állapotát változtatni (leállított állapotba hozni).
 - előmelegített táptartály,
 - két kényszerlökétű szivattyú,
 - szelepek,
 - csővezetékek



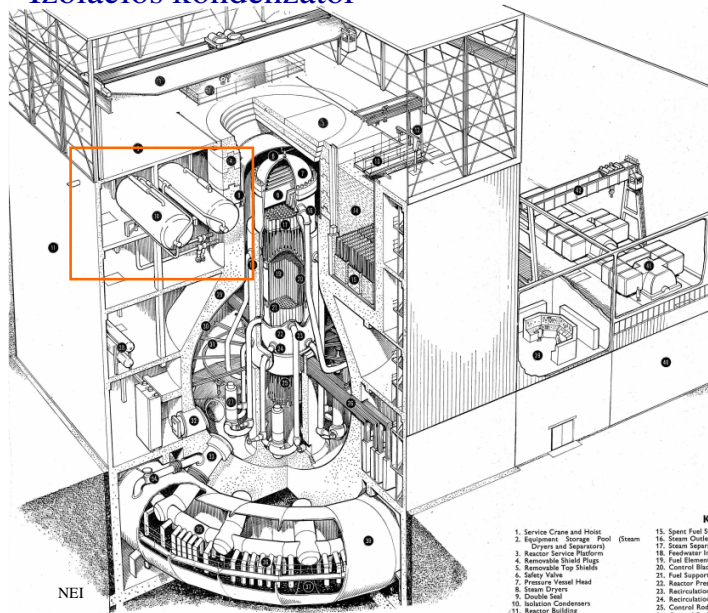
Izolációs kondenzátor - Isolation Condenser (IC)

- BWR/3 - F11



Moriya, Sato: Fukushima Daiichi NPP Accident, Plant Design and Preliminary Observations, ICAPP, 3 May, 2011

Izolációs kondenzátor



OYSTER CREEK

The World's Reactors No. 40

OWNER Jersey Central Power & Light Co.
LOCATION Ocean County, New Jersey, U.S.A.
TYPE Forced circulation, direct cycle, BWR
OUTPUT 515 MW(e) net
 1 600 MW(t)
PRIME CONTRACTOR General Electric Company
ENGINEER Burns & Roe Inc.
CONSTRUCTOR
START-UP 1967
CORE Equivalent diameter: 160.2 in
 Circumscribed diameter: 176.5 in
 Heat transfer area: 49 200 ft²
 Channel material: Zircaloy
FUEL Material: Enriched UO₂
 Average diameter: 0.409 in
 22 000 MW(t) (equilibrium core)
 No. of assemblies: 569
 Assembly weight (including sheath): 407 lb
 No. of rods per assembly: 49
 Rod outside diameter: 0.579 in
 Active length: 144 in
 Cladding material: Zircaloy
 Cladding thickness: 0.038 in
 No. of control blades: 127
CONTROL Material: Inconel
 No. of control rods: 127
 Control rod poison material: Boron carbide
 No. of temporary control rods: 248
 Control material: Boron-stainless steel
MODERATOR/COOLANT demineralized light water
 Reactor steam output: 5 855 000 lb/h
 Recirculation flow rate: 61 x 10⁶ lb/h
PRESSURE VESSEL Pressure: 1 000 psig
 Inside diameter: 17 ft 9 in
 Overall inside height: 63 ft 10 in
 Wall thickness: 7.125 in
 Material: Carbon steel
 Cladding material: Stainless steel
 Cladding thickness: 0.037 in
 Design pressure: 1 350 psig
RECIRCULATION LOOPS Pipe outside diameter: 26 in
 Pump capacity: 32 000 gal/min each
 Pump type: Centrifugal, mechanical
TURBINE GENERATOR Feed water temperature: 150°C
 Number: 1
 Type: Tandem-compound, slip-flow, reheat
 Turbine inlet pressure: 945 psia
 Turbine exhaust pressure: 1.6 in Hg abs
 Speed: 1 800 rpm
 Gross output: 515 MW(e)
 Voltage: 24 000 v
 Gross output: 560 MW(t)

- KEY**
- 1. Service Crane and Hoist
 - 2. Equipment Storage Pool (Steam Drums and Separators)
 - 3. Reactor Service Platform
 - 4. Removable Shield Plug
 - 5. Removable Top Shield
 - 6. Safety Valve
 - 7. Pressure Vessel Head
 - 8. Steam Dryer
 - 9. Double Seal
 - 10. Isolation Condensers
 - 11. Reactor Building
 - 12. Fuel Handling Grapple
 - 13. Fuel Service Platform
 - 14. Fuel Storage Pool
 - 15. Seven Fuel Storage Racks
 - 16. Steam Outlet
 - 17. Steam Separator
 - 18. Fuelwater Inlet
 - 19. Fuel Element Assembly
 - 20. Control Blades
 - 21. Fuel Support Grid
 - 22. Reactor Pressure Vessel
 - 23. Recirculation Outlet
 - 24. Recirculation Inlet
 - 25. Control Rod Drives
 - 26. Control Rod Drive Piping
 - 27. Recirculation Pumps
 - 28. Shutdown Heat Exchangers
 - 29. Drywell Shielding
 - 30. Drywell Containment Vessel
 - 31. Drywell
 - 32. Personnel and Equipment Hatch
 - 33. Doors from Drywell to Suppression Chamber
 - 34. Vacuum Breaker
 - 35. Distribution Header
 - 36. Vent Pipes
 - 37. Suppression Water Pool
 - 38. Pressure Suppression Tower
 - 39. Central Control Room
 - 40. Turbine Building
 - 41. Turbine Generator
 - 42. Turbine Service Crane

Izolációs kondenzátor

- Feladata a reaktor lehűtése izolációs állapot esetén anélkül, hogy a hűtőközeg-tartalom csökkenne a reaktorban
- Izoláció esetén a reaktorban termelődő gőz az izolációs kondenzátor tartályokba kerül
- A hőcsere után a kondenzátum visszajut a reaktortartályba
- Két önálló rendszer, egy-egy kondenzátor medence (hőcsere), vezetékek, stb
- A két kondenzációs medence a névleges hőteljesítmény 6%-át tudja elvezetni
- A kondenzációs medencék kapacitása arra elegendő, hogy azok hűtése nélkül 10 órán keresztül üzemeljen az IC
- DC akkumulátor betáplálás szükséges

Moriya, Sato: Fukushima Daiichi NPP Accident, Plant Design and Preliminary Observations, ICAPP, 3 May, 2011

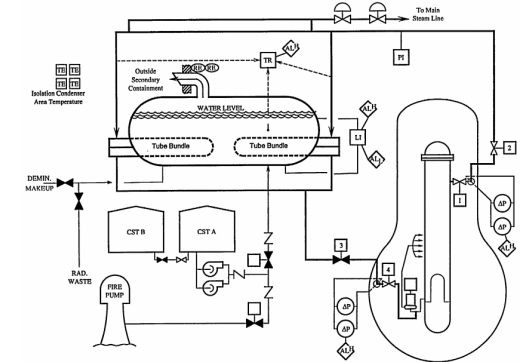
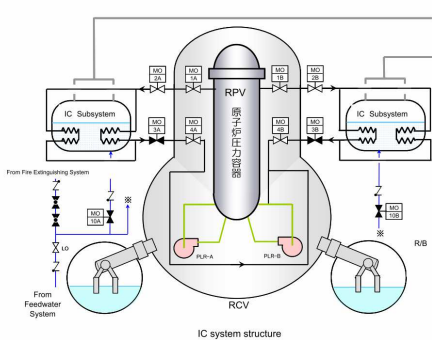


Figure 6.3-1 Isolation Condenser System (BWR/2B)

KoNET, BWR

90



(*)

IC (Subsystem A) power structure			IC (Subsystem B) power structure		
Isolation valve	Installation location	Power source	Isolation valve	Installation location	Power source
Valve 1A	Inside	AC power (MCC-1D)	Valve 1B	Inside	AC power (MCC-1C)
Valve 2A	Outside	DC power (125V-1A)	Valve 2B	Outside	DC power (125V-1B)
Valve 3A	Outside	DC power (125V-1A)	Valve 3B	Outside	DC power (125V-1B)
Valve 4A	Inside	AC power (MCC-1D)	Valve 4B	Inside	AC power (MCC-1C)

- Alaphelyzet (standby): visszatérő vezeték külső szelep zárt, többi nyitott
- Az IC motoros (MO) szelepei villamos (AC és DC) betáplálást igényelnek, ezért standby állapotban minimális a működtetendő szelepek száma (1/4)
 - ez DC (akkumulátor) betáplálást igényel, így üzemeltethető az AC (hálózat) elvesztése esetén
 - redundancia: ha 1 DC rendszer kiesik, a kettőből egy IC még üzemeltethető
- (a nyitott) IC szelepek automatikusan zárnak IC vezeték törés detektálásakor
- Fukushimai baleset: az AC ÉS a DC is elveszett

15.8 Understanding Equipment Conditions and Performance

The IC isolation valves for Fukushima Daiichi Unit 1 are configured to start closing when control power is lost. However, when AC or DC power, which is the power that drives the isolation valve, is lost, the valve stops moving at that point in time.

As described above, **it was difficult to accurately recognize the open/closed status of the valves when the tsunami arrived because, depending on the timing of the loss of AC power and DC power, the open/closed status of the containment isolation valves on the isolation condenser differed, and in addition, the valve status indicator lamps and instruments, etc. had lost power.**

Fukushima Nuclear Accident Analysis Report

June 20, 2012

Tokyo Electric Power Company, Inc.

15.8, p. 445

KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

92

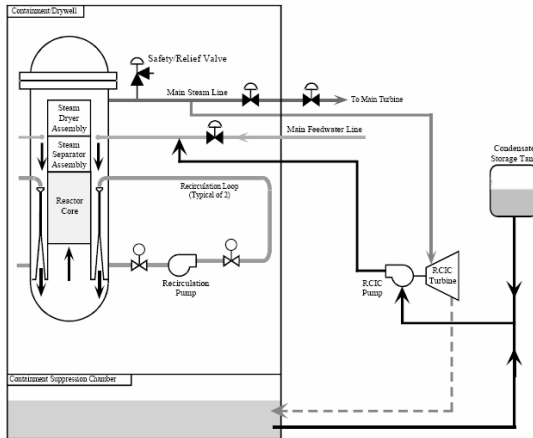
KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

91

Izolációs betáplálás - Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC)

- BWR/4
- Az izolációs betáplálás (RCIC) abban az esetben működik, ha a reaktor izolálódik, azaz a gőz nem tud a turbinákra jutni, illetve a rendes tápvíz (primerkör) betáplálás nem elérhető.
- Ekkor a gőzt az RCIC turbinára vezetik, mely az RCIC szivattyút hajtja meg. A szivattyú segítségével üzemi forgalommal juttatható víz a reaktorba.
- az RCIC turbinát a reaktorból származó gőz hajtja, az RCIC turbináról lejövő gőz a nyomáscsökkentő medencébe (nedvesakna – wetwell) kerül. Az RCIC szivattyú a kondenzátum táptartályokból vagy a nedvesakna medencéből biztosítja a vízpótlást. Betáplálás a primerkörbe történik. A betáplált forgalom megegyezik a 15 perccel leállás utáni gőztermeléssel (maximális remanens hő mellett).
- A rendszer alacsony reaktor vízszint jelre automatikusan indul, vagy az operátor által indítható.



Izolációs betáplálás - Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC)

- Operátor manuálisan is aktiválhatja, funkciójában a nagynyomású üzemzavari hűtőrendszer (HPCI - high pressure coolant injection) a tartaléka.
- Alaphelyzet: kondenzátum táptartályból szív, és nagy nyomáson az „A” tápvíz/primervezetéken juttat vizet a reaktorba. Alternatív vízforrás: nyomáscsökkentő medence (nedvesakna).
- Normál útvonal: kondenzátum táptartályból a HPCI szivóvezetékekkel azonos vezetéken.
- A HPCI/RCIC szivócsonk van a legelső ponton, így minden esetben van egy vízmennyiség, amelyet csak ezek a rendszerek használhatnak fel. Nedvesaknára váltás: ha a kondenzátor táptartályban alacsony a vízszint.
- RCIC addig üzemel, amíg manuálisan le nem állítják, vagy automatikus leállító jel érkezik. Operátor bármikor beavatkozhat. Általában akkor lehet leállítani az RCIC rendszert, ha a reaktor vízszintet sikerült helyreállítani.

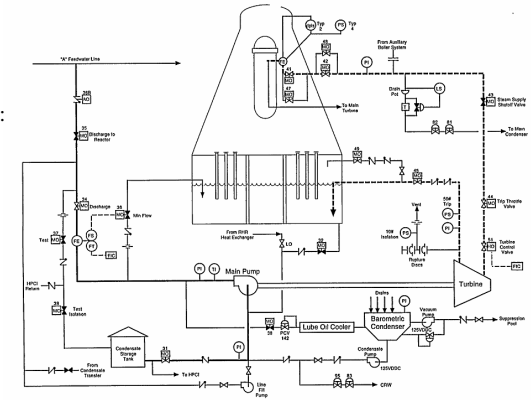
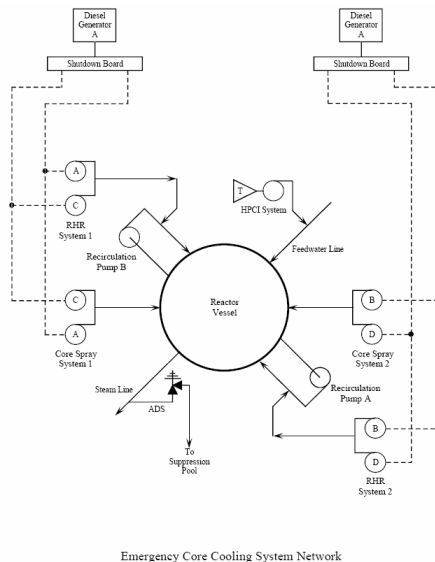


Figure 2.7-1 Reactor Core Isolation Cooling System

Zóna üzemzavari hűtőrendszerek - Emergency Core Cooling Systems

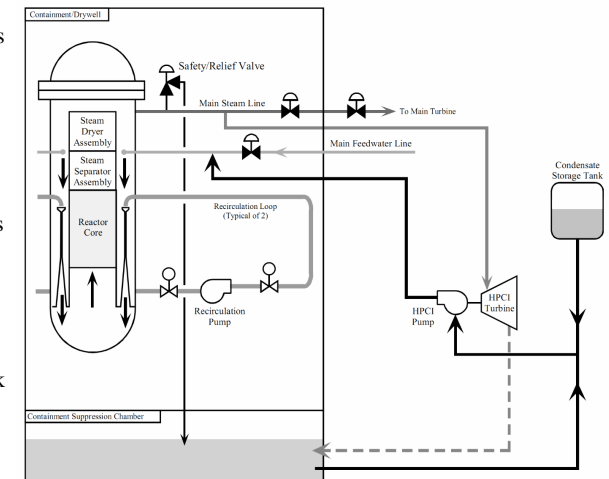
- ZÜHR (ECCS): hűtőközegvesztés esetén biztosítja a zóna hűtését az üzemanyag sérülésének elkerülése/mérséklése érdekében
- Két nagynyomású és két kisnyomású rendszer
 - Nagynyomású befecskendezés (high pressure coolant injection - HPCI) és automatikus nyomáscsökkentő rendszer (automatic depressurization system - ADS). A nyomáscsökkentésre azért van szükség, hogy a kisnyomású rendszer is be tudjon avatkozni.
 - A remanenshő-eltávolító rendszer (Residual Heat Removal – RHR) kisnyomású befecskendezés (LPCI) üzemmódja és a zónapermetező (Core Spray - CS) rendszer.
- Ha a primerköri törés mérete meghaladja a HPCI kapacitását, csökken a nyomás a reaktortartályban. Ez lehetővé teszi, hogy az LPCI hűtőközeget juttasson a zónába.



Nagynyomású ZÜHR - High Pressure Emergency Core Cooling Systems

BWR/3, 4

- HPCI: független, nincs szüksége kisegítő villamos betáplálásra, az erőmű levegőrendszerére vagy külső hűtésre.
- Kis és közepes csőtörések esetén
- Az automatikus nyomáscsökkentő rendszer (ADS) redundáns logikával rendelkezik, mely különböző szelepek nyitásával – szükség esetén – csökkenti a nyomást a reaktortartályban kis és közepes méretű csőtörések esetén, amennyiben a HPCI nem elérhető, vagy nem képes pótolni a vízvesztéséget.



Nagynyomású ZÜHR - High Pressure Emergency Core Cooling Systems

BWR/5, 6

- **HPCS:** aktív szivattyúval üzemeltetett nagynyomású üzemzavari rendszer
- a korábbi BWR típusoknál alkalmazott HPCI helyett

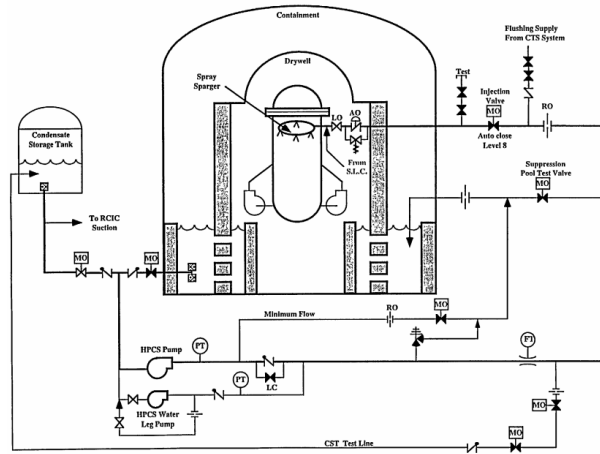


FIGURE 4.7-5 HIGH PRESSURE CORE SPRAY

Kisnyomású ZÜHR - Low Pressure Emergency Core Cooling Systems

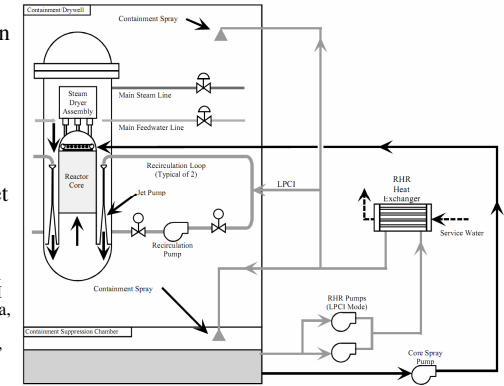
- **Két különálló, független rendszer:**
 - zónapermetező rendszer
 - RHR LPCI üzemmódban

• A zónapermetező rendszer két független befecskendezési körből áll, mindkettő képes a nyomáscsökkentő medencéből (nedvesaknából) vizet juttatni a reaktortartályba.

A rendszer vizet permetez a fűtőelemkötegek felső részére.

• Az RHR LPCI üzemmódja szintén vizet juttat a reaktortartályba LOCA esetén.

- Az RHR egy többcélú rendszer több üzemmóddal, azonos elemeket alkalmazva. LPCI üzemmód a legfontosabb, e szerint van kialakítva az alap szelepelrendezés. Az LPCI automatikusan lép üzembe, hogy helyreállítsa, vagy szükség esetén fenntartsa a közgennyiséget a reaktortartályban ahhoz, hogy a fűtőelempálcák burkolatának hőmérséklete ne érje el az 1200 °C-t. LPCI módban az RHR szivattyúk a nyomáscsökkentő medencéből szívják, és a reaktortartályba juttatják a vizet.



Remanenshő-eltávolító rendszer (RHR)

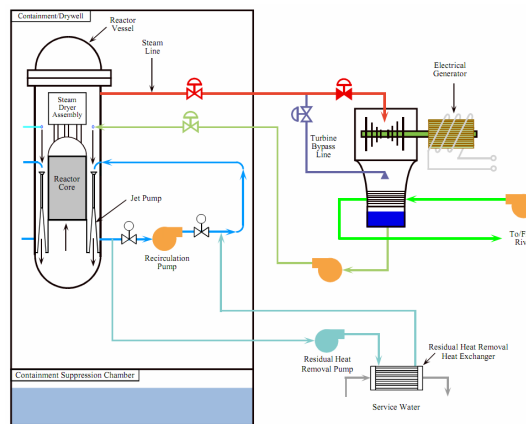
Lehűtő rendszer

Normál üzemi körülmények között:

- a zónában termelt gőz turbinára engedésével, majd lekondenzálásával távozik a hő

Leállítás után:

- a gőz by-pass ágon (a turbinát kikerülve) közvetlenül a kondenzátorba jut, így vonják ki a remanens hőt
- A remanenshő-eltávolító rendszer (residual heat removal - RHR) leállítást utáni hűtő üzemmódja a rendszer nyomáscsökkentésével együtt működik (50 psig (~3,4 bar) nyomásig)
- **A recirkulációs hurkon keresztül hőcserélőn átszivattyúzza keringetik a hűtőközeget.**



Remanenshő-eltávolító rendszer – Residual Heat Removal - RHR

- 7 üzemmódban lát el különböző feladatokat.

- **Kisnyomású üzemzavari hűtőrendszer (Low Pressure Coolant Injection LPCI)** mód: reaktor vízszint helyreállítása LOCA esetén
- **Konténment spray** üzemmód: a primer konténmenten belül a gőz kondenzációja és a légnemű radioaktivitás csökkentése LOCA esetén
- **Nyomáscsökkentő medence hűtés** üzemmód: A nyomáscsökkentő medence hőelvonásának biztosítása
- **Leállási hűtés és reaktortartály felső rész hűtés:** leállított reaktor esetén biztosítja a remanens hő elvonását és a reaktortartály felső részében található elemek hűtését
- **Gőzkondenzációs mód:** a reaktorból származó gőz kondenzációja, és az izolációs rendszer (RCIC) vezetékein a kondenzátum visszajuttatása a reaktortartályba
- **Tartalék hűtőközeg biztosító mód:** a primer konténment elárasztásához biztosít (tartalék) vizet
- **Pihentető medence hűtés** mód: kiegészítő hűtést biztosít a pihentető medence számára, ha a pihentető medence hűtőrendszere nem tud elegendő hűtést biztosítani

Remanenshő-eltávolító rendszer – Residual Heat Removal - RHR (*)

(*)

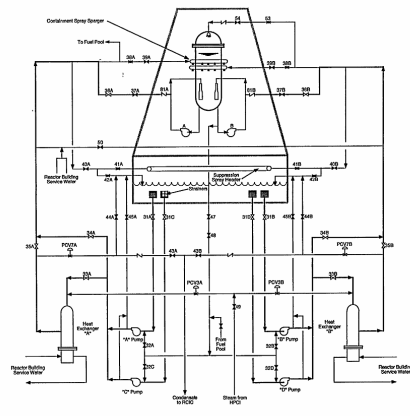


Figure 10.4-1 RHR System

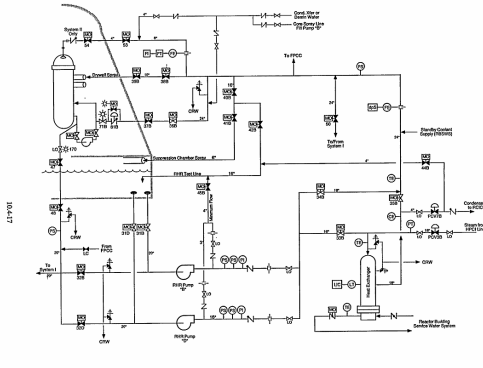


Figure 10.4-3 RHR System II

Remanenshő-eltávolító rendszer – Residual Heat Removal - RHR (*)

- Két független, térben elválasztott hurokból áll, System I és System II. Mindkét rendszer két-két szivattyúval, egy-egy hőcserélővel és a kapcsolódó vezetékekkel, szelepekkel és műszerezéssel rendelkezik.
- A LPCI üzemmód az elsődleges üzemmód, és a szelepek alapállapoti beállítása is e szerint van. Az LPCI üzemmód automatikusan indul, feladata a reaktor vízszint helyreállítása, és, ha szükséges, annak fenntartása, hogy megelőzhető legyen, hogy a fűtőelem burkolat hőmérséklet elérje a 2200 F-et (1200 °C). LPCI üzemmódban az RHR a nyomáscsökkentő medencéből szív vizet, és a reaktortartályba juttatja azt a recirkulációs rendszer nyomóoldali vezetékén keresztül.
- A konténment spray és a nyomáscsökkentő medence hűtési üzemmód az operátor által aktiválható.
 - A konténment spray üzemmódba való beállítás kézzel kapcsolható a vezérlőlőből, ha szárazakna sprayre van szükség
 - A konténment spray csak akkor helyezhető üzembe, ha az LPCI automatikus indítási jelet kapott, a szárazakna nyomás >1 psig és a reaktor vízszint 2/3 zónamagasság felett van.
- A nyomáscsökkentő medence hűtésére normál üzemi körülmények között lehet szükség, ha annak hőmérséklete eléri a normál üzemi korlátot, illetve LOCA esetén a rendszer feladata a nyomáscsökkentő medence hőmérsékletének 170 F (77 °C) alatt tartása. A víz az RHR rendszer hőcserélőjén keresztül adja le a hőt, így lehet a nyomáscsökkentő medencéből a Reactor Building Service Water System felé azt továbbítani. A víz a hőcserélőt követően visszajut a konténment spray rendszer vagy a nyomáscsökkentő medence felé.

Remanenshő-eltávolító rendszer – Residual Heat Removal - RHR (*)

- A leállási hűtés és felső rész hűtés üzemmód: normál üzemi leállításkor és lehűtőskor. Amikor a reaktor hőmérséklet és nyomás megfelelően alacsony értéket ért el, az RHR-t ebbe az üzemmódba kapcsolják. Ez képes a reaktort 125 °F-re (51,6 °C) lehűteni kevesebb, mint 20 óra alatt, illetve képes a reaktor hűtőközeg hőmérsékletét 125 °F alatt tartani átrakáskor. Az RHR a vizet a „B” recirkulációs hurok szívóoldali vezetékéből veszi, az RHR hőcserélő hűti le, és az egyik vagy a másik recirkulációs hurok nyomóoldali vezetékébe van visszavezetve.
- Gőzkondenzációs üzemmódra akkor lehet szükség, ha a reaktort izolálták, viszont korlátozni kell az SRV működést, hogy a reaktor lehűthető legyen. A gőz a HPCI rendszer gőzvezetékéről az egyik vagy mindkét RHR hőcserélőbe van vezetve. A hőcserélőkben a gőz kondenzálódik, a vizet a RCIC rendszer juttatja vissza a reaktortartályba.
- A készenléti/tartalék hűtőközeg biztosító mód „korlátlan” mennyiségű vizet biztosít a primer konténment elárasztásához, LOCA baleset utáni helyreállítási lépéseknél. Az elárasztás úgy történik, hogy a reaktorpület kiszolgáló rendszer szivattyúját egy alapállapotban zárt, kézi nyitású szeleppel rákapcsolják az RHR rendszerre. Ezzel a reaktortartályba vizet szivattyúznak, az távozik a primerkörüi törésen keresztül, és feltölti a primer konténmentet (szárazaknát) az aktív zóna szintje fölé. Ez lehetővé teszi az üzemanyag eltávolítását a reaktorból.
- A pihentető medence hűtő és víztisztító rendszer (Fuel Pool Cooling and Cleanup - FPCC) kiegészítő hűtés módban az RHR hőcserélők extra hűtési kapacitást biztosítanak, amennyiben az FPCC rendszer kapacitása nem elegendő.
- A kettes rendszer (System II) bármilyen RHR üzemmódban üzemeltethető. Az egyes rendszer (System I) nem üzemeltethető reaktor felső rész hűtőként, illetve FPCC kiegészítőként.

Zóna spray – Core Spray - CS

- A zónaspray (CS) rendszer feladata, hogy vízpótlást biztosítson a zónában LOCA állapotok esetén.
- Két 100% kapacitású alrendszer, egyenként a következőkből áll: kisnyomású szivattyú, minimum forgalom vezeték, tesztvezeték, permetező, motor meghajtású szelepek, szabályozás és vezérlés.
- A CS a nyomáscsökkentő medencéből juttat vizet a reaktortartályba. A permetező közvetlenül a zóna fölött helyezkedik el.
- Automatikusan indul level I alacsony vízszint vagy magas szárazakna nyomás jelre.

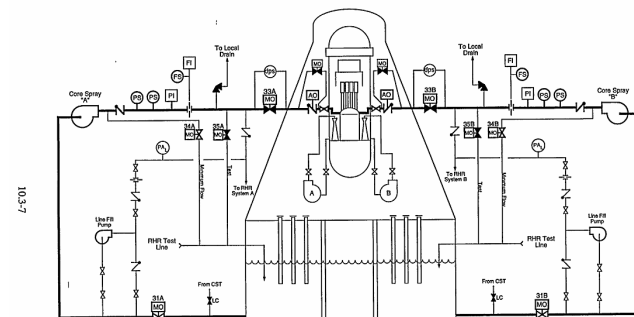


Figure 10.3-1 Core Spray Systems

Zóna spray – Core Spray - CS

- **A zónaspray a zóna tetejére permetez vizet.** A fűtőelemeken lecsorgó víz és az elpárolgó víz hőelvonása biztosítja a fűtőelemek hűtését.

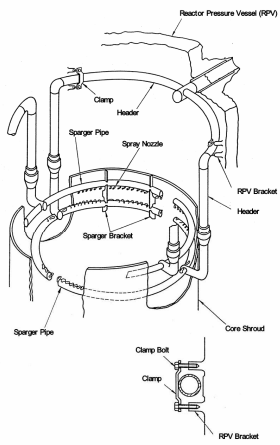


FIG. 2-8. Core spray internal piping.

KoNET, BWR

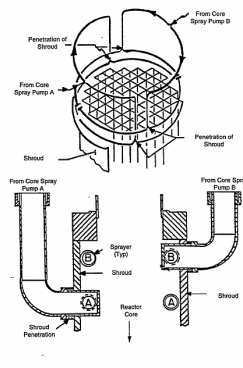


Figure 10.3-2 Vessel Internal Piping

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

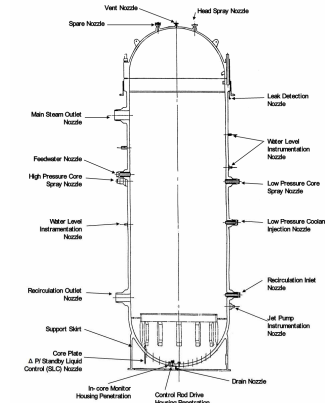
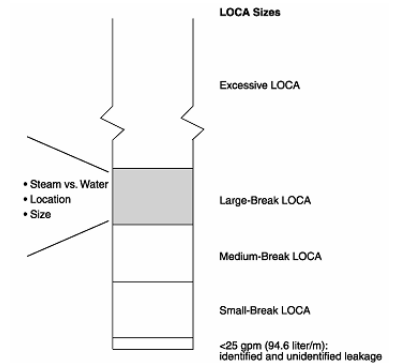


FIG. 2-1(a) Typical GE BWR-5 vessel.

105

BWR nagyátmérőjű csőtörés - LBLOCA

- **Víz LOCA és gőz LOCA**
 - Víz LOCA a súlyosabb, mert gőz LOCA esetén a hűtőközvesztés üteme lassabb azonos törésméretnél, a reaktor újraelárasztás (reflood) az aktív zóna tetejéig lehetséges
- **Amerikai besorolás szerint (NUREG-1150):**
 - Kisátmérőjű csőtörés (Small break (SB) LOCA):
 - < 3,7 cm² vízre,
 - < 47 cm² gőzre
 - Közepes LOCA:
 - ≤ 92,9 cm² vízre
 - ≤ 12,7 cm csőátmérő gőzre
 - Nagy LOCA: 200%-os guillotine törés a recirkulációs szívóvezetékre



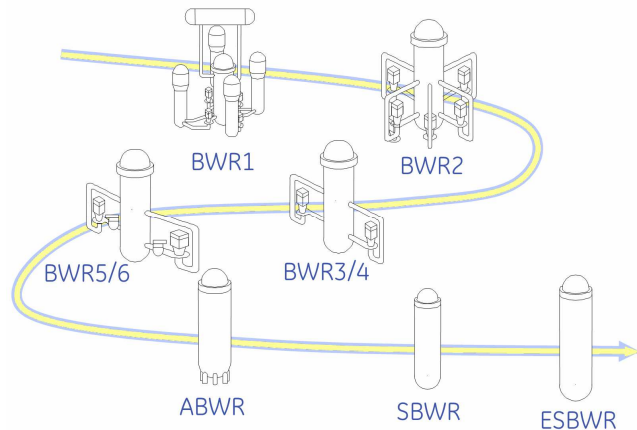
KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

106

Harmadik generációs BWR-ek

- **ABWR: Advanced BWR**
- **ESBWR: Economic Simplified BWR – csak természetes cirkuláció!**



KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

107

ABWR

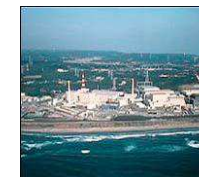
- GE, Hitachi, Toshiba
- Első termelő blokk (Kashiwazaki Kariwa, Japán): 1996
- USA: típusengedély 1997-ben
- Japánban 4 üzemelő* blokk (K K 6, 7: 2020)
- Építés alatt:
 - Japán: 1, Tajvan: 2



Lungmen 1 & 2



Kashiwazaki Kariwa 6 és 7



Hamaoka 5



Shika 2



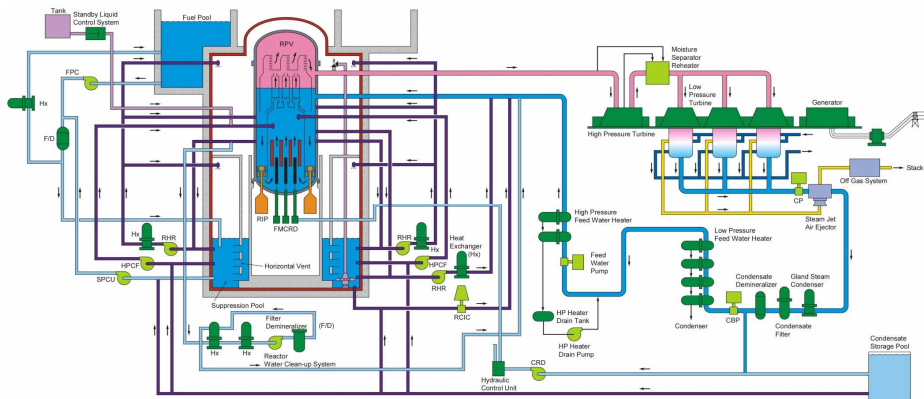
Shimane 3

KoNET, BWR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

108

ABWR



ABWR

A korábbi BWR-ekkel azonos:

- vezetékek
- Szivattyúk, motoros vagy turbina hajtású
- Szelepek
- Hőcserélők, kondenzátorok
- dízelgenerátorok
- hidraulikus BV rúdhajtások (csak BV)

Újdonságok:

- **belső recirkulációs szivattyúk** (Reactor Internal Pumps - RIPs)
- **finommotoros szabályozórúd hajtások** (Fine Motion Control Rod Drives - FMCRDs)
- Nem biztonsági besorolású gázturbinás generátorok

ABWR belső recirkulációs szivattyúk

Tíz belső recirkulációs szivattyú váltja ki a két külső szivattyúhoz csatlakozó recirkulációs hurkokat

- Szelepek, vezetékek és a szükséges hegesztések eliminációja
- Belső sugárszivattyúk kiváltása
- Elhagyhatók a zóna alatti nagyatmérőjű csöcsatlakozások
- Csökkenthető foglalkozási dózisterhelés
- Több hely a konténmenten belüli tevékenységekhez
- Egy szivattyú meghibásodása nem okoz komoly problémát (100%-os üzem folytatható)



ABWR belső recirkulációs szivattyúk

- Elektronikusan vezérelt szabályozható sebességű szivattyúmotor teljesítmény-követésre.
- A motor a nyomástartó tartályon belül van (nedves állórész - „wet stator”)

Záróvíz tartja tisztán és megfelelő hőmérsékleten a forgórészeket

Külső hőcserélők további hűtést biztosítanak

Internal Pump Handling Procedure

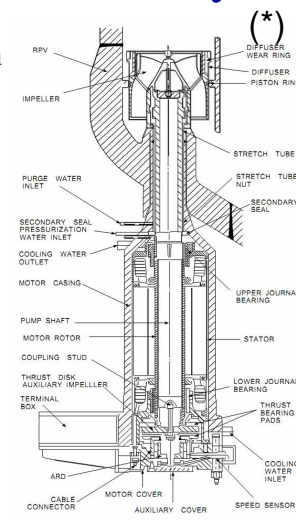
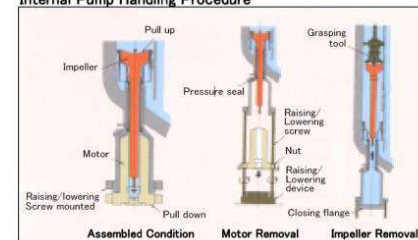


Figure 3-9. Cross-Section of RIP

ABWR finommotoros SZBV hajtás

Standard BWR hidraulikus hajtás: Locking Piston CRD (LPCRD)

- hidraulikus betolás és kihúzás, scram
- Körülmenyes kiszerezés
- Leállásonként mintegy húsz SZBV hajtást kell karbantartani.

ABWR/ESBWR finommotoros rúdhajtás (FMCRD)

- Magasabb biztonság: diverzifikált hajtási módok – elektromotoros és hidraulikus
- Normál betolás és kihúzás elektromotorral meghajtott csavarmentes mechanizmussal.
- Scram: hidraulikus vagy elektromotoros betolás
- Fejlettebb reaktivitás-szabályozás
- Finomszabályozás a precíziós elektromotoros mozgatóval
- Csoportos rúdmozgatás a gyorsabb indítás érdekében
- Jobb megbízhatóság: három hajtást kell karbantartani leállásonként.
- Egyszerűbb karbantartás, alacsonyabb dózisterhelés
- Kevesebb hajtást kell kivenni karbantartásra/ellenőrzésre
- Egyszerűbb hidraulikus rendszer (melyet csak scram-nél kell alkalmazni)

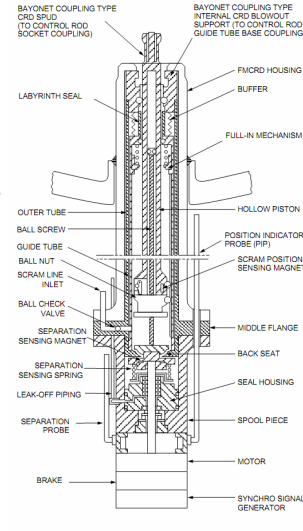


Figure 3-12. Fine Motion Control Rod Drive Cross-Section

ABWR gőzrendszer

- négy gőzvezeték
- belső és külső főelzáró (izolációs) szelepek a konténment fal két oldalán
- biztonsági lefúvató szelepek: 18, ebből 8: ADS

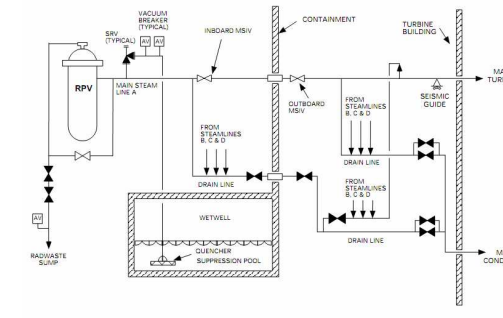


Figure 3-13. Main Steam System

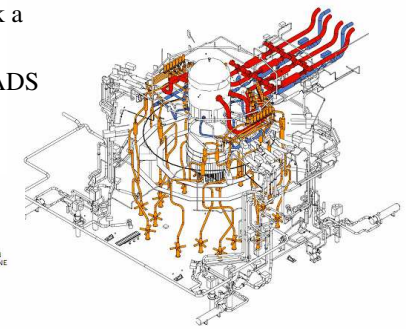
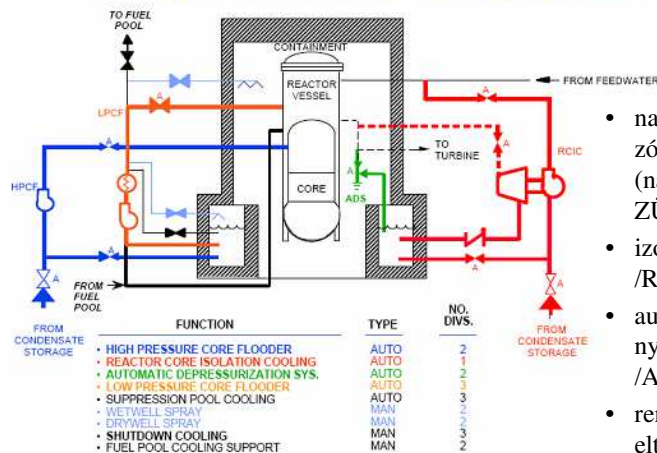


Figure 3-14. Main Steam System Schematic

ZÜHR (ECCS) - ABWR

ABWR Emergency Core Cooling Systems



- nagy nyomású zónaelválasztó (nagy nyomású ZÜHR) /HPCF/: 2
- izolációs hűtés /RCIC/: 1
- automatikus nyomáscsökkentő /ADS/: 2
- remanenshő-eltávolító /RHR/: 3

ZÜHR (ECCS) - ABWR

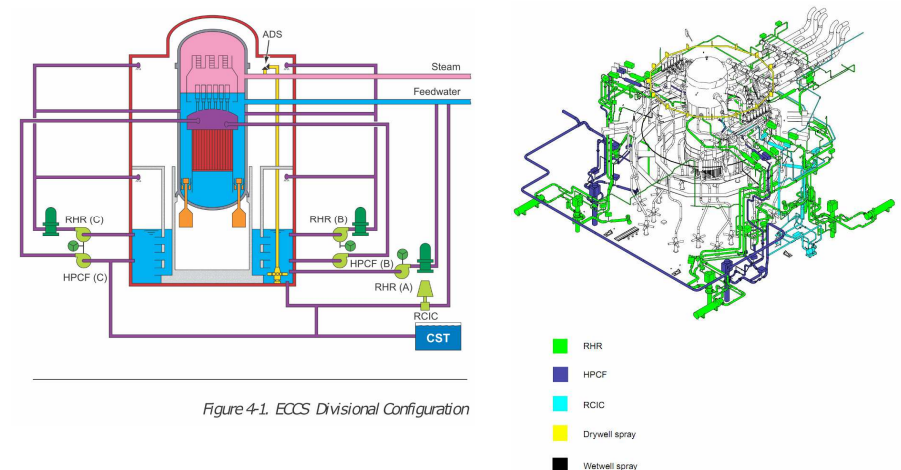


Figure 4-1. ECCS Divisional Configuration

RHR - ABWR

- Leállítási hűtés /Shutdown cooling/: SDC, 3 hurok
- Kisnyomású elárasztó/ZÜHR /Low Pressure Core Flooder/: LPFL, 3 hurok
- Nedvesakna medence hűtés: SPC, 3 hurok
- Pihentetőmedence kiegészítő hűtés: FPC, 3 hurok
- Szárazakna és nedvesakna (légtér) permetező: DW-WW spray, 2 hurok
- AC-független befecskendezés: a tűzoltórendszerrel (FP) az RHR-en keresztül: ACIWA, 1 hurok

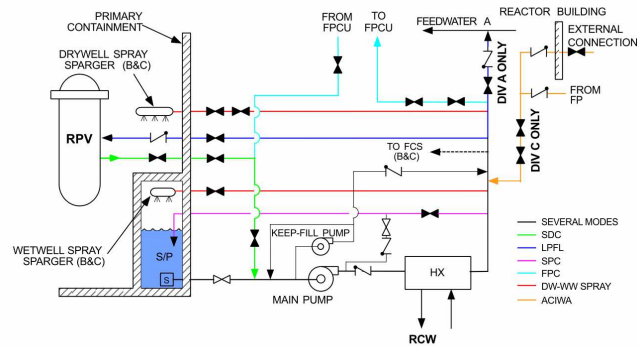


Figure 4-5. Residual Heat Removal System

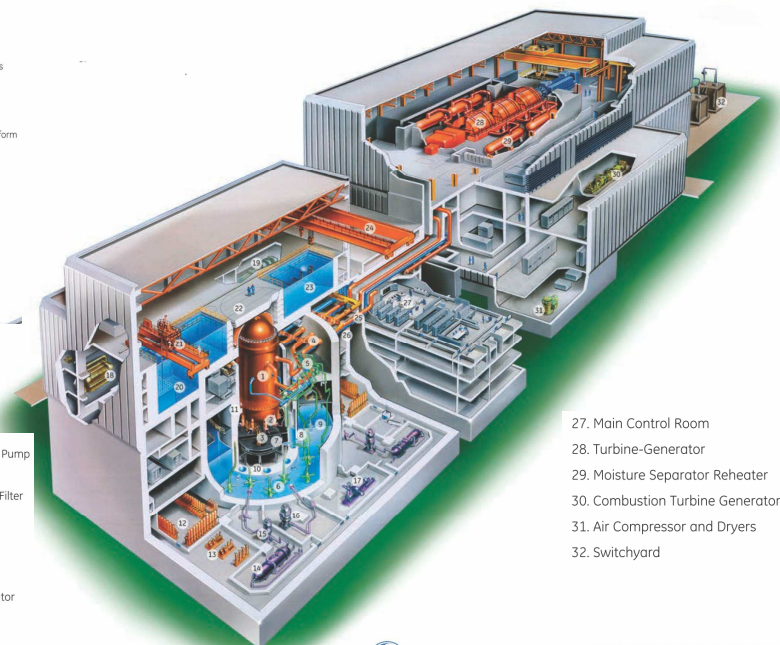
ABWR - SA

Súlyos baleset (severe accident - SA) kezelési rendszerek, eszközök

- Inert konténment atmoszféra: nitrogén
- Alsó szárazakna elárasztás: zónaolvadék hűtés
- **Kórium pajzs: a zónaolvadék és a beton alapzat reakcióját gátolja**
- Szűrt leeresztés a nedvesaknán keresztül: konténment nyomáscsökkentés
- ACIWA: két tűzoltórendszer (1 AC, 1 dízel), ezek külső medencéről, tűzoltókocsiról táplálhatók, az RHR-re csatlakozva a reaktortartályba tudna vizet juttatni

ABWR Plant Layout

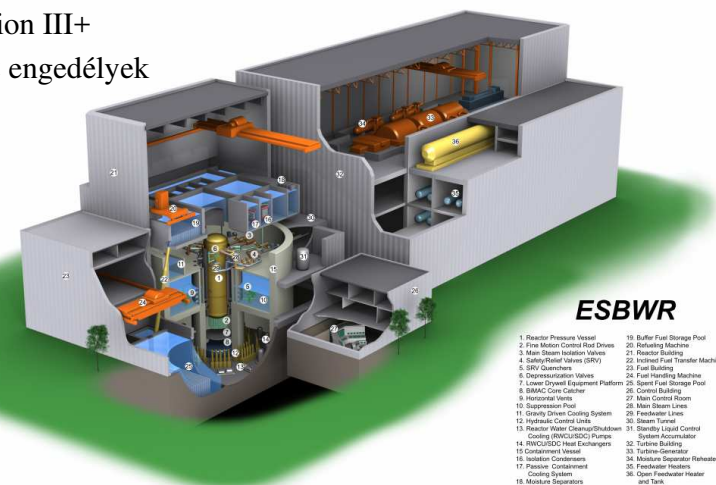
1. Reactor Pressure Vessel
2. Reactor Internal Pumps
3. Fine Motion Control Rod Drives
4. Main Steam Isolation Valves
5. Safety/Relief Valves (SRV)
6. SRV Quenchers
7. Lower Drywell Equipment Platform
8. Horizontal Vents
9. Suppression Pool
10. Lower Drywell Flooder
11. Reinforced Containment Concrete Vessel
12. Hydraulic Controls Units
13. Control Rod Drive Hydraulic System Pumps
14. RHR Heat Exchanger
15. RHR Pump
16. HPCF Pump
17. RCIC Steam Turbine and Pump
18. Diesel Generator
19. Standby Gas Treatment Filter and Fans
20. Spent Fuel Storage Pool
21. Refueling Platform
22. Shield Blocks
23. Steam Dryer and Separator Storage Pool
24. Bridge Crane
25. Main Steam Lines
26. Feedwater Lines



27. Main Control Room
28. Turbine-Generator
29. Moisture Separator Reheater
30. Combustion Turbine Generator
31. Air Compressor and Dryers
32. Switchyard

ESBWR

- Economic Simplified BWR
- Generation III+
- USNRC engedélyek



1. Reactor Pressure Vessel
2. Fine Motion Control Rod Drives
3. Main Steam Isolation Valves
4. Safety/Relief Valves (SRV)
5. SRV Quenchers
6. Deaerators/Steam Traps
7. Lower Drywell Equipment Platform
8. BWRAC Core Catcher
9. Horizontal Vents
10. Suppression Pool
11. Gravity Driven Cooling System
12. Hydraulic Control Lines
13. Reactor Water Cleanup/Shutdown Cooling (RW/CSDCC) Pumps
14. RW/CSDCC Heat Exchangers
15. Containment Vessel
16. Isolation Containment
17. Pressure Containment Cooling System
18. Moisture Separator
19. Buffer Fuel Storage Pool
20. Refueling Machine
21. Reactor Building
22. Inerted Fuel Transfer Machine
23. Fuel Building
24. Fuel Handling Machine
25. Control Building
26. Spent Fuel Storage Pool
27. Main Control Room
28. Main Steam Lines
29. Feedwater Lines
30. Steam Turbine
31. Steamly Liquid Control System Recuperator
32. Turbine Building
33. Turbine Generator
34. Moisture Separator Reheater
35. Feedwater Heaters
36. Open Feedwater Heater and Tank

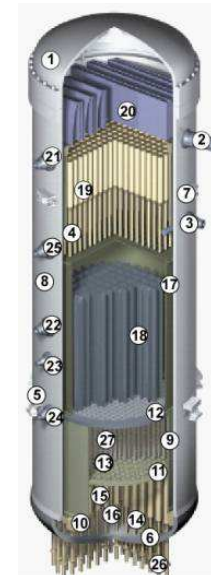
Figure 2-1. Cutaway Rendering of the ESBWR

ESBWR

- **Természetes cirkuláció**
 - nincsenek recirkulációs szivattyúk
- **Passzív üzemi hűtőrendszerek**
 - 72 órás passzív üzem
 - Az üzemi rendszer nem tartalmaz szivattyúkat
 - Az üzemi rendszer nem tartalmaz generátorokat
- ~1575 - 1600 MWe

ESBWR

- Zónatető alatti magasságon nincsenek nagytérű csonkok
 - nincs nagytérű csőtörés a zóna magasságában vagy az alatt
- Zóna felett kémény
 - ennek megfelelően hosszabb leszálló gyűrűs akna
- H: ~27,6 m, D: ~7,1 m

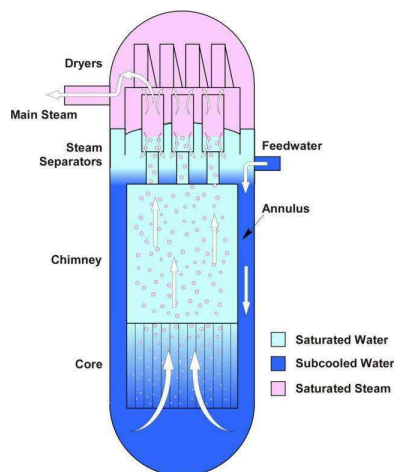


ESBWR

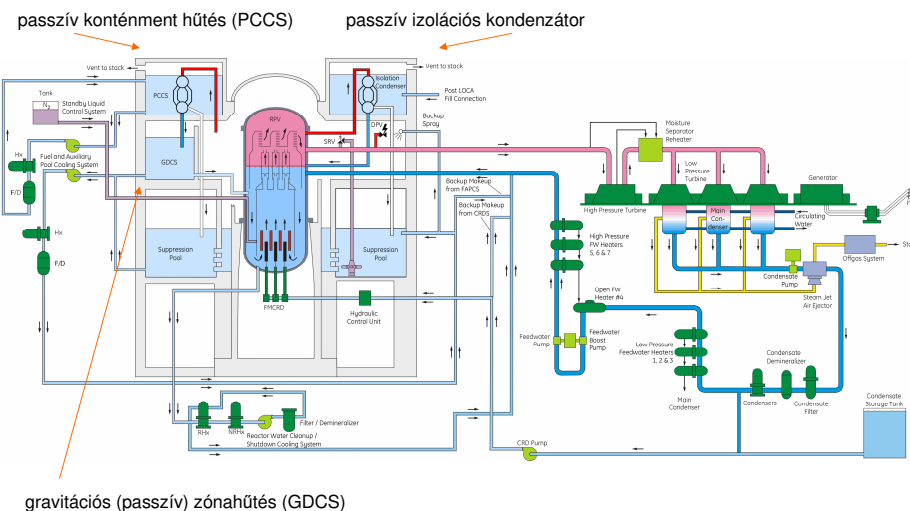
1. Vessel Flange and closure head
2. Steam outlet flow restrictor
3. Feedwater nozzle
4. Feedwater sparger
5. Vessel support
6. Vessel bottom head
7. Stabilizer
8. Forged shell rings
9. Core shroud
10. Shroud support brackets
11. Core plate
12. Top guide
13. Fuel supports
14. Control rod drive housings
15. Control rod guide tubes
16. In-core housing
17. Chimney
18. Chimney partitions
19. Steam separator assembly
20. Steam dryer assembly
21. DPV/IC outlet
22. IC return
23. GDCS inlet
24. GDCS equalizing line inlet
25. RWCU/SDC outlet
26. Control rod drives
27. Fuel and control rods

Természetes cirkuláció

- **Passzív üzemi hűtőrendszerek, természetes cirkuláció**
 - Nagyobb víztérfogat a reaktortartályban
 - Kémény: gőzszívó hatás
- **Kevesebb elem**
 - szivattyúk, motorok, hőcserélők, stb
- **Szabályozórúdak mozgatásával lehet teljesítményt változtatni**
- **A nagymennyiségű víz lassítja a tranzieneket**



ESBWR



gravitációs (passzív) zónahűtés (GDCS)

ESBWR

Ami nincs:

- üzemzavari rendszeri szivattyúk és a szivattyúkhoz kapcsolódó részek
- üzemzavari generátorok – léteznek, de nem látnak el üzemzavari funkciót

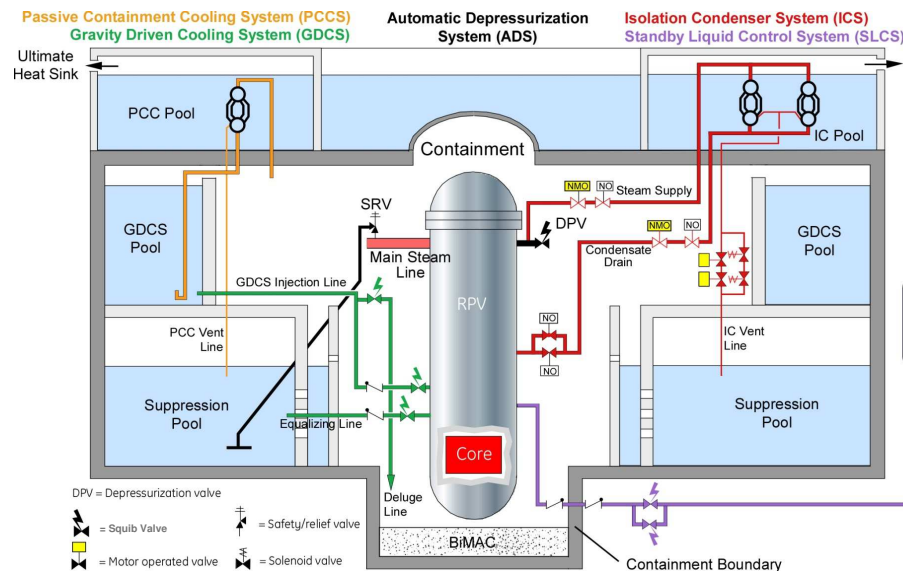
Ami azonos:

- vezetékek
- szelepek
- hőcserélők, kondenzátorok
- SZBV hidraulikus hajtás (csak scram)
- Nem biztonsági besorolású szivattyúk, motorok, turbinák

Ami új:

- ABWR-hez hasonló finommotoros SZBV hajtások
- Izolációs (IC) és passzív konténment (PCC) hűtő kondenzátorok
- nitrogén motoros szelepek („Nitrogen Motor Operated – NMO”)
- Standby Liquid Control System (SLCS) hidroakkumulátorok

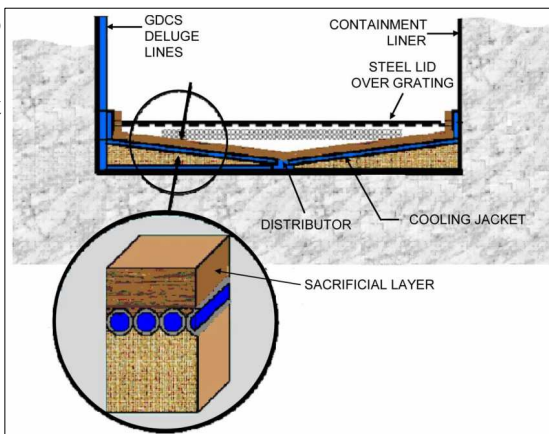
Passzív üzemzavari rendszerek



Súlyosbaleset-kezelés

- BiMAC: Basemat internal Melt Arrest and Coolability zónaolvadék csapda

- elteríti a súlyos baleset során reaktorból kijutó zónaolvadékok
- elősegíti annak hűtését a GDCS elárasztó (deluge) segítségével
- roncsolható réteg
- passzív hőelvonás a PCCS segítségével
- dedikált I&C és villamos betáp



Izolációs és passzív konténment hűtő kondenzátorok

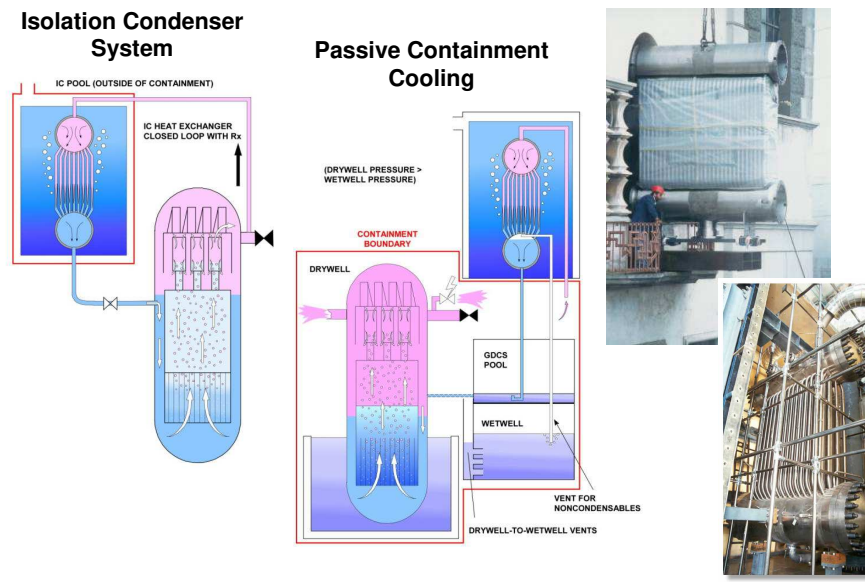


Figure 3-14 Isolation Condenser Test Module

BWRs vs ABWR vs ESBWR (*)

	BWR/4-Mk I	BWR/6-Mk III	ABWR	ESBWR
Teljesítmény (MWt/MWe)	3293/1098	3900/1360	3926/1350	4500/1590
Tartály magasság/átmérő (m)	21,9/6,4	21,8/6,4	21,1/7,1	27,7/7,1
Fűtőelemkötegek száma	764	800	872	1132
ÜA aktív hossz (m)	3,7	3,7	3,7	3,0
Teljesítmény-sűrűség (kw/l)	50	54.2	51	54
Recirkulációs szivattyúk	2(nagy, külső)	2(nagy, külső)	10 (belső)	nincs
SZBV hajtások száma/típusa	185/hidraulikus	193/hidraulikus	205/finommotoros	269/finommotoros
ZÚHR szivattyúk	9	9	18	nincs
Üzemzavari dízelgenerátorok	2	3	3	nincs
Zónasérülési gyakoriság /év	1E-5	1E-6	1E-7	3E-8
Konténment fajlagos térfogat (m ³ /MWe)	120	170	180	135

Felhasznált irodalom

- IAEA
 - Teccod-1181: Metal components of BWR containment systems
 - Teccod-1470: BWR pressure vessels
 - Teccod-1471: BWR pressure vessel internals
 - <http://www.iaea.org/NuclearPower/Technology/Training/Simulators/>
 - Boiling Water Reactor Simulator with Active Safety Systems User Manual
- NEA/CSNI: State of the art report on boiling water reactor stability
- US NRC: Reactor Concepts Manual, Boiling Water Reactor Systems
- US NRC/GE: GE Technology Manual (R-304B)
- US NRC: Boiling Water Reactor GE BWR/4 Technology Advanced Manual (R-504B)
- GE Nuclear Energy: Advanced Boiling Water Reactor Plant General Description
- JNES: Outline of Safety design (BWR), training material
- Convention on Nuclear Safety, Report by the Government of the Federal Republic of Germany for the Fifth Review Meeting in April 2011
- Lahey, Moody: The thermal-hydraulics of a boiling water reactor
- Todreas, Kazimi: Nuclear Systems I, Thermal hydraulic fundamentals
- Cacuci (ed.): Handbook of Nuclear Engineering
- Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana II.
- Fuel Design Data, Nuclear Engineering International, pp 26-35, September 2004
- interneten található anyagok