

Ütemterv
az **Atomerőművek** c. tárgyhoz (GEAHT 545-B)
Energetikai mérnöki alapképzési szakos hallgatók részére
ősi félév (2 óra előadás+2 óra gyakorlat)

- 1.hét: Tudománytörténeti áttekintés. A Bohr-féle atommodell. Az atommag, az atomok felépítése, radioaktivitás, az atomenergia.
- 2.hét: A radioaktív bomlás lehetőségei és a bomlás időbeli lefolyása. Stabilitási görbe. Tömeghiány, kötési energia. Az atomenergia felszabadítás két lehetősége: a fúzió és a fisszió.
- 3.hét: A maghasadás folyamata, példák. Hasadó izotópok, tenyészanyagok. Hasadási termékek. Hasadási neutronok, hasadáskor felszabaduló energia. A maghasadás valószínűsége, hatáskeresztmetszetek.
- 4.hét: Az atomreaktorok csoportosítása. Heterogén termikus reaktor fő elemei.
- 5.hét: A reaktor sokszorozási tényezője. A végtelen reaktor sokszorozási tényezője. Véges méretű reaktor sokszorozási tényezője, kritikus reaktor. Fluxuseloszlás csupasz és reflektált reaktorban.
- 6.hét: A reaktorszabályozás alapjai. Az üzemanyag kiégetése. A reaktormérgek. A hőmérséklet tényező. A kiégetési szint.
- 7.hét: A reaktor hőtermelése. A reaktor hűtőrendszere, átlagos és forró csatorna. A hőmérséklet változása a hűtőcsatorna keresztmetszete és hossza mentén.
- 8.hét: A reaktorhűtés korlátjai, a reaktor határteljesítménye. A reaktorhűtés és az erőművi körfolyamat kapcsolata.
- 9.hét: A primer kör és berendezései. Az üzemanyag és a szabályozó rudak, kazetták. A reaktortartály. A reaktortartály tartozékai.
- 10.hét: A főelzáró tolozár, a főkeringtető szivattyú, a gőzfejlesztő. A térfogat-kiegyenlítő rendszer.
- 11.hét: A szekunder kör és berendezései. A gőzfejlesztő. A gőzturbina. A cseppelválasztó. A gőztúlhevítő.
- 12.hét: A kondenzátor és a kondenzátum-szivattyú. A gőzsugárszivattyúk, az előmelegítők, a gáztalanító táptartály, a tápszivattyúk.
- 13.hét: A láncreakció szabályozása, azonnali leállítása. Az atomerőmű tervezett legsúlyosabb üzemzavara és a hatása elleni védekezés módjai. Az atomerőművek elrendezési terve. Az atomerőművek építésének különleges követelményei.
- 14.hét: A gázhűtésű atomerőművek. A folyékonyfém hűtésű atomerőművek.

Tantárgyi követelmények

Az előadások 60%-án kötelező a részvétel, valamint a gyakorlatok maximum 30%-ról lehet hiányozni!
Az aláírás feltétele a félév során írandó egy zárthelyi dolgozat legalább 40%-os teljesítése. A zárthelyi dolgozat előre kiadott tételesor alapján kerül összeállításra. Az utolsó oktatási héten pótzárthelyit biztosítunk. Gyakorlati jegy: Gyakorlati jegy az eredményes zárthelyi dolgozat alapján az alábbiak szerint:

Osztályozás:

- 0-39% elégtelen;
- 40-54% elégséges;
- 55-69% közepes;
- 70-84% jó;
- 85-100% jeles.

Ajánlott irodalom

- Dr. Szabó Szilárd: Atomerőművek. Elektronikus előadásvázlat. (Letölthető az E-Learning portálról)
- Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana I. kötet: A reaktorfizika és –technika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana II/1. és II/2. kötet: Az energetikai atomreaktorok üzemtana, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2005
- A. Ziegler-H.L. Allelein: Reaktortechnik, Springer, 2013
- S.C.Somasundaram-Thermal Engineering-New Age International (P) Ltd,1996
- Anderson, J.D.: Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw Hill, New York, 1995.
- Büki, G.: Energiatermelés, atomtechnika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- Büki, G., Ósz, J., Zsebik, A.: Energetikai számítások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.
- Margulova, T. H.: Atomerőművek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1988.
- Bede, G.: Reaktorelmélet-reaktortechnika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.

- R.A. Zahoransky: Energietechnik, Studium Technik, Vieweg, 2007

ATOMERŐMŰVEK
zárthelyi dolgozat

Név:		Neptun kód:					
A feladat sorszáma	1	2	3	4	5	Σ	Pontsz.
Elérhető pontszám:	20	15	25	20	20	100	min. 40
Elért pontszám:							

1. *Ismertesse a tömeghiány és a kötési energia fogalmát! Mi a fúzió és mi a fisszió?*
2. *Sorolja fel, hogy milyen n-reakciókat jellemző mennyiségeket ismer!*
3. *Mutassa be a kétkörös atomerőmű primer körét és annak berendezései közül az alábbiakat: Az üzemanyag és a szabályozó rudak, kazetták. A reaktortartály. A reaktortartály tartozékai.*
4. *Ismertesse a láncreakció szabályozásának és azonnali leállításának módját!*
5. *Mutassa be az atomerőmű tervezett legsúlyosabb üzemzavarát és a hatása elleni védekezés módjait!*

Megoldás:

1. feladat

Az atom számított tömege:

$$M_0 = Z \cdot (m_p + m_e) + N \cdot m_n$$

A számított tömeg (M_0) \neq tényleges tömeg (M). Különbőségük a **tömeghiány**, a tömeg defektus:

$$\Delta M = M_0 - M = Z \cdot (m_p + m_e) + N \cdot m_n - M$$

Tömeg, energia = az anyag különböző megjelenési formái. Einstein szerint a ΔM -nek megfelelő energia:

$$E_k = \Delta M \cdot c^2$$

$$[J] = [kg] \cdot \left[\frac{m^2}{s^2} \right],$$

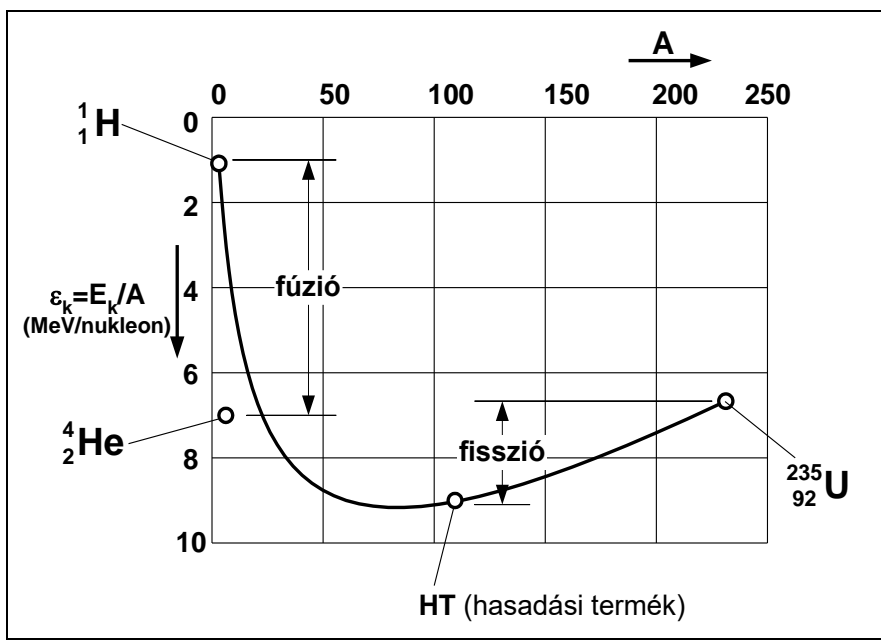
ahol c a fénysebesség:

$$c = 299,79258 \cdot 10^6 \frac{m}{s} \cong 300 \cdot 10^6 \frac{m}{s} = 300000 \frac{km}{s} .$$

A ΔM -nek megfelelő E_k -t kötési energiának nevezzük. Ez az energia szabadulna fel,

ha egy atomot elemi részekből raknánk össze, ill. ekkora energia kell az elemi részekre bontáshoz.

1 nukleonra eső kötési energia, a fajlagos kötési energia $\varepsilon_k = E_k / A$, amelyek változását a tömegszám függvényében az ábramutatja.



A fajlagos kötési energia változása a tömegszám függvényében
 Az atomenergia felszabadítás két lehetősége (E_k -nak mindenképpen nőnie kell):

Fúzió: ($E_k \uparrow$)

Kis tömegszámú magok egyesítésekor a keletkezett mag fajlagos kötési energiája nagyobb, mint az eredeti magoké, tehát kifelé energia szabadul fel. Pl: Fúzió van: napban, hidrogénbombában.

Fisszió:(maghasadás): ($E_k \uparrow$)

Nagy tömegszámú atommagot kettéhasítunk, következésképpen a keletkezett HT fajlagos kötési energiája nagyobb, mint az eredeti magé, tehát kifelé ugyancsak energia szabadul fel.

A jelenlegi atomerőművek a **maghasadást** hasznosítják.

2. feladat

A magreakciók (főleg n-reakciók) valószínűségét hatáskeresztmetszetekkel jellemezzük.

A neutronokkal kapcsolatos reakciók:

- befogás** ⇔ a neutron befogódik
- hasadás** ⇔ a neutron hasít
- szórás** ⇔ a neutron ütközik

A neutronokkal kapcsolatos reakciók időegység alatti száma:

$$dC \left[\frac{\text{reakciók száma}}{\text{sec}} \right]$$

Mikroszkopikus hatáskeresztmetszet

$$\sigma \sim \frac{\text{reakció}}{\text{mag} \cdot n} \text{ (egy magra és egy neutronra eső reakció száma)}$$

$$\sigma [cm^2] = \frac{dC \left[\frac{\text{reakció}}{s} \right]}{dN [\text{mag}] \cdot I \left[\frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]}$$

Makroszkopikus hatáskeresztmetszet

A térfogategységben bekövetkező reakciók valószínűségét fejezi ki. Legyen a térfogategységben lévő atommagok száma:

$$N = \frac{L \cdot \rho}{A_t} \cong \frac{L \cdot \rho}{A}, \left[\frac{\text{mag}}{cm^3} \right],$$

ahol:

- ρ : az anyag sűrűsége [g/cm³],
- $L = 6,023 \cdot 10^{23}$ -Avogadro-féle állandó [mag/mol],
- A_t [g/mol]) móltömeg $\cong A$ (tömegszám).

A makroszkopikus hatáskeresztmetszet így:

$$\Sigma = N \cdot \sigma, \left[\frac{1}{cm} \right].$$

Amennyiben m különböző fajta mag van a térfogategységben:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^m (N_i \cdot \sigma_i),$$

ahol:

- σ_i - az i -edik izotóp mikroszkopikus hatáskeresztmetszete
- $N_i = \frac{L \cdot \rho}{A_t} \cdot r_i$

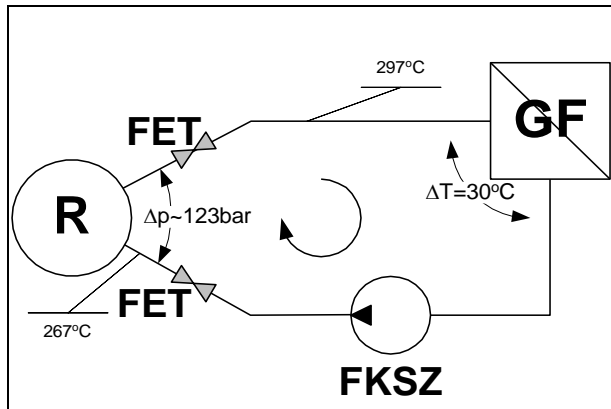
amelyben r_i a ρ sűrűségű és A_t móltömegű anyagban az i -edik izotóp részaránya.

Szabad úthossz

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} \text{ [cm]}$$

az az út, amelyet a neutron a közegben átlagosan megtesz addig, amíg a magreakció bekövetkezik.

3. feladat

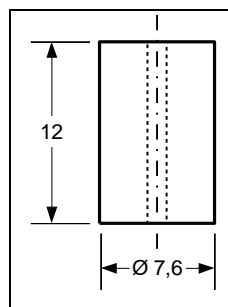


A primer kör berendezései: R- reaktor (1db), FET- főelzáró tolózár (12db), GF- gőzfejlesztő (6db), FKSZ- fő keringtető szivattyú (6db)

A reaktor üzemanyaga

^{235}U	^{238}U	
1,6 %	98,4 %	1,6 % dúsítású üzemanyag
2,4 %	97,6 %	2,4 % dúsítású üzemanyag
3,6 %	96,4 %	3,6 % dúsítású üzemanyag

a.) PAE: **Uránoxid pasztilla**



b.) **Fűtőelem** Hermetikusan zárt cirkónium cső, benne 200 db UO_2 pasztilla, (azonos dúsítású) a belső tér héliummal töltött. \rightarrow 9,1 mm befoglaló méretű, hatszögletű.

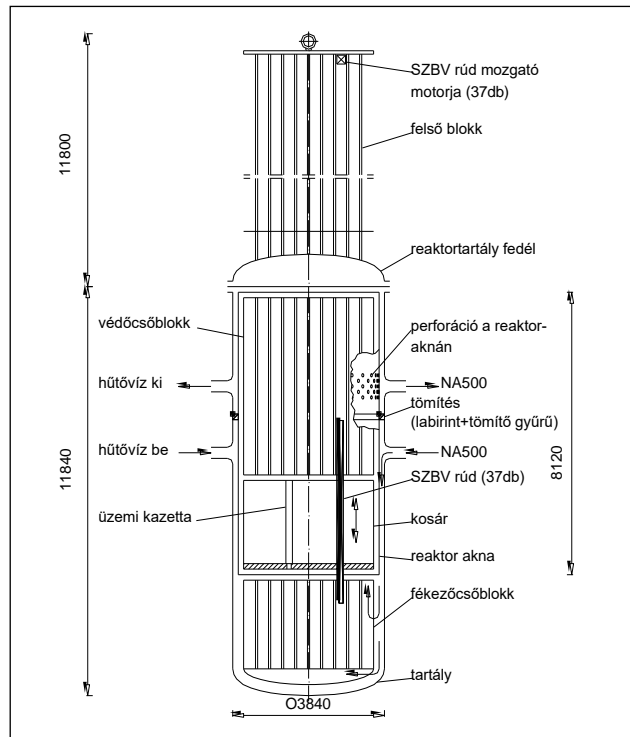
c.) **Üzemi kazetta** 126 db azonos dúsítású fűtőelem összefogva mozgatás szállítás céljára egy hatszögletű cirkónium csőben, amelynek laptávja 146 mm, hossza 3217 mm.

A reaktortartály (és tartozékai)

- **Feladata** : az aktív zóna hermetikus elzárása a környezettől még a legsúlyosabb üzemzavar esetén is.
- **Kialakítása**: csonkokkal ellátott, elliptikus fenekű hengeres tartály.

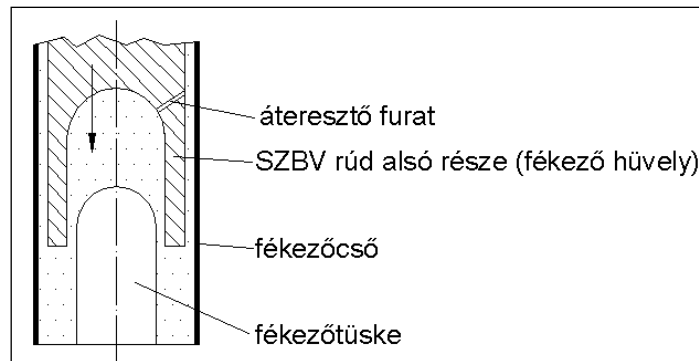
- **Tartály perem:**
 - erre illeszkedik a fedél,
 - a két felület között 4 db nikkel gyűrű van,
 - összefogás: 60 db M140-es tőcsavar.
- **Anyaga:**
 - gyengén ötvözött szénacél, amely bírja a nagy nyomást,
 - belül 8 mm vastag rozsdamentes bevonat (plattírozás).

A tartályt és fő részeit az ábra mutatja.



A reaktortartály tartozékai:

- **Reaktor akna:**
 - függőleges helyzetű henger, oldalán perforáció egy szakaszon,
 - feladata: a hűtővíz terelése a tartály fala mentén lefelé, → a tartály fala így hűtött,
- **Fékezőcső blokk:**
 - feladatai: a tartály alján megforduló víz megvezetése, a perforált elliptikus alja segítségével
 - az SZBV (szabályozó biztonságvédelmi) rudakat lefékezni, ha azok havaria esetén szabadeséssel zuhannak le.



▪ **Védőcső blokk:**

- **elhelyezkedése:** az üzemanyagkosár felett az aknában,
- **feladatai:**
 - ◆ védi a 37 db SZBV rudat a vízáramtól,
 - ◆ leszorítja az üzemi kazettákat,
 - ◆ központosítja az üzemi kazettákat,
 - ◆ hőmérséklet-, neutronfluxus mérők érzékelőit tartja.

▪ **Üzemanyagkosár:** A kosárban helyezkedik el a zónatérképnek megfelelően a 312 üzemi kazetta és a 37 SZBV rúd.

Ezen keresztül áramlik a víz, amely a hűtés és a moderáció feladatát is ellátja.

▪ **A felső blokk:**

felépítése: a 37 db hajtástokból és a és a reaktortartály félgömb alakú fedeléből áll,

A hajtástokban vannak a SZBV rudak villamos hajtásai és a rudak helyzetérzékelői.

▪ **Szabályzó és biztonságvédelmi rudak (SZBV) 37 db**

Két részből állnak.

- Neutron elnyelő rész: Hatszögletű cirkónium lemezzel burkolt hasáb, amelynek belsejében bóracél van – nagy a neutronbefogási hatáskeresztmetszete,
- Üzemanyag rész: mint egy szabályos kazetta 126 fűtőelemből áll, cirkónium lemezzel burkolva.

Elhelyezkedésük: az üzemanyag rudak között.

Le- fel mozgathatók a felső blokkban levő mozgató mechanizmussal. A kosár alján levő hatszögletű részen a fékező blokkba ereszthető az üzemanyag része. A mozgatásukkal a reaktor szabályozható vagy leállítható.

▪ **Moderátor:** PAE-ban a moderátor szerepét is a hűtővíz játssza. A víz H atomjaiba ütközve a gyors neutronok lelassulnak hasítóképes termikus neutronokká.

4. feladat

A láncreakció szabályozása, azonnali leállítása

A láncreakcióban résztvevő neutronok és ^{235}U atommagok számától függ a maghasadások száma, következésképpen a reaktor hőteljesítménye:

$$n, {}^{235}\text{U} \uparrow \Rightarrow P \uparrow;$$

$$n, {}^{235}\text{U} \downarrow \Rightarrow P \downarrow;$$

A szabályozás megvalósítása két úton történik, egyrészt az **SZBV rudakkal**, másrészt a **hűtővíz bórkonzentrációjának** változtatásával.

Szabályozás a szabályozó biztonságvédelmi rudakkal:

PAE: 37 db rúd → 30 db normál üzemben, azaz felhúzva,

→ 7 db szabályozás üzemben, változó magasságban.

A szabályozó rudak neutronelnyelő felső része benyúlik az aktív zónába → fékezi a neutronokat, másrészt alsó ^{235}U -t tartalmazó része kinyúlik az aktív zónából ⇒ kettős ok a teljesítmény csökkenésére.

SZBV szabályozás

- előnye: gyors szabályozás: 2cm/s,
- hátránya: korlátozott szabályozás, a rudak véges száma miatt.

Bóros szabályozás

A hűtővíz bórsav koncentrációjának növelésével nő a hűtővíz neutronelnyelő képessége → csökken a maghasadások száma.

Fő feladata az éves ciklus során a mindenkori 100% teljesítmény megtartása. Ezért 6-7 g/l bórsav tartalommal erősen csökkentik a neutronok számát, majd az üzemanyag kiegészésével párhuzamosan csökkentik a koncentrációt, így tartva állandó szinten a neutronok számát s így a teljesítményt. Az éves ciklus végén a koncentráció ~0, további ü.a. kiegészés a bórsav koncentráció csökkentésével nem kompenzálható. Az erőmű teljesítményen tartásához új, friss üzemanyag kell.

A bóros szabályozás

- előnye: hatása szinte korlátlan,
- hátránya: lassú, mert az egész primer körüli víztömeg bórsav koncentráció változásához idő kell.

A láncreakció azonnali leállítása

A technológiai paraméterekben történő káros mértékű eltérések észlelésekor a biztonsági automatika képes emberi beavatkozás nélkül leállítani a reaktort, ezzel megelőzve a reaktor és a kapcsolódó berendezések végzetes károsodását.

A reaktor leállítása:

- Valamennyi (37 db) SZBV rúd szabadeséssel beesik az aktív zónába.
 $v \cong 20 \text{ cm/s}$; $t \cong 12-13 \text{ s}$.
- Megindul a primerkörü hűtővíz bórsav koncentrációjának növelése. Ez a művelet sor lehet önműködő és a kezelők által vezérelt is.

5. feladat

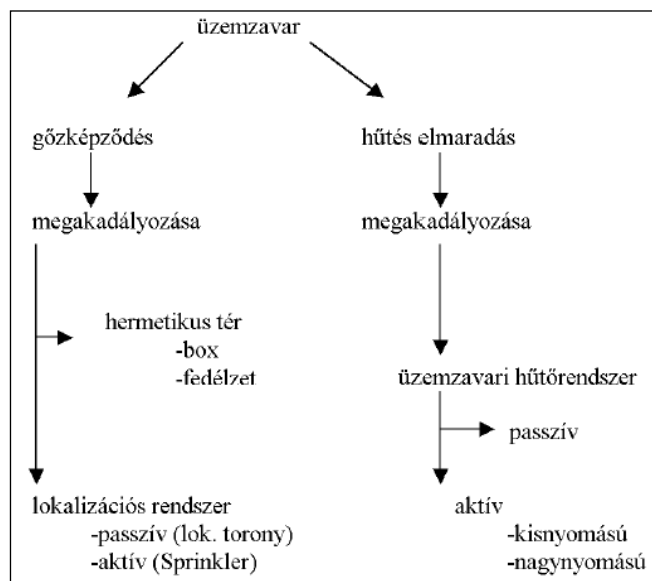
Az atomerőmű tervezett legsúlyosabb üzemzavara és a hatása elleni védekezés módja

A legsúlyosabb tervezett üzemzavar az NA 500-as vezeték teljes keresztmetszetű törése. \Rightarrow 123 bar, 280 °C-os víz hirtelen gőzzé alakulna.

Ennek két súlyos következménye lenne:

- A radioaktív anyagokat tartalmazó **víz gőzzé alakulván** ezen anyagokat magával vinné a környezetbe.
- Az **aktív zóna hűtés nélkül maradna**. A 37 SZBV rúd a láncreakciót ugyan leállítaná, de a hasadványok bomlása tovább folya, illetve az aktív zóna jelentős tárolt hőt is tartalmaz. Ezért a cirkónium fűtőelem burkolatok megolvadhatnak \Rightarrow a fűtőelemekben felgyülemlt radioaktív hasadványok kikerülnének a környezetbe.

Üzemzavar következményeit és a elhárításának eszközeit és módszereit az ábra foglalja össze.



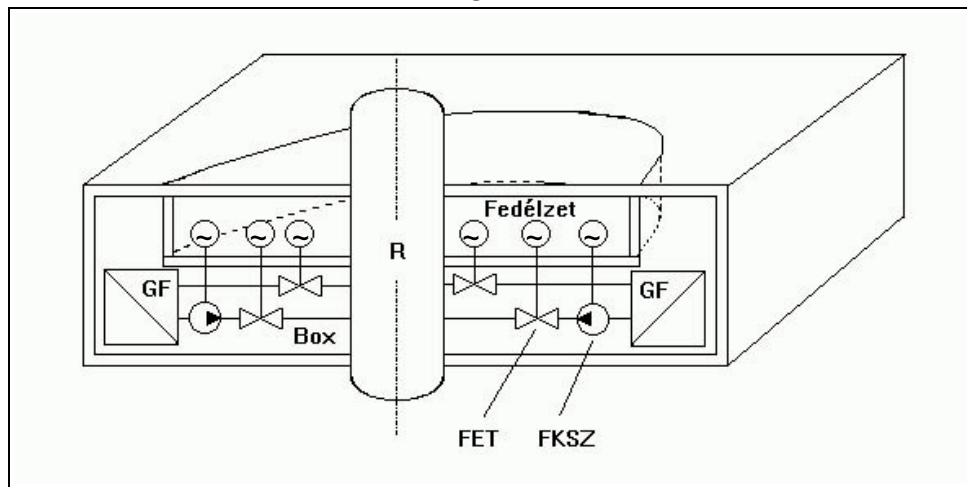
A felsorolt üzemzavari jelenségek elkerülésének módszerei:

Ad. A.) A radioaktívan szennyezett gőz kijutásának megakadályozása:

- **hermetikus tér és**
- **lokalizációs rendszer lévén valósul meg.**

a) **Hermetikus tér** veszi körül a kétkörös atomerómű teljes primer körét- 1,5m vastag betonfallal körbevelt épületrész. Ez két részre osztható:

- **Box:** A teljes vízkört tartalmazza: keringtető szivattyút, tolózárok aktív részét, a hőcserélőket, a hozzá tartozó NA 500-as vezetékeket. Üzemszerűen ez a tér nem kezelhető.
- **Fedélzet:** Ez tartalmazza a szivattyúk, tolózárok kezelő szerveit, tömítő fokozatokat, stb. Ez üzem közben is kiszolgálható.



b) **Lokalizációs rendszer** akadályozza meg a nyomás megnövekedését a hermetikus rendszerben.

- **Passzív rész** → **lokalizációs torony** → **nem kell villamos energia a működtetéséhez**

A keletkezett gőz és a hermetikus tér levegője kitágulva átáramlik az ún. lokalizációs toronyba → vízzel töltött tálcákon átbuagyborékolva a gőz kondenzálódik és különvállik a levegőtől → a levegő az ún. levegőcsapdába kerül → összegyűjtik → légtisztító → megtisztul a radioaktív szennyeződésektől → szellőző kémények → elhagyja a tisztított levegő a rendszert.

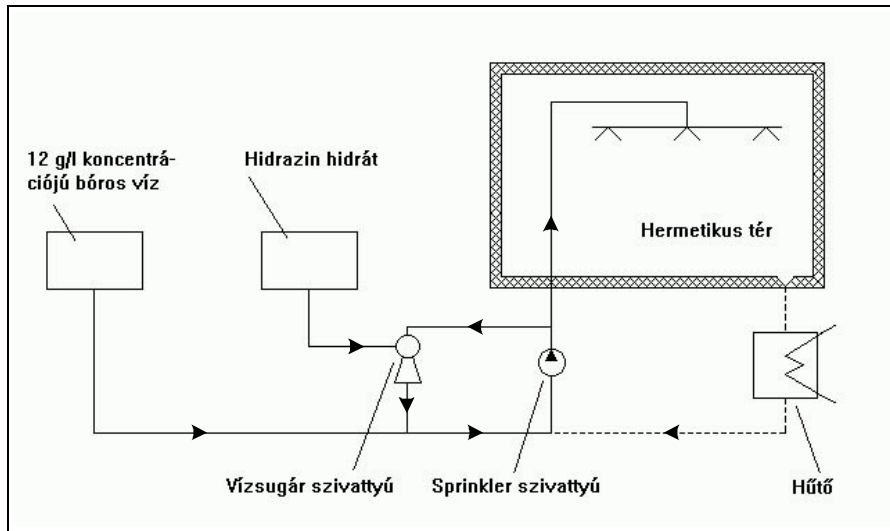
A tálcákon a kondenzáció hatására felgyülemelő víz alázuhog, a maradék gőzt még a hermetikus térben is kondenzálja.

- **Aktív rész** → Sprinkler rendszer → villamos energia kell a működtetéséhez.
3 egyforma rendszert építenek ki, de 1 is elég a feladat ellátására.

A hermetikus térben a csőtörés okozta gőzkeletkezés miatti nyomásnövekedés érzékelésekor a Sprinkler szivattyú bóros vizet porlaszt be a hermetikus térbe. → A víz a gőzt kondenzálja → csökken a nyomás.

A bóros víz elfogytával a hermetikus tér alján összegyűlő vizet egy hűtőn keresztül juttatja vissza a szivattyú a hermetikus térbe mindaddig, míg a nyomás a megengedett érték alá nem csökken.

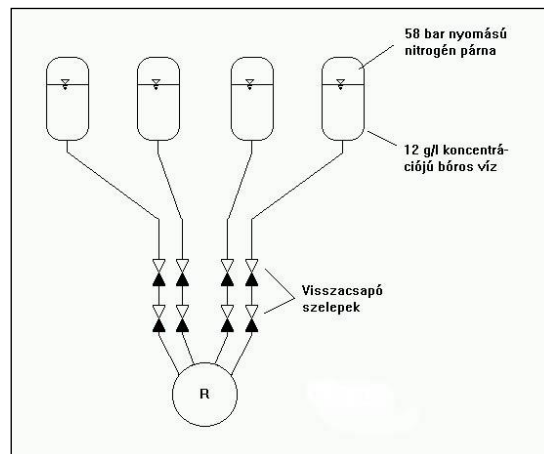
A boxban lévő radioaktív jód megkötésére egy vízsugárszivattyú segítségével hidrazin hidrátot is adagolnak a bepermetezendő vízhez. (jód-ember- 75%-a a pajzsmirigyben gyűlik fel- erős sugárterhelés)



A Sprinkler rendszer

Ad. B.)A főkeringtető vezeték törésekor működésbe lép az aktív zóna üzemzavari hűtőrendszer (ZÜHR):

- **Passzív ZÜHR** -villamos energia nem kell hozzá. A primer körí nyomás 58 bar alá csökkenve a visszacsapó szelepeken keresztül bóros víz árasztja el a reaktort. A vizet a **nitrogén párna** nyomja a tárolótartályokból a reaktorba.



- **Aktív ZÜHR**-villamos energia kell hozzá.
3 egyforma rendszer van kiépítve, bár 1 is elég volna.

Minden egység két részből áll:

- **kisnyomású ZÜHR:** szivattyú 12 g/l bóros vizet nyom a reaktorba egy tartályból, majd ez kiürülvén a hermetikus tér alján összegyűlőt szállítja.
- **nagynyomású ZÜHR:** nagynyomású szivattyú 40 g/l bóros vizet nyom a hűtőkör hideg ágába.