Zóna üzemzavari hűtőrendszerek

PWR, BWR

Csige András
BME Nukleáris Technikai Intézet

Atomerőművek
2019. április 1.

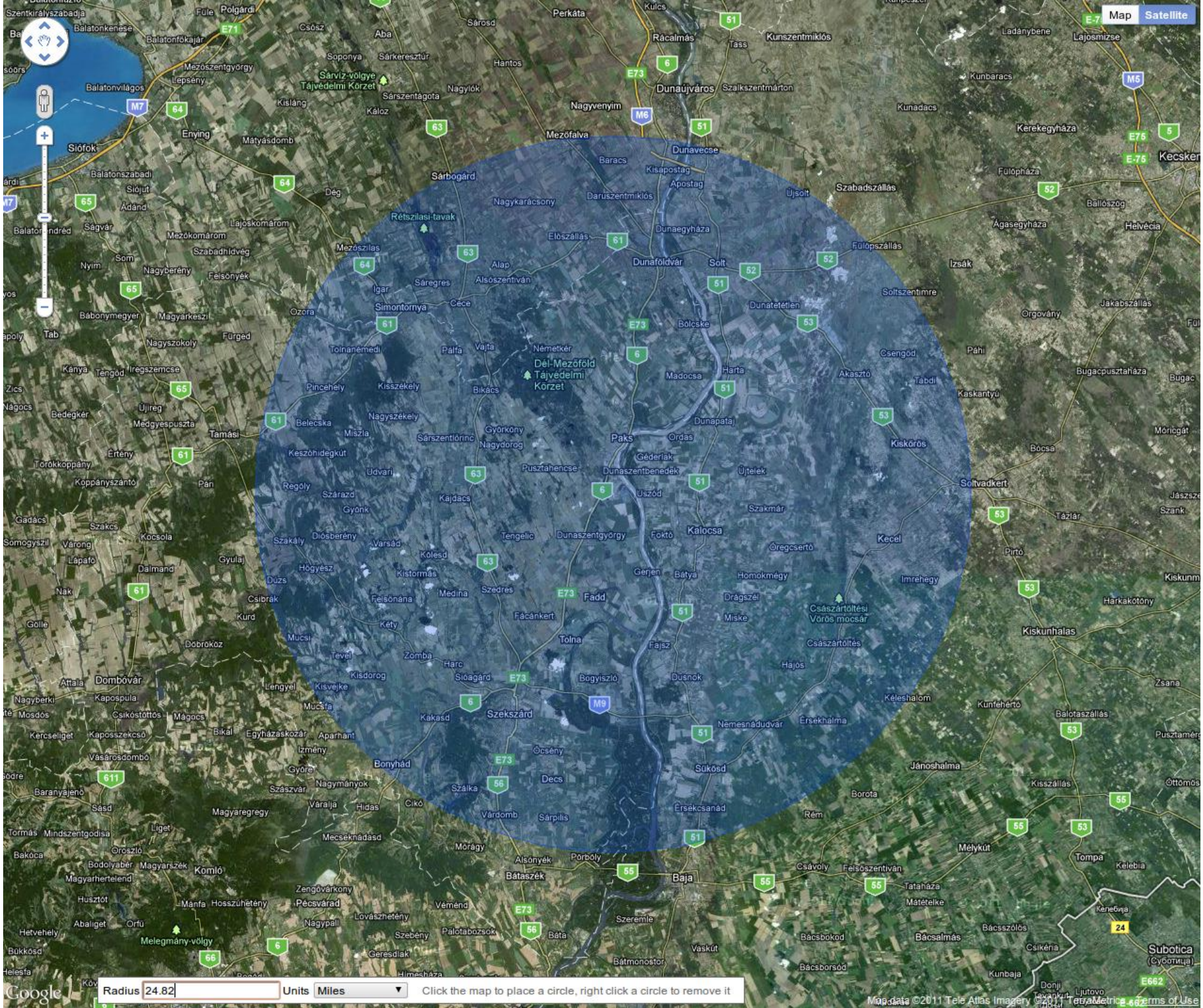
Tartalom

- Történelem
- Semiscale és LOFT
- Westinghouse PWR
- Babcock & Wilcox PWR
- GE BWR
- Mitsubishi APWR

Történelem

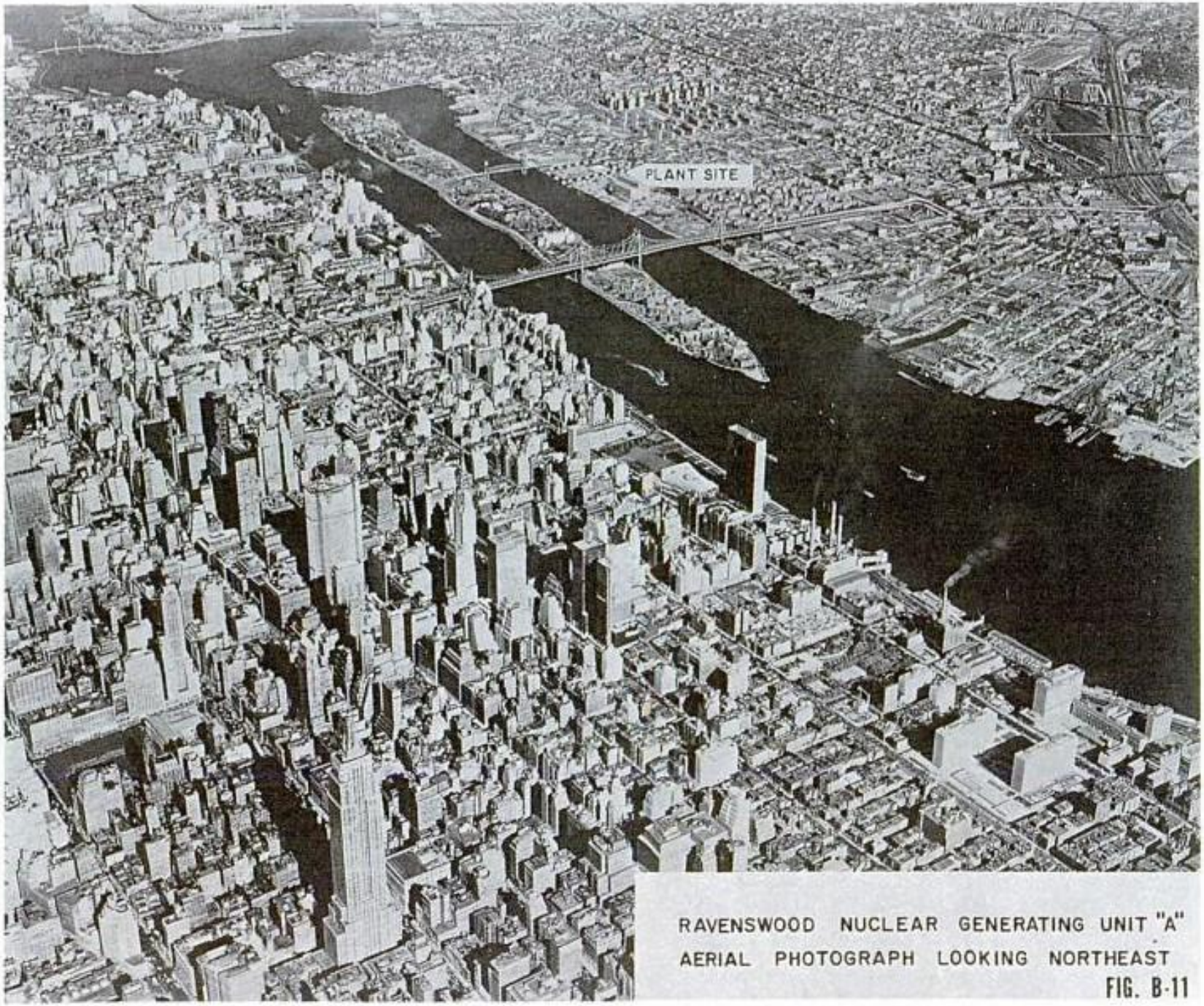
- Atomic Energy Act, 1946.
  - restricted data, “born secret”
  - polgári felügyelet: Atomic Energy Commission (AEC)
  - vállalatok által épített és üzemeltetett katonai célú reaktorok, távol a lakott területektől
- AEC Reactor Safeguards Committee, WASH-3 report (1950.):
  - P kW hőteljesítményű reaktor körüli védőterület sugara mérföldben: R=0.01*sqrt(P)
- Atoms for Peace, Atomic Energy Act of 1954.
  - egyszerűsödik a hozzáférés a védett adatokhoz
  - lehetővé válik a polgári célú nukleáris energiatermelés
  - közelebb kerülhetnek a reaktorok a lakott területekhez

Map
Satellite
Műegyetem rakpart
Budai alsó rakpart
Bertalan Lajos utca
Egry József utca
Stoczek utca
Goldmann György tér
Imnyi József utca
Petőfi híd
Radius 0.1
Units Miles
Click the map to place a circle, right click a circle to remove it
Google


Map
Satellite
Radius 24.82
Units Miles
Click the map to place a circle, right click a circle to remove it
Map data ©2011 Tele Atlas Imagery ©2011 TerraMetrics Terms of Use
Google
Dél-Mezőföld Tájvédelmi Körzet
Sárvíz-völgye Tájvédelmi Körzet
Rétszilasi-tavak
Melegmány-völgy
Paks
Dunaújváros
Kecskemét
Kalocsa
Szekszárd
Dombóvár
Bonyhád
Baja
Siófok
Kiskunhalas
Subotica

Történelem

- Védőtávolság csökkentése védőépülettel: konténment
- Első konténmenttel ellátott reaktor: General Electric S1G kutatóreaktor (atomtengeralattjáró prototípus), West Milton, New York
- Első, hálózatra termelő atomerőmű konténmenttel: Shippingport
- Telephely kiválasztás jogi szabályozása: 10 CFR 100
  - “maximum credible accident” (általában hűtőközeg-vesztés)
  - forrástag meghatározása
  - terjedésszámítás
  - “exclusion area”: erőmű körüli terület, ahol az engedélyesnek joga van a lakosság által végzett tevékenységeket korlátozni
  - “low population zone”: maximum 25 rem egésztest és 300 rem pajzsmirigy dózis lehet baleseti helyzetben
  - a baleset során a konténment nem sérül, de normál szivárgása van
- Gazdasági érdek az “exclusion area” minimalizálása, és a fogyasztókhoz közeli telepítés



4. Site of proposed Ravenswood nuclear plant in New York City. The Empire State Building is at the lower left; the United Nations is in the center along the East River. (AEC Docket 50-204)

Történelem

- Üzemzavar / baleset következményeinek minimalizálására szolgáló rendszerek (reactor safeguards):
  - Reactor trip
  - ECCS: Emergency Core Cooling Systems (ZÜHR)
  - PAHR: Post-Accident Heat Removal
  - PARR: Post-Accident Radioactivity Removal
  - Containment
- Amíg bízunk a konténmentben, a ZÜHR opcionális.
- Probléma: a zónaolvadás veszélyezteti a konténment integritást (“Kína szindróma”, 1965.)
- A ZÜHR “új feladata”: megvédeni a konténmentet a zónaolvadás megakadályozásával
- Új elvárások a ZÜHR redundanciára és megbízhatóságra vonatkozóan
  - Westinghouse/PWR: hidroakkumulátorok
  - GE/BWR: redundáns zóna elárasztás, automatikus nyomáscsökkentés

Történelem

- 1971. eleje: Semiscale kísérletek
  - Westinghouse PWR, 1:1570 méretarányú teszt berendezés
  - ZÜHR által befecskendezett víz túl nagy része távozik a törésen hidegági nagy csőtörés esetén (zóna bypass)
- 1971. első fele: Oak Ridge, üzemanyagpálca viselkedésének vizsgálata
  - burkolat felfúvódás és ridegedés alacsonyabb hőmérsékleten bekövetkezhet mint azt a korábbi kísérleti eredmények alapján feltételezték
- AEC gyors válasza: Interim Acceptance Criteria
  - Maximális megengedett burkolathőmérséklet az üzemzavar során 1260 °C
  - Burkolat ridegedése nem megengedett
  - Burkolat kevesebb, mint 1%-a léphet reakcióba a vízzel
- Az AEC először megpróbálta “csendben” megoldani a kérdést, ezért komoly sajtókritika és politikai támadások érték
- 1972.-1973.: “ECCS hearings”, közben moratórium új engedélyek kiadására

Történelem

- 1973.: 10CFR50.46 rögzíti a LOCA számítások elfogadási kritériumait:
  - Maximális burkolathőmérséklet nem lehet nagyobb mint 2200 °F (1200 °C)
  - Maximális burkolat oxidáció nem lépheti túl a burkolat vastagság 17%-át
  - A cirkónium-vízgőz reakcióból származó hidrogén mennyisége nem lépheti túl az elméleti maximális érték 1%-át.
  - A tranziens során a zóna geometriájának végig hűthetőnek kell maradnia.
  - A zóna hosszú távú hűtését biztosítani kell.

Történelem

- 1973.: “10CFR50 Appendix K” rögzíti a biztonsági elemzésben szereplő LOCA számítások szabályait. Néhány példa a teljesség igénye nélkül:
  - A remanens hő és az üzemanyagban tárolt hő számításához azt kell feltételezni, hogy a zóna a névleges teljesítmény 102%-ával üzemelt hosszú időn keresztül.
  - Az üzemanyagban tárolt hő számításánál a kiégés során előálló legelőnytelenebb hőtechnikai paramétereket kell feltételezni.
  - A remanens hő számításánál az ANS szabvány által meghatározott érték 120%-ával kell számolni.
  - A kifúvás (blowdown) fázisában nem juthat ZÜHR víz a reaktortartályba.
  - Ha a kifúvás során forráskrízis lép fel, csak az elárasztás során lehet a buborékos forrásba történő visszatéréssel számolni.
  - Az Appendix K-ban meghatározott korrelációkat kell alkalmazni.

Történelem

- 1974.: AEC (és az ő tudathasadásos állapota) megszűnik, megalakul a Nuclear Regulatory Commission (NRC).
- 1978.: Működni kezd a LOFT kísérleti reaktor, az eredmények bizonyítják az "Appendix K" (túlzott) konzervativizmusát.

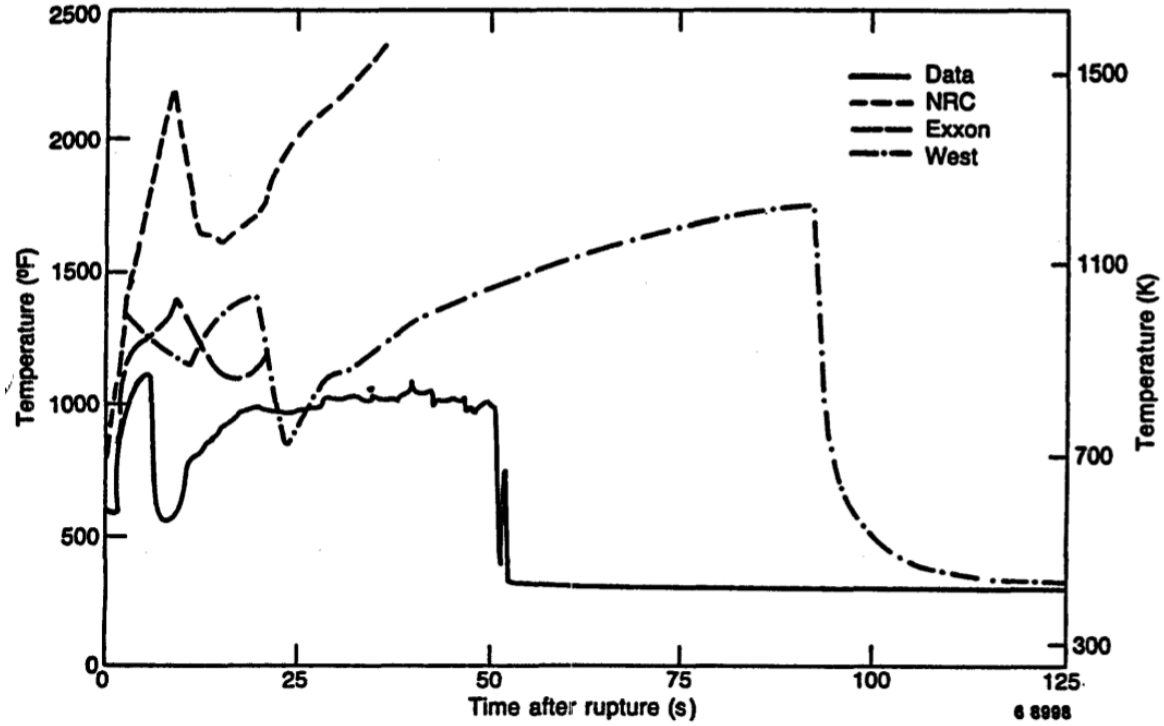
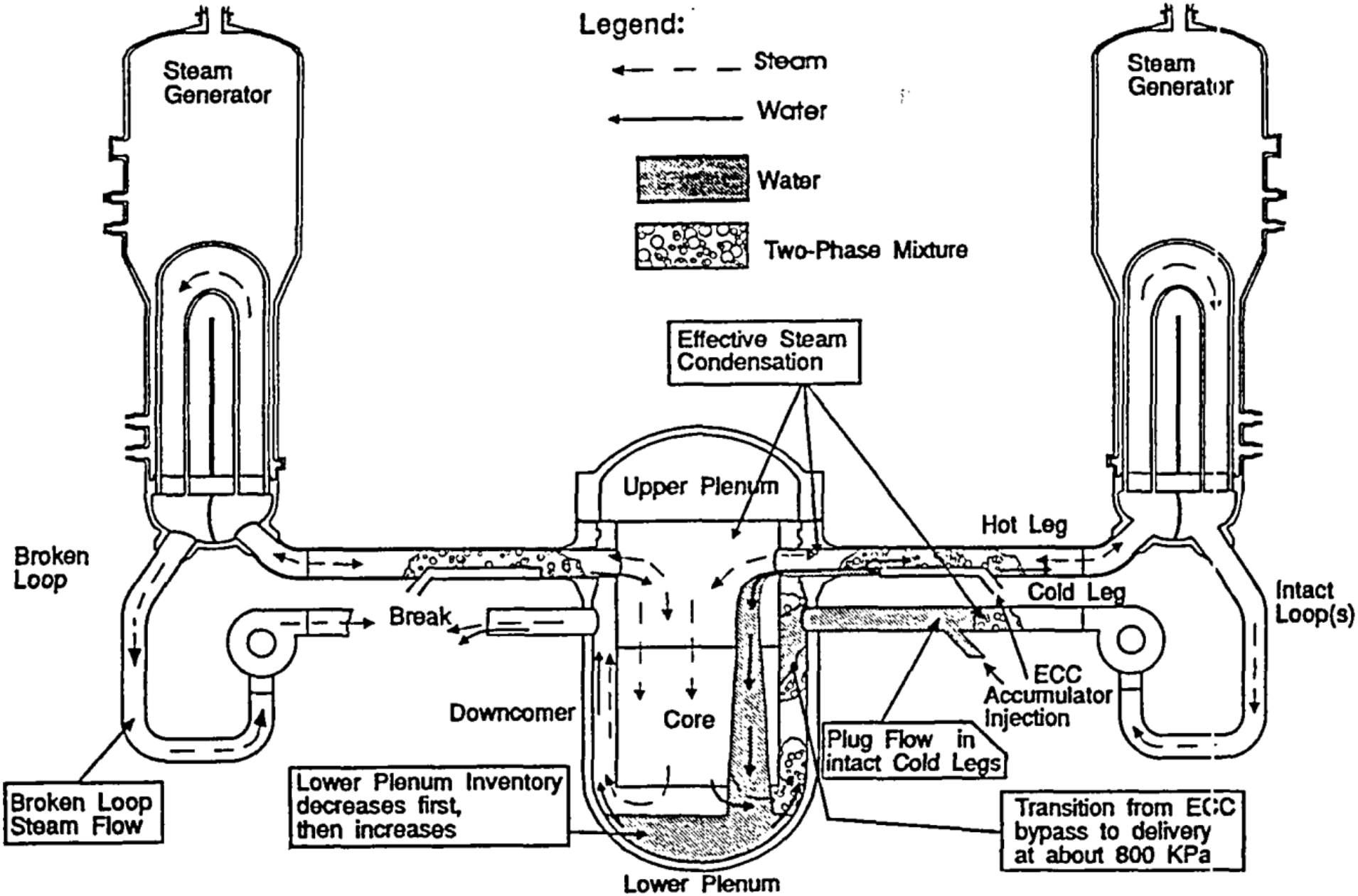


Figure 2-1 Comparison of cladding temperatures measured during LOFT test L2-3 with calculations using several vendor evaluation models and an NRC calculation using conservative Appendix K assumptions. The large difference between the data and the calculations illustrate the conservatism of these Appendix K models.

Történelem

- 1979. március 28., TMI-2
  - Kis csőtörés is vezethet súlyos következményekre
- 1980-as évek: ZÜHR működés vizsgálata a csőtörések teljes spektrumára
  - Integrális kísérleti berendezések minden reaktortípushoz
  - NRC LOFT, majd (a pénz elfogytával) OECD LOFT program
  - 2D/3D program
- Eredmények:
  - ZÜHR képes kis csőtörések esetén is ellátni a funkcióját (...ha nincs operátori hiba...)
  - LBLOCA számítások során a 2D/3D effektusok elhanyagolása a konzervativizmust túlzottan növeli



SUMMARY OF LBLOCA BEHAVIOR IN A COMBINED INJECTION PWR
END-OF BLOWDOWN/REFILL PHASE

Példa 2D/3D eredményekre: Különböző módon viselkedő régiók a reaktortartályban

Történelem

- 1988: Appendix K módosítása: a számítás konzervativizmusát növelő feltételezések egy részétől el lehet tekinteni, ha a számítások során meghatározzák az eredmények bizonytalanságát, és a bizonytalanságokkal terhelt eredmények is teljesítik a LOCA kritériumokat. A számítási módszerek helyességét bizonyítani kell.
- 1989: az NRC kiadja az RG 1.157 útmutatót a realisztikus LOCA számításokhoz: aki az ebben leírt modelleket, adatokat, korrelációkat és metódusokat használja, annak nem kell a számítási módszer helyességét bizonyítania.
- 2005: RG 1.203, további kiegészítések (pl. a bizonytalanságok becsléséhez).

Semiscale

- Westinghouse PWR-eket modellező termohidraulikai kísérleti berendezés
- Névleges üzemi nyomás és hőmérséklet
- 1:1 magassági szintek, 1:1500-1:1700 térfogatarány
- Idaho National Engineering Laboratory, 1965-1986., számos átépítés
- Elektromosan fűtött zóna szimulátor (1.6 / 2.0 MW, 1969.)
- Gőzfejlejlesztő (ép hurokban 1974., sérült hurokban 1981. után)
- Kis- és nagy nyomású ZÜHR, hidroakkumulátorok
- Nyomás, nyomásesés, hőmérséklet, gőztartalom, vízszint, forgalom mérések
- Mod 1: LOFT tervezéséhez LBLOCA előkísérletek
- TMI után bővül a vizsgált tranziensek spektruma:
  - Kis- és közepes csőtörések
  - Természetes cirkuláció
  - PRISE, szekunder oldali törések
  - Operátori beavatkozások

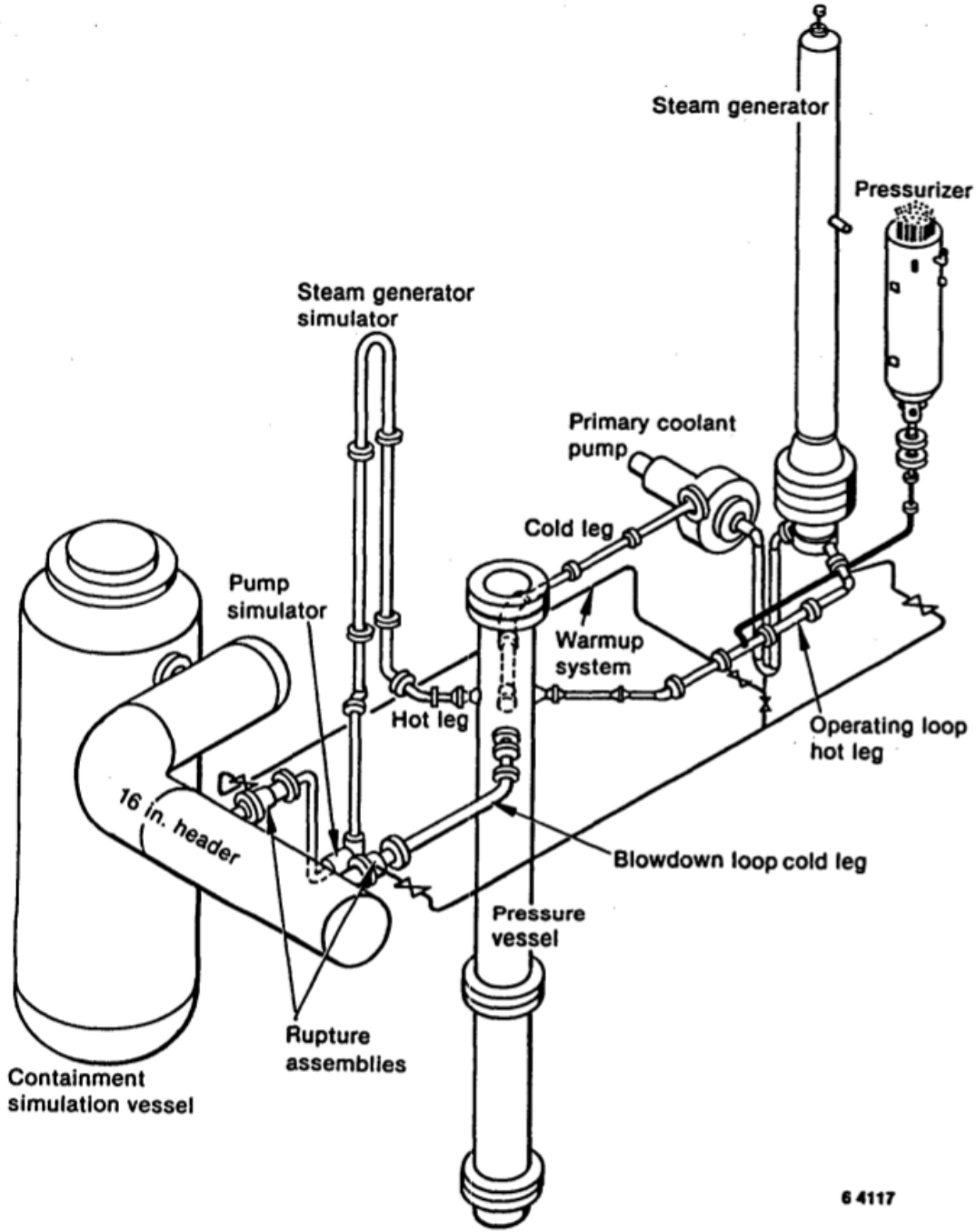


Figure A.1-1 Semiscale Mod-1

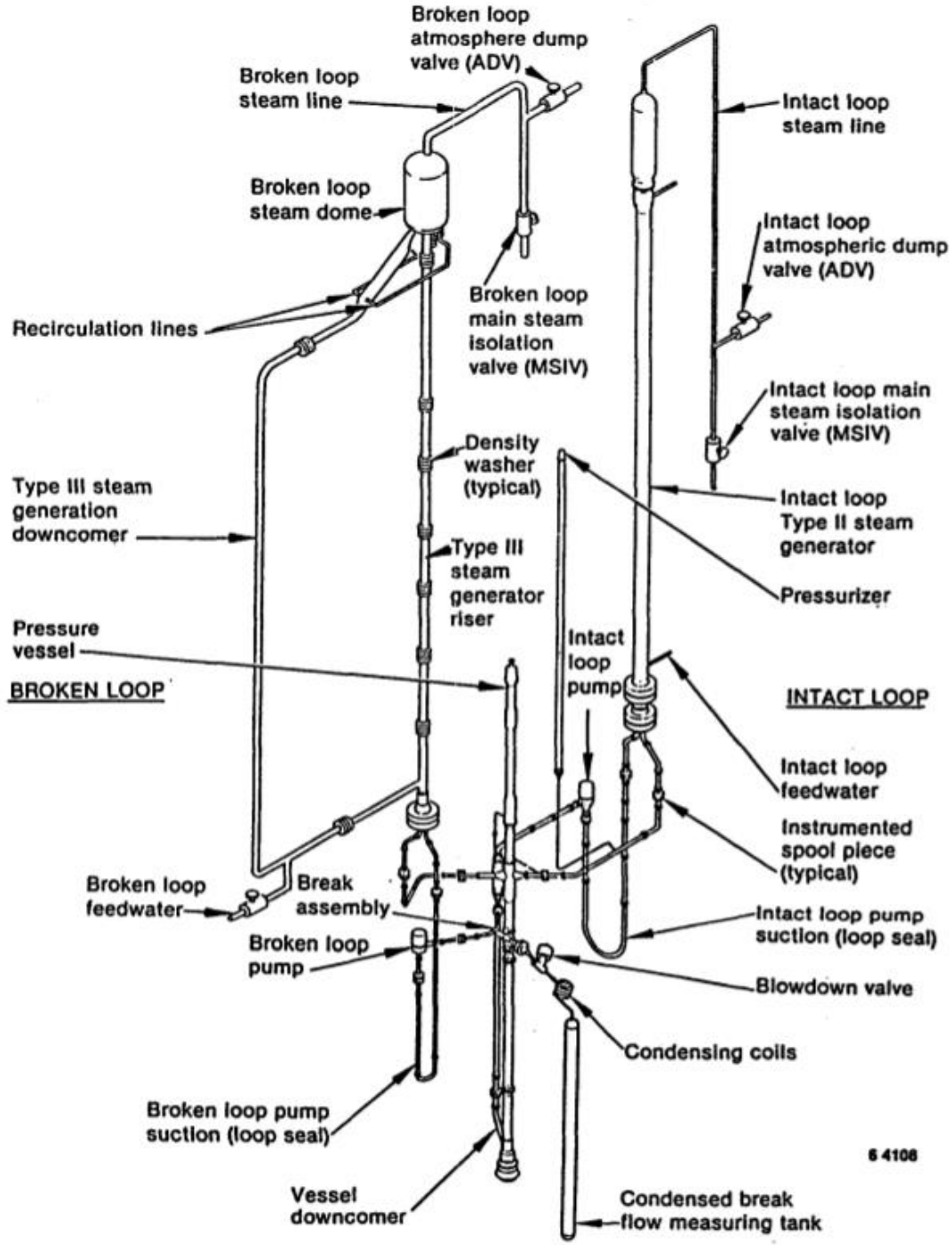


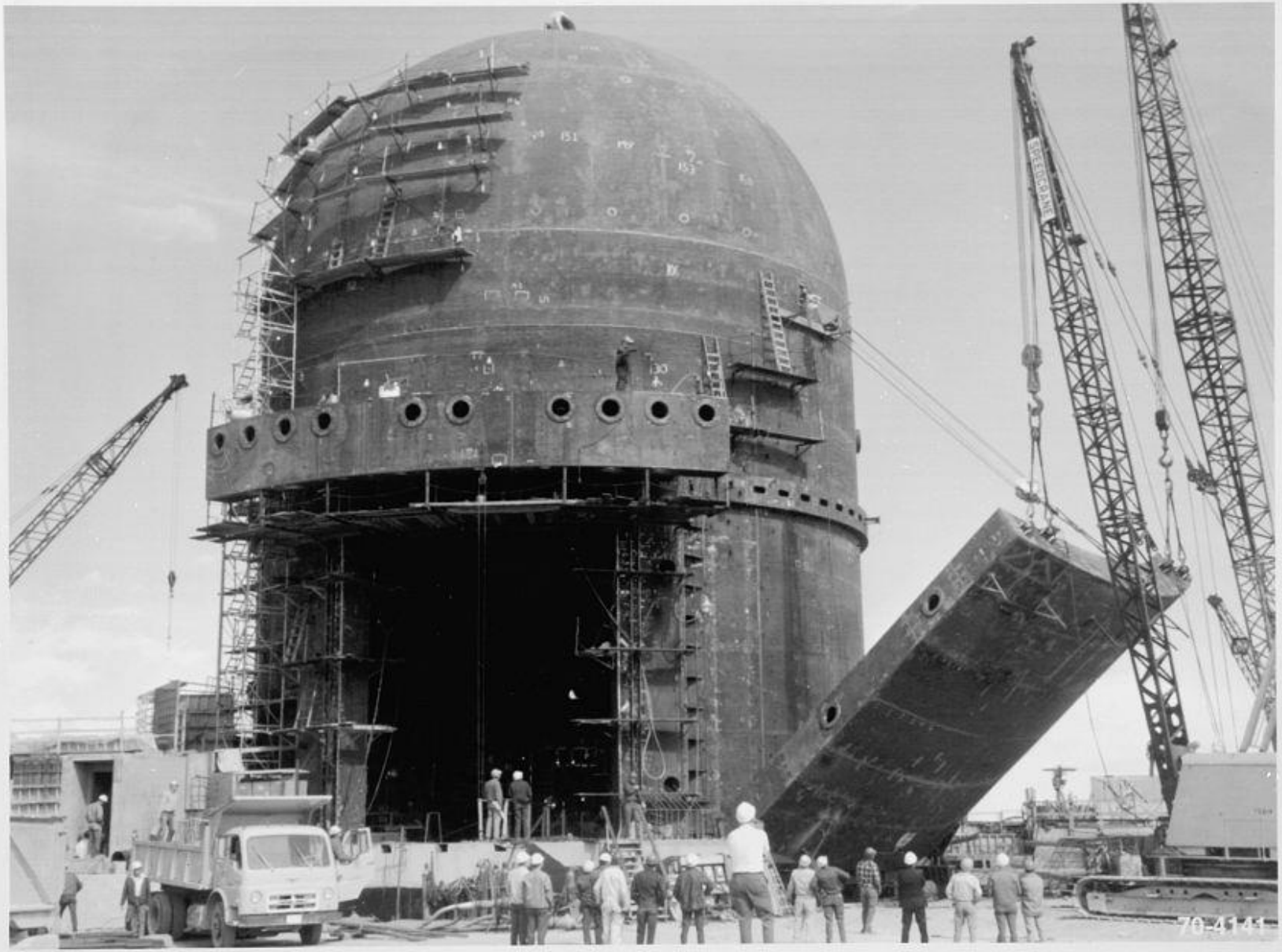
Figure A.1-5 Semiscale Mod-2C

LOFT – Loss Of Fluid Test

- Eredeti cél: zónaolvadással járó nagy csőtörés vizsgálata (1963)
- 50 MW-os nyomottvizes reaktor, konténment, INEL telephely
- Folyamatos csúszások miatt változik a deklarált cél is: ZÜHR vizsgálata
- Főbb évszámok:
  - konténment tartály 1971-ben készül el,
  - berendezés tesztelése 1976-ban indul,
  - első “izotermikus LBLOCA” 1978. áprilisában
  - első nagy csőtörés nukleárisan fűtött zónával 1978. decemberében
  - TMI miatt kis csőtörés, ATWS, teljes feszültségvesztés, szekunder oldali törések vizsgálata
  - 1983-85.: OECD LOFT projekt, 8 kísérlet, 2 zónasérülés

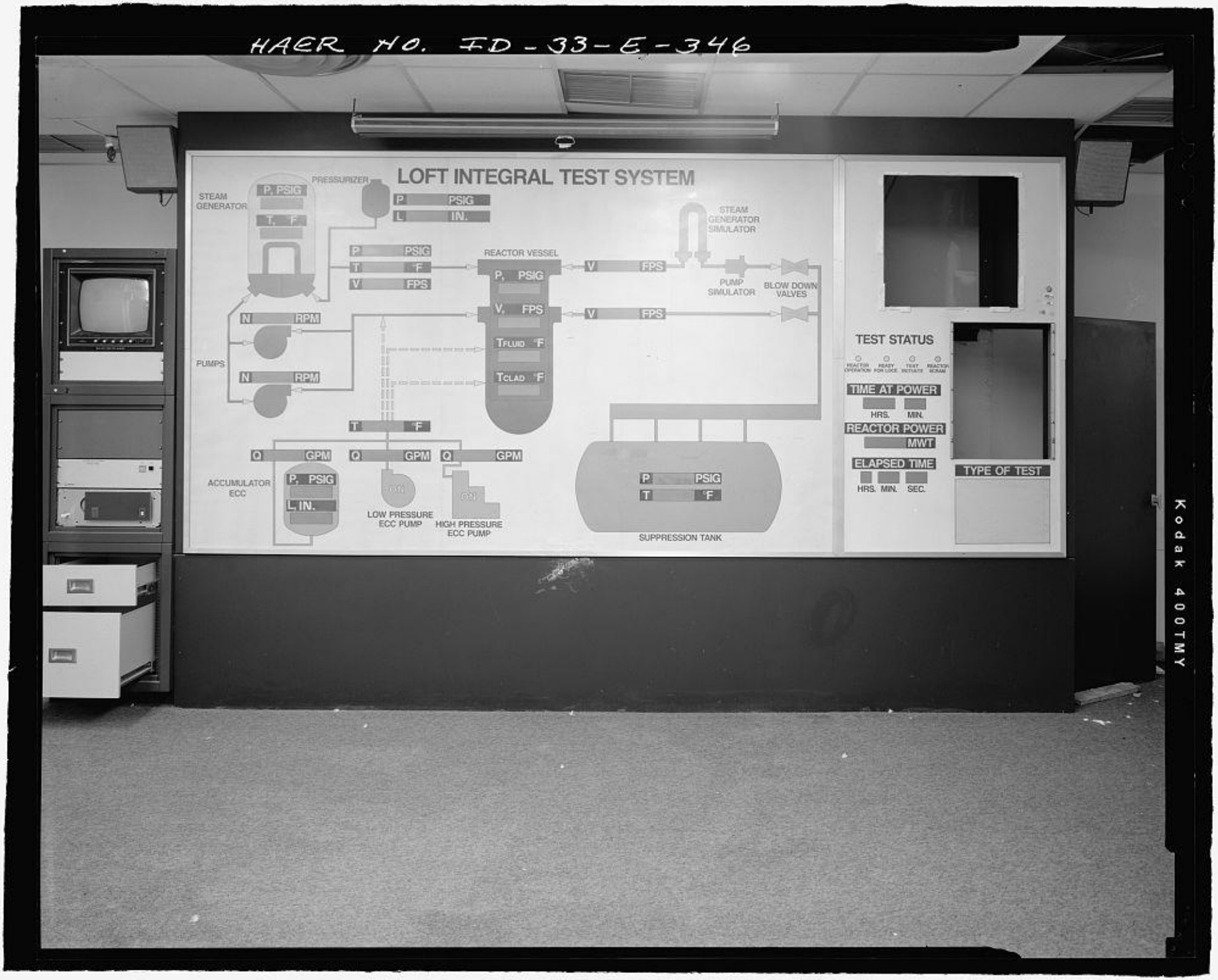
LOFT – Loss Of Fluid Test

- Aktív zóna
  - 1.68 m magas, 9 kazetta, PWR pálcák, normál rácsosztás
- Primer kör
  - Törött hurok: kezdetben nincs benne áramlás, recirkulációs vezetékek szolgálnak a felfűtésére, a törést 2 gyorsműködtetésű szelep modellezi
  - Intakt hurok: 3 sértetlen hurkot modellez, GF, FKSZ, térfogatkompenzátor
- Lefúvató tartály (Blowdown Suppression System)
  - Konténment nyomását modellezi a tranziens során
  - Védi a LOFT konténmentet a szennyeződéstől
- ZÜHR
  - 2 rendszer, kis- és nagynyomású szivattyúkkal és akkumulátorokkal
  - Lehetséges betáplálási pozíciók: sértetlen hurok hidegág, melegág, downcomer, alsó és felső keverőtér
- Szekunder kör
  - Gőzfejlesztő, léghűtésű kondenzátor, tápvíz szivattyú, szabályozó szelepek



HAER NO. ID-33-E-35

HAER NO. ID-33-E-346



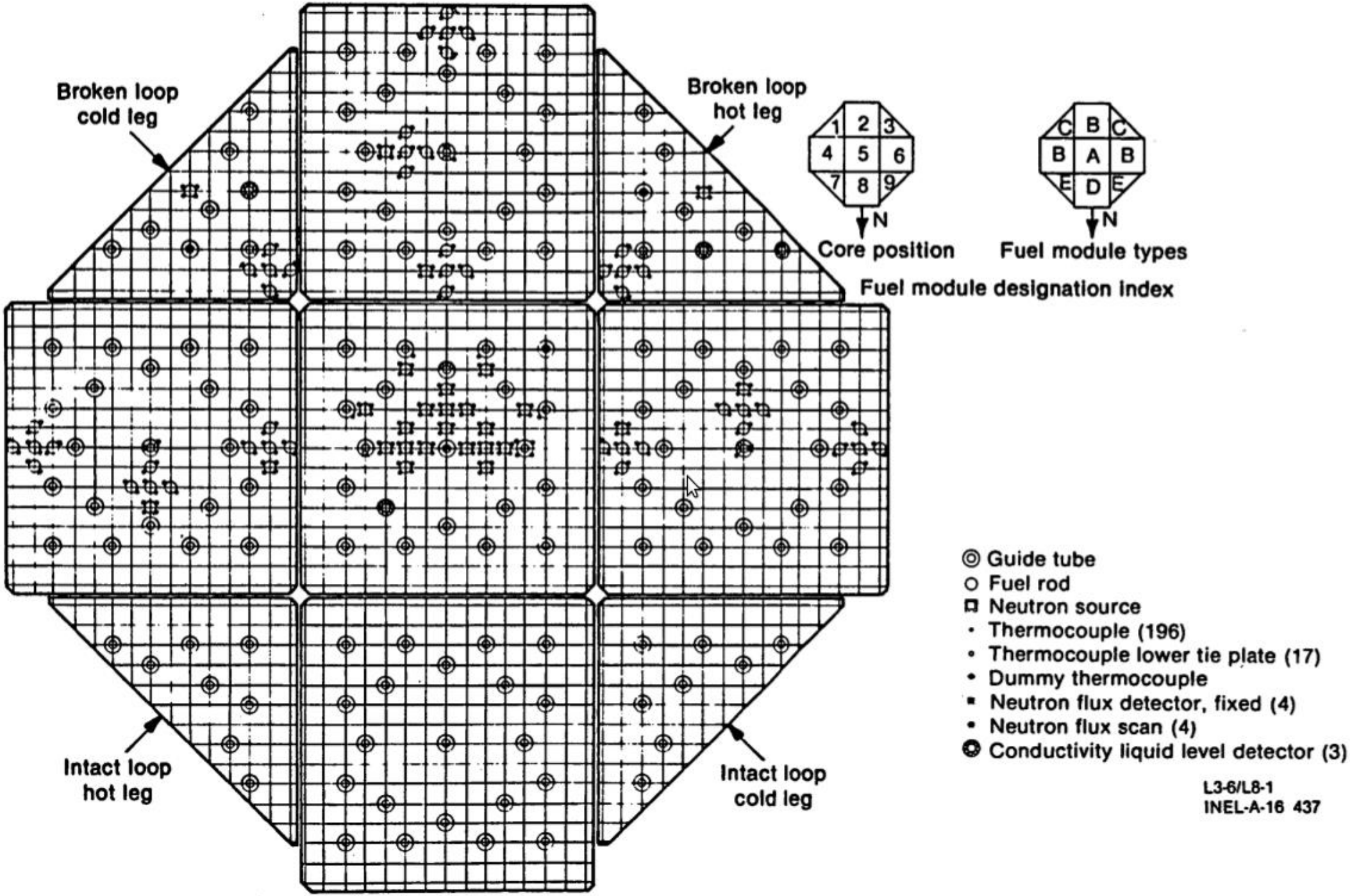


Figure A.2-2 LOFT core configuration and typical instumentation

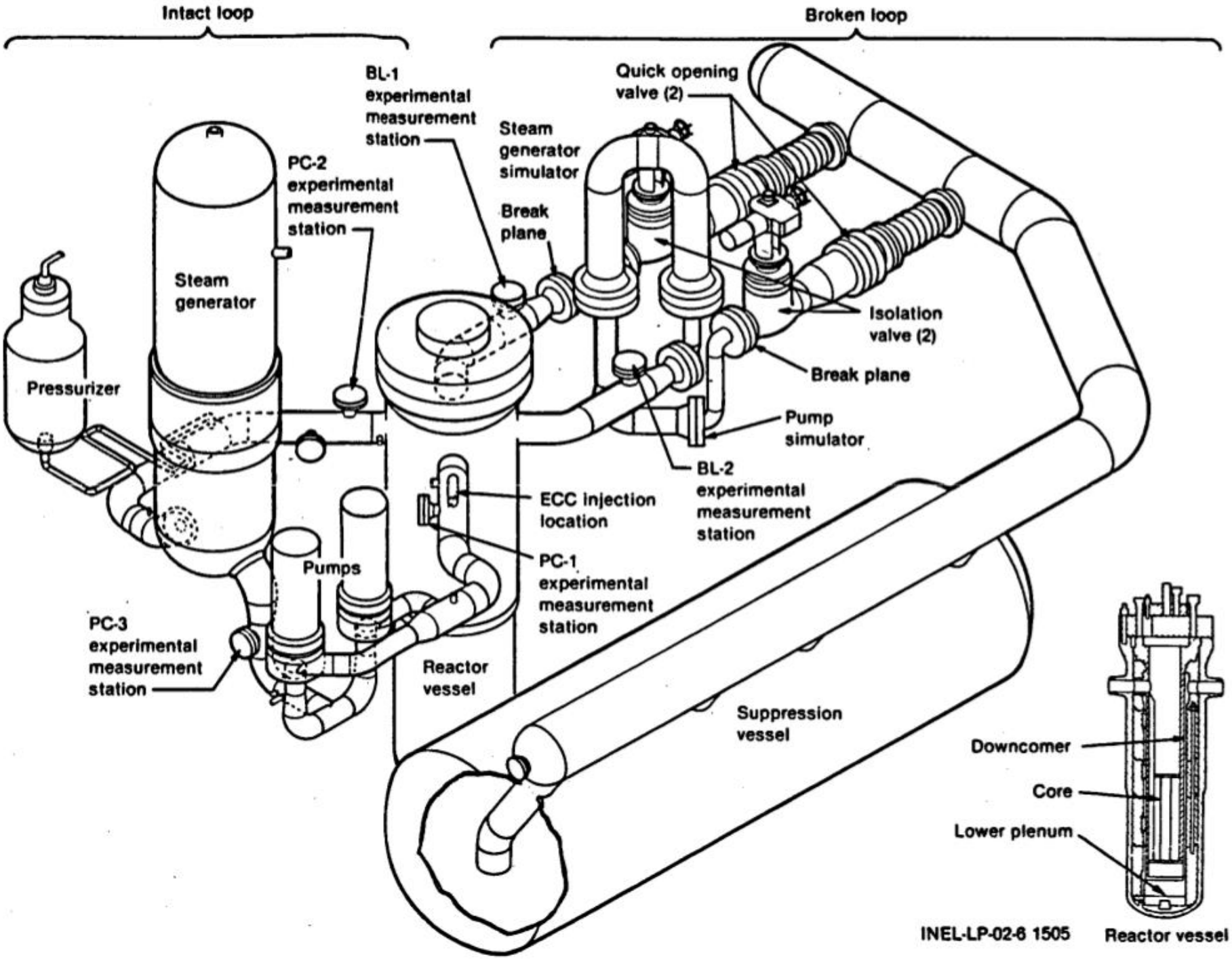
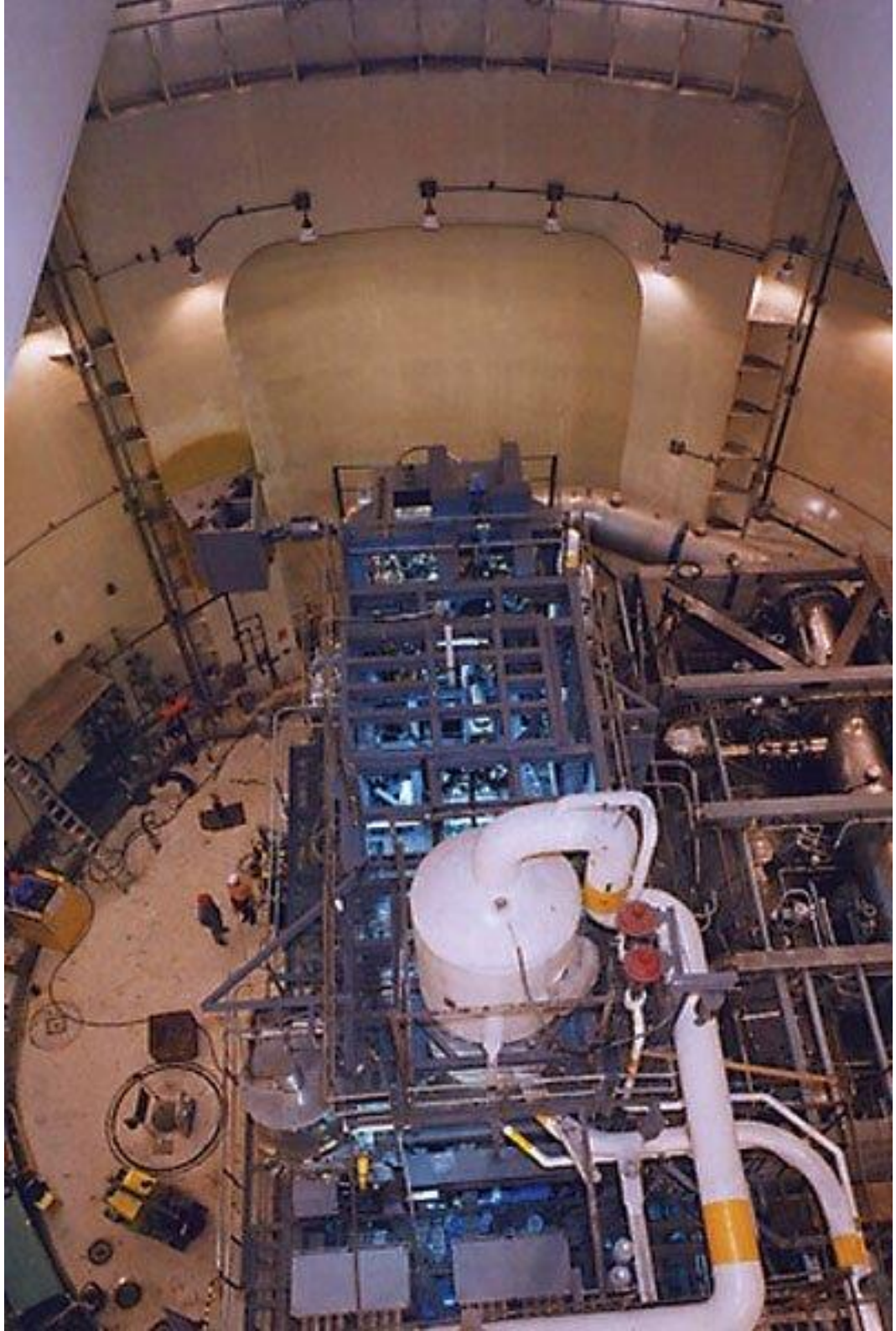
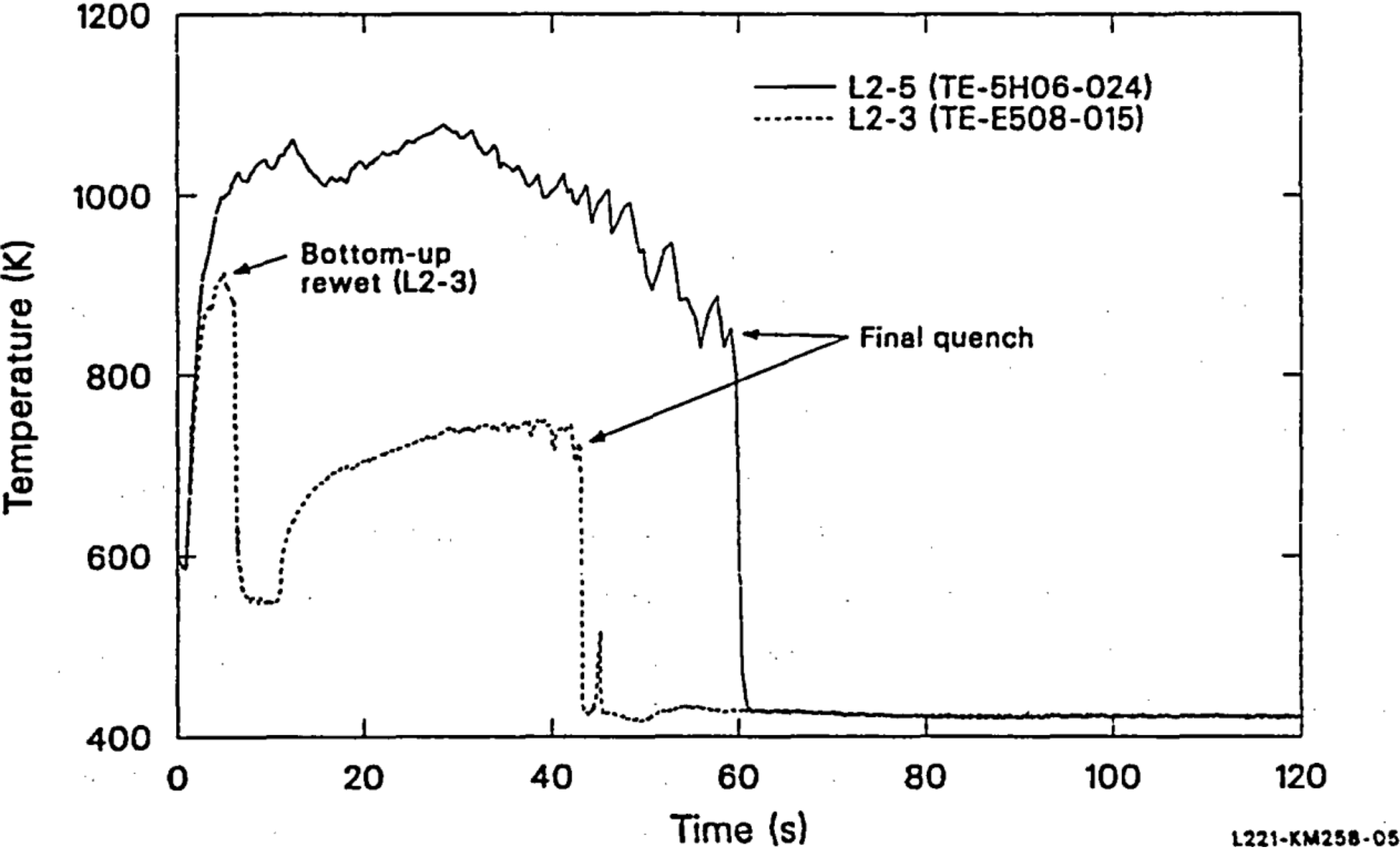


Figure A.2-3 The LOFT primary coolant system

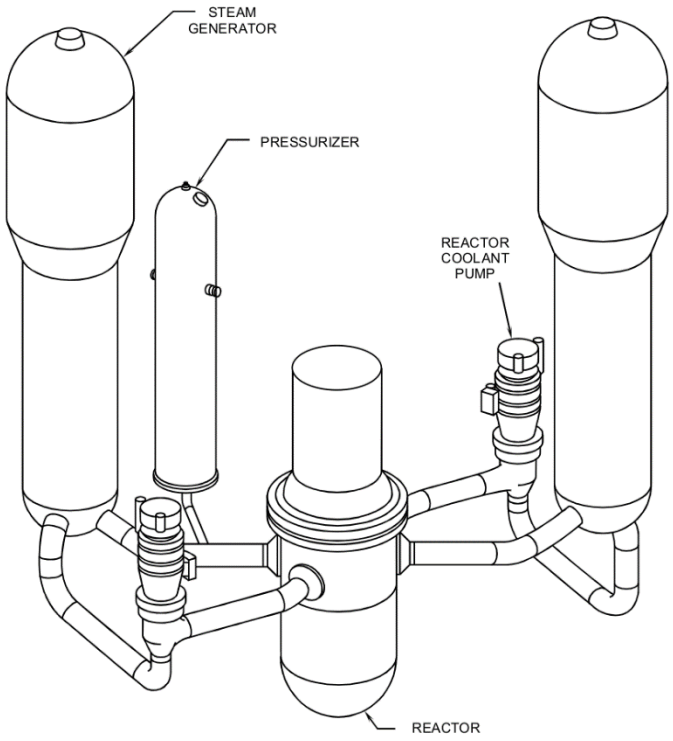


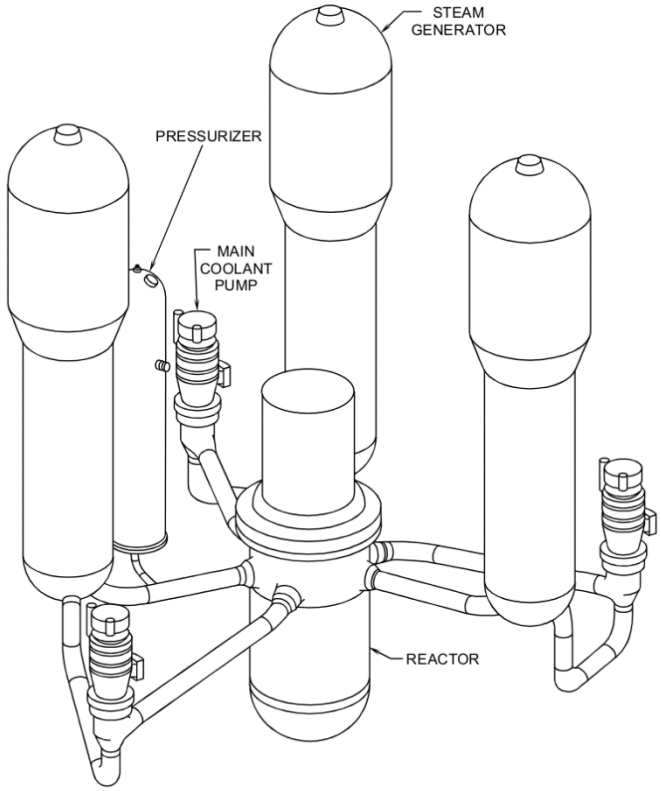
LOFT – Loss Of Fluid Test

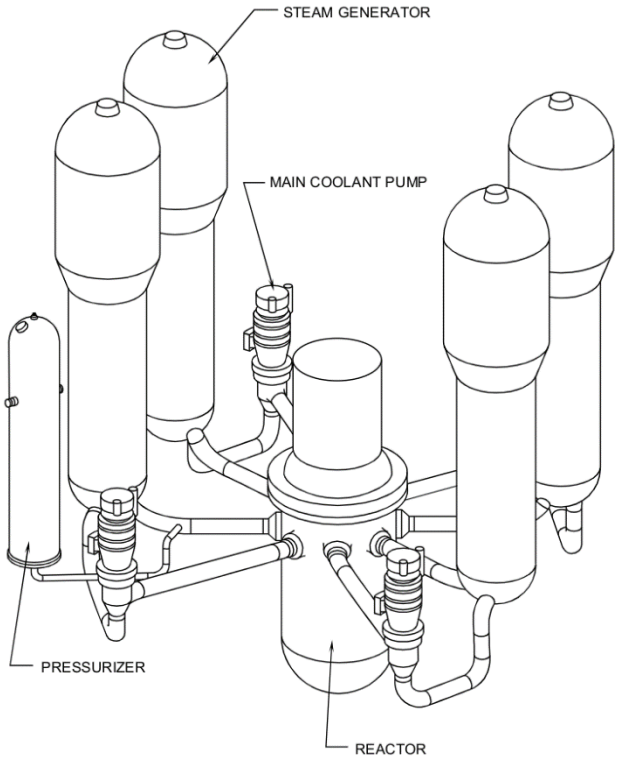


Példa LOFT eredményekre: FKSZ kifutás jótékony hatása a maximális burkolathőmérsékletre

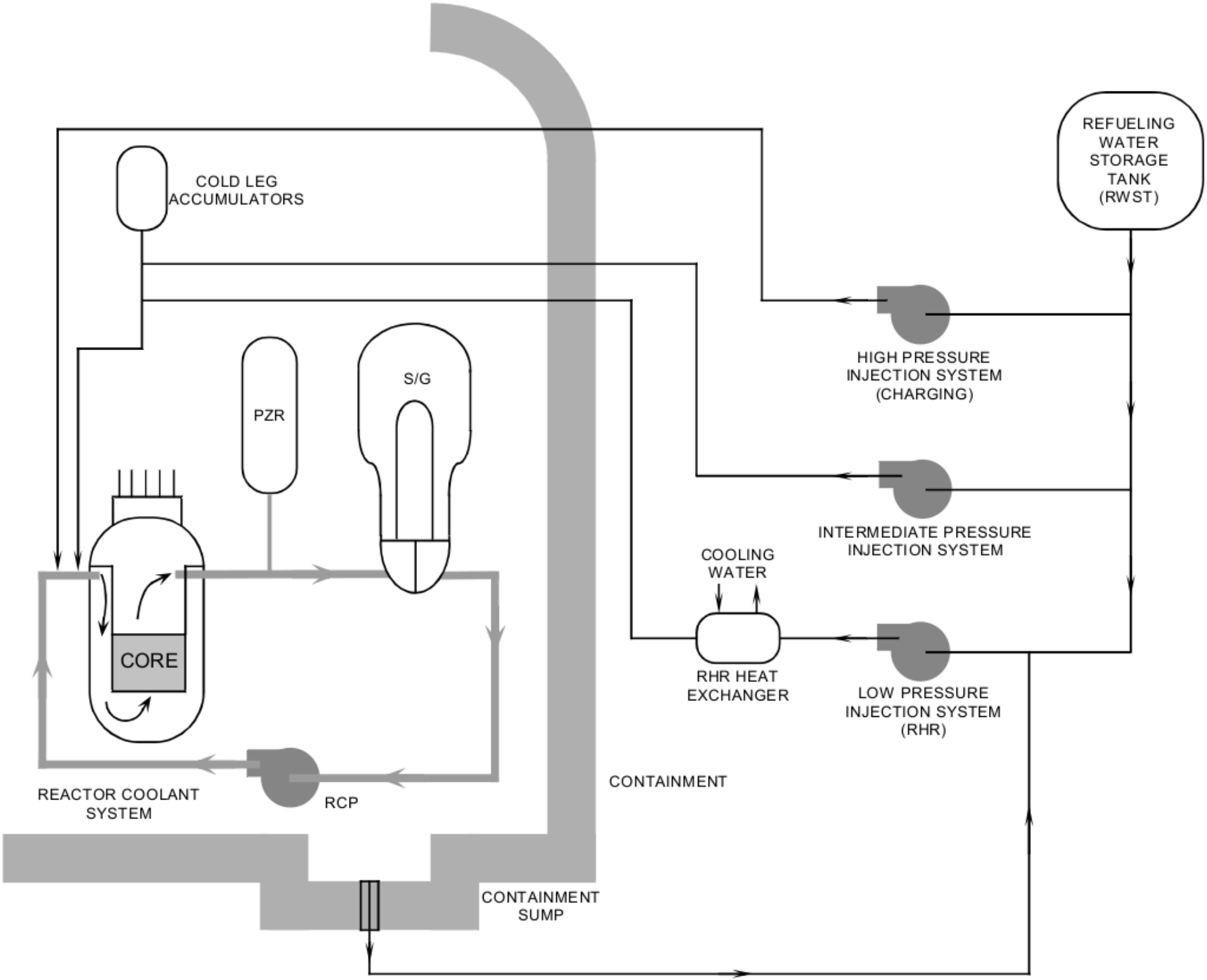
Westinghouse PWR

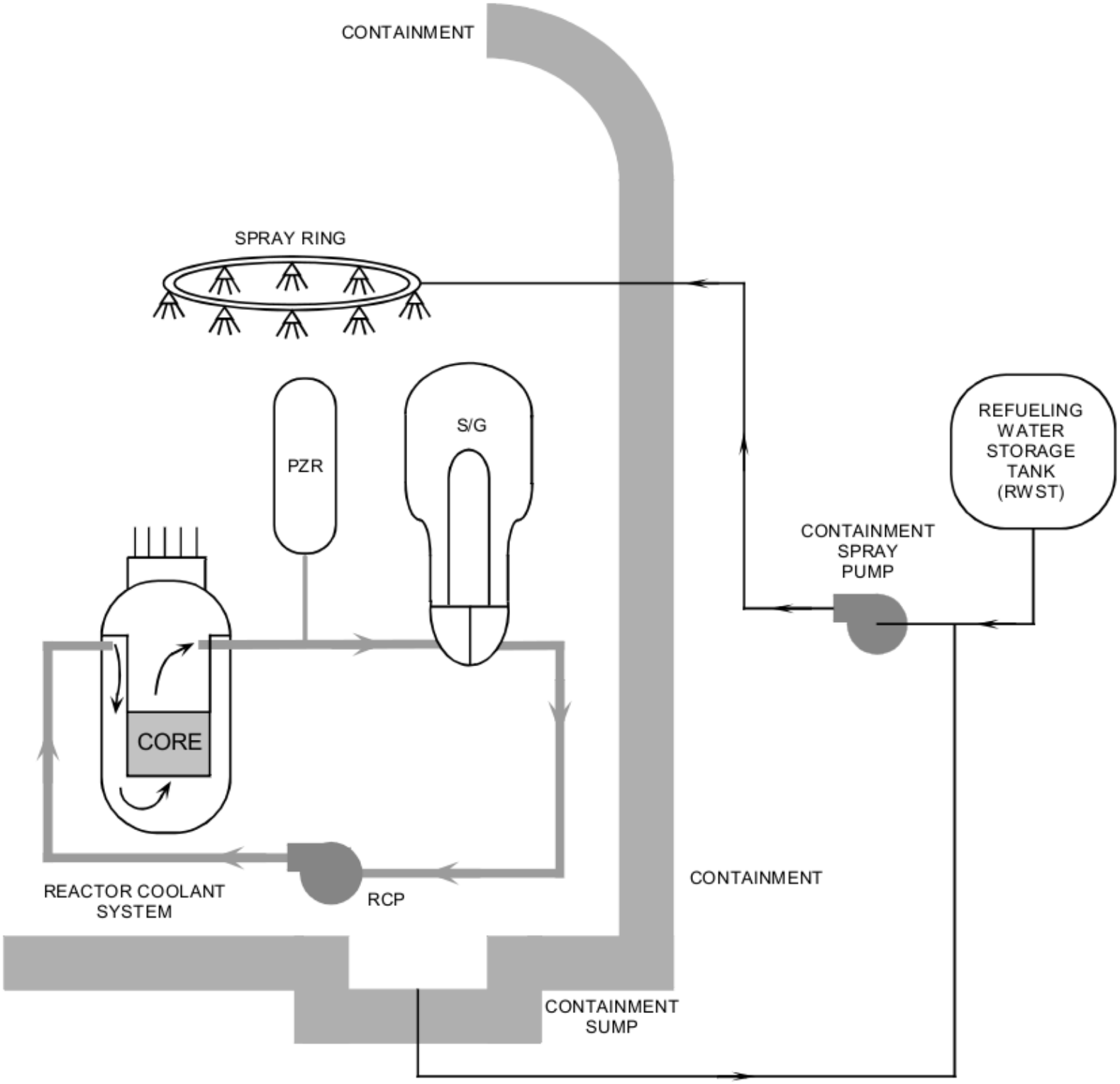




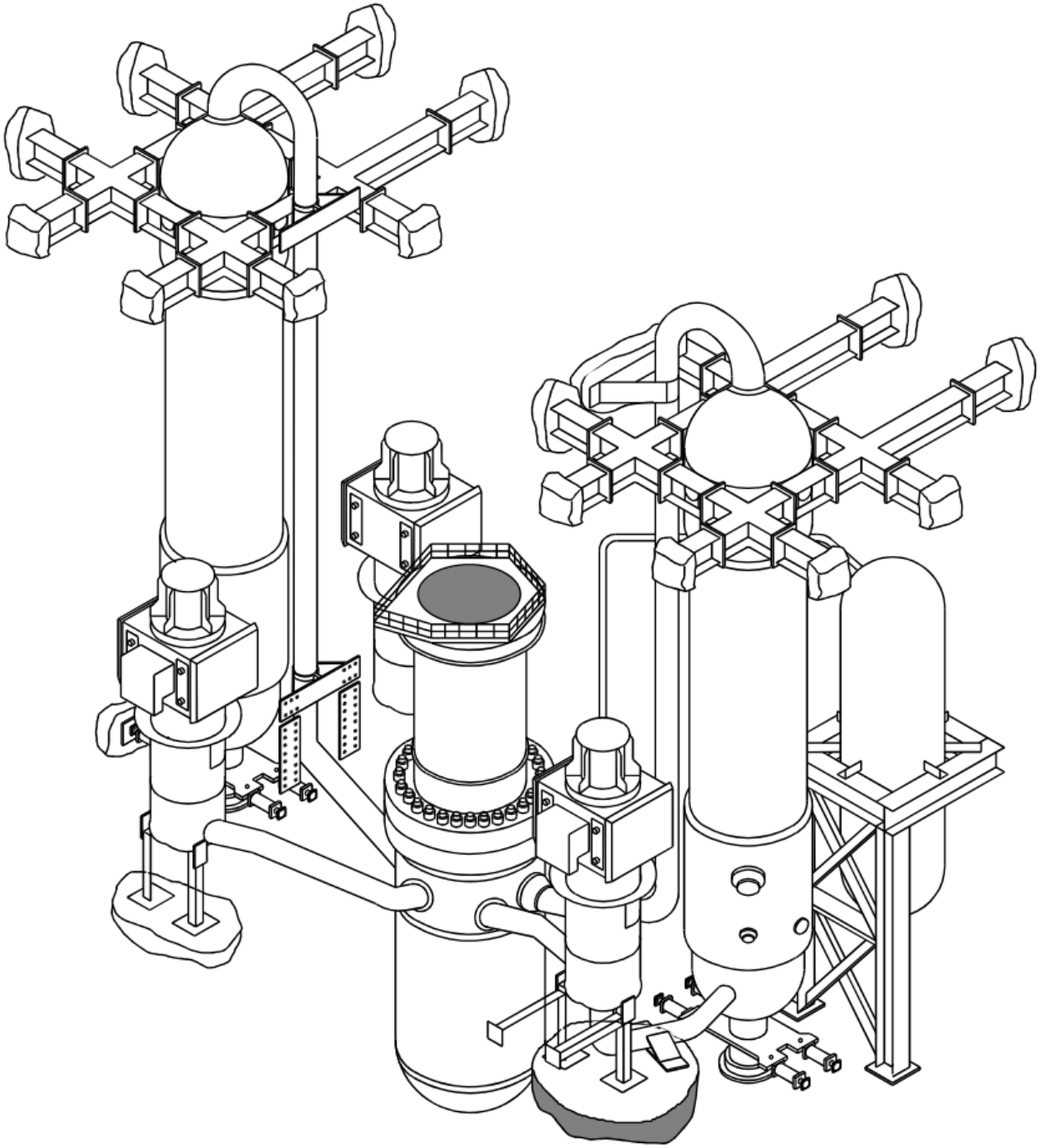


- 2/3/4 hurok, hurkonként 1 GF és 1 FKSZ
- HPCI, HA, LPCI betáplálás a hidegágakba
- Hidegági vízzár (uralható probléma)


COLD LEG
ACCUMULATORS
REFUELING
WATER
STORAGE
TANK
(RWST)
HIGH PRESSURE
INJECTION SYSTEM
(CHARGING)
PZR
S/G
INTERMEDIATE PRESSURE
INJECTION SYSTEM
COOLING
WATER
CORE
RHR HEAT
EXCHANGER
LOW PRESSURE
INJECTION SYSTEM
(RHR)
CONTAINMENT
REACTOR COOLANT
SYSTEM
RCP
CONTAINMENT
SUMP


CONTAINMENT
SPRAY RING
PZR
S/G
REFUELING
WATER
STORAGE
TANK
(RWST)
CONTAINMENT
SPRAY
PUMP
CORE
REACTOR COOLANT
SYSTEM
RCP
CONTAINMENT
CONTAINMENT
SUMP

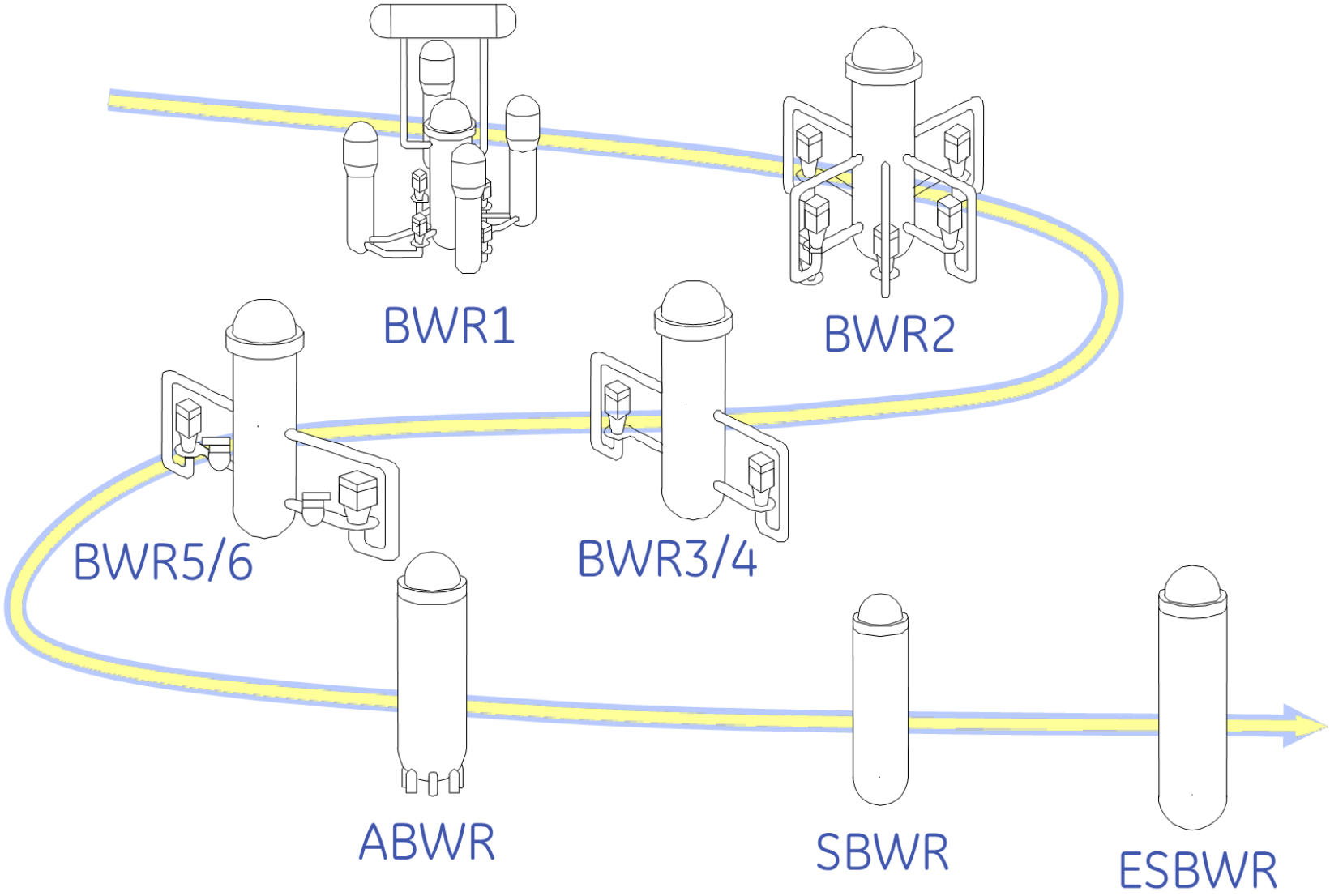
Babcock & Wilcox PWR



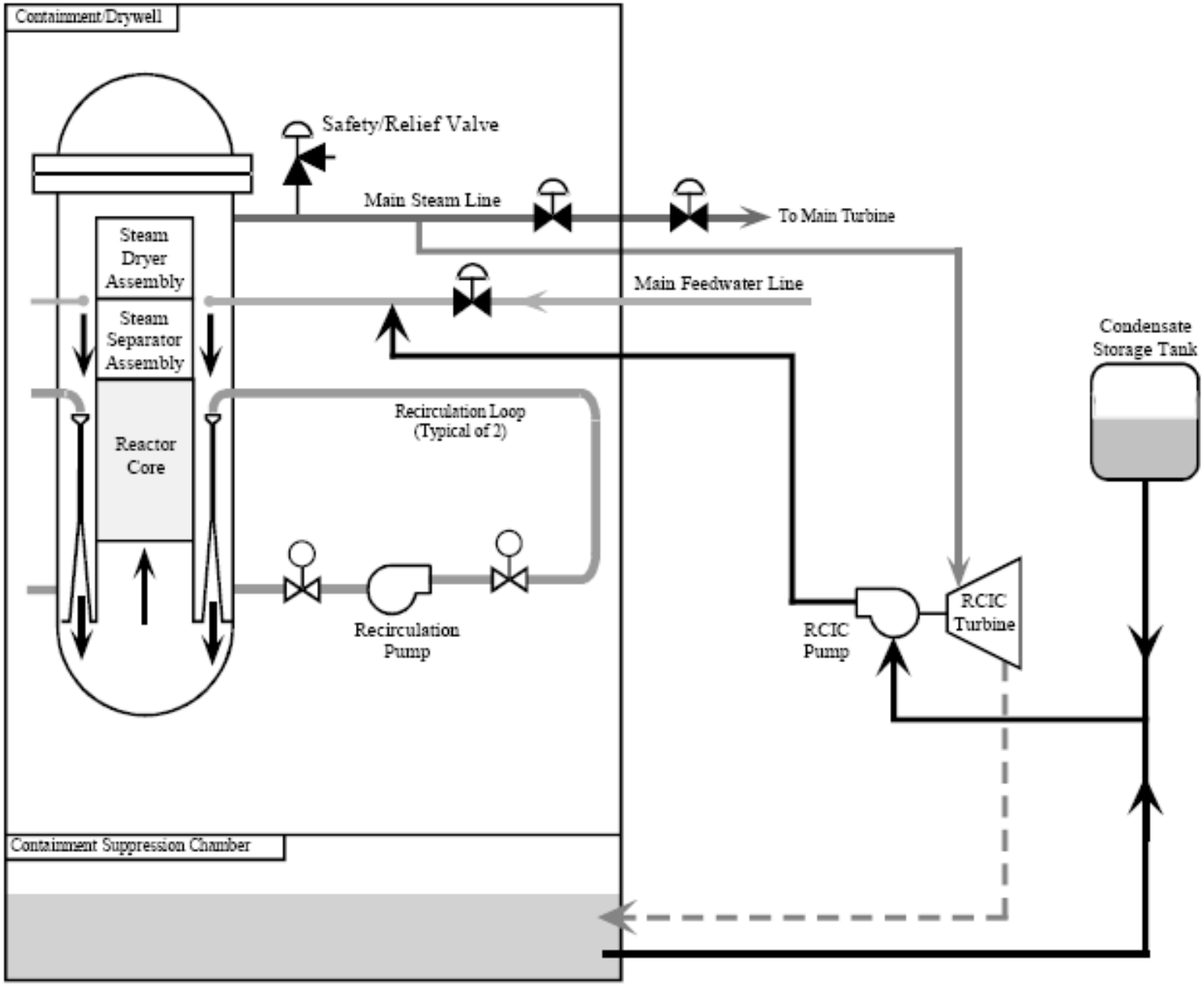
Babcock & Wilcox PWR

- 2 GF, 4 FKSZ, 4 hidegág, 2 melegág
- HPCI betáplálás a hidegágakba
- LPCI, HA betáplálás a reaktortartályba
- Hidegági vízzár miatt szelepek (*vent valves*) a zónatartó kosáron. Cél: hidegági törés esetén áramlási útvonalat biztosítani a zónában termelődő gőznek a felső keverőtérből a leszálló gyűrűs csatornába (és ezáltal a konténmentbe).
- Üzemzavari helyzetben névleges üzemi szint fölé feltöltött gőzfejlesztők (kis szekunder oldali térfogat miatt)
- Primer kör legmagasabb pontja nem hűtött ("*candy cane*"), gőz felgyűlése blokkolhatja az áramlást, üzemzavari helyzetben lefúvatják innen a gőzpárnát.
- A típus legbiztonságosabb példánya Németországban épült fel...

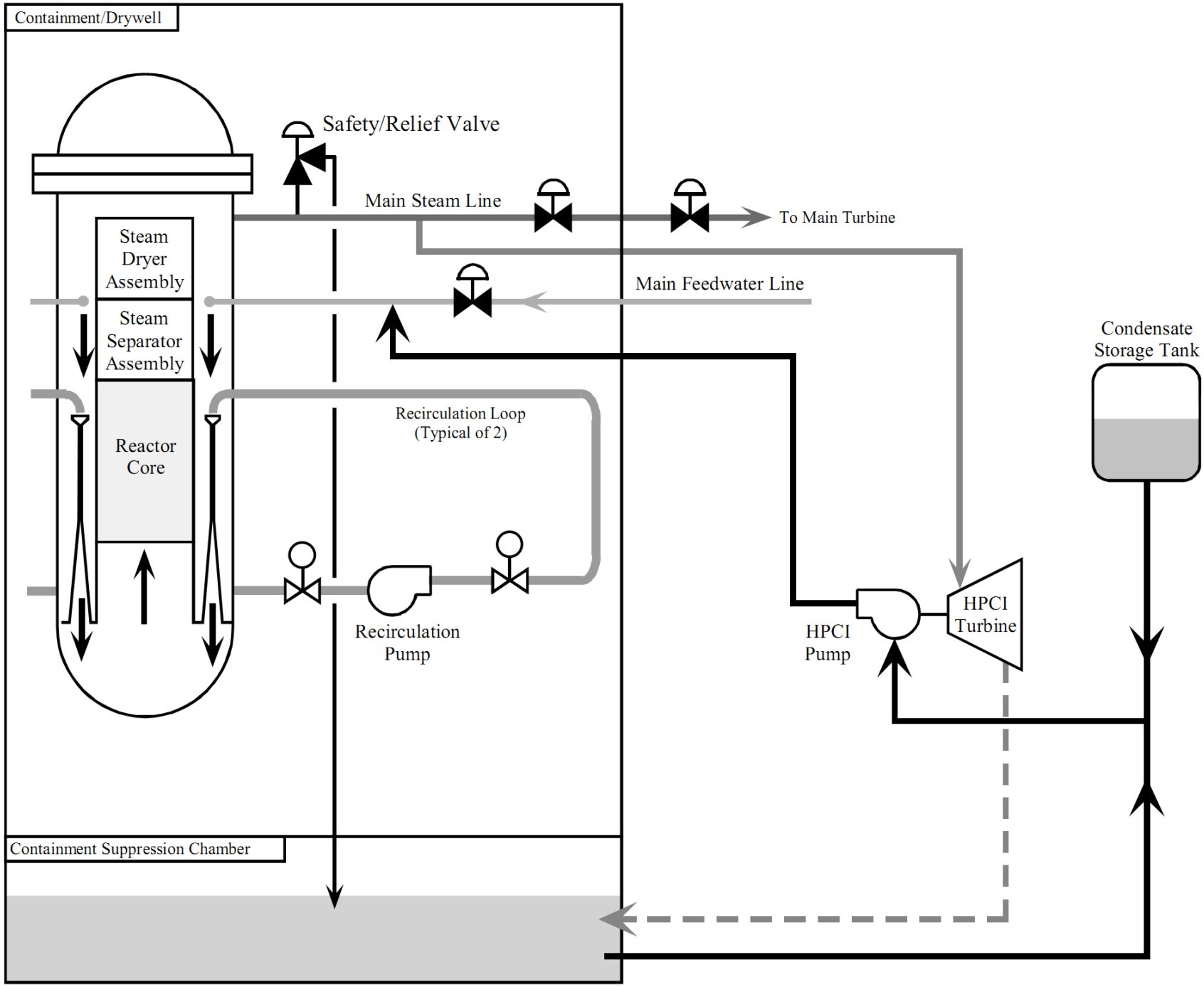
General Electric BWR



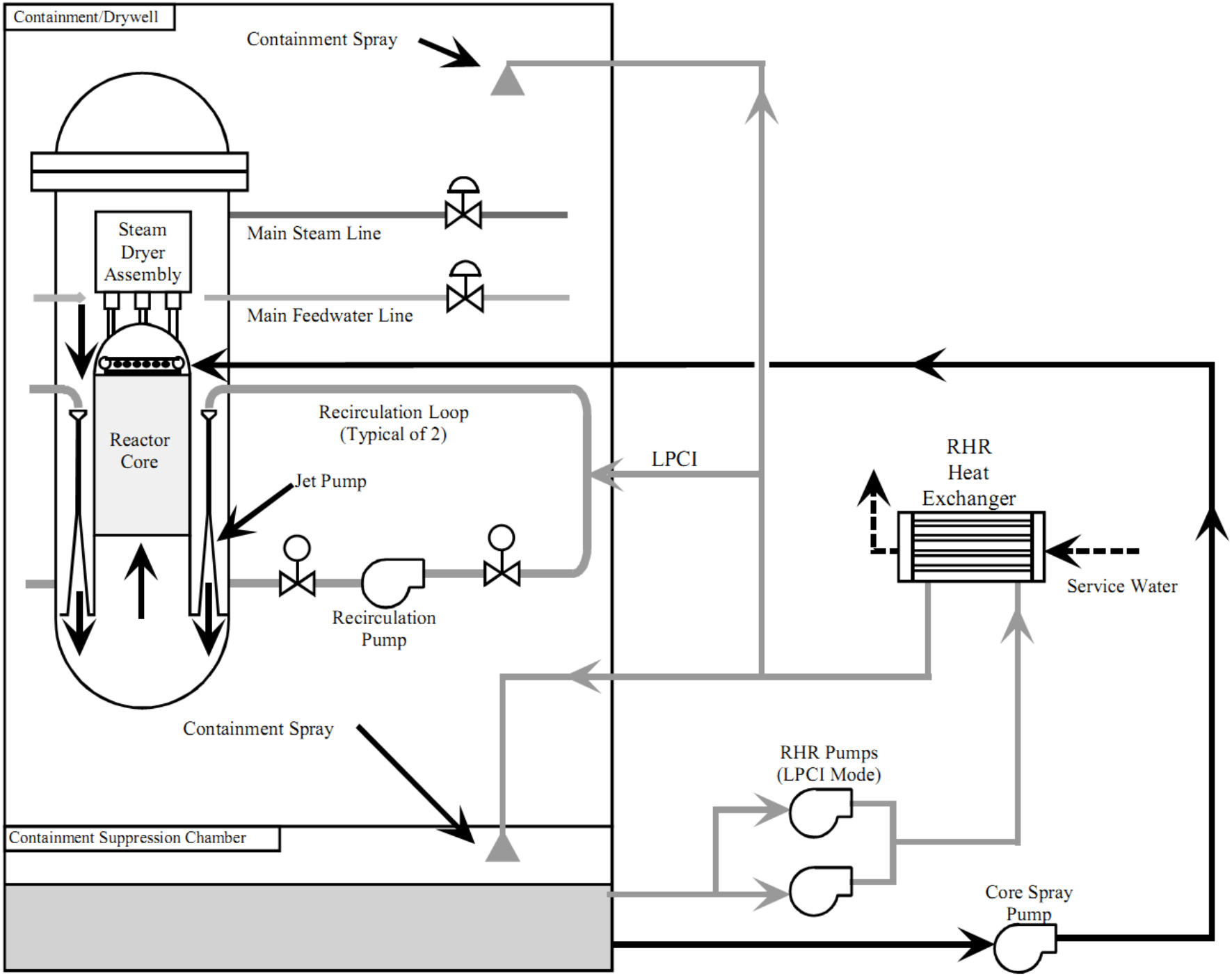
Izolációs betáplálás - Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC)



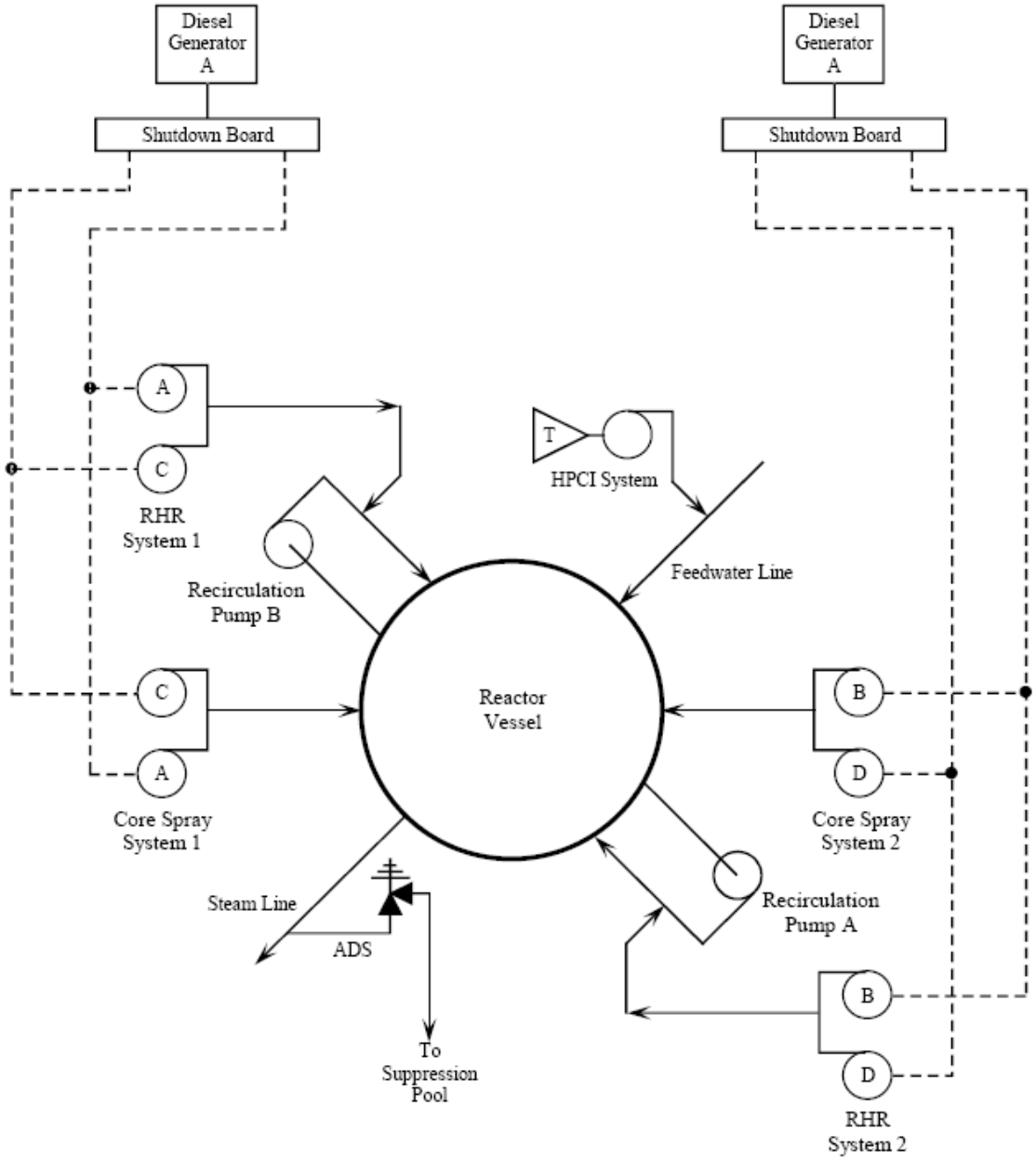
Nagy nyomású ZÜHR



Kis nyomású ZÜHR

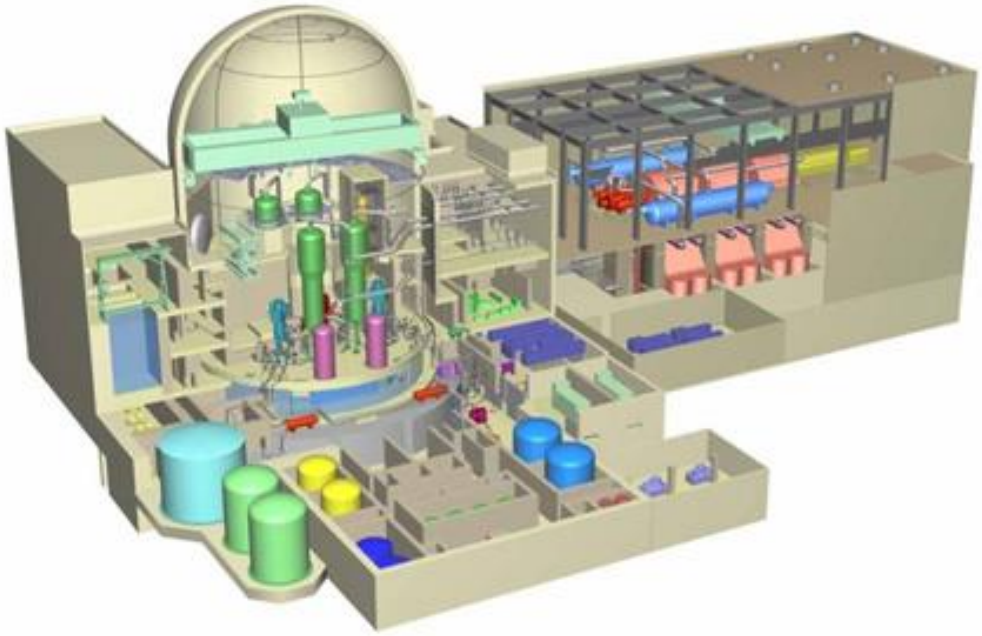


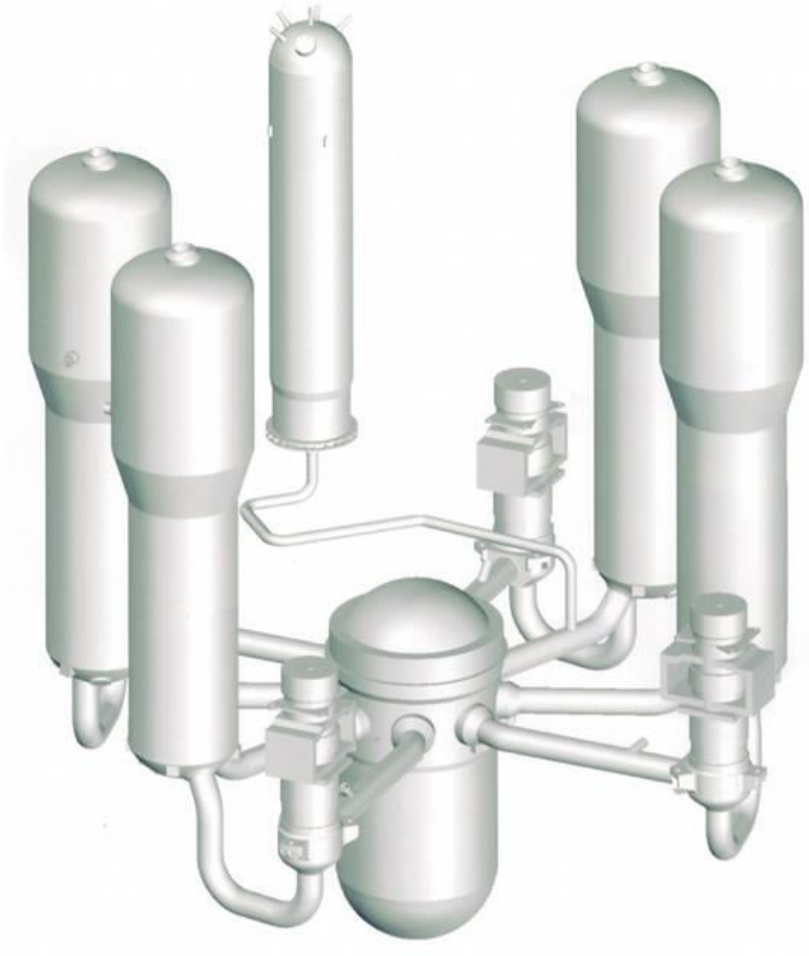
ZÜHR - ECCS



Emergency Core Cooling System Network

Mitsubishi APWR

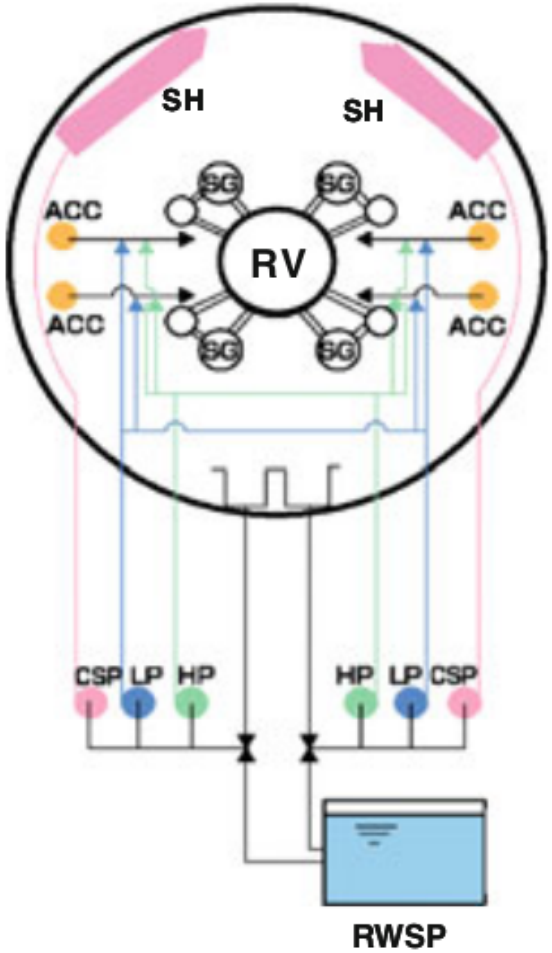




A Mitsubishi APWR továbbfejlesztett hidroakkumulátora

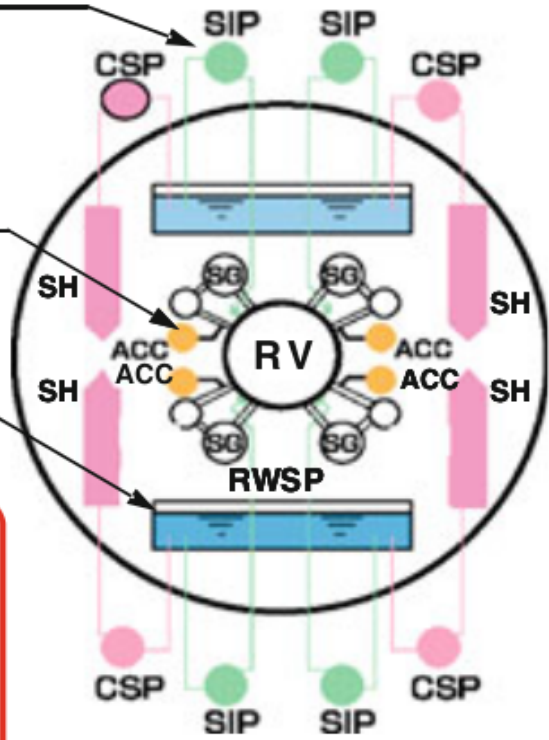
Current 4-Loop PWR (2 trains)

APWR (4 trains)



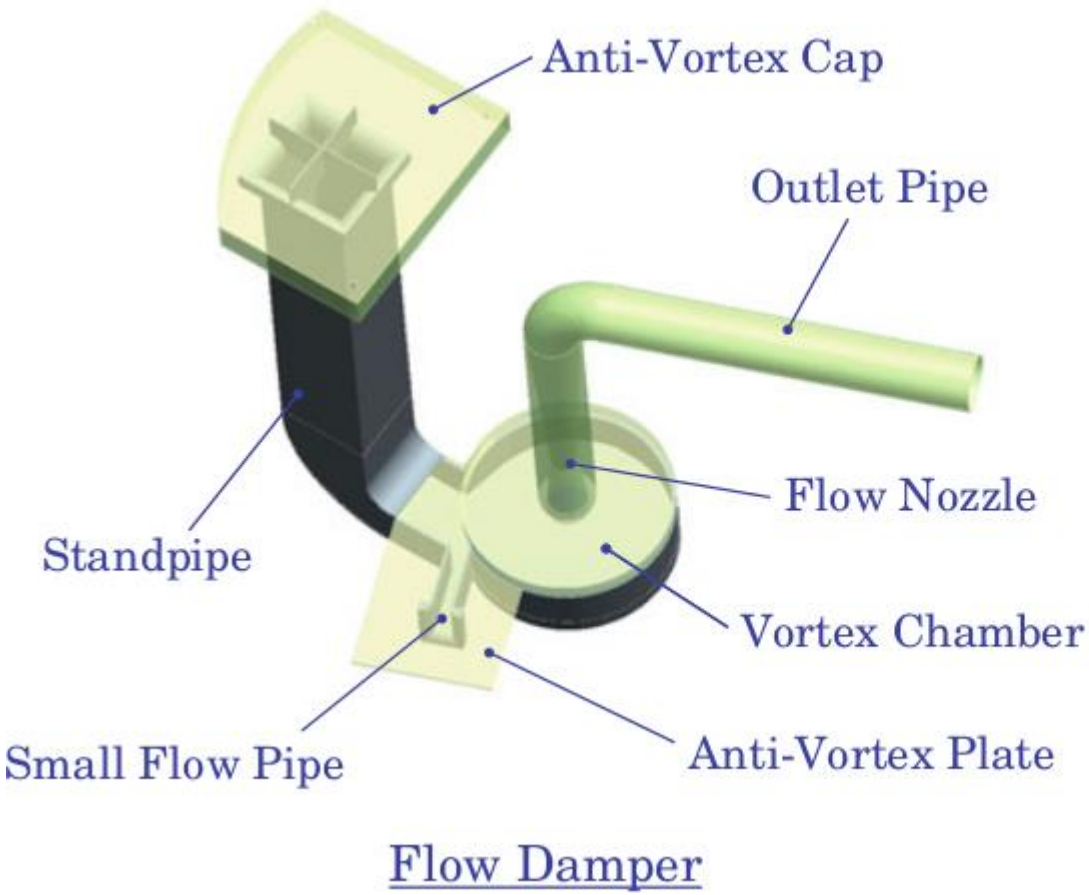
- **4 trains (DVI)**
  - → Higher Reliability
    Simplified Pipe Routing
- **Advanced Accumulator**
  - → Elimination of LP
- **In- containment RWSP**
  - → Higher Reliability

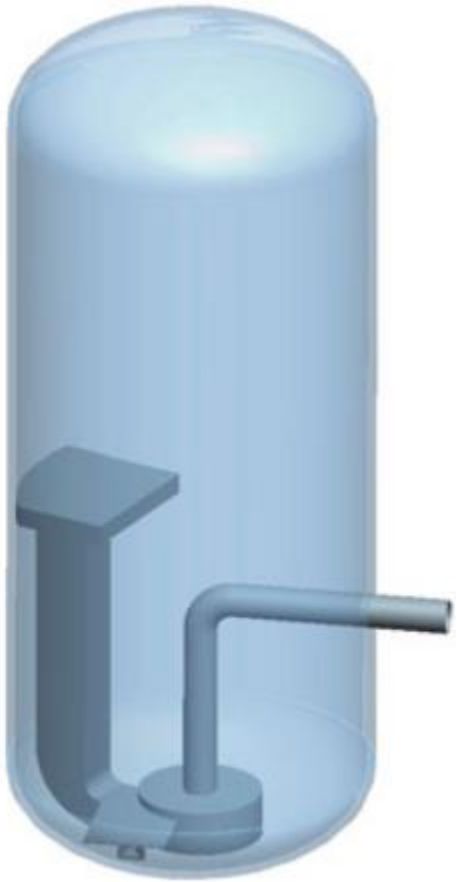
ACC	:	Accumulator
HP	:	High Head SIP
LP	:	Low Head SIP
SIP	:	Safety Injection Pump
CSP	:	Containment Spray Pump
SH	:	Spray Header
RV	:	Reactor Vessel
RWSP	:	Refueling Water Storage Pit



A 4 hurkos PWR és az APWR ZÜHR rendszerei

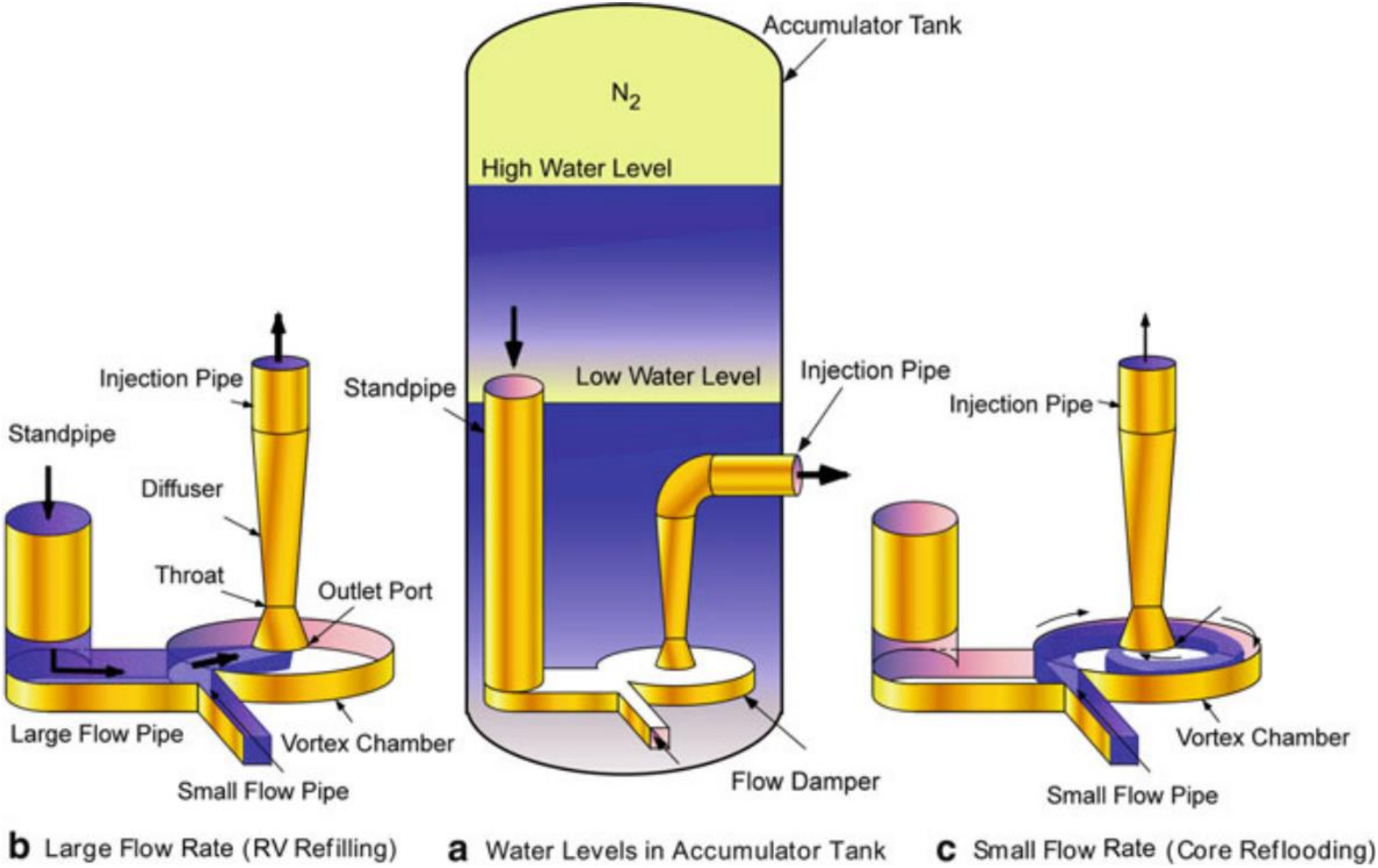
A Mitsubishi APWR továbbfejlesztett hidroakkumulátora





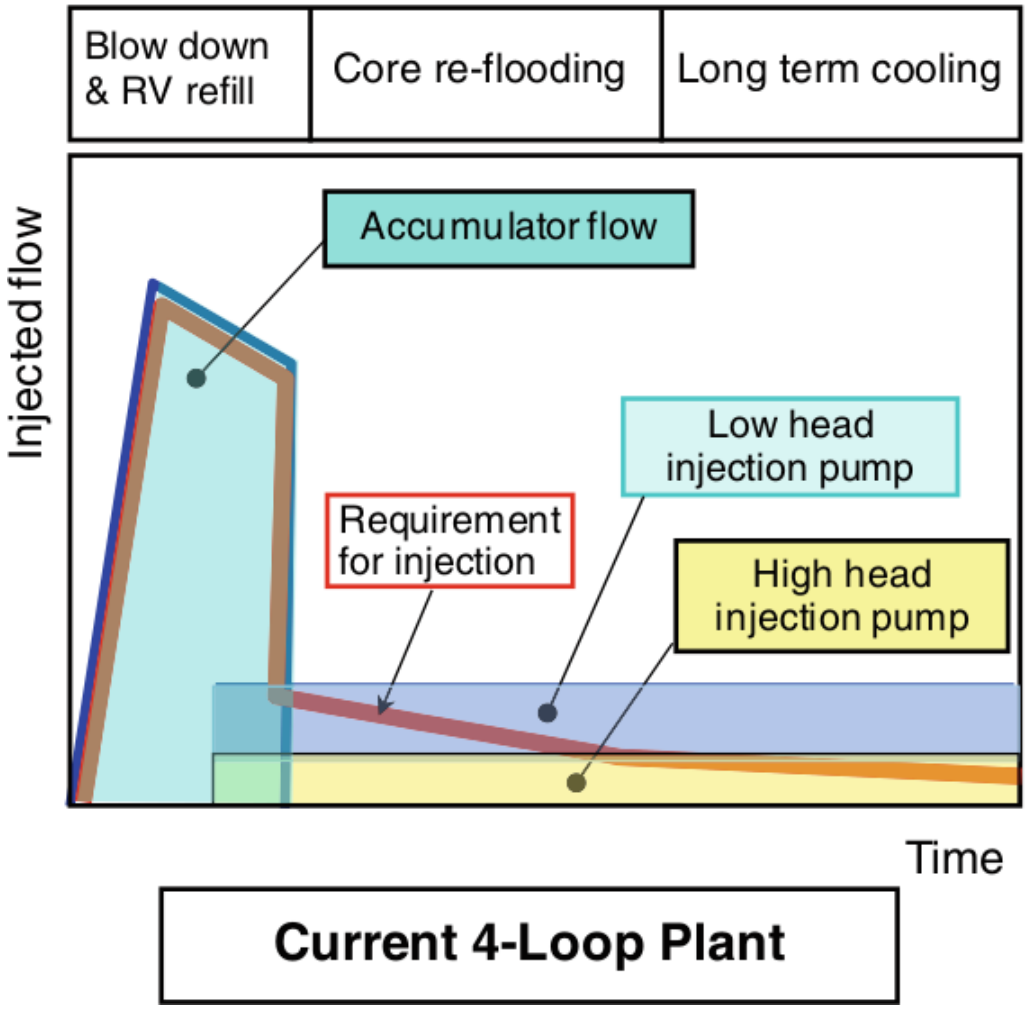
A továbbfejlesztett hidroakkumulátor kialakítása

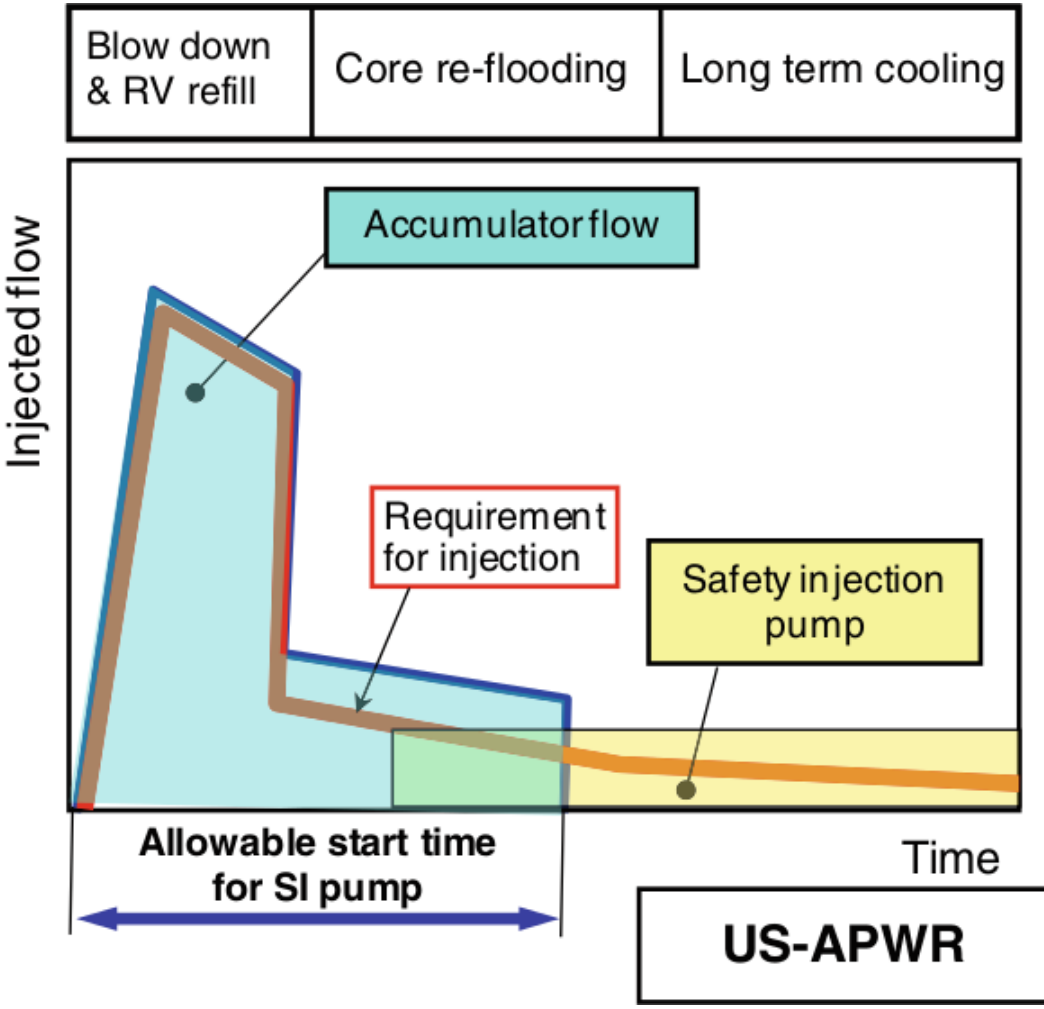
A Mitsubishi APWR továbbfejlesztett hidroakkumulátora



A továbbfejlesztett hidroakkumulátor üzemmódjai

A Mitsubishi APWR továbbfejlesztett hidroakkumulátora





ZÜHR víz szükséglet primer köri nagy csőtörés során