

CANDU

2. és 3. generációs nehézvízes, nyomott csöves blokkok technológiája és biztonsága

Dr. Yamaji Bogdán
 Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
 Nukleáris Technikai Intézet

CANDU reaktorok a világban

- Üzemelő

| 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 |

- Épülő

| Típus | Blokkok száma | Össz MW(e) |
|------------------|---------------|---------------|
| BWR | 4 | 5253 |
| FBR | 1 | 470 |
| HTGR | 1 | 200 |
| PHWR | 4 | 2520 |
| PWR | 43 | 45 342 |
| Összesen: | 53 | 53 785 |

PRIS database. Last update on 2019-11-25 (<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>)

Moderátor anyagok

| Moderátor anyagok jellemzői | H ₂ O | D ₂ O | Grafit |
|---|------------------|------------------|--------|
| termikus úthossz [cm] | 5,74 | 10,93 | 19,7 |
| neutronabszorpciós hatáskeresztmetszet [barn] | 0,66 | 0,0026 | 0,0045 |

Nehézvízes reaktorok

- Nehézvízes reaktorok fejlesztése: 1950-es évektől, Kanada, Franciaország, Németország, Japán, USA, Egyesült Királyság, SZU, stb
 - nyomottcsöves, nehézvíz hűtésű
 - nyomott-tartályos, nehézvíz hűtésű
 - nyomottcsöves, könnyűvíz hűtésű
 - nyomottcsöves, gázhűtésű
- Kanada: nehézvíz moderátorú, nehézvíz hűtőközegű nyomottcsöves reaktor

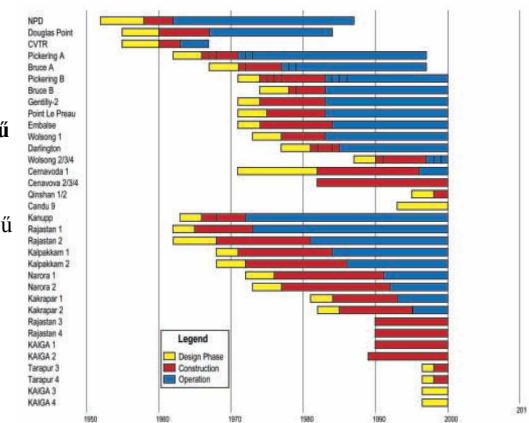


FIG. 1. Pressure tube pressurized heavy water moderated and heavy water cooled reactors.

Nehézzvizes reaktorok

- Nehézzvizes reaktorok fejlesztése: 1950-es évektől, Kanada, Franciaország, Németország, Japán, USA, Egyesült Királyság, SZU, stb

- nyomottcsöves, nehézvíz hűtésű
- nyomott-tartályos, nehézvíz hűtésű
- nyomottcsöves, könnyűvíz hűtésű
- nyomottcsöves, gázhűtésű

- Kanada: nehézvíz moderátorú, nehézvíz hűtőközegű nyomottcsöves reaktor

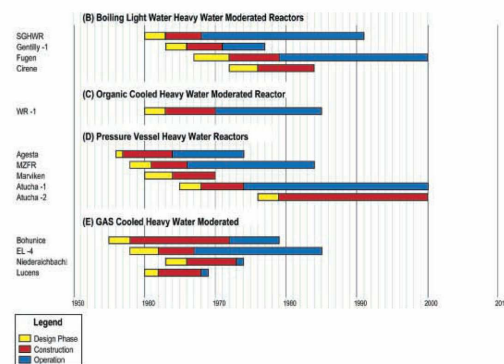


FIG. 2. Other heavy water moderated reactors.

Nehézzvizes reaktorok

(*)

TABLE I. DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATIONAL PHASES OF THE PRESSURE TUBE HEAVY WATER MODERATED HEAVY WATER COOLED REACTORS

| Plant | Date of commencement of Design | Date of commencement of Construction | Date of startup/ connection to grid | Date of shutdown |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| NRU | -1952 | 1958 | 1962 | 1987 |
| Douglas Point | -1955 | 1960 | 1967 | 1984 |
| CVTR | -1955 | 1960 | 1963 | 1967 |
| Pickering A (1-4) | -1962 | 1966/66/67/68 | 1971/71/72/73 | 1997 ^a |
| Bruce A (1-4) | -1967 | 1971/70/72/72 | 1977/76/78/79 | 1997 ^b |
| Pickering B (5-8) | 1971 | 1974/75/76/76 | 1983/84/85/86 | |
| Bruce B (5-8) | 1974 | 1978/78/79/79 | 1983/84/86/87 | |
| KANUPP | 1963 | 1966-1968 | 1972 | |
| Gentilly 2 | 1971 | 1974 | 1983 | |
| Point Lepreau | 1971 | 1975 | 1983 | |
| Embalse | 1971 | 1974 | 1984 | |
| Wolsong 1 | 1973 | 1977 | 1983 | |
| Darlington (1-4) | 1977 | 1982/81/84/85 | 1990/90/92/93 | |
| Wolsong 2 | 1987 | 1990 | 1997 | |
| Wolsong 3,4 | 1990 | 1991 | 1998/99 | |
| Cernavoda 1 | 1971 | 1982 | 1996 | |
| Cernavoda 2,3,4,5 | 1971 | 1982 | | |
| Qinshan 1,2 | 1995 | 1998 | | |
| CANDU 9 | 1993 | | | |
| India | | | | |
| Rajasthan 1 | 1962 | 1965 | 1973 | |
| Rajasthan 2 | 1962 | 1968 | 1981 | |
| Kalpakkam 1 | | 1971 | 1984 | |
| Kalpakkam 2 | | 1972 | 1986 | |
| Narora 1 | | 1976 | 1991 | |
| Narora 2 | | 1977 | 1992 | |
| Kakrapar 1 | | 1984 | 1993 | |
| Kakrapar 2 | | 1985 | 1995 | |
| Rajasthan 3 | | 1990 | | |
| Rajasthan 4 | | 1990 | | |
| Kaiga 1 | | 1990 | | |
| Kaiga 2 | | 1989 | | |
| Tarapur 3 | | 1998 | | |
| Tarapur 4 | | 1998 | | |

^a Temporary shutdown. Restart scheduled for late 2002.
^b Temporary shutdown. Restart scheduled for 2003.

TABLE I. (cont.)

| Plant | Date of commencement of: | | Date of startup/ connection to grid | Date of shutdown |
|---|--------------------------|--------------|-------------------------------------|------------------|
| | Design | Construction | | |
| Boiling light water heavy water moderated reactors | | | | |
| SGHWR | -1960 | 1963 | 1968 | 1991 |
| Gentilly 1 | 1963 | 1966 | 1971 | 1977 |
| Fugen | 1967 | 1972 | 1979 | |
| Circé | 1972 | 1976/84 | | 1988 |
| Organic cooled heavy water moderated reactor | | | | |
| WR 1 | 1960 | 1963 | 1970 | 1985 |
| Pressure vessel heavy water reactors | | | | |
| Agesta | -1956 | 1957 | 1964 | 1974 |
| MZFR | -1958 | 1961 | 1966 | 1984 |
| Marviken | -1960 | 1964 | | |
| Atucha 1 | -1965 | 1968 | 1974 | |
| Atucha 2 | -1976 | 1979 | | |
| Heavy water moderated gas cooled reactors | | | | |
| Bohunice | -1955 | 1958 | 1972 | 1979 |
| EL 4 | -1958 | 1962 | 1967 | 1985 |
| Niederraichbach | -1963 | 1966 | 1973 | 1974 |
| Lucens | -1960 | 1962 | 1968 | 1969 |

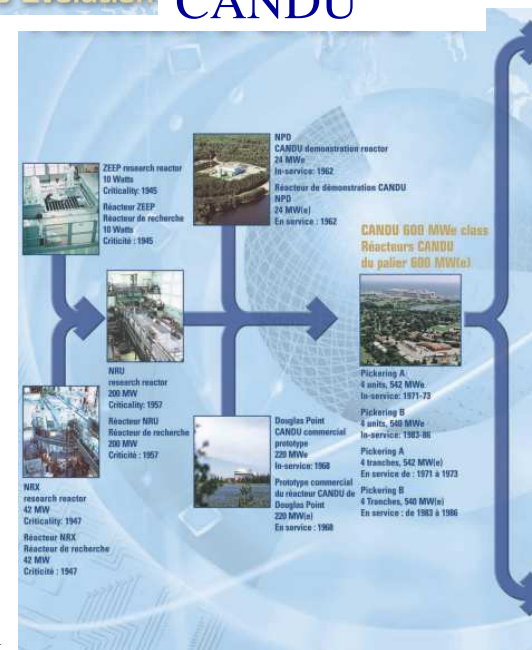
CANDU

- CANada Deuterium Uranium Reactor
- fejlesztés az 1950-es évek végén és az 1960-as években folyt, Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Hydro-Electric Power Commission of Ontario (most Ontario Power Generation), Canadian General Electric (most GE Canada)
- jelentős uránkészletek (cél: természetes urán üzemanyag használata)



CANDU: The Evolution CANDU

(*)



CANDU: The Evolution CANDU

(*)



CANDU reaktorok

(*)

CANDU reaktorok Európában:

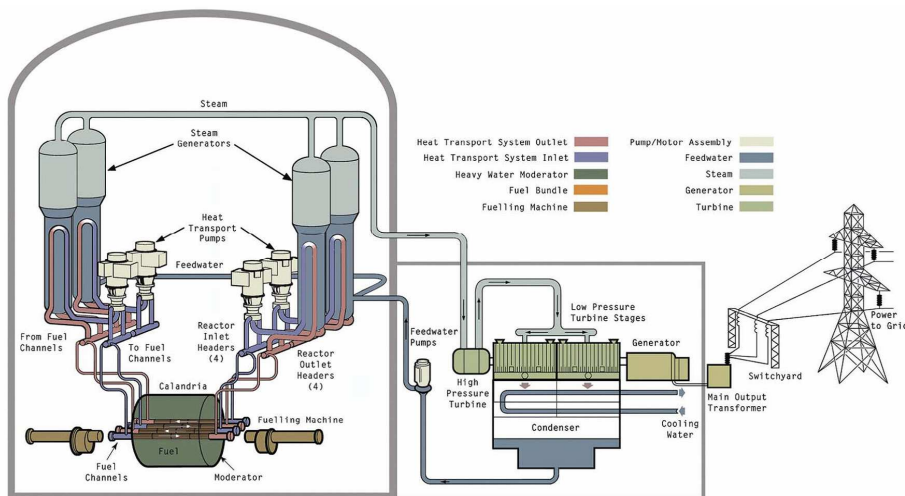
| Blokk | Ország | Üzembe helyezés | Névleges teljesítmény | Teljesítmény-kihasználási tényező |
|-------------|---------|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Cernavoda 1 | Románia | 1996. dec. 2. | 706 MWe | 90,1% |
| Cernavoda 2 | Románia | 2007. okt. 31. | 706 MWe | 94,1% |



KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

CANDU-6 fő jellemzők



KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

CANDU-6 fő jellemzők

- Több száz fűtőelem-csatorna, nincs nagy nyomástartó tartály
- Nehésvíz (D_2O) moderátor és hűtőközeg
- Különálló alacsony nyomású moderátor rendszer és magas nyomású hűtőrendszer
- Üzem alatti fűtőelem-átrakás
- Reaktivitás változtató eszközök, melyek nincsenek kitéve magas nyomásnak vagy hőmérsékletnek, mert a moderátorban vannak
- Természetes urán, vagy egyéb alacsony hasadóanyag tartalmú üzemanyag
- Üzemzavari/baleseti szituációk reaktivitás-fluktuációinak mérsékelt hatása van: az üzemanyagban tárolt többlet reaktivitás alacsony, a prompt neutronok relatív hosszú élettartama kizárja a teljesítmény gyors változását
- Két teljes értékű, egymástól és a szabályozástól független biztonságvédelmi rendszer

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

CANDU-6 fő jellemzők

- Nyomástartó csövek/csatornák: 10 cm átmérő, ezekben található az üzemyanyag (háttér: Kanada nem rendelkezett nagy nyomástartó tartályok gyártásához szükséges nehéziparral)
- Neutronfizikai okokból a csatornák anyaga cirkónium (zircaloy). A csatornákat a nagy, alacsony nyomású, ún. kalandria tartály veszi körül, mely tartalmazza a moderátor nagy részét.
- Kalandria tartály: ausztenites rozsdamentes acél, moderátor: <math><80^{\circ}\text{C}</math>, $\sim 0,1\text{ MPa}$
- Kanada urándúsítási kapacitásokkal sem rendelkezett, így a CANDU-t természetes urán üzemyanyaggal tervezték.
- A széles körben elterjedt könnyűvíz moderátor túl sok neutronot nyel el, így nem alkalmazható természetes uránnal. Ezért nehézvíz a moderátor
- Azzal, hogy a moderátort alacsony hőmérsékleten (forráspont alatt) tartják, a neutronspektrum megfelelően „tisztán” tartható, nincs szórás.

CANDU-6 fő jellemzők

- A nagy mennyiségű moderátor nagy hőelnyelő térfogat is, mely a biztonsági jellemzőket javítja.
- Amennyiben egy fűtőelemköteg túlhevül, és a csatornán belül deformálódik, a geometria magas hőátadási tényezőt biztosít az alacsony hőmérsékletű moderátorral, így a hűtés segítségével megelőzhető az üzemyanyag sérülés.
- A természetes urán üzemyanyagból adódóan a geometria jelentős sérülése esetén nagy lesz az eltérés a szükséges ideális geometriától, így szubkritikussá válik a rendszer.
- Az alacsonyabb U-235 arány azt is jelenti, hogy kevesebb üzemyanyag fogy el, mielőtt a hasadások száma túl alacsony lesz a kritikusság fenntartásához (mivel kevés az U-235 a felhalmozódó hasadási termékekhez képest). Ezzel együtt a CANDU reaktorok jelenlegi kialakítása mellett az uránérc-hasznosítás mintegy 30-40%-kal alacsonyabb (rosszabb), mint az LWR-eké.

Jellemző üzemi paraméterek

| | | | |
|---|--------|----------------------------------|---|
| Reactor | | PHWR | |
| Type | (PHTS) | 2064 MW(th) | |
| Thermal output | (PHTS) | 7.7 Mw(e) | |
| Coolant flow rate | (RH) | 279° C | Weight of bundle (nominal) 23.7 kg |
| Design temperature | (RH) | 12.9 MPa(g) | Weight of uranium per bundle (nominal) 19.2 kg |
| Design pressure | (RH) | 266° C | Sheath outside dia. (cold) 13.1 mm |
| Operating temperature | (RH) | 11.75 MPa(abs) | Sheath thickness (average) 0.4 mm |
| Operating pressure | (ROH) | 316° C | Sheath material Zircaloy - 4 |
| Design temperature | (ROH) | 10.7 MPa(g) | Elements per bundle 37 |
| Design pressure | (ROH) | 310° C | Fuel material Natural UO ₂ |
| Operating temperature | (ROH) | 10.0 MPa(abs) | Fuel bundles in core 4560 |
| Operating pressure | (ROH) | | Fuel bundles per channel 12 |
| | | | Heat Transport System |
| Fuel Channels | | | Number of loops 2 |
| Pressure tube inside diameter (cold, unpressurized) | | 103.38 mm | Primary coolant D ₂ O |
| Core Length (between calandria tubesheets) | | 5.94 m | Reactor inlet temperature 266° C |
| Number of pressure tubes | | 380 | Reactor outlet temperature 310° C |
| Coolant flow (nominal) | | 24 kg/s | Reactivity Control Units |
| Est. pressure drop – 12 bundles | | 838 kPa | Power control 14 light water compartments |
| | | | 21 stainless steel rods |
| Fuel | | | 4 cadmium rods |
| Length of bundle | | 495.3 mm | Safety shutdown 28 cadmium rods (vertical) |
| Outside dia. of bundle (over bearing pads) | | 102.4 mm | 6 gadolinium nitrate injection tubes (horizontal) |
| Materials (out of core) | | Stainless steel | Turbine |
| Materials (in core) | | zircaloy/stainless steel/cadmium | Single shaft tandem compound steam turbine directly coupled to 828 MVA generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/reheaters and three double flow low pressure cylinders. |
| Steam Generators | | | Generator |
| Type, number of units | | Vertical U-tube, 4 | Rated 828 MVA at 0.9 power factor and 414 kPa(g) hydrogen pressure. 1800 rpm with terminal voltage of 22,000 volts, 60 Hz. |
| Steam flow for 4 steam generators | | 1033.0 kg/s | Condenser |
| Steam pressure at full power | | 4.7 MPa(abs) | Single tube sheet shells. Each shell is connected to the three LP turbine exhausts. |
| Steam temperature at full power | | 260° C | Two 100% main condensate extraction pumps and one auxiliary condensate extraction pump. Three 50% main steam generator feedwater pumps and one auxiliary steam generator feedwater pump. |
| Maximum moisture | | 0.25% | |
| Feedwater temperature | | 187° C | |
| Reactor Coolant Pumps | | | |
| Number | | 4 | |
| Motor type | | AC vertical, TEWAC induction | |
| Rated capacity | | 2228 l/s | |
| Rated head | | 215.0 m | |
| Containment | | | |
| Type | | Pressurized cylindrical concrete | |
| Inside diameter | | 41.46 m | |
| Height Above Grade | | 46.02 m | |
| Total Inside Containment | | 85,500 m ³ | |

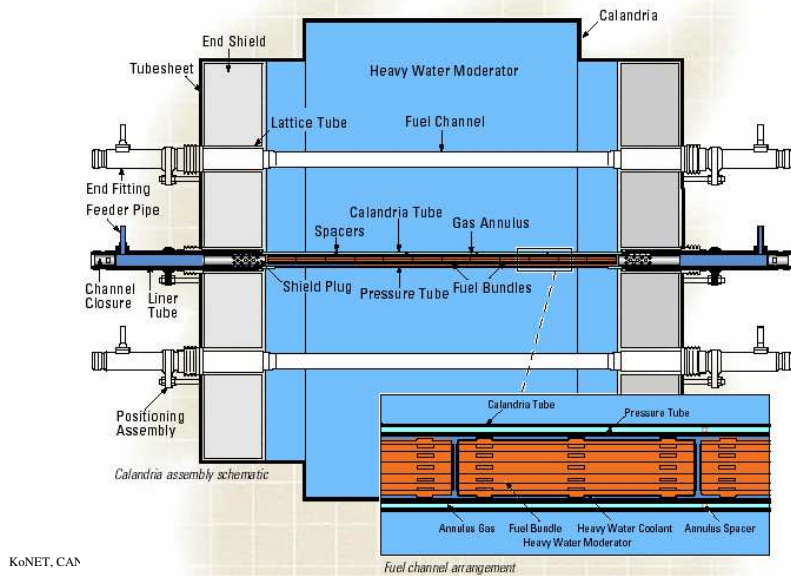
Jellemző üzemi paraméterek (*)

A comparison of principal CANDU Heat Transport System Parameters

CANDU 6 Operating stations or under construction

| | Heat Transport System Conditions | | | | | | | Heat Transport Pumps | | Steam Generators | | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------|-------------------|--|--------------------|----------------------|
| | Electrical Output (MW) | Number of Fuel Channels | Elements in Fuel Bundle | Number of Loops | Outlet header Pressure (MPa) | Maximum Channel Flow (kg/s) | Outlet Header Quality (%) | Total | Operating | Motor Rating (kW) | Area (m ²) per Steam Generator | Integral Preheater | Steam Pressure (MPa) |
| Point Lepreau, | 680/633 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 3200 | Yes | 4.7 |
| Gentilly 2 | 675/638 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 3200 | Yes | 4.7 |
| Wolsong 1 | 678/638 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 3200 | Yes | 4.7 |
| Embalse | 648/600 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 2800 | Yes | 4.7 |
| Cemavoda 1, 2 | 710/665 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 3200 | Yes | 4.7 |
| Wolsong 2, 3, 4 | 715/668 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 3200 | Yes | 4.7 |
| Qinshan 1, 2 | 728/668 | 380 | 37 | 2 | 10.0 | 24 | 4 | 4 | 4 | 6700 | 3200 | Yes | 4.7 |
| <i>Other CANDU operating stations</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Pickering A 4 Units | 542/515 | 390 | 28 | 2 | 8.7 | 23 | - | 16 | 12 | 1420 | 1850 | Yes | 4.1 |
| Bruce A 4 Units | 904/840 | 480 | 37 | 1 | 9.1 | 24 | <1 | 4 | 4 | 8200 | 2400 | No | 4.4 |
| Pickering B 4 Units | 540/516 | 390 | 28 | 2 | 8.7 | 23 | - | 16 | 12 | 1420 | 1850 | Yes | 4.1 |
| Bruce B 4 Units | 915/860 | 480 | 37 | 1 | 9.1 | 24 | <1 | 4 | 4 | 8200 | 2400 | No | 4.7 |
| Darlington 4 Units | 936/881 | 480 | 37 | 2 | 10.0 | 25 | 2 | 4 | 4 | 9600 | 4900 | Yes | 5.1 |

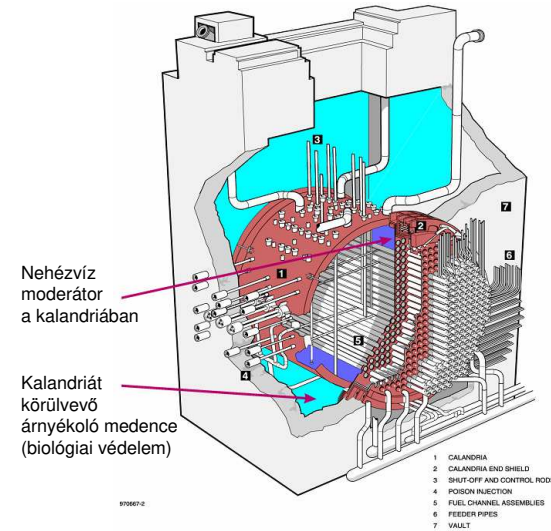
CANDU zóna



KoNET, CAN

17

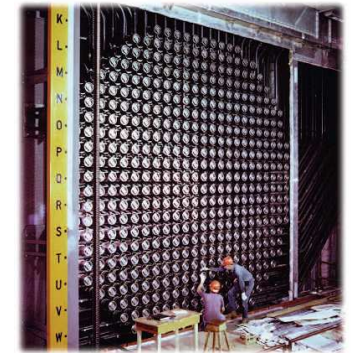
CANDU zóna



CANDU 6 Reactor Assembly

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI



Reactor face (during construction)

18

CANDU zóna

- Fűtőelem-csatornák négyzetes rácsban
- Elő- és hátoldalon záró, árnyékoló fal, perforációkkal
- Nyomástartó csatornák Zr ötvözetből
- Üzem alatti átrakás:
 - a csatorna záró elemhez hűtőközeg vezetékek csatlakoznak
- A fűtőelem csatorna fala cserélhető, ez lehetővé teszi az öregedéskezelést, üzemidő-hosszabbítást
- A fűtőelem-csatorna és a kalandria fala között CO₂ töltőgáz
 - hőszigetelés
 - csatorna sérülés esetén a gáz szivárgása segíti a detektálást
- Amennyiben sérül a nyomástartó fal, az lokális, tehát csak az adott csatornát érinti
- Az egyes fűtőelem-csatornákat nagy mennyiségű moderátor víz veszi körül, tehát közvetlen közelben van a végső hőnyelő

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

19

CANDU zóna

- Kalandria záró/árnyékoló fal
 - dupla fal, köztük lévő térrész acél golyókkal és vízzel töltött
 - a vízszintes fűtőelem-csatornákat tartja

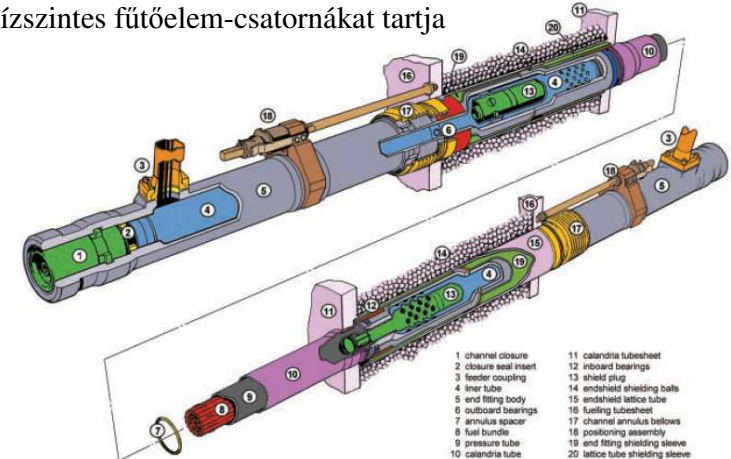


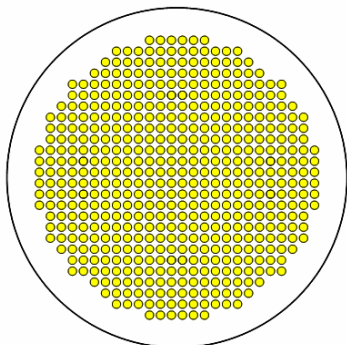
FIG. 65. Illustration of the CANDU 6 fuel channel.

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

20

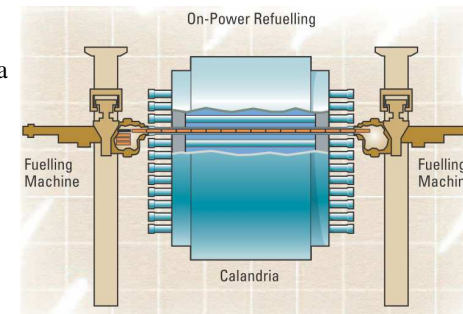
CANDU zóna



- Number of Channels 380
- Reactor Core Diameter [m] 7.6
- Lattice Pitch [mm] 286
- Vol. of D₂O in Moderator [m³] 265
- Vol. of D₂O in HTS [m³] 192
- Total vol. of D₂O [m³] 457

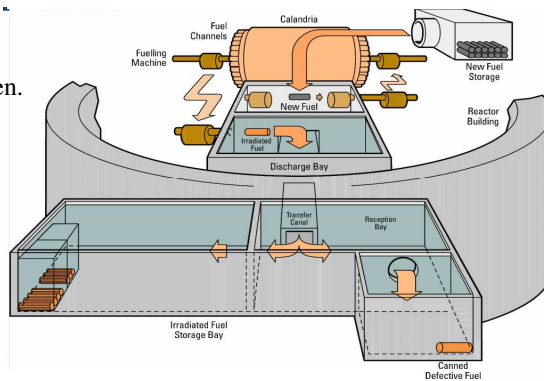
CANDU üzemanyag-kezelés

- Üzemanyag csere
 - Két távirányítású átrakógép együttes használata, melyek az üzemanyag-csatornák két végén üzemelnek. A friss üzemanyagot a hűtőközegáramnak megfelelő felső végen tölti be.
 - Jellemzően a 12 kötegből 4-8 fűtőelemköteget cserélnek le egy átrakás során. Egy CANDU 6 reaktor esetén hetente mintegy tíz csatornát raknak át/töltenek újra.



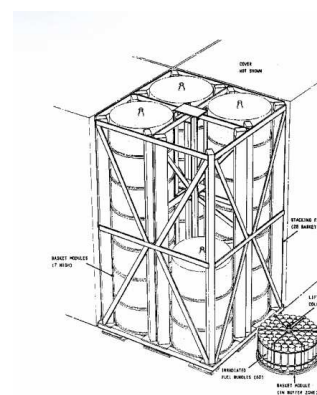
CANDU üzemanyag-kezelés

- Üzemanyag csere
 - Mindkét távirányítású átrakógép tud tölteni, illetve fogadni üzemanyagot, az átrakott fűtőelem-csatorna hűtőközegáramától függően.
 - A teljes műveletet a vezénylőből irányítják előre programozott számítógépes rendszerrel.

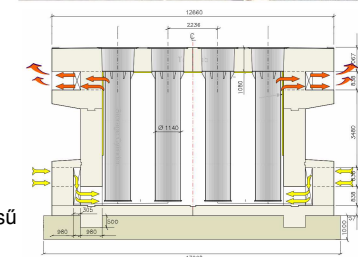


CANDU üzemanyag-kezelés

- Nedves tárolás: ~ 10 év, száraz (átmeneti) tárolás 70-100 évig



02-09-19
Kosaras elrendezés a pihentető medencében



Passzív léghűtésű száraz tároló

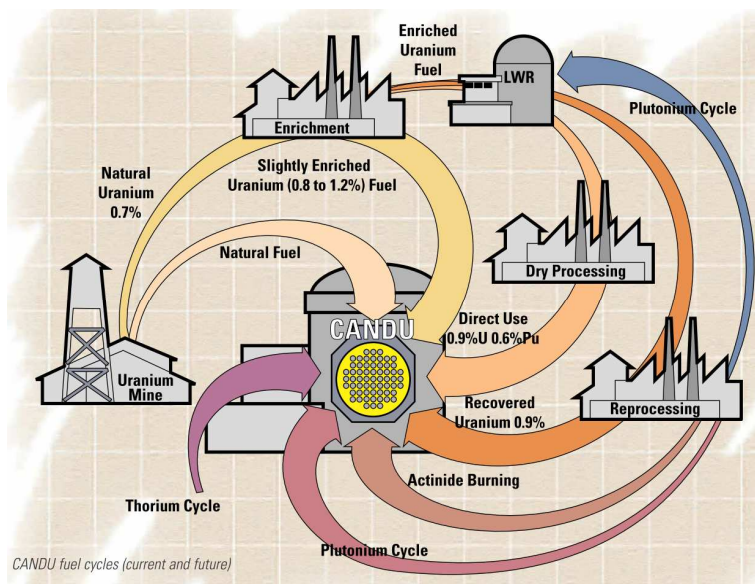
CANDU üzemanyag-kezelés

- Üzem közbeni átrakás jelentősége
 - kisebb reaktivitás-tartalék szükséges
 - nincs szükség bóros reaktivitás-szabályozásra (egyszerűbb rendszer)
 - a kiégett üzemanyag hasadóanyag-tartalma nagyon alacsony (kiégett üzemanyag kritikussági kérdései kevésbé jelentősek)
 - indermetikussá vált üzemanyag üzem közben eltávolítható
 - csökkenthető a hasadási termékek kikerülése
 - a zóna reaktorfizikai állapota a kampány során nem változik (egyszerűbb üzemeltetés és felügyelet)
 - egyes esetekben lehetséges a fűtőelem-csatornák üzem közbeni ellenőrzése (nem szükséges leállítás, vagy a csatorna kirakása)
 - súlyos baleset esetén a rendszer szándékolatlan újra kritikussá válásának nagyon kicsi a valószínűsége

CANDU üzemanyagciklus

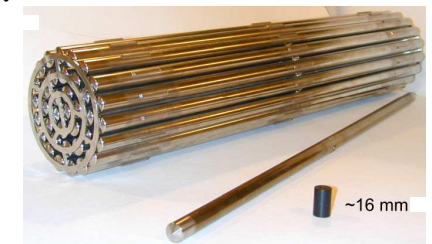
- Az LWR-ekhez képest a nehézvízes kialakítás neutronokban gazdag.
 - Ez alkalmassá teszi a CANDU típust többféle üzemanyag-összetétel alkalmazására (pl. MOX).
 - Mivel a CANDU típust természetes urán felhasználására tervezték, CANDU üzemanyag előállítható LWR-ek kiégett üzemanyagából is. Az újrahasznosított urán ("Recovered Uranium" - RU) dúsítása kb. 0,9%. Megközelítőleg 30-40%-nyi további energiatartalom kinyerhető a CANDU reaktorokban történő üzemanyag újrahasznosítással.
 - Az LWR üzemanyag újrahasznosításához nincs feltétlenül szükség reprocesszálásra, hanem közvetlenül alkalmazható a könnyűvízes reaktor üzemanyaga: a pasztillákat CANDU üzemanyagba szerelik át pusztán fizikai átalakítás (darabolás) után (nincs kémiai feldolgozás).
 - Emellett több üzemanyag típus létezik plutónium felhasználásra is, melyekkel a plutónium mellett más aktinidák is kiégethetők, a MOX üzemanyagnál jobb hatásfokkal. Ezek az üzemanyagok nem tartalmaznak uránt, így a kiégetés során nem keletkezik plutónium.
 - CANDU reaktorokkal lehetséges hasadóanyag tenyésztése természetes tóriumból.
- **Viszont a reaktivitás hűtőközeg üregtényezője enyhén pozitív!**

CANDU üzemanyagciklus



CANDU zóna és üzemanyag

- A CANDU üzemanyag cirkócium (zircaloy) csövekből és keramikus üzemanyag-pasztillákból áll. A pálcák (csövek) körkörösén vannak elrendezve.
- A korábbi kialakításokban a fűtőelemköteg 28 vagy 37 db 0,5 m hosszú pálcát tartalmaznak, egy csatornában összesen 12 vagy 13 fűtőelemköteg. Átmérő: 10 cm, tömeg: ~23 kg. Pasztilla: D=12 mm, H=16 mm
- Az újabb CANFLEX köteg 43 pálcát tartalmaz kétféle pasztilla mérettel. A köteg átmérője 10 cm, 0,5 m hosszú, tömege 20 kg, a 37 pálcát tartalmazó köteg lecserélésre lett kialakítva. Az átalakítás elsődleges célja a jobb üzemanyag jellemzők elérése volt a kétféle pasztillaátmérővel.
- Több, könnyűvíz tartalmú rekesz (liquid zone controllers) van kialakítva reaktivitás-szabályozásra. Ezek elnyelik a többlet neutronokat, és lokálisan csökkentik a hasadások számát.



CANDU zóna és üzemanyag

- CANDU 37 típusú üzemanyag

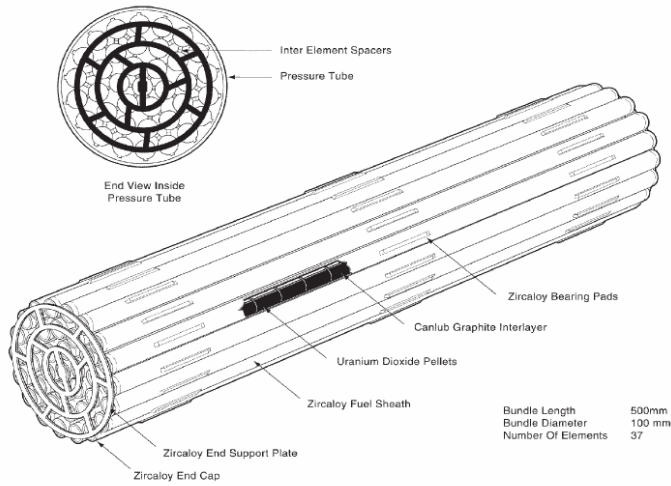
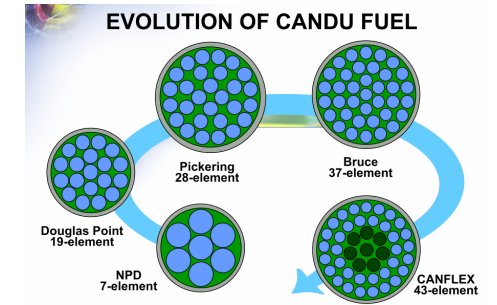
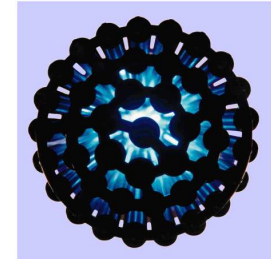


FIG. 8. CANDU 37 element fuel bundle.

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

CANDU zóna és üzemanyag

- CANFLEX üzemanyag
 - kétféle pasztillaátmérő
 - 43 fűtőlempálca
 - alacsonyabb maximális teljesítmény
 - magasabb elérhető kiegészi szint
 - hűtadást javító szerkezet (keverőrácsok)
 - a központi elemek diszprózium tartalmúak (kiegő méreg)
 - reaktivitás együtthatók „javítása”!
 - 2%-os, enyhén dúsított üzemanyag
 - 20 500 MWnap/T(U)
 - vastagabb pálcaburkolat

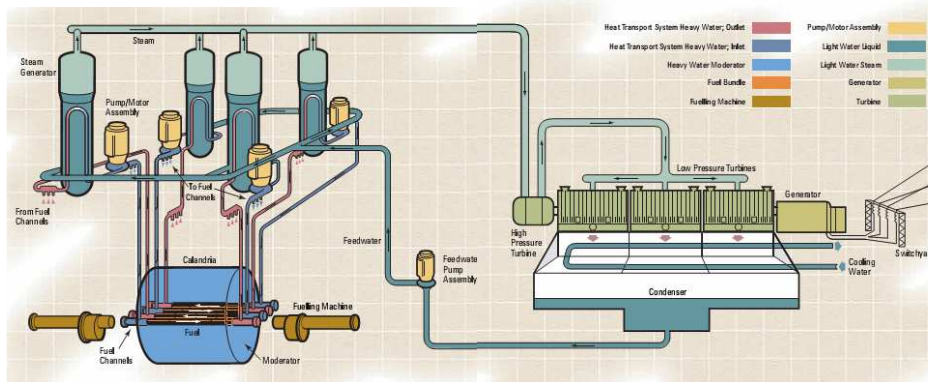


NRC

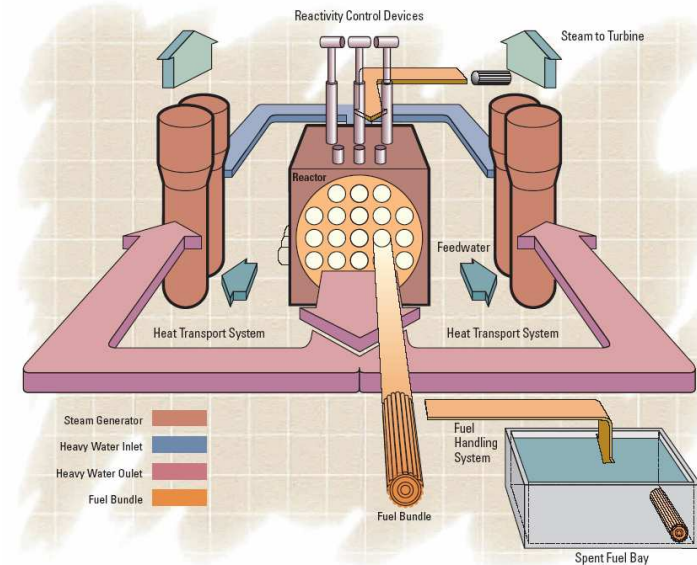
02-09-19

Page 17

CANDU séma



CANDU hőtranszport



A moderátor rendszer és egyéb rendszerek

- Moderátor rendszer
 - A reaktor hőteljesítményének mintegy 4,5%-a* a moderátort fűti.
 - A hő legnagyobb forrása a gamma sugárzás. Másrészt hő termel a gyorsneutronok lassítása, valamint kis mértékű hőtermelést jelent a hőátadás a magas hőmérsékletű nyomástartó csatornák és a moderátor között.
 - A rendszer két 100% kapacitású szivattyút tartalmaz, két 50% kapacitású hőcserélőt. Utóbbit recirkulált könnyűvíz hűti szabályozó és visszacsapó szelepek segítségével. A rendszerhez víztisztító rendszer, folyékony neutronmérég-adagoló és nehézvízgyűjtő rendszer, betáplálás és mintavétel csatlakozik.

A moderátor rendszer és egyéb rendszerek

- Moderátor rendszer
 - A szivattyúk és a hőcserélők soros-párhuzamos kapcsolása lehetővé teszi, hogy a szivattyúk által szállított közeget mindkettő/bármelyik hőcserélő hűteni tudja. Így a szivattyúk egyenként izolálhatók karbantartásra.
 - Ebben az esetben a reaktor teljesítményt 60%-ra kell csökkenteni.
 - A rendszer fő feladatai:
 - moderátor hűtése
 - moderátor mennyiség fenntartása
 - kalandria kilépő hőmérséklet 70°C-on tartása
 - Normál üzemi és tartalék üzemzavari villamos betáplálás

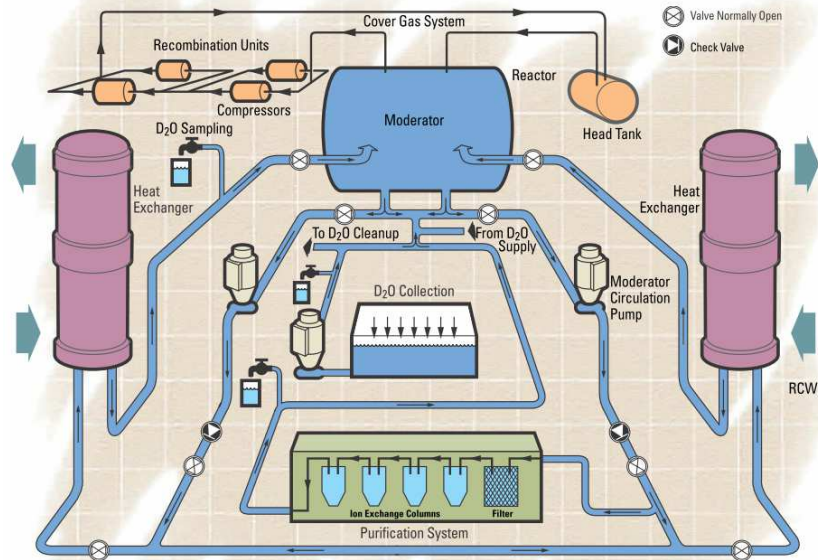
A moderátor rendszer és egyéb rendszerek

- Moderátor rendszer
 - A reaktor hőteljesítményének mintegy 4,5%-a* a moderátort fűti.
 - *ez a teljesítmény azonos nagyságrendű a leállítást utáni remanenshő-teljesítménnyel, így:
 - A kalandriában tárolt nehézvíz hőelnyelőként viselkedik egy hűtőközegvesztéses baleset esetén, amennyiben az üzemzavari hűtőrendszerek sem működnek.
 - „Inherens” biztonság: amennyiben a moderátorban gőz fejlődik, az automatikusan leállítja a láncreakciót.
 - A csatornák súlyos baleseti sérülése esetén is a kalandria nagy valószínűséggel megőrzi generális integritását (szivárgások lehetségesek)
 - A kalandria súlyos baleseti hűtését az árnyékoló medence biztosítja

A moderátor rendszer és egyéb rendszerek

- Védőgáz rendszer
 - A moderátor rendszer védőgáza hélium.
 - A nehézvíz moderátorban radiolízis hatására hidrogén (deutérium) és oxigén termelődik.
 - A védőgáz atmoszféra meggátolja a hidrogén és az oxigén felhalmozódását, katalitikus rekombinációval ismét nehézvízzé alakítva.
 - A rendszer két kompresszorból és két rekombinátorból áll: héliumot cirkuláltatnak a kalandria nyomáscsökkentő vezetékén. Normál üzemben egy kompresszor és két rekombinátor üzemel, a másik kompresszor tartalék.
- Nehézvíz mintavételező rendszer
- Moderátor tisztító rendszer
 - A nehézvíz tisztaságát biztosítja, ezzel minimalizálva a radiolízis mértékét.
 - Minimalizálja a korróziós termékek mennyiségét a szennyezők eltávolításával és a pH (pD) szabályozásával.
 - Operátori beavatkozásra csökkenthető az oldott mérgek koncentrációja (bór, gádolínium), amennyiben növelni kell a reaktivitást.
 - A kettes számú leállító rendszer alkalmazása után eltávolítja az oldott gádolíniumot.

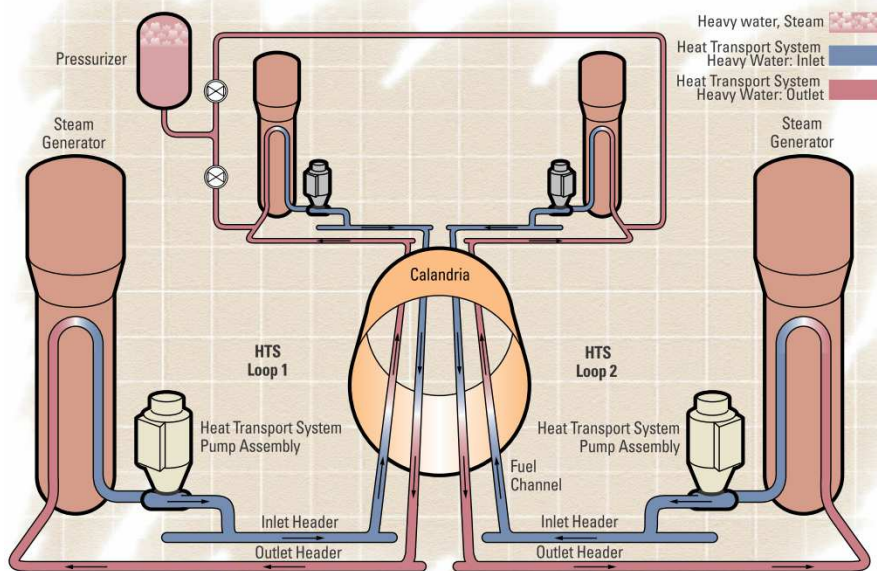
A moderátor rendszer és egyéb rendszerek



Hőszállító rendszer

- Kéthurkos primer hűtőkör
- A gőzfejlesztőbe továbbítja a hőt. A szekunder közeg könnyűvíz.
- Egy-egy hurok a 380 üzemanyag-csatorna 50-50%-ának hűtését látja el. Mindkét hurok egy-egy be- és kilépő fejjel rendelkezik a zóna két oldalán. A nehézvíz a csatornába tápvezetékeken keresztül jut a belépő fejből, illetve ugyanígy egyesével vannak bekötve a kilépő fejbe.
- A hurkok „nyolcas” elrendezésben vannak, azaz a hűtőközeg kétszer halad át a zónán ellenkező irányban egy teljes kör megtétele során. A szomszédos csatornában a hűtőközeg-áramlás ellentétes irányú.
- Primerkörü nyomástartás:
 - A reaktor egyik oldalán a kilépő fejnél csatlakozik a rendszerhez a térfogatkompenzátor
 - primerkörü közeget mennyiség szabályozásával történő nyomástartás (feed and bleed pressure control)

Hőszállító rendszer



Hőszállító rendszer

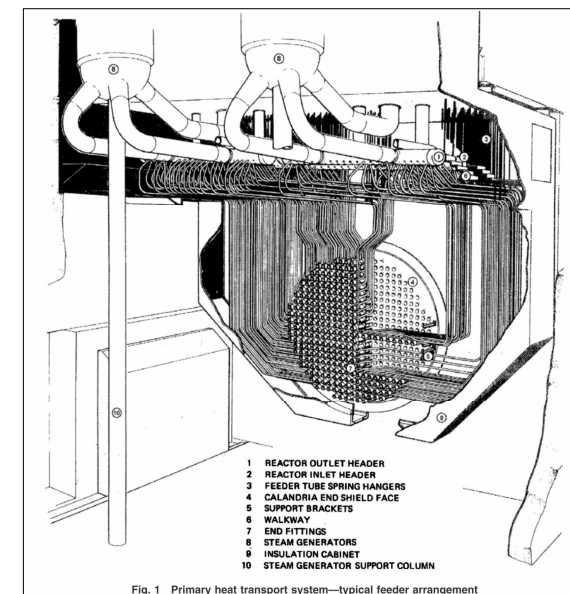
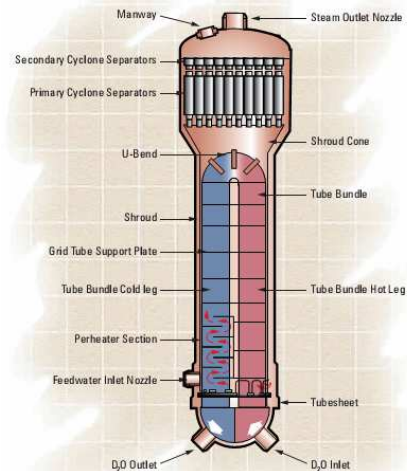


Fig. 1 Primary heat transport system—typical feeder arrangement

Hőszállító rendszer

- Gőzfejlesztők
 - U-csöves álló gőzfejlesztők.
 - A GF előhevítvél rendelkezik a szekunderoldalon, az U-csövek kilépésénél.
 - Beépített gőzleválasztó és gőzsűrítő.
- Vertikális FKSZ-ek, centrifugálmotorral, egy szívó és két nyomócsonkkal.
- Hálózatról való leszakadás esetén a hűtést egy ideig az FKSZ-ek tehetetlensége adta forgalom biztosítja a reaktor teljesítményének csökkentése alatt. Az FKSZ-ek leállása után a természetes cirkuláció biztosítja a hűtést.



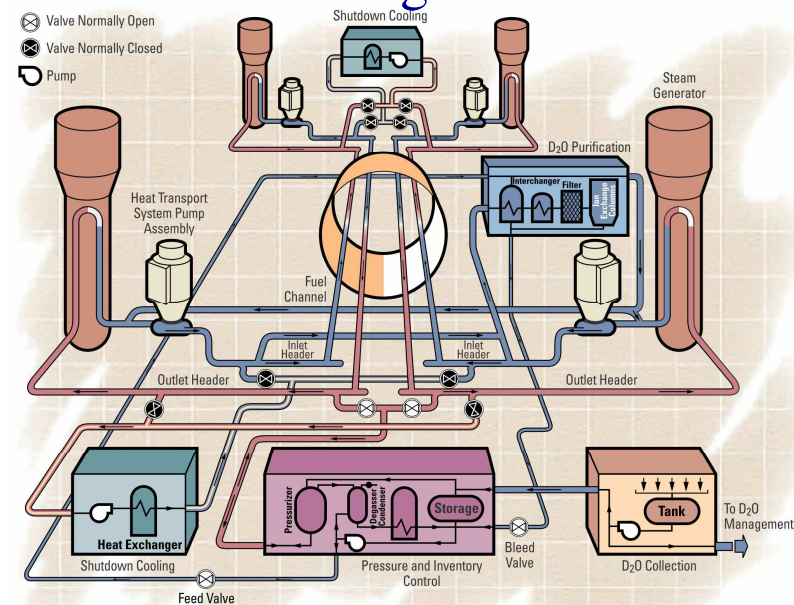
Primerköri kiegészítő rendszerek

- Nyomástartó és összetétel-felügyelő rendszer
 - Térfogat-kompenzátor*, nehézvíz szivattyúk, táp- és csapolószelepek, nehézvíz tartály.
 - Nyomástartás, összetétel-felügyelet, túlnyomás-védelem, ellenőrzött gáztalanítás.
- Nehézvíz gyűjtő rendszer
 - Az egyes komponensek szivárgásait gyűjti össze
 - Mintavételező rendszer
 - A gyűjtőtartályokból a nehézvizet visszajuttatják a nyomástartó és összetétel-felügyelő rendszer tárolóiba.
- Tisztító rendszer
 - Eltávolítja a korróziós termékeket valamint az apró szilárd szennyeződések.
 - A nehézvíz pH-jának (pD) szabályozása
 - Vízkivétel a primer hurkok belépési ágán
 - Hőcserélő-előmelegítő biztosítja, hogy ne hűljön le a közeg

Primerköri kiegészítő rendszerek

- Leállítási hűtőrendszer (Shutdown cooling)
 - Lehűti a primerkört 177 °C-ról 54 °C-ra
 - FKSZ és GF karbantartás során biztosítja a zóna hűtését (remanenshő eltávolítást).
 - Két független hűtőkör: szivattyú, hőcserélő; egy-egy a reaktor két végénél
 - Egy-egy tartozik a két primerköri hurokhoz
 - Csatlakozás a primerköri belépésnél és kilépésnél
 - Készletléti állapotban fel van töltve nehézvízzel, izolálva van a primerkörtől
 - A szivattyúk forgalma biztosítja, hogy indításkor nem léphet fel forrás a fűtőelem-csatornákban
 - Leálláskor a gőzfejlesztőkről a gőz by-pass ágon a kondenzátorba jut, ez biztosítja, hogy ~30 perc alatt névleges hőmérsékletéről 177 °C-re hűljön
 - A lehűtéskor a primerköri FKSZ-ek teljes fordulaton üzemelnek, a hűtőközeg egy részét a leállási hűtőkörök hőcserélőibe juttatják. Ezzel további 100 °C-kal csökken a primerkör hőmérséklete. Amikor 100 °C alá csökken, az FKSZ-eket leállítják, és indítják a leállítási rendszer szivattyúit.

Primerköri kiegészítő rendszerek



Primerköri kiegészítő rendszerek

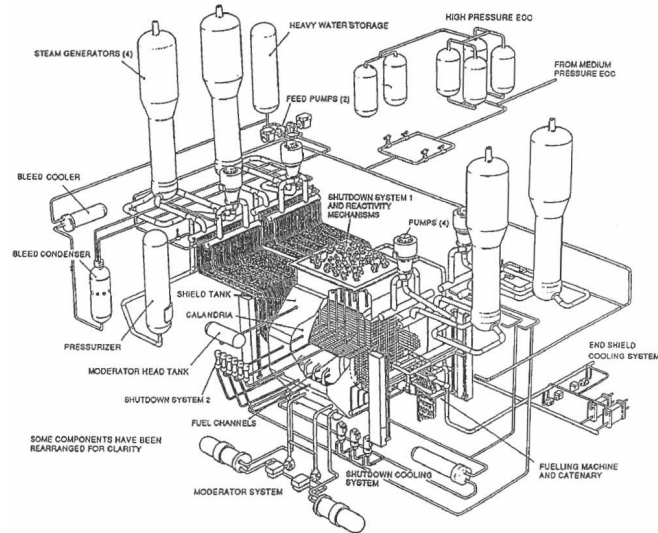


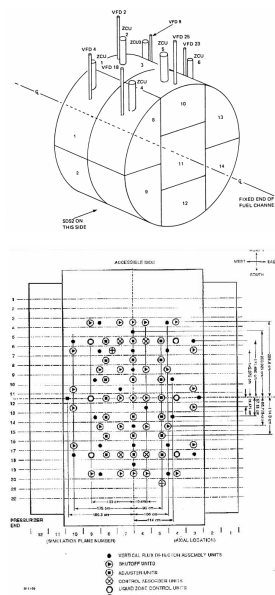
FIG. 13. Illustration of the relative location of components in the CANDU PHWR and the auxiliary systems' components in the HTS and the moderator system.

Reaktivitás-szabályozás

- Teljesítmény-szabályozás, manőverezés
- A neutronfluxus- és a teljesítménymérés, valamint a reaktivitás-szabályozó rendszerek és számítógépek segítségével három fő funkciót lát el:
 - a blokk teljes teljesítményének felügyelete az erőmű terhelésének megfelelően.
 - fluxuselozslás felügyelete és szabályozása
 - technológiai és egyéb reaktorparaméterek felügyelete, a reaktor teljesítményének megfelelő sebességű csökkentése, amennyiben valamely paraméter üzemi korláton kívül kerül.
- Reaktivitás-szabályozó eszközök: időben rövid hatású globális és lokális reaktivitás-szabályozás:
 - könnyűvízes zónák
 - mechanikus szabályozórudak
 - reaktorméreg-szabályzók
 - oldható mérgek adagolása és kivonása a moderátorból.

Reaktivitás-szabályozás

- **Könnyűvíz zónák**
 - Nehésvíz környezetben a könnyűvíz neutronelnyelő
 - Hat függőleges csatornában könnyűvíz
 - A csatornák további rekeszekre van osztva
 - Az egyes rekeszek könnyűvíz tartalmával lehet lokálisan változtatni a reaktivitást, alakítani a neutronfluxust
- **Szabályozó rudak (control absorbers)**
 - Négy szabályozórúd
 - Alaphelyzetben kihúzott állapotban vannak a zóna fölött
 - A könnyűvíz zónák funkcióját segítik ki
 - BV funkciót és el tudnak látni: leállított állapotban tartják a reaktort, amíg az 1-es BV rendszer nem elérhető (pl. karbantartáskor)
- **Reaktorméreg-szabályzók (adjuster rods)**
 - 21 db abszorbens rúd, alaphelyzetben teljesen betolva
 - Xe mérgeződés ellensúlyozására húzhatók
 - rozsdamentes acél



Reaktivitás-szabályozás

- **Oldható neutronmérgek**
 - Bórsavoldat juttatása a moderátorrendszerbe, mellyel a friss üzemanyag reaktivitástöbblete ellensúlyozható
 - Oldott gadolínium juttatása a rendszerbe, feladata a hosszú leállásokat követő Xe-koncentráció hatásait egyenlíti ki
 - Az oldott mérgek eltávolítását ioncserélő rendszer végzi
- **Hosszútávú reaktivitás-szabályozás: átrakás (üzem közben)**

Biztonságvédelmi rendszerek

CANDU biztonságvédelmi rendszerek eredete

- régi reaktorok: egy gyors beavatkozású rendszer
 - NPD, Douglas Point: **moderátor gyors leeresztése/szintjének csökkentése**
 - Pickering-A: a nagy zónaméret miatt a moderátor leeresztés nem biztosított elég gyors reaktivitás-csökkenést a leeresztés korai szakaszában, ezért **gravitációs módon beeső BV rudakat** terveztek
 - Bruce-A, Gentilly-1: egy **második, független gyors beavatkozású BV rendszer** bevezetése
 - legyen a meglévőtől **független**, kialakítása **diverz**

Biztonságvédelmi rendszerek

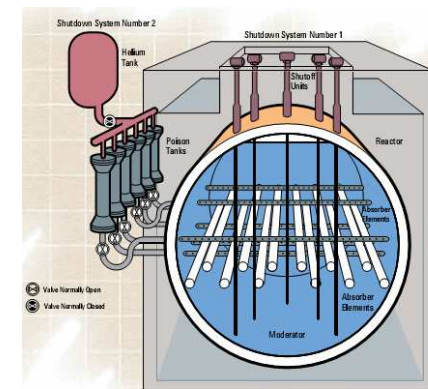
- Két biztonságvédelmi leállítórendszer: neutronabszorbens **SZBV rudak és folyékony reaktorméreg** befecskendezés
 - **redundancia**
 - egymástól és az irányítástechnikától is függetlenek
 - nem alkalmaznak közös mérőláncokat vagy működtetést
 - különböző elven avatkoznak be – **diverzifikáció**
 - az egyes rendszerek letesztelhetők
 - **az egyes rendszerek önmagukban képesek a reaktor nukleáris leállítására**, a legnagyobb reaktivitású állapotból hideg leállított állapotba
 - a rendszerekkel szembeni követelmény: 1000 indításból 999 hibátlan működés
 - moderátor méregre csak hosszú távon (órákkal később) van szükség (amikor a Xenon koncentráció csökkenni kezd)

Biztonságvédelmi rendszerek

- Két biztonságvédelmi leállítórendszer
- 1. rendszer: az elsődleges, gyors leállító rendszer
 - A 2. rendszertől független, valamint a szabályozórendszertől is. A biztonságvédelmi rudakat ejti be a zónába. A BV rudak felső pozícióban rugókat feszítenek, így azok a tartóreteszek kioldásakor felgyorsítják a rudakat.
 - A tervezési filozófia szerint minden mért változót háromszorosan mérnek, és hátról kettő logika szerint aktiválódnak a BV funkciók (pl. ha egy változó két mérőláncon, vagy egy-egy változó két mérőláncon BV tartományba kerül).
 - BV beavatkozással jár, ha a következő paraméterek korlátba ütköznek:
 - túl magas teljesítmény
 - alacsony primerköri forgalom
 - magas primerköri nyomás
 - periódusidő-sértés (túl gyors teljesítmény-változás)
 - magas reaktorépület (konténment) nyomás
 - GF alacsony vízszint
 - TK alacsony vízszint
 - magas moderátor hőmérséklet

Biztonságvédelmi rendszerek

- 2. rendszer:
 - neutronmérgek (tömény gadolínium-nitrát oldat) befecskendezése a moderátorba vízszintes csatornákon keresztül, melyek a kalandria egyik oldalán csatlakoznak a tartályba, és a kalandria teljes szélességében szelepeken keresztül jut a méreg a moderátorba.
 - CANDU 6 esetén hat ilyen befecskendező csatorna.
 - Szintén független rendszer. Korlátsértés esetén gyors nyitású szelepek nyitnak a nagynyomású He tartályok és a gadolínium tartályok között, a nagynyomású gáz a befecskendező csatornába, a szelepeken keresztül a moderátorba nyomja a mérget.
 - Az előzővel azonos nukleáris és technológiai paraméterek korlátsértése aktiválja a rendszert. A mérőláncok és a logika fizikailag különálló az 1. rendszerétől.



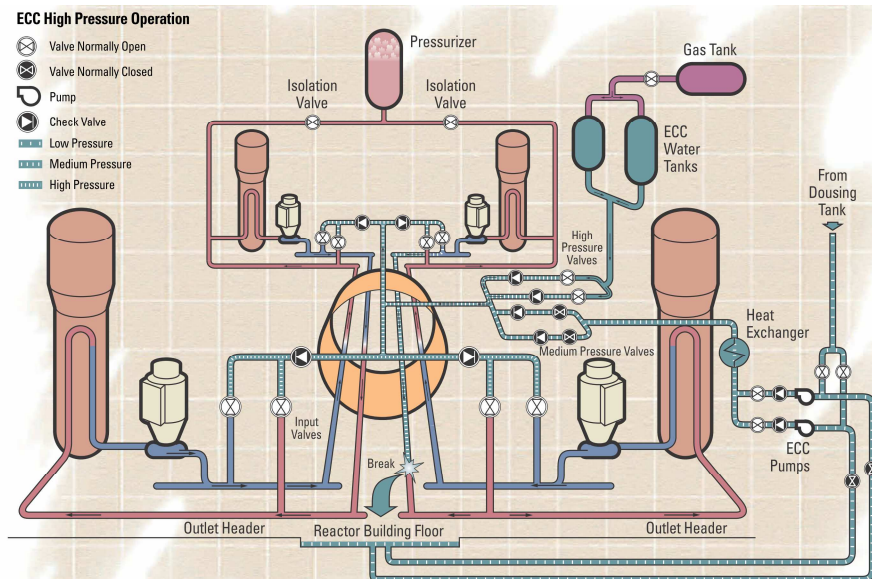
Üzemzavari hűtőrendszerek

- Két üzemzavari DG csoport
- Üzemzavari hűtőrendszerek (Emergency Core Cooling System - ECCS)
 - LOCA esetén pótolja és keringeti a primerköri hűtőközeget, mely nehézvíz és könnyűvíz keveréke.
 - **Könnyűvíz** → nem lehet kritikus. Nincs szükség bórsavra
 - CANDU 6 esetében a ZÜHR három üzemi szinttel rendelkezik: magas-, közepes és alacsony nyomású üzemmód.
 - Ha a primerköri nyomás LOCA következtében 5,5 MPa (55 bar) alá esik, aktiválódik a ÜH, valamint a ÜH-től független rendszer izolálja a sérült hurkot a másiktól.
- **Magas nyomású üzem**
 - A kiváltó LOCA jelre aktiválódik a két hurok izolációja, nyit a gáz befecskendezés a **hidroakkumulátorokba** (ÜH tartályokba), megkezdődik a magas nyomású ÜH befecskendezés, valamint aktiválódnak a nehézvíz/könnyűvíz izolációs szelepek. Megindul a GF-k gyors lehűlése: a szekunderoldali BV szelepek nyitásával a gőz kiengedése
 - a ÜH víz **könnyűvíz**, a hidroakkumulátorkból a sérült hurokba nyomódik, amennyiben a hurok nyomása 4,14 MPa alá esik.
 - Legnagyobb csőtörés esetén nagyjából 10 s a magas nyomású üzem időtartama. Egy hurok leürüléséhez szükséges minimális idő 2,5 perc.

Üzemzavari hűtőrendszerek

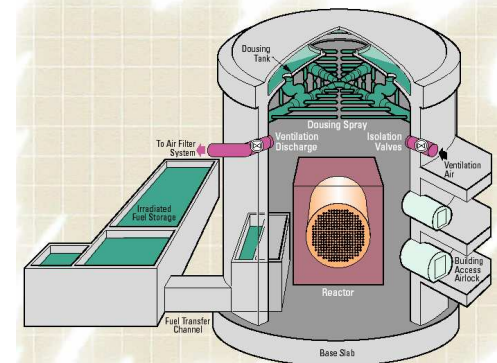
- **Közepes nyomású üzem**
 - A ÜH szivattyúk az **elárasztó tartályok** (dousing tank) vizét a **primerkörbe** juttatják.
 - Az elárasztó tartályok vize közepes nyomású üzemben legalább 13 percig biztosítja a hűtést maximális csőtörés esetén. Két 100% kapacitású ÜH szivattyú 150 psia (1,034 MPa, 10,34 bar abs) nyomáson képes a közeget a primerkörbe juttatni.
- **Alacsony nyomású üzem**
 - **Az elárasztó tartályok leürülésekor nyitnak a zomszselepek a konténment padlón, a konténmentben felgyűlt víz a ÜH szivattyúk számára elérhetővé válik.**
 - A konténment alján felgyűlt hűtőközeget hőcserélőkön keresztül juttatják vissza a primerkörbe a zóna hűtése céljából. A hőcserélők 49°C-on tartják a víz hőmérsékletét.
 - A zomszpból származó nehézvíz-könnyűvíz keverék hőmérséklete kb. 66°C. Kisátmérőjű törések esetén a remanens hő a GF-kbe jut, és a fő biztonsági lefűvató szelepeken távozik. Nagyatmérőlű törések esetén maga a törés is hőnyelőként viselkedik a ÜH befecskendezés mellett.
- **Tartalék remanenshő-eltávolító rendszer**
 - Amennyiben a ÜH rendszerek nem működnek egy LOCA alatt, a remanens hő az üzemanyagból a moderátor felé távozik hőszugárzás és hővezetés útján.
 - A legbelső üzemanyag pálcá mindössze 50 mm-re van az alacsony hőmérsékletű moderátortól. A hővezetés és hőszugárzás általi hőelvezetés miatt az adott csatorna kiszáradása esetén is biztosítva van, hogy a remanens hő eltávozzon az üzemanyagból, és az ne olvadjon meg.

Üzemzavari hűtőrendszerek



Konténment

- A konténment részei:
 - bélelt, beton konténment épület
 - automata elárasztó rendszer
 - léghűtés
 - levegőszűrő rendszer
 - légszilipek
 - automatikusan üzembe lépő konténment izolációs rendszer

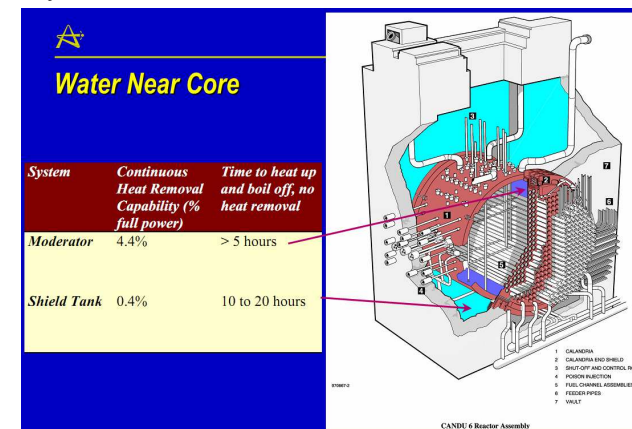


CANDU zóna

- Vízszintes csatorna geometria
 - BDBA súlyos baleset: LOCA + üzemzavari hűtőrendszerek hiánya (LOECC) + moderátor hűtés + moderátor pótvíz elvesztése esetén:
 - a csatornák a kalandria tartályba esnek be, és annak alján halmozódnak fel
 - az árnyékoló medence biztosítja a kalandria tartály hűtését
 - az újabb CANDU típusoknál az árnyékoló medence is rendelkezik pótvízrendszerrel és gőzlefúvatással

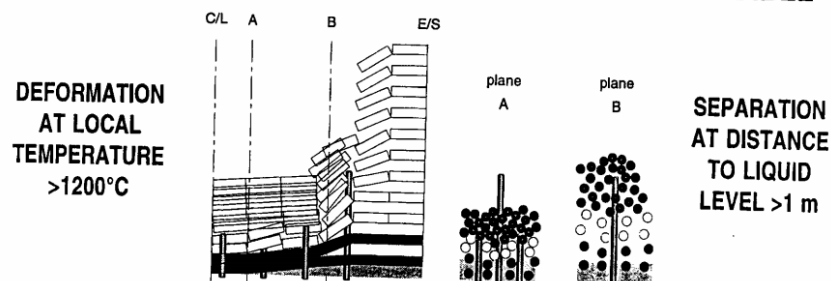
Súlyos baleseti viselkedés

- Két nagy víztérfogat a zónasérülés kezelésére:
 - moderátor
 - árnyékoló tartály



Súlyos baleseti viselkedés

UNCOVERED CHANNELS DEFORM BY SAGGING
SEGMENTS SEPARATE BY MEMBRANE STRETCHING
WHEN SUFFICIENT DEFLECTION DISTANCE AVAILABLE



SUBMERGED CHANNELS FAIL AT ROLLED JOINT WHEN SUFFICIENT DEBRIS LOAD BUILDS UP (CORE COLLAPSE)

Súlyos baleseti viselkedés

- Amikor a kalandria félig kiszárad, először a felső csatornák szakadnak le, így azok még vízbe esnek
- Az alsóbb csatornák akkor szakadnak le, ha a rájuk esett darabok súlya már túl nagy
- a törmelék többnyire nagyobb méretű keramikus darabokból áll
- a törmelék addig nem kezd el olvadni, amíg a moderátor teljesen el nem forrt
- kiszáradás után a cirkónium-gőz reakció felgyorsítja az olvadást

Súlyos baleseti viselkedés

– törmelék/olvadék és a kalandria fal hőtranszportjára különböző modellszámítások

- hősugárzás
- (gyenge) konvekció
- buborékos forrás hőátadása az árnyékoló tartály felé

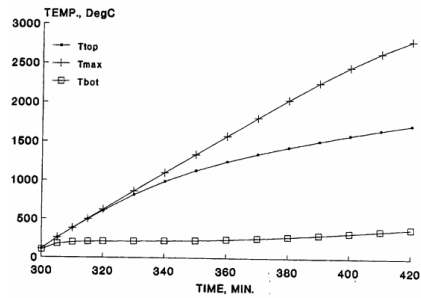
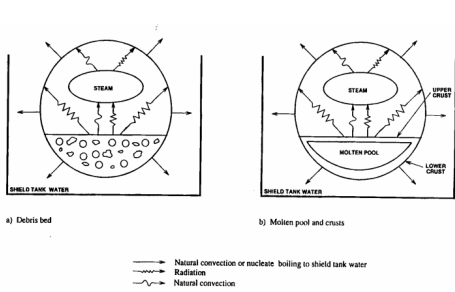
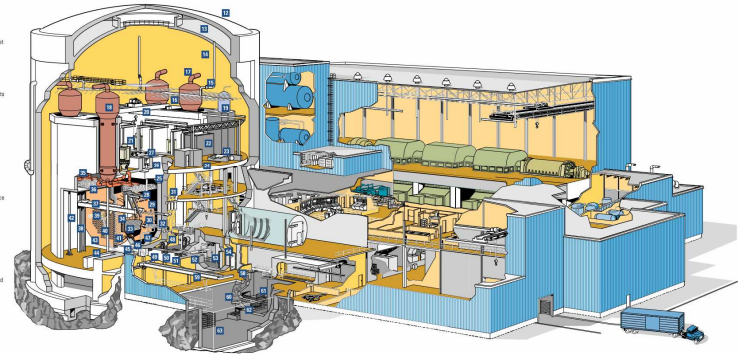


Figure 7 Heat Up of Core Debris in CANDU 6 Calandria, Reference Conditions

CANDU 6 áttekintés

Key to Diagram

1. Diesel room
2. Waste treatment plant
3. Core hall
4. Turbine building
5. Turbine building crane
6. Generator
7. Condenser
8. Battery room
9. Boiler feed water tanks
10. Deaerator storage tank
11. Deaerator
12. Reactor building
13. Cooling tank
14. Dissolving water supply pipes
15. Dissolving water spray nozzles
16. Steam pipes
17. Steam generators
18. Reactor
19. Pressurizer
20. Crane
21. Heat transport pumps
22. Bleed condenser
23. Bleed cooler
24. Hatch
25. Reactor vessel
26. Pressure relief pipes
27. Reactor vessel head
28. Reactor vessel neck
29. Reactor vessel base
30. Bridge support column
31. Diesel room
32. Generator
33. Core hall
34. Turbine building
35. Turbine building crane
36. Generator
37. Condenser
38. Battery room
39. Boiler feed water tanks
40. Deaerator storage tank
41. Deaerator
42. Reactor building
43. Cooling tank
44. Dissolving water supply pipes
45. Dissolving water spray nozzles
46. Steam pipes
47. Steam generators
48. Reactor
49. Pressurizer
50. Crane
51. Heat transport pumps
52. Bleed condenser
53. Bleed cooler
54. Hatch
55. Reactor vessel
56. Pressure relief pipes
57. Reactor vessel head
58. Reactor vessel neck
59. Reactor vessel base
60. Bridge support column
61. Diesel room
62. Generator
63. Core hall
64. Turbine building
65. Turbine building crane
66. Generator
67. Condenser
68. Battery room
69. Boiler feed water tanks
70. Deaerator storage tank
71. Deaerator
72. Reactor building
73. Cooling tank
74. Dissolving water supply pipes
75. Dissolving water spray nozzles
76. Steam pipes
77. Steam generators
78. Reactor
79. Pressurizer
80. Crane
81. Heat transport pumps
82. Bleed condenser
83. Bleed cooler
84. Hatch
85. Reactor vessel
86. Pressure relief pipes
87. Reactor vessel head
88. Reactor vessel neck
89. Reactor vessel base
90. Bridge support column

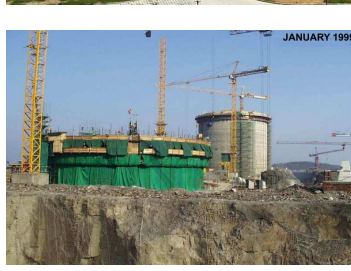


Technical Data

| Reactor | Light | PHWR | Weight of bundle (nominal) | 23.7 kg | Materials (out of core) | Stainless steel | Turbine |
|---|----------------|----------------|---|-----------------------------|---|---|--|
| Thermal output (PHTS) | 3064 MW(th) | 3064 MW(th) | Weight of uranium per bundle (nominal) | 13.7 kg | Stainless steel/zirconium/zirconium alloy | Stainless steel/zirconium/zirconium alloy | Single shaft tandem compound steam turbine directly coupled to 828 MVA generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Coolant flow rate (PHTS) | 7.7 Mkg/s | 7.7 Mkg/s | Sheath outside dia. (cold) | 13.1 mm | Vertical U-tube, 4 | Vertical U-tube, 4 | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Design temperature (DRR) | 279° C | 279° C | Sheath thickness (average) | 0.8 mm | Zirconium - 4 | Zirconium - 4 | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating pressure (DRR) | 260° C | 260° C | Elementary per bundle | 27 | Natural UO ₂ | Natural UO ₂ | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Design pressure (DRR) | 11.25 MPa(abs) | 11.25 MPa(abs) | Fuel bundles in core | 496 | Natural UO ₂ | Natural UO ₂ | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating temperature (DRR) | 310° C | 310° C | Fuel bundles per channel | 12 | Natural UO ₂ | Natural UO ₂ | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Design pressure (DRR) | 10.7 MPa(g) | 10.7 MPa(g) | Heat Transport System | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating temperature (DRR) | 310° C | 310° C | Number of loops | 3 | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating pressure (DRR) | 10.0 MPa(abs) | 10.0 MPa(abs) | Primary coolant | D ₂ O | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Pressure tube inside diameter (LSD, compressed) | 102.26 mm | 102.26 mm | Reactor inlet temperature | 286° C | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Core Length (between calandria tubesheets) | 5.94 m | 5.94 m | Reactor outlet temperature | 310° C | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Number of pressure tubes | 288 | 288 | Reactivity Control Units | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Coolant flow (nominal) | 24 kg/s | 24 kg/s | Power control | 14 light water compartments | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating temperature (DRR) | 310° C | 310° C | 21 stainless steel rods | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating pressure (DRR) | 10.0 MPa(abs) | 10.0 MPa(abs) | 4 cadmium rods | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Pressure tube inside diameter (LSD, compressed) | 102.26 mm | 102.26 mm | 28 cadmium rods (vertical) | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Core Length (between calandria tubesheets) | 5.94 m | 5.94 m | 6 gadolinium nitrate injection tubes (horizontal) | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Number of pressure tubes | 288 | 288 | | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Coolant flow (nominal) | 24 kg/s | 24 kg/s | | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating temperature (DRR) | 310° C | 310° C | | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |
| Operating pressure (DRR) | 10.0 MPa(abs) | 10.0 MPa(abs) | | | | | generator. Steam turbine consists of one double flow high pressure cylinder, two external moisture separator/extractors and three double flow low pressure cylinders. |

CANDU 6 áttekintés

- Quinshan III (Kína), CANDU 6 építés, 2 blokk (2002, 2003)



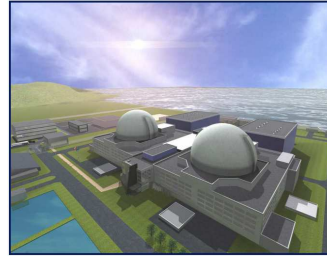
CANDU 6 áttekintés

- Quinshan III (Kína), CANDU 6 építés, 2 blokk (2002, 2003)



Advanced CANDU reaktor

- ACR-1000 (AECL)
- Generation III+
- 1200 MWe kapacitás
- Kompakt ŰA kialakítás 50%-kal magasabb teljesítmény a CANDU 6-hoz képest, nagyjából azonos átmérő mellett.
- Jobb termikus hatásfok a magasabb gőznyomás eredményeként (13 MPa primer nyomás; 7 MPa kilépő gőz nyomás, szemben a korábbi (jelenlegi) 10 MPa és 5 MPa nyomással);
- **Nyomott, könnyűvíz hűtőközeg (!);**
- Csökkentett nehézvíz felhasználás (kb. fele azonos kapacitás mellett), alacsonyabb költség és kevesebb anyagkezelési nehézség.
- Enyhén dúsított urán alkalmazása (2%), az üzemanyag élettartama (kampányhossz) háromszorosa a jelenleginek (természetes urán), 30%-kal kevesebb kiégett ŰA.
- **Kis mértékben negatív üregegyüttható!**



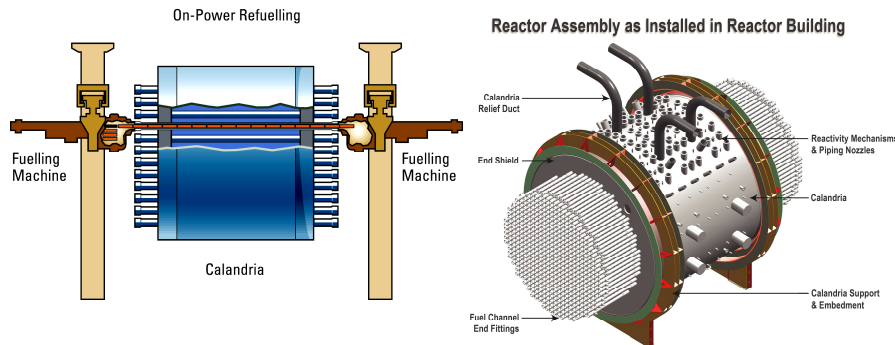
Advanced CANDU reaktor

- ACR-1000 (AECL)
- magasabb átlagos csatorna teljesítmény 6 MW (CANDU 6) helyett 7 MW;
- egyenletesebb fluxuselozlás, 14%-kal alacsonyabb terhelés a legterheltebb pálcákban;
- hosszabb üzemidő (60 év);
- hosszabb kampányok nagykarbantartások között (3 év);
- 90% rendelkezésre állás;
- előfeszített beton konténment (1,8 m vastag) acél bélelés;
- további passzív biztonsági rendszerek



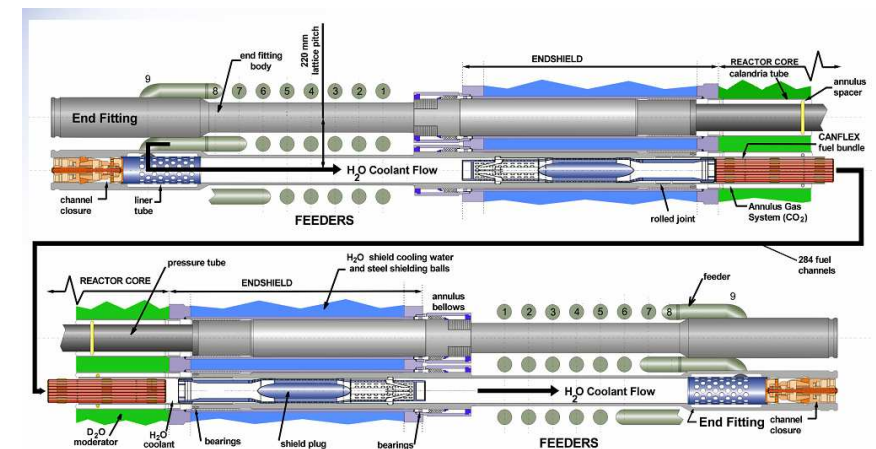
Figure 2-1 Two-Unit Plant Layout of Major Structures

ACR-1000



- Üzem közbeni folyamatos átrakás
- Átrakás miatti leállítás nem szükséges

ACR-1000



ACR-1000

- Passzív üzemzavari hűtés
- CDF < $3,4 \times 10^{-7}$ / reaktorév (üzem közben)
- Építési idő: <5 év (n-edik blokknál 42 hónap első betonozástól első üzemanyag-betöltésig)

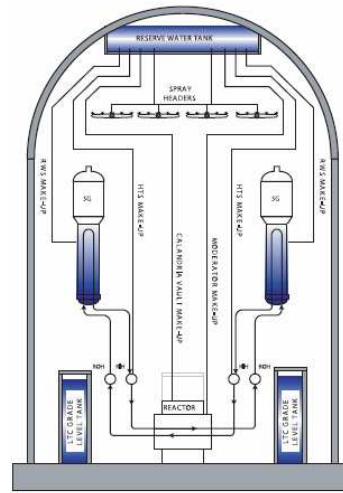


Figure 1-2 Reserve Water System

ACR-1000

- Passzív üzemzavari hűtés
- CDF < $3,4 \times 10^{-7}$ / reaktorév (üzem közben)
- Építési idő: <5 év (n-edik blokknál 42 hónap első betonozástól első üzemanyag-betöltésig)

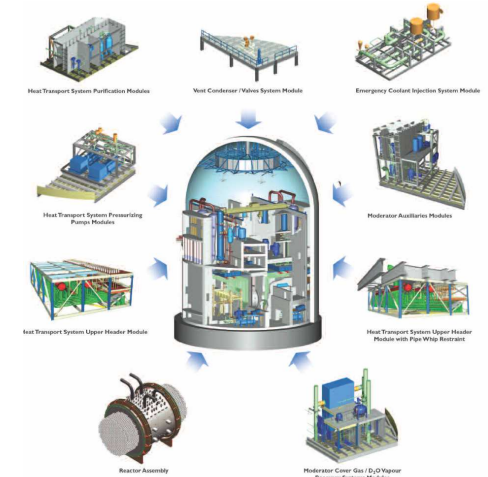
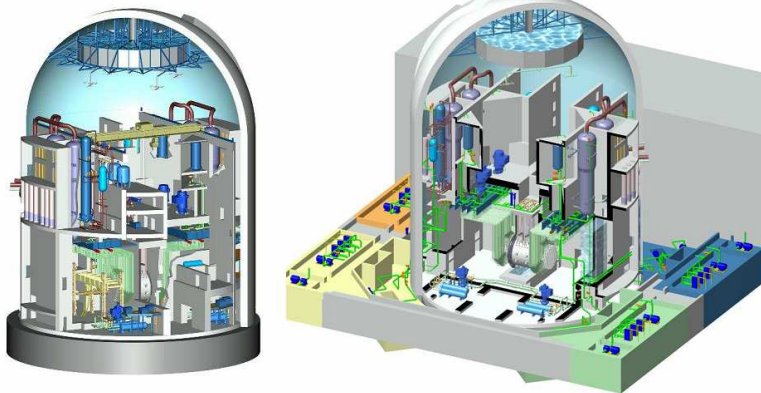


Figure 4-4 Typical Reactor Building Modules

ACR-1000

Strong Containment and Quadrant Design



Steel-lined, 1.8 meter thick pre-stressed concrete walls

Safety support systems in quadrants around Reactor Building

ACR-1000

| | CANDU 6 | ACR-1000 |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Containment Structure | | |
| Type | Pre-stressed concrete / epoxy liner | Pre-stressed concrete / steel liner |
| RB inside diameter | 41.4 m | 56.5 m |
| RB containment wall thickness | 1.07 m | 1.8 m |
| Building height (base slab to top of dome) | 51.2 m | 74.0 m |

ACR-1000

Table 2- 5 Reactor Core Design Data

| | CANDU 6 | Darlington | ACR-1000 |
|-----------------------------------|---|---|---|
| Reactor | | | |
| Output [MWth] | 2064 | 2657 | 3187 |
| Coolant | Pressurized D ₂ O | Pressurized D ₂ O | Pressurized Light Water |
| Moderator | D ₂ O | D ₂ O | D ₂ O |
| Calandria diameter [m] | 7.6 | 8.5 | 7.5 |
| Fuel channel | Horizontal Zr 2.5wt%Nb alloy pressure tubes with modified 403 SS end-fittings | Horizontal Zr 2.5wt%Nb alloy pressure tubes with modified 403 SS end-fittings | Horizontal Zr 2.5wt%Nb alloy pressure tubes with modified 403 SS end-fittings |
| Fuel channels | 380 | 480 | 520 |
| Lattice pitch (mm) | 286 | 286 | 240 |
| Pressure tube wall thickness (mm) | 4 | 4 | 6.5 |

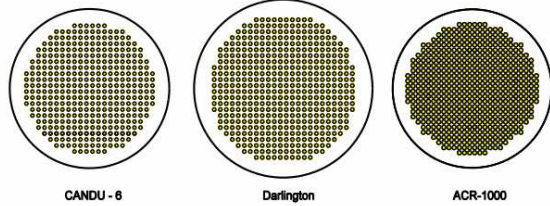
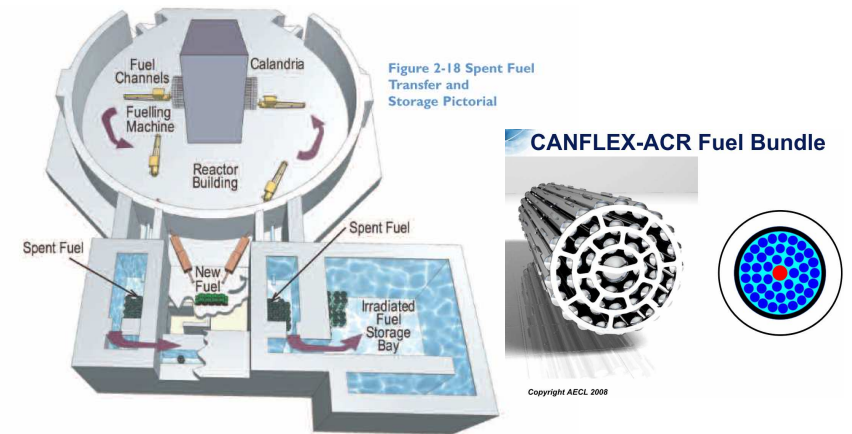


Figure 2-12 Comparison of Core Sizes

ACR-1000



| | CANDU 6 | Darlington | ACR-1000 |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| Fuel | Natural UO ₂ | Natural UO ₂ | Low enriched UO ₂ |
| Fuel burn-up [MWd/te U] | 7,500 | 7,791 | 20,000 |
| Fuel bundle assembly | 37 element | 37 element | 43-element CANFLEX [®] -ACR |
| Bundles per fuel channel | 12 | 13 | 12 |

Irodalom

- <http://canteach.candu.org/>
- AECL: <http://www.aecl.ca/site3.aspx>
- CANDU Owners Group: <http://www.candu.org/>
- IAEA Technical Report Series No. 407: Heavy Water Reactors: Status and Projected Development

Grafitmoderátoros atomerőművi blokkok technológiája és biztonsága: RBMK, GCR

RBMK reaktorok a világban

• Üzemelő blokkok

- 11 RBMK +
- 3 EGP-6: „mini RBMK” - Bilibino 2-4 atomerőmű

| 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 |

• Építés alatt álló blokkok: 0

PRIS database. Last update on 2019-11-25 (<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>)

RBMK reaktorok

• Oroszország:

- Kurszk 1-4 RBMK-1000 925 MWe
- Leningrád 1-4 RBMK-1000 925 MWe
- Szmolenszk 1-3 RBMK-1000 925 MWe

• Litvánia:

- Ignalina-2, leállítva: 2009 RBMK-1500 1185 MWe

- Kurszk-5, módosított típus, építés leállítva 2012. aug.



RBMK reaktorok (*)

Table 1.1 Specific status of the RBMK plants [1]

| Generation * | Status | Number of CPS Channels | Number of Fuel Channels |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Ignalina 1 | operational | 211 | 1661 |
| Ignalina 2 | operational | 211 | 1661 |
| Chernobyl 1 | operational | 179 | 1693 |
| Chernobyl 2 | shut down | 179 | 1693 |
| Chernobyl 3 | operational | 211 | 1661 |
| Chernobyl 4 | shut down | 211 | 1661 |
| Kursk 1 | operational | 179 | 1693 |
| Kursk 2 | operational | 179 | 1693 |
| Kursk 3 | operational | 211 | 1661 |
| Kursk 4 | operational | 211 | 1661 |
| Kursk 5 | under construction | 223 | - |
| St. Petersburg 1 | operational | 191 | 1693 |
| St. Petersburg 2 | operational | 179 (191) | 693 |
| St. Petersburg 3 | operational | 211 | 1661 |
| St. Petersburg 4 | operational | 211 | 1661 |
| Smolensk 1 | operational | 211 | 1661 |
| Smolensk 2 | operational | 211 | 1661 |
| Smolensk 3 | operational | 211 | 1661 |

* The term "Generation" pertains to the initial design or an updated version of the initial design

Az RBMK főbb jellemzői

- Szovjet tervezésű **grafit moderátoros, nyomott csöves, könnyűvíz hűtésű** reaktor
- RBMK: Реактор Большой Мощности Канальный – „Nagyteljesítményű Csatornás Reaktor”
- Az RBMK típus annak a szovjet programnak a kiteljesedése, mely plutónium termelésre tervezett grafit moderátoros katonai reaktorokból fejlesztett energetikai célra reaktort.
- **Könnyűvíz hűtőközeg és grafit moderátor** alkalmazásával **természetes uránt is lehet üzemanyagnak** használni. Így nagyon nagy egységteljesítményű reaktorok is építhetők (az Ignalina atomerőmű 1500 MW-os blokkjai az építéskor kiemelkedően nagyoknak tekinthetők voltak) dúsítási és nehézvízgyártási kapacitások nélkül.

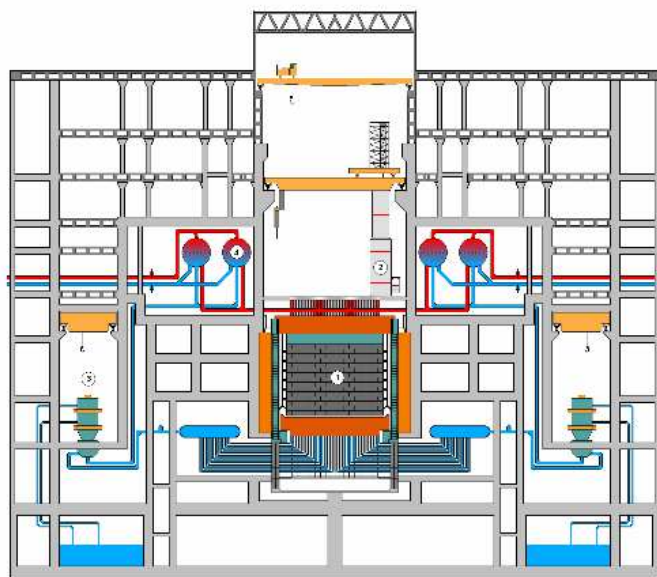
Az RBMK főbb jellemzői

- 10+ m hosszú **függőleges nyomástartó csatornák** vannak négyzet keresztmetszetű grafit tömbökben. Ezekben áramlik a hűtőközeg. A zónában megengedett a forrás, az adott nyomáson ez 290°C-on történik.
- 3,65 m hosszú fűtőelemkötegek, alacsony dúsítású üzemanyaggal, esetleg kiégő méreggel.
- Mivel a **moderációt döntően a szilárd grafit moderátor okozza, a túlzott forrás a hűtést és a neutronelnyelést csak rontja, azaz nincs negatív visszacsatolással a láncreakcióra. Ez pozitív üreggyűthető és pozitív visszacsatolást jelent.**
- A zóna mintegy 3000 fűtőelemkötegből áll.
- A fűtőelemköteg hermetikus üzemanyagpálcákból áll, ezekben UO_2 pasztilák vannak.
- Az RBMK szintén alkalmas üzem közbeni fűtőelem átrakásra.

Az RBMK főbb jellemzői

- Grafit hűtésének javítására hővezető kontaktusok vannak a fűtőelem-csatorna fala és a grafitömb között, illetve hélium-nitrogén gázkeverék van a kettő közötti résben áramoltatva.
- A hélium-nitrogén gázrendszer csatornánként alul csatlakozik a reaktorra.
- A gázrendszer alkalmas fűtőelem és fűtőelem-csatorna szivárgás detektálásra is: magasabb nedvességtartalom és hőmérséklet utal erre.
- A zónát alul, felül és oldalt reflektor veszi körül, szintén grafit.

RBMK-1000



RBMK-1500

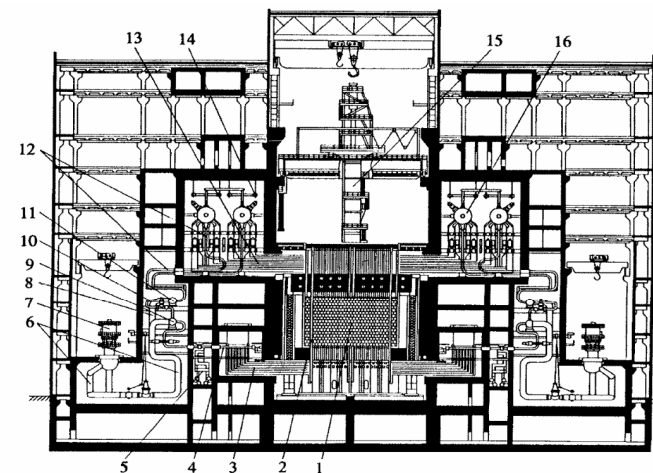


Fig. 1.7 Schematic cross-section through the main reactor building [4]:
 1 - graphite stack; 2 - fuel channel feed pipes; 3 - water pipes; 4 - group distribution header; 5 - emergency core cooling pipes; 6 - pressure pipes; 7 - main circulation pump; 8 - suction pipes; 9 - pressure header; 10 - bypass pipes; 11 - suction header; 12 - downcomers; 13 - steam/water pipes; 14 - steam pipes; 15 - refueling machine; 16 - separator drum

RBMK-1500

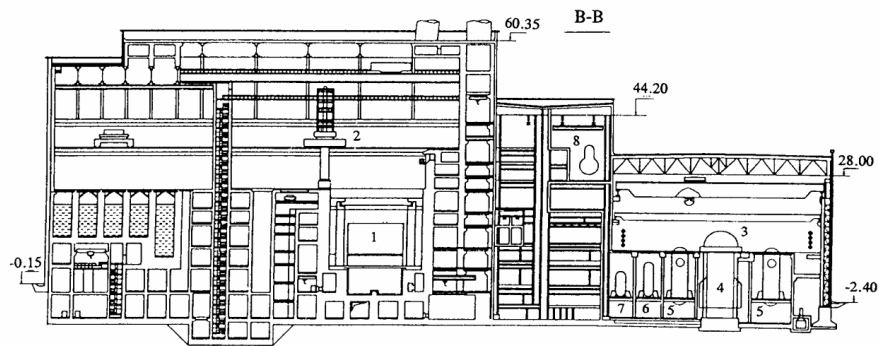


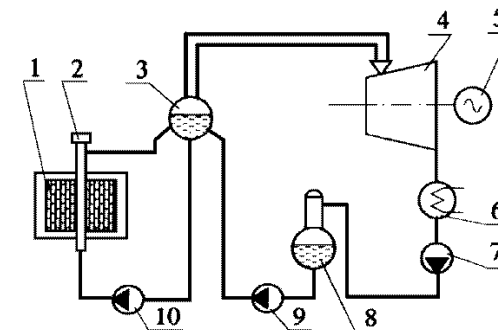
Fig. 1.6 Cross-section B-B of one unit of the Ignalina NPP [2]

1 - reactor, 2 - refueling machine, 3 - turbine, 4 - condenser, 5 - separator - reheater, 6 - evaporator, 7 - first stage of the condensate pump, 8- deaerator



RBMK

• RBMK hűtőkör egyszerűsített séma



1 - reaktor, 2 - fűtőelem/csatorna, 3 - gőz(szeparátor)dob, 4 - turbina, 5 - generátor, 6 - kondenzátor, 7 - kondenzátor szivattyú, 8 - légtelenítő, 9 - tápszivattyú, 10 - főkeringető szivattyú

RBMK

• Ignalina RBMK-1500 fő paraméterek

| | |
|--|----------------------------|
| Hűtőközeg | víz (víz-gőz keverék) |
| Kapcsolás | egykörös |
| Teljesítmény, MW: | |
| Hő (névleges) | 4800 |
| Hő (valós) | 4200 |
| Villamos (névleges) | 1500 |
| Zóna méretek, m: | |
| magasság | 7 |
| átmérő | 11,8 |
| Grafit reflektor vastagság, m: | |
| alsó-felső | 0,5 |
| oldal | 0,88 |
| Rácsosztás, m | 0,25 x 0,25 |
| Csatornák száma: | |
| üzemanyag | 1661 |
| SZBV | 235 |
| reflektor hűtés | 156 |
| ÜA | urán-dioxid |
| kezdeti dúsítás, U-235, % | 2,0 |
| Kiegész, MWnap/kg | 21,6 |
| FKSZ-ek száma | 8 |
| FKSZ forgalom, m ³ /s (m ³ /h) | 1,805 – 2,22 (6500 - 8000) |

RBMK

• Ignalina RBMK-1500 fő paraméterek

| | |
|--|-------------------------------|
| Hőmérséklet, °C: | |
| megengedhető maximum a fűtőelem középvezetékében | 2600 |
| megengedhető maximum a grafitban | 760 |
| megengedhető maximum fűtőelem burkolat-hőmérséklet | 700 |
| megengedhető maximum ÜA csatorna hőmérséklet | 650 |
| hűtőközeg-hőmérséklet a zóna belépésén | 260 - 266 |
| tápvíz-hőmérséklet | 177 - 190 |
| Nyomás, MPa (kgf/cm ²): | |
| gőzdobban | 6,86 (70) |
| csatorna gyűjtőfejen | 8,5 (86,6) |
| Zónaforgalom, m ³ /s (m ³ /h) | 10,83 – 13,33 (39000 - 48000) |
| Gőztermelés, kg/s (t/h) | 2056 - 2125 (7400 - 7650) |
| Gőzhányad a zóna kilépésnél, % | 23 - 29 |
| Maximális fűtőelem-csatorna paraméterek: | |
| Csatorna teljesítmény, kW | 4250 |
| Csatorna forgalom, m ³ /s (m ³ /h) | 0,0111 (40) |
| Gőzhányad csatorna kilépésnél, % | 36,1 |

RBMK

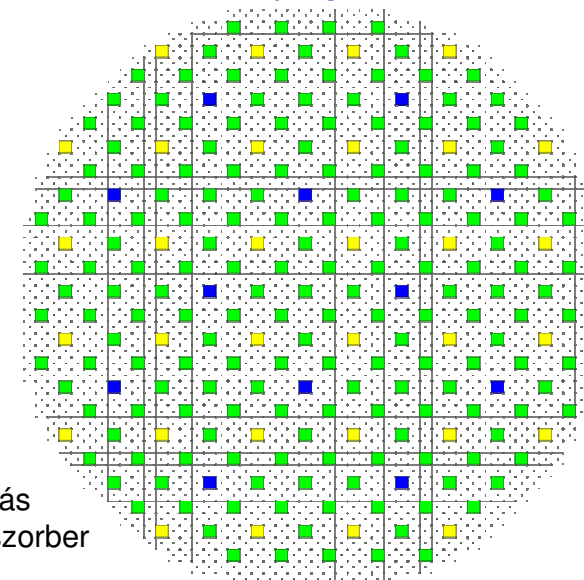
• RBMK – BWR összevetés

Table 1.3 Comparison of BWR and RBMK-1500 reactor parameters [3]

| Parameter | BWR* | RBMK |
|--|------|-------|
| Thermal power, MW | 3800 | 4800 |
| Core diameter, m | 5.01 | 11.80 |
| Core height, m | 3.81 | 7.0 |
| Core volume, m ³ | 75 | 824 |
| Mean specific power per core volume, MW/m ³ | 51 | 5.82 |
| Mean specific power per fuel quantity, MW/t | 24.6 | 25.4 |
| Mean power per fuel element length, kW/m | 19.0 | 15.0 |

* General electric design

Zóna és üzemanyag



RBMK-1000

Zöld (179):

szabályozó rudak

Kék (12): neutronforrás

Sárga (32): rövid abszorber

Zóna és üzemanyag

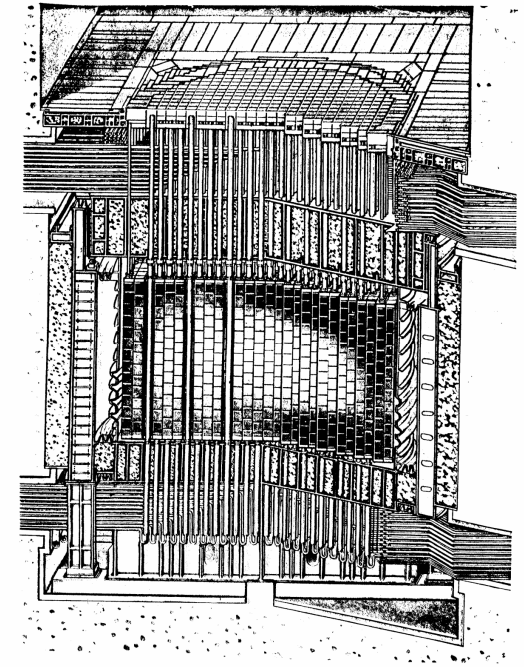


KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

113

Zóna és üzemanyag



KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Fig. 4.2 General view of the graphite stack and the water-steam piping

Zóna és üzemanyag

• RBMK-1500

- **Cirkónium (Zr 1% Nb) burkolatú, 13,6 mm átmérőjű fűtőelemek, alacsony dúsítású urán-dioxid.**
 - Kezdeti dúsítás eredetileg **2%**, 1997-től a friss ŰA **2,4%**-os.
 - Egy fűtőelemkötegben 18 pálca. Egy csatornában két fűtőelemköteg.
 - **1661 függőleges csatorna, 7 m aktív hossz.**
 - Csatornák szintén cirkónium ötvözetből (Zr 2,5% Nb), kilépő és belépő vezetékek rozsdamentes acélból.
 - A tervezési kiegész 21,6 MWnap/kg, ezt a tényleges kiegész nem éri el nukleáris biztonsági megszorítások miatt. Ezek célja a gőz reaktivitásegyütthatójának minimalizálása.
 - A valós kiegészi szint 12-16 MWnap/kg 2%-os ŰA esetén, és minimum 21 MWnap/kg a 2,4 %-o s ŰA esetén.
 - A csatornába alul belépő hűtőközeg 30°C-os aláhűtésű, a csatornákból történő kilépésnél a maximális gőz térfogathányad 36%.
- Névleges hűtőközeg forgalom 10 000 kg/s.

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

115

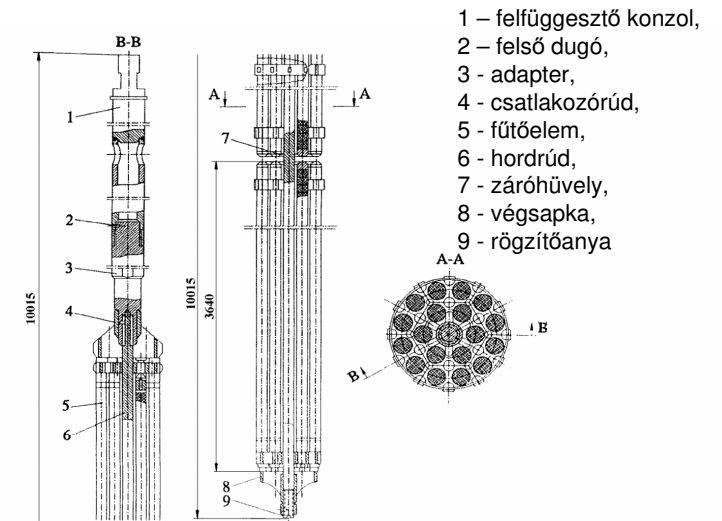


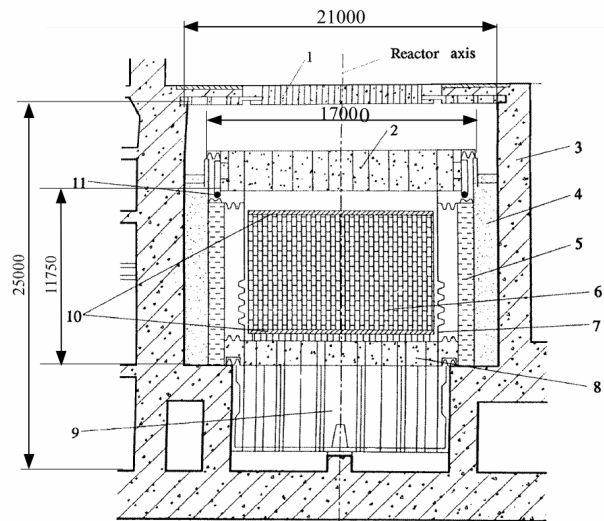
Fig. 1.8 Fuel assembly:

1 - suspension bracket; 2 - top plug; 3 - adapter; 4 - connecting rod; 5 - fuel rod; 6 - carrier rod; 7 - end sleeve; 8 - end cap; 9 - nut. (Dimensions in mm)

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

116



- 1 – reaktorfedél, a csarnok eltávolítható padlója,
- 2 – felső fémszerkezet (azbeszt),
- 3 – beton akna,
- 4 – homok gyűrű,
- 5 – víztartály gyűrűs akna,
- 6 – grafit blokkok,
- 7 – „reakortartály”,
- 8 – alsó fémszerkezet,
- 9 – alátámasztás
- 10 – acél blokkok
- 11 – görgős lábak

Fig. 1.9 Cross-section of the reactor vault:
 1 - top cover, removable floor of the central hall; 2 - top metal structure filled with serpentinite; 3 - concrete vault; 4 - sand cylinder; 5 - annular water tank; 6 - graphite stack; 7 - reactor vessel; 8 - bottom metal structure; 9 - reactor support plates; 10 - steel blocks; 11 - roller supports. (Dimensions in mm)

• RBMK-1500

– 2488 grafit oszlop

– moderátor

– szerkezeti tartás

– nagy hőkapacitás

• négyzet keresztmetszetű hasábok

– 0,25 m x 0,25 m

– H= 0,2m;0,3m;0,5m; **0,6 m**

– ~1700 tonna

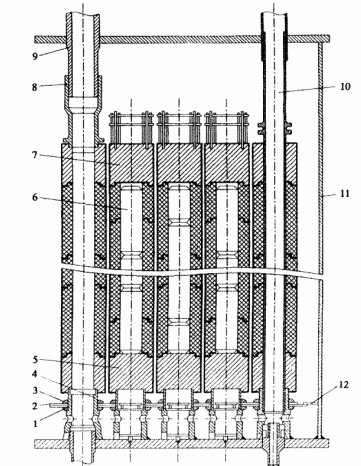


Fig. 4.3 Segment of the graphite stack
 1 - top ring, 2 - diaphragm, 3 - bottom ring, 4 - bushing, 5 - steel support plates, 6 - graphite rods, 7 - shield plates, 8 - standpipe, 9 - guide pipe, 10 - reinforcing tube (reflector cooling channel), 11 - outer steel shell, 12 - ring plate

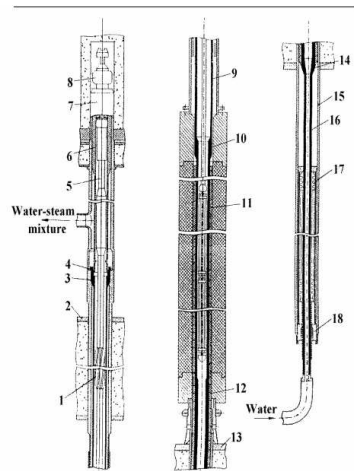


Fig. 4.10 Fuel channel
 1 - steel biological shield plug, 2,10 - top and bottom metal structures, respectively, 3 - top part of the fuel channel, 4 - welding-support ledge, 5 - fuel assembly support bracket, 6 - encasement cylinder, 7 - seal plug, 8 - graphite cylinder, 9 - central part of the channel, 11 - bottom part of the channel, 12 - thermal expansion bellows compensator, 13 - stuffing box

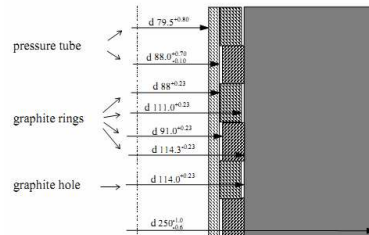


Fig. 4.11 Graphite and zirconium interaction zone

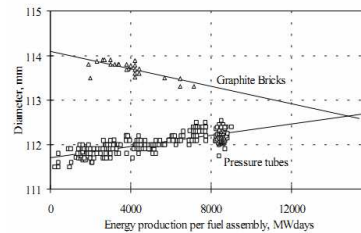


Fig. 4.13 Change of hole diameter in graphite bricks and equivalent diameter of pressure tubes (pressure tube channel & graphite rings) during operation of Ignalina NPP unit 1 [62]

• Zóna felső lemez

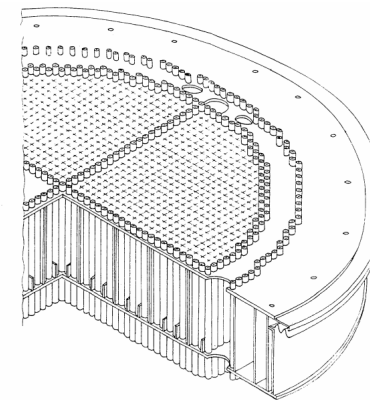


Fig. 4.5 Top metal structures

• Felső takaró szerkezet

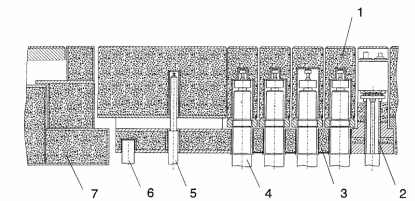


Fig. 4.6 Segment of the top cover
 1 - removable blocks, 2 - top cover of the control rod channel, 3 - bottom block, 4 - top cover of the fuel channel, 5 - top cover of the temperature instrumentation channel, 6 - top cover of the reflector cooling channel, 7 - peripheral part of the cover



SZBV rudak

- Szabályozó és biztonságvédelmi rudak
 - független hűtőkör
 - 2 alcsoport: **lokális automatikus szabályozás** (LAC/LACR), lokális BV (LEP/LSR)
 - 5 kialakítás: **kézi szabályozórúd (MCR), rövid abszorber, BV (SCRAM) rudak**, átalakított rudak
 - **abszorber tartalmú grafit követők**

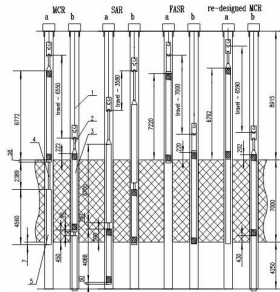


Fig. 6.20 Control rod design
a - withdrawn position, b - inserted position,
1 - suspension steel tape, 2 - fastening unit, 3 - absorber,
4 - telescopic joint (pull), 5 - graphite

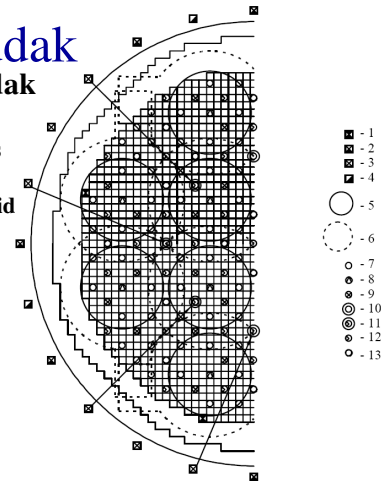


Fig. 6.19 Arrangement of control and protection system absorber rods in the core
1- fission chamber (4 per reactor), 2 - ionization chamber for reactor startup (8 per reactor), 3 - ionization chamber for normal reactor operation (12 per reactor), 4 - chart recorder (4 per reactor), 5 - LAC zone (12 per reactor), 6 - LEP zone (12 per reactor), 7, 8, 9, 10 - Manual Control Rods, 11, 12 - Shortened Absorber Rods, 13 - Fast-Acting Scram Rods

SZBV rudak

- Szabályozó és biztonságvédelmi rudak
 - független hűtőkör
 - 2 alcsoport: **lokális automatikus szabályozás** (LAC/LACR), lokális BV (LEP/LSR)
 - 5 kialakítás: **kézi szabályozórúd (MCR), rövid abszorber, BV (SCRAM) rudak**, átalakított rudak
 - **abszorber tartalmú grafit követők**

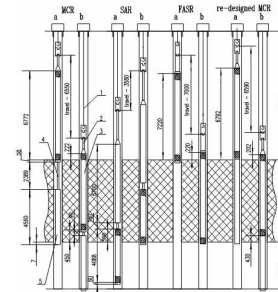


Fig. 6.20 Control rod design
a - withdrawn position, b - inserted position,
1 - suspension steel tape, 2 - fastening unit, 3 - absorber,
4 - telescopic joint (pull), 5 - graphite

Grafit követőkazetták funkciója:

- árnyékolás lefelé
- az SZBV rúd helyén a csatornát könnyűvíz töltené ki, az pedig neutronmérget a grafit moderátorú környezetben, ezért a megfelelő moderációhoz is szükségesek a grafit követők

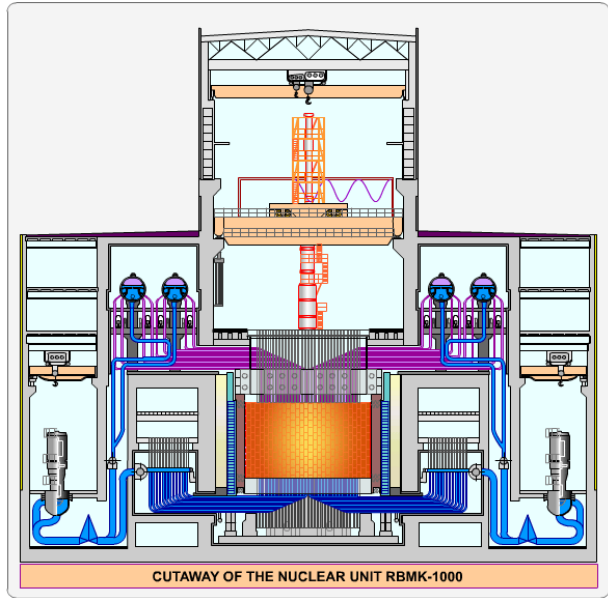
Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500

- A primer hűtőközeg a zóna teljesítményének 95%-át szállítja el: **a hőteljesítmény 95%-a a fűtőelemen végbemenő hasadásokból, 5% a grafitból származik a moderáció és a gamma fűtés eredményeként.**
- A víz már a csatornák alsó részében eléri a telítést. A csatornákból **kilépő közegek gőz tömegaránya 23-29,1%.**
- **Két hurok**
- Mindkét hurok két gözdobbal rendelkezik, melyekben a gőzszeperáció lejátszódik.
- A gözdobok vízszintes hengeres tartályok, belső átmérő 2,6 m, hossz 33,76 m, elliptikus végekkel. A gözdobok falvastagsága 115 mm.
- A gözdobok össze vannak kötve mind az alsó, vízzel telt, mind a felső, gőztartalmú részen.

Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500

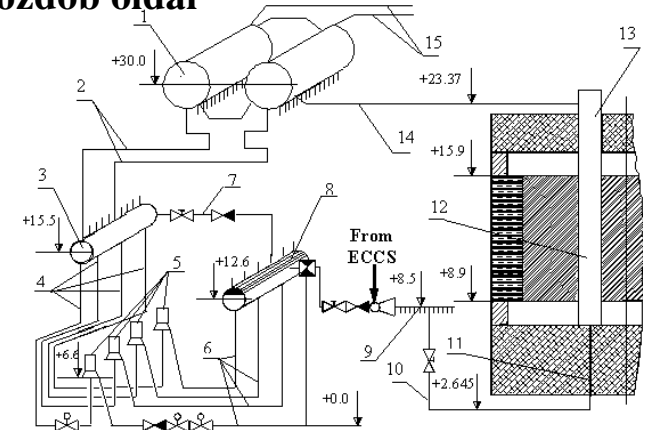
- A szeparált víz összekeveredik a visszatérő tápvízzel, a szívófejbe kerül 24 leszálló vezetéken mindkét hurokban.
- A **szívófejből** négy vezetéken halad tovább a **négy FKSZ** felé.
- **Normál üzembn három FKSZ üzemel, a negyedik tartalék.**
- Az FKSZ-ek függőleges, centrifugális, egyfokozatú szivattyúk.
- Az FKSZ-től a nyomófej vezetékeken jut a **nyomófejbe**. A szívófejek és a nyomófejek hat by-pass vezetékkel vannak összekötve, melyeken tolózárak és visszacsapószelepek vannak.
- A nyomófejből húsz vezetéken keresztül húsz **csoportelosztófejbe** jut a hűtőközeg.
- Mindegyik csoportelosztó fejhez 40-43 zóna alatti csővezeték csatlakozik, melyek a fűtőelemcsatornákhöz vezetik a hűtőközeget.
- A gözdobból a gőz a turbinákra van vezetve.

Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500



Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500

• Reaktor-gőzdob oldal



Egy primerköri hurok sémája

1 - gőzdob, 2 - leszálló vezeték, 3 - szívófej, 4 - FKSZ szívóvezetékek, 5 - FKSZ, 6 - FKSZ nyomóoldali vezeték, 7 - fejek közötti by-pass vezeték, 8 - nyomófej, 9 - csoportosító fej forgalomszabályozóval, visszacapó szeleppel és keverővel, 10 - zóna alatti csővezeték, 11 - ÜA csatorna a zóna alatt, 12 - ÜA csatorna a zónában, 13 - ÜA csatorna a zóna fölött, 14 - víz-gőz vezeték, 15 - gőzvezeték

Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500 (*)

• Gőzdob

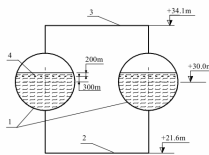


Fig. 5.8 Connections at the liquid and steam level between separator drums
1 - separator drums, 2 - connecting pipes at the water level, 3 - connecting pipes at the steam level, 4 - submerged perforated sheet

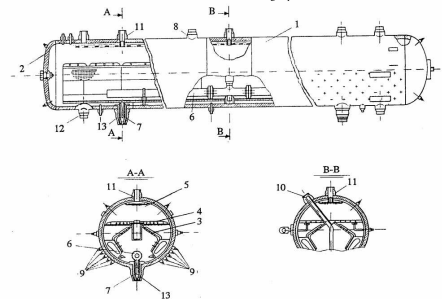


Fig. 5.7 Separator drum

1 - vessel, 2 - cover, 3 - impact plates for steam-water flow, 4 - submerged perforated sheet, 5 - top perforated shield, feed water distribution header, 7 - jet spray nozzle, 8 - nozzle of steam-pipe, 9 - nozzle of steam-water piping, nozzle of feed water, 11 - nozzle of connection in the steam zone, 12 - nozzle of connection in the water zone, nozzle of the downcomers

Table 5.4 Specifications* of the separator drum (39,40) (Type - SP-2100)

| | |
|--|-------------|
| Number per reactor | 4 |
| Steam generation, kg/s | 513.9-531.2 |
| Steam-water flow rate, m ³ /s | 2.71-3.33 |
| Average steam content in the steam-water mixture (mass fraction), % | 23-29 |
| Operational pressure, MPa | 6.47-6.96 |
| Design pressure, MPa | 7.5 |
| Outlet water content in the steam flow (mass fraction), % | >0.1 |
| Feedwater temperature, °C | 177-190 |
| Feedwater flowrate, kg/s | 513.9-531.2 |
| Operational level above the perforated sheet, mm | 200 ± 50 |
| Stored operational water volume for nominal steam generation and water level, m ³ | 63 |
| Reduced steam flow velocity per evaporation cross-section, m/s | 0.23 |
| Velocity of steam in perforations of submerged sheet, m/s | 3.1 |
| Velocity of steam in perforations of upper shield, m/s | 20.5 |
| Outlet steam velocity, m/s | 18.62 |
| Size of separator drum: | |
| - total length, m | 33.76 |
| - inside diameter, m | 2.6 |
| - distance between submerged sheet and upper shield, m | 0.95 |
| Dry mass of separator drum, kg | 292000 |
| Number of outlets: | |
| - steam-water piping (nominal diameter d _n =90mm) | 424 |
| - steam piping (d _n = 300 mm) | 16 |
| - water downcomer (d _n = 300 mm) | 12 |
| - connecting pipes at the water level (d _n =300mm) | 6 |
| - connecting pipes at the steam level (d _n =300mm) | 5 |
| - pressure metering outlets (d _n = 10 mm) | 4 |
| - level meters (d _n = 50 mm) | 32 |
| Submerged perforated sheet: | |
| - thickness, mm | 6 |
| - diameter of perforations, mm | 10 |
| - number of perforations | 70280 |
| Upper perforated shield: | |
| - thickness, mm | 5 |
| - diameter of perforations, mm | 10 |
| - number of perforations | 10620 |

* Thermal parameters at 4200 MW(th) power

Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500 (*)

• Csoportosító fej

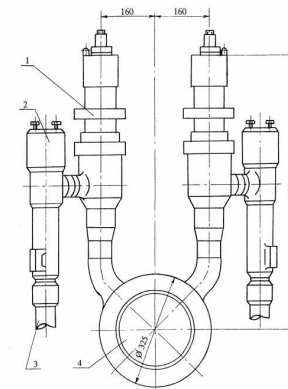


Fig. 5.3 Group distribution header

1 - isolation and control valve, 2 - ball type flow-rate meter, 3 - coolant water pipe leading to the fuel channel, 4 - group distribution header

Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500

• Gőzdob-kondenzátor oldal

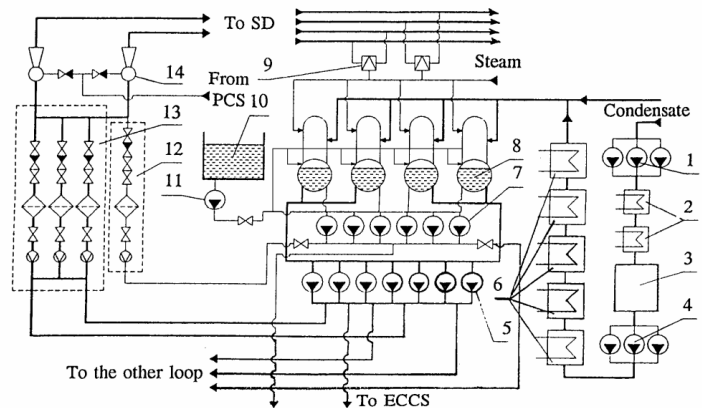


Fig. 5.14 Water feedback system

1 - condensate pump of the first stage, 2 - main ejector and seal ejector cooler, 3 - condensate filter, 4 - condensate pump of the second stage, 5 - MFWPs, 6 - low pressure reheaters, 7 - AFWPs, 8 - deaerators, 9 - SDV-D, 10 - demineralized water storage tank, 11 - auxiliary deaerator makeup pumps, 12 - auxiliary feeder, 13 - main feeder, 14 - mixer

SDV – steam discharge valve – lefúvató szelep

•SDV-D: légtelenítőbe redukáló

Fő hűtőkör (primerkör) - RBMK-1500

• Gőzdob-kondenzátor oldal

– normál üzemen 10%-os nyomásingadozásokon belül (névlegeshez viszonyítva) a fő tápszivattyúk szállítják a hűtőközeget

- 6 db párhuzamos szivattyú
- +1 tartalék

– kisegítő tápvízszivattyúk

- FKSZ-ek feltöltése reaktor indítás előtt
- indításkor vagy leálláskor, vagy alacsony nyomású üzem esetén, max. 10%-os teljesítmény mellett
- fő tápvízszivattyúk kikapcsolása esetén
- kisegítő üzemzavari hűtőrendszer funkció!

Gőzrendszer - RBMK-1500

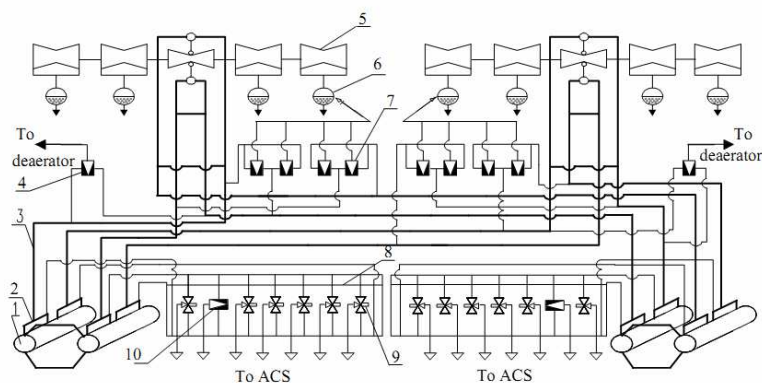


Fig. 5.13 Steam piping

1 - separator drum, 2 - header, 3 - main steam pipes, 4 - SDV-D, 5 - turbogenerators, 6 - condensers, 7 - SDV-C, 8 - high pressure steam loop, 9 - MSV, 10 - SDV-A

SDV – steam discharge valve – lefúvató szelep

- SDV-C: kondenzátorba redukáló
- SDV-A: lokalizációs rendszerbe (ACS) redukáló

Szivárgásfelügyelő rendszer - RBMK-1500

- A reaktor és a technológiai rendszerek víztartalmának szabályozása
- Üzemanyag-csatorna, SZBV csatorna, reflektor csatorna szivárgások felügyelete
- A reaktortérben lévő vezetékek felületéről lecsurgó kondenzátumok összegyűjtése
- A reaktor fémszerkezeteinek gázüregeiben (melyek a biológia védelem gyűrésakna víztartályaihoz vannak közel) kialakuló kondenzátumok gyűjtése
- Az ionizációs kamrákban kialakuló kondenzátumok gyűjtése

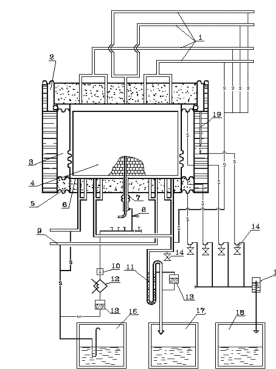


Fig. 4.19 Block diagram of the reactor draining system

1 - upper steam-gas release circuit pipelines, 2 - upper interbellow cavity, 3 - reactor interface cavity, 4 - reactor gas cavity, 5 - upper interbellow cavity, 6 - bottom metal structure, 7 - control rod channel bellow, 8 - temperature detector, 9 - upper steam-gas release circuit pipelines, 10 - drainage visual indicators, 11 - 8-meter hydrolock, 12 - heat exchanger, 13 - drainage measuring tank, 14 - valves for visual drainage monitoring, 15 - tank-hydrolock, 16 - draining tank, 17 - "dirty" demineralized water tank, 18 - floor drain water reception tank 19 - peripheral ionization chambers

Biztonságvédelmi rendszerek, RBMK-1500

- SZBV rudak
 - Adott csatorna pozíciókba felülről vannak bevezetve
 - Ezeket a csatornákat is víz hűti, a primer körtől függetlenül
- Funkció szerint több csoportba sorolhatók
 - teljesítmény szabályozás, periódusidő szabályozás
 - automatikus teljesítménytartás
 - az in-core és ex-core detektorok jele alapján
 - radiális teljesítmény-eloszlás szabályozása
 - a neutrondetektorok jelének ingadozása esetén teljesítmény-csökkentés
 - gyors teljesítmény-csökkentés
 - reaktor leállítás a szabályozó rudakkal (BV rudak nélkül)
 - reaktor leállítás szabályozó és BV rudakkal (BV funkció)
- Két csoport, mindkettő egyenként képes az összes funkció ellátására

Zónaüzemzavari hűtőrendszer – RBMK-1500

- Üzemzavari/baleseti szituációban a zóna hűtésének biztosítása, az elveszett hűtőközeg pótlása
- Remanens hő eltávolítása
- Az üzemanyag szerkezetben és a grafit tömbökben jelen lévő hő eltávolítása
 - számítások szerint az üzemanyagban tárolt hő (nem a bomláshő!) egy tranziens első 100-120 másodpercében elvonható
 - a **grafit lehűtéséhez viszont 5-7 óra szükséges**
 - **az első pár órában a grafit kétszer annyi hőt bocsát ki magából, mint amennyi a remanens hő**

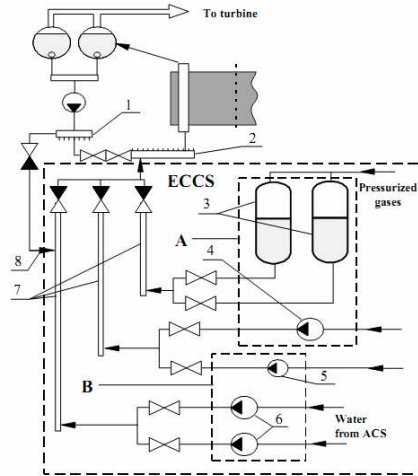
Zónaüzemzavari hűtőrendszer – RBMK-1500

- Rövidtávú (gyors), hosszútávú (lassú) rendszer
 - mindkettő a névleges üzemi nyomáson tud vizet juttatni a hűtőkörbe
- Rövidtávú ZÜHR
 - Azonnali hűtővízpótlást biztosít
 - Három független rendszer, egyenként a szükséges hűtési kapacitás ~50%-át tudják ellátni.
 - Ezek közül kettő gázatmoszférával előnyomott hidroakkumulátorokból, a harmadik a tápszivattyúval a légtelenítőből.
 - Ez a rendszer csak a sérült hurkot látja el hűtéssel.

Zónaüzemzavari hűtőrendszer – RBMK-1500

- Hosszútávú rendszer
 - Három független, 50% kapacitású ág.
 - Két ág a lokalizációs rendszer meleg kondenzátum tartályából veszi a közeget (6 ZÜHR szivattyú, egyenként 70 kg/s), a harmadik hat kisegítő tápvízszivattyú segítségével a légtelenítőből.
 - A ZÜHR víz három független fejen keresztül éri el a reaktort.
 - A fejekhez visszacsapó szeleppel ellátott vezetékek csatlakoznak. ezek egyesülnek, majd a csoportelosztó fej keverőbe csatlakoznak, melyben egy forgalomkorlátozó van. Ez a korlátozó korlátozza az átáramló mennyiséget, ha a fej maga is törött lenne. A hosszútávú rendszer mindkét hurokba táplál üzemzavari hűtőközeget. A légtelenítők vize kiegészíthető tartalék tartályok vizével is.

Zónaüzemzavari hűtőrendszer – RBMK-1500



A: rövidtávú (gyors)
B: hosszútávú

Fig. 3.1 Emergency core cooling system flow diagram [4]:

A - short-term cooling subsystem; B - long-term cooling subsystem; 1 - MCP pressure header; 2 - group distribution header; 3 - ECCS accumulator; 4 - main feedwater pump; 5 - auxiliary feedwater pump; 6 - ECCS pump for pumping water from ACS hot condensate chamber; 7 - ECCS header; 8 - ECCS bypass

RBMK-1500 vezénylő

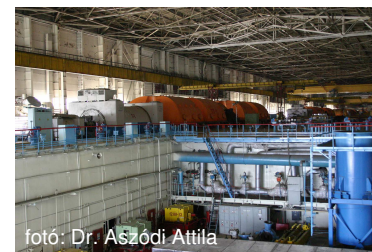
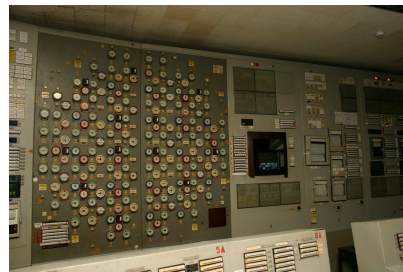
Felosztás technológia szerint:

- Reaktoroperátor - zónafelügyelet;
- Primerkörü mérnök – primerkörü felügyelet: víz- gőzrendszerek;
- Turbinaoperátor – turbinák és villamos rendszerek felügyelete
- Főoperátor (műszakvezető): a három operátor koordinálása, általános blokkfelügyelet.

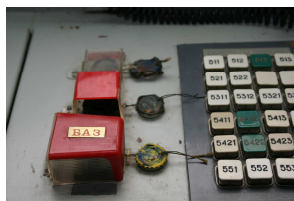


Csernobil 1. blokk – 2005. május

- Leállítva: 1996.11.30.



fotó: Dr. Aszódi Attila



fotók: Dr. Aszódi Attila

Csernobil 1. blokk – 2005. május



fotók: Yamaji Bogdán

Felhasznált irodalom

- Lithuanian International Nuclear Safety Center
 - <http://www.lei.lt/insc/index.html>
 - Ignalina Source Book
 - Ignalina Handbook
- IAEA Safety Report Series 43: Accident analysis for Nuclear Power Plants with Graphite Moderated Boiling Water RBMK Reactors
- IAEA: Mitigation of Intergranular Stress Corrosion Cracking in RBMK Reactors
- Ignalina atomerőmű weboldal: <http://www.iae.lt>
- MNT/FINE csernobili expedíciója, 2005. május-június

Gázhűtésű reaktorok – Gas Cooled Reactors (GCR)

Gázhűtésű reaktorok

- 14 üzemelő GCR blokk, 7685 MWe
- Két alaptípus: Magnox és AGR
 - utolsó MAGNOX blokk: Wylfa-1 leállítva 2015. 12. 30-án
- Európában: UK

Power reactors operating in the UK

| Plant | Type | Present capacity (MWe net) | First power | Expected shutdown |
|------------------------|------|----------------------------|-------------|-------------------|
| Dungeness B 1&2 | AGR | 2 x 520 | 1983 & 1985 | 2028 |
| Hartlepool 1&2 | AGR | 595, 585 | 1983 & 1984 | 2024 |
| Heysham I 1&2 | AGR | 580, 575 | 1983 & 1984 | 2024 |
| Heysham II 1&2 | AGR | 2 x 610 | 1988 | 2030 |
| Hinkley Point B 1&2 | AGR | 475, 470 | 1976 | 2023 |
| Hunterston B 1&2 | AGR | 475, 485 | 1976 & 1977 | 2023 |
| Torness 1&2 | AGR | 590, 595 | 1988 & 1989 | 2030 |
| Sizewell B | PWR | 1198 | 1995 | 2035 |
| Total: 15 units | | 8883 MWe | | |

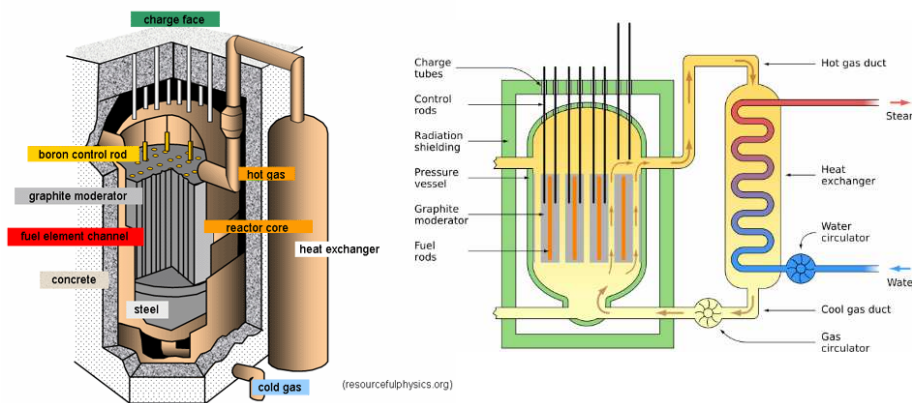
<http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx> (2016.11.28.)

Magnox reaktorok (*)

| MAGNOX | | first grid | shutdown | MWe |
|-------------------|--------------------|------------|----------|-----|
| BERKELEY-1 | Permanent Shutdown | 1962 | 1989 | 138 |
| BERKELEY-2 | Permanent Shutdown | 1962 | 1988 | 138 |
| BRADWELL-1 | Permanent Shutdown | 1962 | 2002 | 123 |
| BRADWELL-2 | Permanent Shutdown | 1962 | 2002 | 123 |
| CALDER HALL-1 | Permanent Shutdown | 1956 | 2003 | 49 |
| CALDER HALL-2 | Permanent Shutdown | 1957 | 2003 | 49 |
| CALDER HALL-3 | Permanent Shutdown | 1958 | 2003 | 49 |
| CALDER HALL-4 | Permanent Shutdown | 1959 | 2003 | 49 |
| CHAPELCROSS-1 | Permanent Shutdown | 1959 | 2004 | 48 |
| CHAPELCROSS-2 | Permanent Shutdown | 1959 | 2004 | 48 |
| CHAPELCROSS-3 | Permanent Shutdown | 1959 | 2004 | 48 |
| CHAPELCROSS-4 | Permanent Shutdown | 1960 | 2004 | 48 |
| DUNGENESS A-1 | Permanent Shutdown | 1965 | 2006 | 225 |
| DUNGENESS A-2 | Permanent Shutdown | 1965 | 2006 | 225 |
| HINKLEY POINT A-1 | Permanent Shutdown | 1965 | 2000 | 235 |
| HINKLEY POINT A-2 | Permanent Shutdown | 1965 | 2000 | 235 |
| HUNTERSTON A-1 | Permanent Shutdown | 1964 | 1990 | 150 |
| HUNTERSTON A-2 | Permanent Shutdown | 1964 | 1989 | 150 |
| OLDBURY A-1 | Permanent Shutdown | 1967 | 2012 | 217 |
| OLDBURY A-2 | Permanent Shutdown | 1968 | 2011 | 217 |
| SIZEWELL A-1 | Permanent Shutdown | 1966 | 2006 | 210 |
| SIZEWELL A-2 | Permanent Shutdown | 1966 | 2006 | 210 |
| TRAWSFYNYDD-1 | Permanent Shutdown | 1965 | 1991 | 195 |
| TRAWSFYNYDD-2 | Permanent Shutdown | 1965 | 1991 | 195 |
| WYLFA-2 | Permanent Shutdown | 1971 | 2012 | 490 |

2013.09.12

Magnox általános felépítés



Magnox általános felépítés

- **Nyomott-tartályos, szén-dioxid gázzal hűtött, grafit moderátoros reaktorok természetes (nem dúsított) urán üzemanyaggal.** Nevét a **Magnox ötvözet**ről kapta, mely a fűtőelemburkolat anyaga: Mg-Al ötvözet nem oxidálódó borítással (**Magnesium non-oxidising**).
- Magnox: alacsony befogási hatáskeresztmetszet, ellenben csak alacsony hőmérsékletet (~360°C) bír, és vízzel reagál (kiégett üa. pihentetése!).
- Szabályozórúdak: bóracél
- A **korai típusok acél reaktortartállyal** épültek, a **későbbiek (Oldbury, Wylfa) vasbeton reaktortartállyal**; többségük gömb alakú, de vannak hengeresek is.
- Üzemi nyomás: 6,9 – 19,35 bar acél esetében, a két betontartályos konstrukció esetén 24,8 bar és 27 bar.
- Üzem közbeni átrakás lehetősége!

Magnox biztonság

- Jó inherens biztonsági jellemzők: szilárd szerkezet, alacsony teljesítmény-sűrűség, gáz hűtőközeg. Nincs szükség és nem is rendelkeznek szekunder konténmenttel.
- LOCA esetén nem kell számolni az üzemanyag jelentős sérülésével, így a burkolat döntően visszatartja a radioaktív anyagokat, feltéve, hogy a reaktort gyorsan leállítják (SCRAM).
- Forrás miatti gyors nyomásnövekedés a gáz hűtőközeg miatt nem fordulhat elő
- A régebbi acéltartályos kialakítás esetén a gőzfejlesztők és a gázvezetékek a beton biológiai védelmen kívül vannak.
 - Jelentős direkt gamma és neutron sugárzás („shine”).
 - Az ICRP szerint a Dungeness Magnox reaktor környezetében élők 2002-ben 0,56 mSv többletet szenvedtek el (lakossági korlát: 1 mSv/év!) csak emiatt.
 - A beton reaktortartályos konstrukcióban a betonon belül van a teljes gázkör, a lakossági dózisek jelentősen kisebbek.

Magnox reaktorok

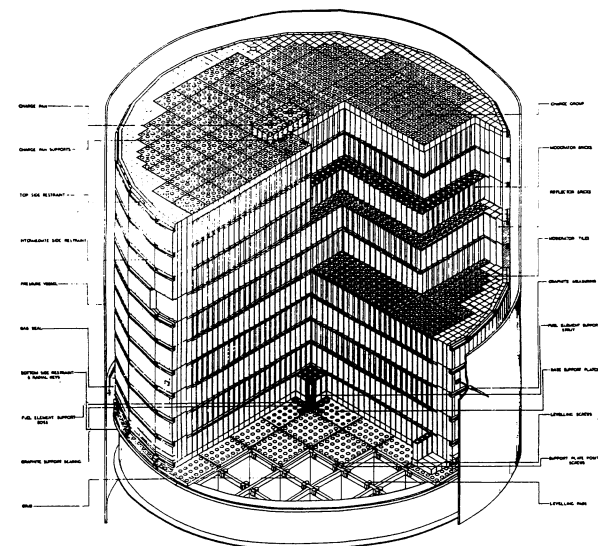


FIG 1 ISOMETRIC VIEW OF CALDER HALL GRAPHITE STRUCTURE

Magnox reaktorok

- Korai zóna felépítés:
 - négyzet alapú grafit téglák
- A grafit anizotrop módon változik a besugárzás és a hőterhelés hatására, és a besugárzás mértéke és a hőmérséklet érték is másképp befolyásolja viselkedést
 - Calder Hall, Chapelcross: azt feltételezték, a vízszintes és a függőleges méretnövekedés azonos, de a tapasztalat szerint igen eltérő volt.

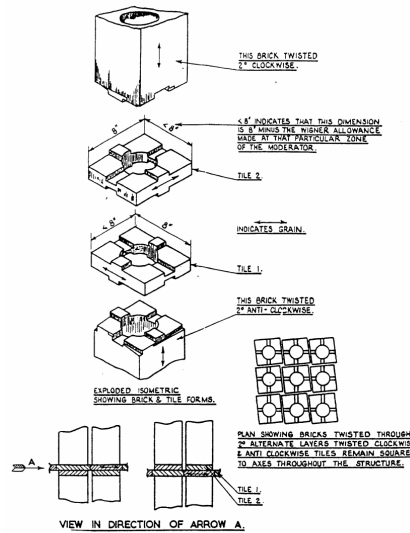


FIG 2 BRICK AND TILE ARRANGEMENT IN EARLY MAGNOX CORE DESIGNS

Magnox reaktorok

- Továbbfejlesztett zóna kialakítás:
 - szabad (radiális irányú) térfogatnövekedést enged meg a zóna számára anélkül, hogy a rács geometriája megváltozna

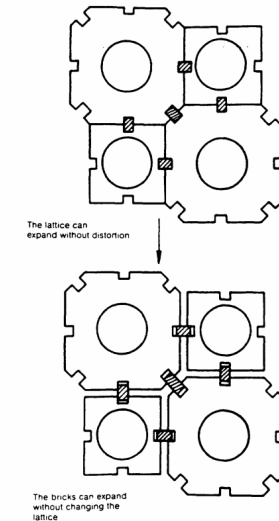


FIG 3 KEYING ARRANGEMENT IN LATER MAGNOX CORE DESIGNS

Magnox reaktorok



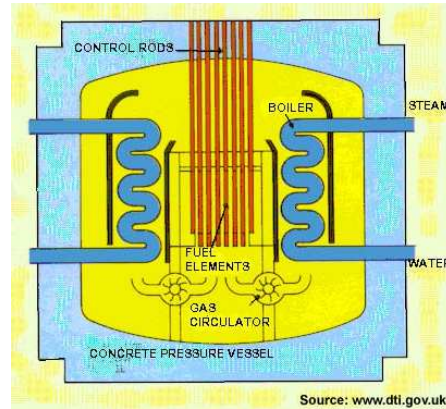
AGR reaktorok

- Üzemelő AGR blokkok

| Unit | Location | In-Service Date | Gross Output |
|------------------|--------------------|-----------------|--------------|
| DUNGENESS-B1 | Romney Marsh, Kent | 1983/04/03 | 615 MWe |
| DUNGENESS-B2 | Romney Marsh, Kent | 1985/12/29 | 615 MWe |
| HARTLEPOOL-A1 | Cleveland County | 1983/08/01 | 655 MWe |
| HARTLEPOOL-A2 | Cleveland County | 1984/10/31 | 655 MWe |
| HEYSHAM-A1 | Lancashire County | 1983/07/09 | 625 MWe |
| HEYSHAM-A2 | Lancashire County | 1984/10/11 | 625 MWe |
| HEYSHAM-B1 | Lancashire County | 1988/07/12 | 680 MWe |
| HEYSHAM-B2 | Lancashire County | 1988/11/11 | 680 MWe |
| HINKLEY POINT-B1 | Somerset County | 1976/10/30 | 655 MWe |
| HINKLEY POINT-B2 | Somerset County | 1976/02/05 | 655 MWe |
| HUNTERSTON-B1 | Ayrshire County | 1976/02/06 | 644 MWe |
| HUNTERSTON-B2 | Ayrshire County | 1977/03/31 | 644 MWe |
| TORNESS 1 | Lothian County | 1988/05/25 | 682 MWe |
| TORNESS 2 | Lothian County | 1989/02/03 | 682 MWe |

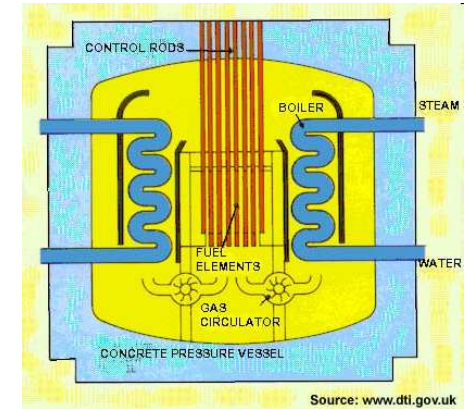
AGR általános felépítés

- Eredeti AGR felépítés célja: a gőz a hagyományos erőművekhez hasonló jellemzőkkel bírjon, így hagyományos turbinákat lehetett alkalmazni: 600 MWe, szén- és olajtüzelésű erőművekhez.
- Magnox továbbfejlesztése
- Alapkonceptió: 1200 MW villamos teljesítmény két 600 MW-os ikerblokkal
- **Vasbeton reaktortartály**
 - egy üregű (single cavity): a zóna, a gőzfejlesztők egy üregben
 - többüregű: a gőzfejlesztők (boiler) és a gázkeringetők (circulator) különálló üregben



AGR általános felépítés

- Az elérendő magas hőmérséklet és a grafit élettartamának hosszan tartása érdekében (magas hőmérsékleten oxidálódik CO_2 környezetben) a közeget recirkuláltatják
- UO_2 üzemanyag, 2,5-3,5%, rozsdamentes acél csövekben.
- A reaktortartály belső felületén acél burkolat, mely hőszigetelt és hűtött, ennek hőmérséklete 50-70 °C.

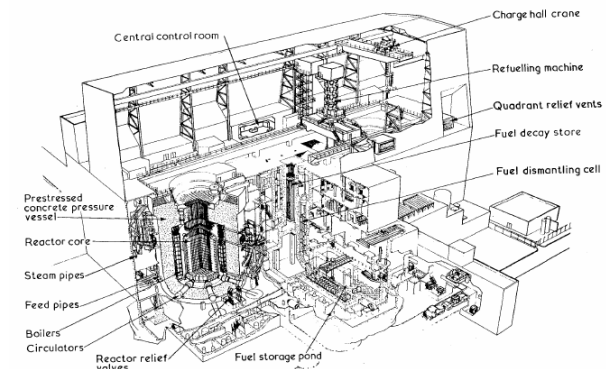


AGR általános felépítés

- Az eredeti konstrukció Be-alapú burkolattal számolt. Ez nem volt megfelelő, ezért növelték a dúsítást, hogy a nagyobb befogási hatáskeresztmetszettel rendelkező acélt lehessen burkolatanyagként alkalmazni. De ez jelentősen emelte az AGR villamos energia egységköltségét.
- A szén-dioxid gáz a zónán átáramolva eléri a 640 °C-ot és 43 bar nyomást, majd gőzfejlesztőbe jut, mely a zónán kívül, de a plattírozott vasbeton reaktortartályon belül van.
- Maximális megengedett fűtőelemburkolat-hőmérséklet 825 °C, maximális megengedett hűtőközeg hőmérséklet: 670 °C.
- A szabályozó és biztonságvédelmi rudak a grafit moderátorba hatolnak. A másodlagos leállító rendszer nitrogént juttat a hűtőközegbe. Egy tercier leállító rendszer bórtartalmú golyókat juttat a zónába.

AGR általános felépítés

- Jó termikus hatásfok: 41%, (modern PWR: 34%).
 - Magas hűtőközeg-hőmérséklet (~ 640 °C / 1184°F) gázokkal könnyen elérhető (PWR-ek: ~325°C).
 - Nagyobb zóna szükséges azonos egységteljesítmény eléréséhez, a kiégés alacsonyabb, tehát gazdaságatlanabbul égeti ki az üzemanyagot. Ez ellensúlyozza az előbbi előnyt.



AGR általános felépítés

- Eredetileg: üzem közbeni átrakás. Azonban a fűtőelemkötegek vibrációja névleges teljesítményen problémát jelentett
 - leterhelt üzemmódotban, vagy leállított reaktor esetén történik az átrakás.



AGR üzemanyag

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

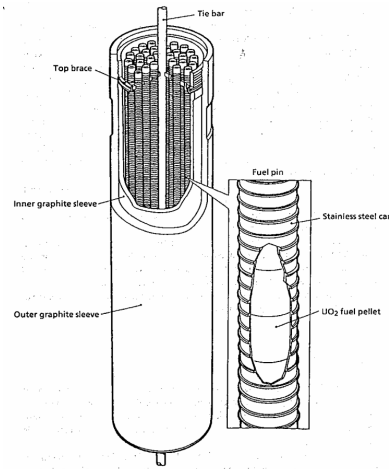


FIG. 4.2. AGR fuel element.

176

AGR paraméterek

TABLE 4.1. PRINCIPAL DIMENSIONS AND DESIGN PARAMETERS FOR HEYSHAM-2 AND TORNES AGRs

| | |
|--|---|
| <i>Pressure vessel</i> | |
| Internal height | 21.9 m |
| Internal diameter | 20.3 m |
| Wall thickness | 5.8 m |
| Top slab centre thickness | 5.4 m |
| Bottom slab centre thickness | 7.5 m |
| <i>Reactor primary circuit</i> | |
| Gas baffle internal diameter | 13.9 m |
| Gas baffle dome height above liner floor | 19.9 m |
| Core restraint tank outside diameter | 13.6 m |
| Type of main boiler | Two-start, once-through serpentine platen rectangular unit |
| Number of main boilers | 4 |
| Number of boiler units per main boiler | 3 |
| Type of decay heat boiler | One-start, once-through serpentine platen |
| Number of gas circulators | 8 (2 per quadrant) |
| Type of gas circulators | Centrifugal, single stage, encapsulated, variable inlet guide vanes |
| <i>Reactor core</i> | |
| Number of fuel assemblies | 332 |
| Number of control assemblies | 89 (44 bulk rods, 45 regulating rods) |
| Number of secondary shutdown system channels | 163 |
| Height of core (including neutron shields) | 12.8 m |
| Overall width of core across flats | 12.4 m (regular 16 sided polygon) |
| <i>Full load performance parameters</i> | |
| <i>Reactor</i> | |
| Reactor heat | 1556 MW |
| Bulk circulator outlet gas temperature | 298°C |
| Bulk fuel channel outlet gas temperature | 640°C at top of fuel stack |
| Net circulator flow | 4269 kg·s ⁻¹ |
| Gas pressure at circulator outlet | 43.3 bar abs |
| Pressure difference across gas baffle dome | 2.14 bar |
| Total primary circuit pressure drop | 6.0 MW |
| Peak channel power | 6.0 MW |

TABLE 4.1. (cont.)

| | |
|---------------------------------------|------------------------|
| <i>Boilers</i> | |
| Feedwater flow | 500 kg·s ⁻¹ |
| Feedwater temperature | 157°C |
| HP steam temperature | 541°C |
| HP steam pressure | 166 bar abs |
| Reheater steam temperature | 538°C |
| Reheater steam pressure | 40.4 bar |
| <i>Turbine generator</i> | |
| Turbine heat rate | 8400 kJ per kW·h |
| Nominal gross electric output/reactor | 660 MW |

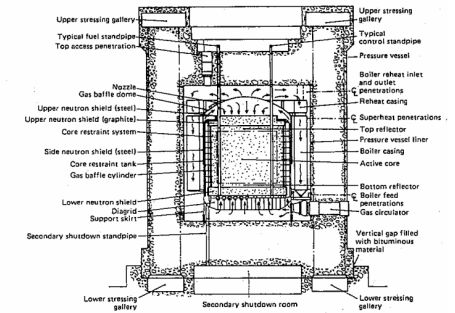


FIG. 4.1. Elevation of reactor pressure vessel.

77

AGR jellemzők

- Hűtőközeg áramlás:
 - Főáram (~70%) : a zóna körüli szerkezetben áramlik felfele, majd a zóna feletti keverőtérben visszafordul, a grafitban kialakított hűtőcsatornákon keresztül leáramolva hűti a moderátort. Ezután a főáram csatlakozik a:
 - Mellékáramhoz (~30%): a fűtőelem csatornákon felfelé áramló gáz, ez hűti a fűtőelemek felületét. A hűtőközeg innen jut a gőzfejlesztőkbe.

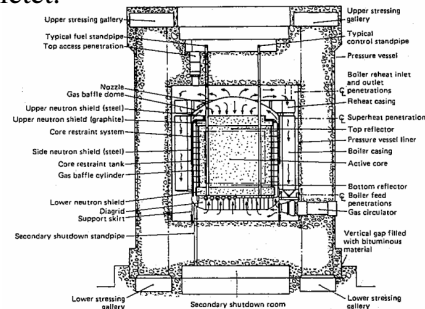


FIG. 4.1. Elevation of reactor pressure vessel.

78

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bt

AGR jellemzők

- Primer hűtőkör:
 - nyolc gázkeringető (egyenként 2-2 négy negyedbe [kvadránsba] rendezve)
 - 43,3 bar abs
 - 298 °C belépő hőmérséklet
 - ~640 °C kilépő hőmérséklet
 - négy gőzfejlesztő (negyedenként egy)
 - a kvadránsok fizikailag egymástól el vannak választva
- Szekunder kör:
 - tápvíz hőmérséklet: 157 °C
 - gőz hőmérséklete: 541 °C
 - egy blokk egy turbinát hajt meg

KoNET, CANDU, RBMK, GCR

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

179

AGR zóna

- AGR zóna

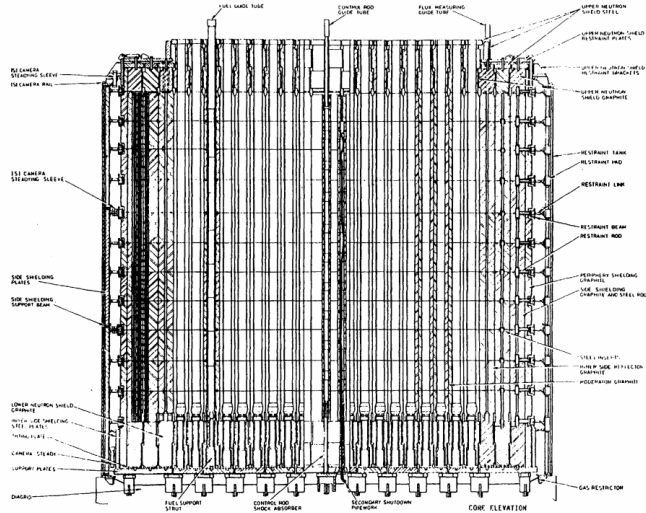
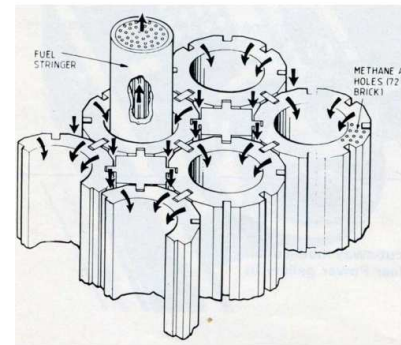


FIG 4 SECTION THROUGH HEYSHAM 2 AND TORNESS REACTOR CORE

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

AGR zóna

- Az AGR esetén a grafit terhelése jóval nagyobb volt (mint a Magnoxnál), ezért új geometriát kellett kialakítani, illetve új anyagösszetételt kifejleszteni.
- Nagyobb grafit blokkok: üzemanyag csatornák és reflektor blokkok, befoglaló alak nyolcszög
- Kisebb méretű blokkok: SZBV rúd csatornák és grafitűtő csatornák, négyzet



KoNET, CANDU, RBMK, GCR

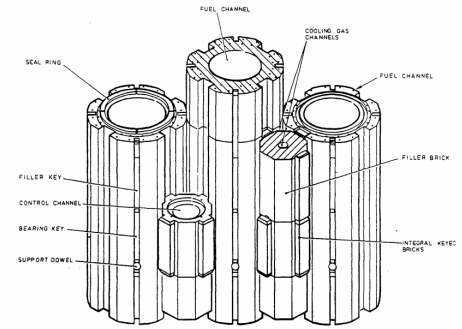
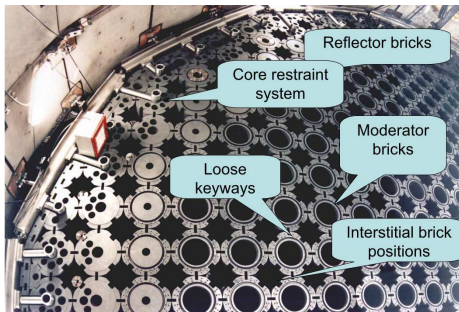


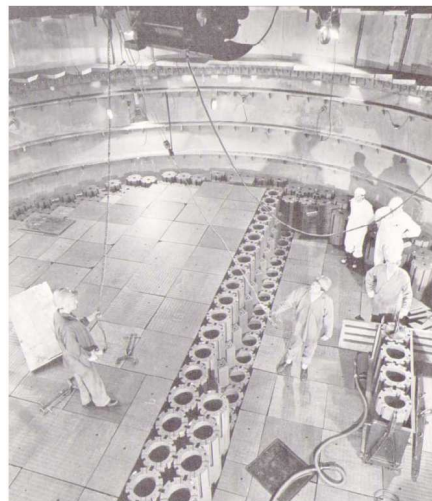
FIG 5 ARRANGEMENT OF GRAPHITE COMPONENTS IN HEYSHAM 2 AND TORNESS AGRs

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

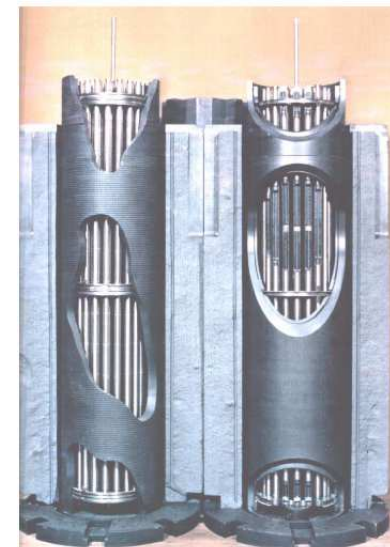
AGR zóna



Torness zóna



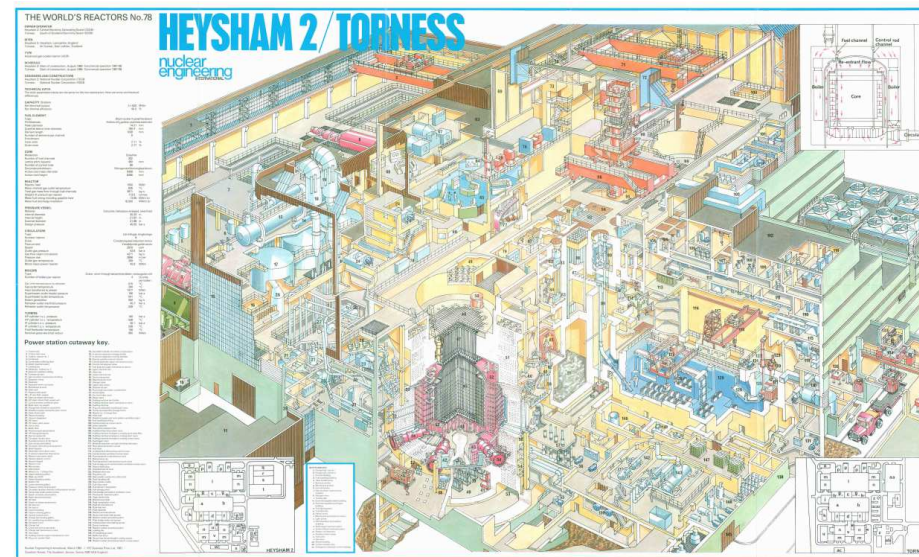
AGR zóna



AGR biztonság

- Neutronabszorberrel történő reaktorleállítás
 - Elsődleges és másodlagos szabályozó és leállító rendszer: 89 SZBV rúd, ebből 40-45 szabályozó, a többi biztonságvédelmi
 - Gravitációs beejtés
 - Nagyon magas megbízhatóság (redundáns és diverzifikált rendszer)
 - másodlagos rendszer (secondary shut down - SSD): nagy nyomású nitrogént fecskendeznek a reaktorba
 - a nitrogénrendszer csővezetékei a reaktortartály alján vannak átvezetve
 - az elsődleges rendszertől teljesen független
 - hosszú távú leállítás: börtartalmú üveggolyók zónába juttatása

AGR



Irodalom

- IAEA Technical Report Series No. 312: Gas Cooled Reactor Design and Safety, IAEA, Vienna, 1990
- NEI wallcharts