

CENTRALE NUCLEARO- ELECTRICE

Curs 3

02.10.2007

PTDEE - Curs 3 - prof. R. TIRNOVAN

3.1. Generalități

Energia nucleară joacă un rol important în producția de energie electrică, la egalitate cu cea produsă în hidrocentrale. Pe plan european circa 33% din energia electrică este produsă în centrale nucleare-electrice (de exemplu în Franța energia nucleară stă la baza a circa 75% din producția de energie electrică).

Centralele nucleare sunt centrale termoelectrice, fiind constituite dintr-o sursă care cedează căldură (reactorul), un sistem de transport al energiei termice (cu unul, două sau trei circuite) și un sistem de transformare a energiei termice în energie electrică (turbină, generator plus sursă rece). În practică există o multitudine de combinații posibile ale acestor elemente, în primul în ceea ce privește tipurile de reactoare dezvoltate, dar și în ceea ce privește producerea energiei electrice care se poate realiza cu turbine cu abur sau cu turbine cu gaz. Totodată sursa rece poate să fie apa unui râu, apa mării, aerul etc. Schematic sunt prezentate elementele principale ale circuitului termic al unei centrale nucleare în figura 3.1.

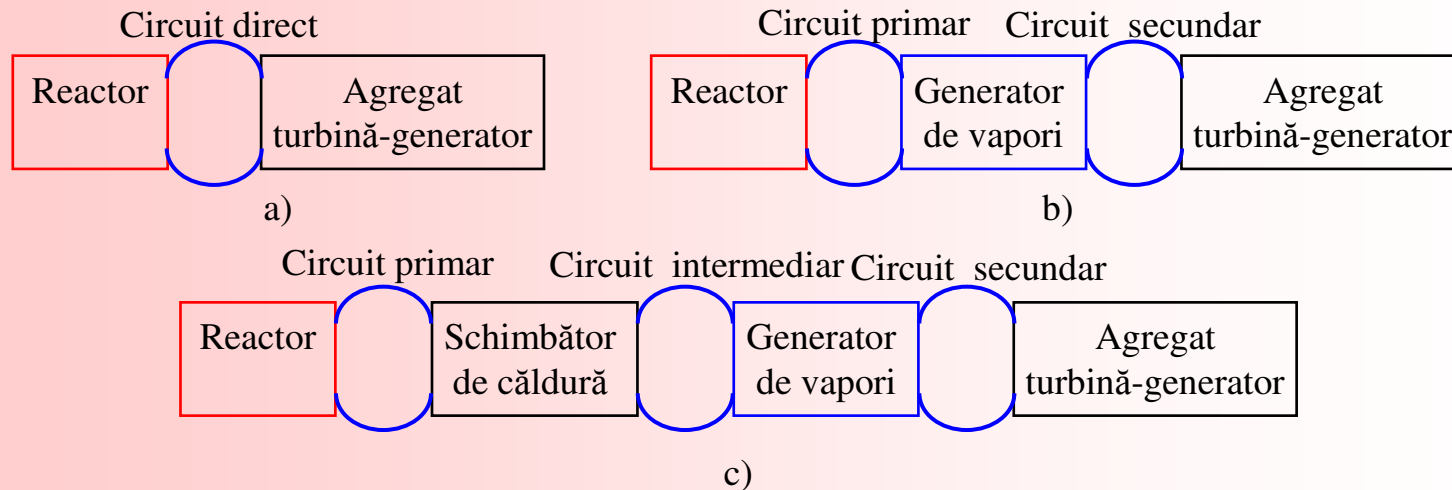


Fig.3.1. Scheme de principiu ale centralelor nucleare-electrice

Utilizarea reactoarelor nucleare impune, ca și surse de căldură, impune condiții specifice de presiune și temperatură, diferite față de centralele termoelectrice clasice. Din acest motiv tehnologiile utilizate pentru realizarea instalațiilor sunt diferite față de cele utilizate în instalațiile centralelor termoelectrice clasice.

3.2 Reactorul nuclear de fisiune

3.2.1 Reacția de fisiune în lanț

În reactorii nucleari actuali, eliberarea energiei nucleare este rezultatul procesului de **fisiune nucleară**.

Transformările nucleare pot avea loc fie spontan, **dezintegrări radioactive**, fie datorită interacțiunii nucleelor între ele sau cu particule incidente, așa numitele **reacții nucleare**.

Fisiunea nucleară a fost descoperită de Hahn și Strassmann în 1938, când au descoperit în urma reacției $U+n$ prezența bariului cu numărul atomic 56.

Francezii F. Joliot Curie și F. Perrin au stabilit că la fiecare dezintegrare se produc în medie mai mult de doi neutroni, fapt care permite să se autoîntrețină o reacție de fisiune în lanț.

Fisiunea nucleară poate avea loc în mod spontan, sau poate fi indusă prin ciocnirea nucleelor grele cu alte particule: neutroni, protoni, particule alfa, deuteroni etc. Primul model al fisiunii induse de particule a fost elaborat de Bohr și Wheeler pe baza modelului picătură al nucleului.

În conformitate cu acest model, particula incidentă formează la început, împreună cu nucleul țintă, un nucleu compus într-o stare excitată, excesul de energie fiind datorat energiei cinetice a particulei incidente și corecției intervenite în energia de legătură prin formarea nucleului compus. Energia de excitare provoacă o deformare a nucleului, care trece de la forma sferică la una elipsoidală.

Dezexcitarea poate avea loc prin expulzarea unui foton gama, caz în care reacția nucleară reprezintă doar o **captură radiativă**. Dacă deformarea depășește o anumită valoare critică, forțele columbiene de respingere devin predominante și nucleul evoluează spre o separare în fragmente distincte - **fisiunea nucleară**. Există și alte modele de fisiune, mai apropiate de realitate, cum este modelul în pături.

Pentru nucleele cu o configurație par-impară, ca de exemplu ${}_{92}\text{U}^{235}$, neutronul incident conduce la o configurație par-pară ${}_{92}\text{U}^{236}$, instabilă, adică cu energie de separare mare, cu alte cuvinte ${}_{92}\text{U}^{235}$ va putea fisiona cu neutroni de energie cinetică mică, **neutroni lenți** sau **neutroni termici**.

Pentru nucleele cu o configurație par-pară, de exemplu ${}_{92}\text{U}^{238}$, neutronul suplimentar va conduce la o configurație par-impară, ${}_{92}\text{Pu}^{239}$, stabilă (un timp de înjumătățire de 24000 ani), cu o energie mică a neutronului introdus, ca urmare pentru fisiune este nevoie de neutroni cu o mare energie cinetică, **sau neutroni rapizi**.

Uraniul ${}_{92}\text{U}^{235}$ este singurul izotop fisibil cu neutroni termici care se găsește în natură, cu o abundență masică în uraniul natural de 0.7113%. Alți izotopi fisibili cu neutroni termici în energetica nucleară sunt produși prin reacții nucleare; aceștia sunt ${}_{92}\text{Pu}^{239}$ și ${}_{92}\text{U}^{233}$, de asemenea nuclee par-impare, obținuți prin bombardarea unor izotopi naturali cu neutroni rapizi.

O caracteristică a reacției de fisiune induse de neutroni constă în faptul că, pe lângă eliberarea unei cantități însemnate de energie, se emit mai mulți neutroni decât sunt absorbiți. Un astfel de proces se numește **reacție în lanț**. În anumite condiții reacția de fisiune în lanț, poate fi controlată, numărul de neutroni din reactor rămânând constant.

În cazul fisiunii cu neutroni termici, un proces important îl constituie reducerea energiei neutronilor rapizi, pentru ca aceștia să poată provoca noi reacții de fisiune, proces denumit **moderare** și care are loc prin ciocnirea neutronilor rapizi cu nucleele **materialelor moderatoare**. Înainte, în timpul și după moderare, au loc pierderi de neutroni, prin absorbție și prin părăsirea mediului în care se află materialul fisionabil. Pentru amorsarea reacției nucleare e nevoie de o anumită cantitate de material fisionabil, numită **masă critică**. Această masă critică depinde de o serie de factori externi, dar îndeosebi de natura materialului fisionabil (tabelul 3.1).

Tabelul 3.1. Masele critice ale unor materiale fisionabile

| Materialul | În stare metalică [kg] | În soluție apoasă [kg] |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| U^{235} | 22.8 | 0.82 |
| Pu^{239} | 5.6 | 0.51 |

3.2.2. Structura și caracteristicile unui reactor nuclear

Partea principală a unui reactor o constituie **zona de reacție**, sau **zona activă**, care conține un amestec omogen sau eterogen de combustibil și moderator (figura 3.2).

În cazul unei zone active eterogene, combustibilul este introdus sub formă de **elemente combustibile**, sistem care îi asigură un plus de rezistență mecanică și permite containerizarea produselor de fisiune radioactive.

Combustibilul nuclear, în reactor, poate fi natural sau artificial. Există două tehnologii: a uraniului natural și a uraniului îmbogățit. Cea a uraniului îmbogățit este accesibilă unui mic număr de țări, SUA, Rusia, Franța și Anglia, construirea unei uzine de îmbogățire a uraniului fiind foarte scumpă. Dar asigură un grad mai bun de ardere a combustibilului nuclear.

Elementele combustibile ceramice folosesc pulbere de oxid de uraniu, presată și sinterizată. Dar se utilizează și elemente combustibile metalice, obținute prin turnare și deformare plastică.

Moderatorul are rolul de a reduce energia neutronilor rapizi rezultați din fisiune, transformându-i prin ciocniri elastice în neutroni lenți sau termici.

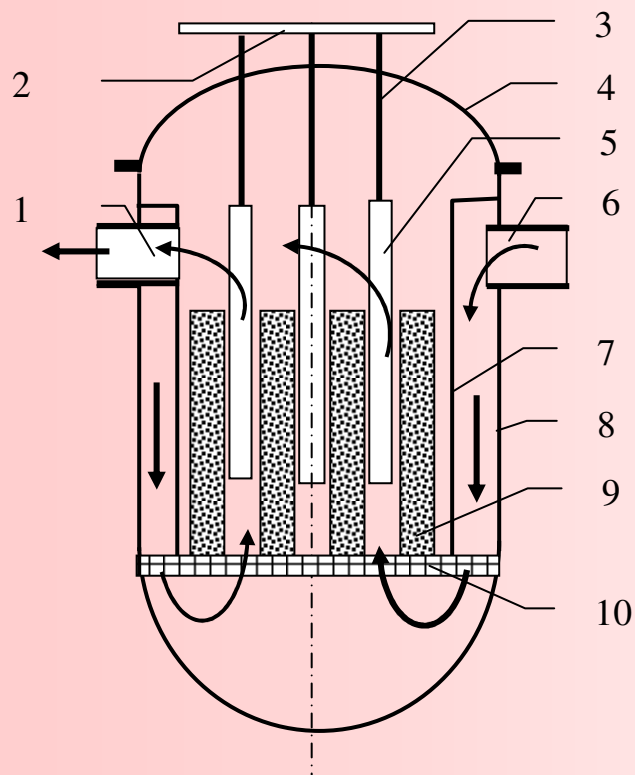


Fig.3.2. Secțiune printr-un reactor răcit și moderat cu apă:

1 – ieșire apă de răcire; 2 – mecanismul barelor de reglare; 3 – dispozitive de ghidaj pentru bare de reglare; 4 – capacul vasului de presiune; 5 – bare de reglare; 6 – intrare apă de răcire; 7 – manta interioară de dirijare a circulației apei; 8 – vas de presiune; 9 – bare de combustibil; 10 – placă de susținere a zonei active.

Acesta este realizat din materiale cu greutate atomică mică: apă, apă grea, grafit sau Be. ***Un moderator*** este cu atât mai bun cu cât numărul de ciocniri necesar pentru aducerea neutronilor la viteza termică este mai mic și cu cât absorbția neutronilor este mai mică.

Apa grea este cel mai bun moderator, având cea mai mică secțiune de absorbție și un număr de ciocniri acceptabil. Poate fi folosită ca moderator și la reactoare cu uraniu natural, dar trebuie specificat că este foarte higroscopică, adică se impurifică ușor cu apă ușoară. Din acest motiv pretențiile privind puritatea și etanșeizarea instalației de apă grea sunt foarte severe, ceea ce scumpesc mult investiția.

Apa ușoară are proprietăți excelente pentru moderare (număr de ciocniri cel mai mic), dar are o mare capacitate de absorbție asupra neutronilor (de circa 600 de ori mai mare ca apa grea). Din acest motiv se poate utiliza numai pentru reactoare cu combustibil îmbogățit.

Există și moderatoare solide: ***grafitul și uneori beriliul***, dar sunt mai scumpe decât cele lichide.

Ansamblul combustibil-moderator este înconjurat de un **reflector** care are rolul de a reduce scăpările de neutroni în afara zonei active a reactorului.

De regulă reactorul este construit dintr-un **vas de presiune etanș** în interiorul căreia se află zona activă. Vasul de presiune se realizează din oțel sau din beton precomprimat.

Evacuarea căldurii din zona activă a reactorului se face prin intermediul **agenților de răcire**. Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească un bun agent de răcire sunt:

- ❑ capacitate bună de înmagazinare și transfer a căldurii;
- ❑ absorbție scăzută a neutronilor;
- ❑ să rămână lichizi la temperaturi ridicate și presiuni scăzute;
- ❑ să fie stabil la radiații;
- ❑ vâscozitate mică;
- ❑ să fie neinflamabil, netoxic și preț de cost cât mai scăzut.

Dintre substanțele gazoase pot fi folosiți ca agenți de răcire CO_2 și He .

Dintre lichide se pot folosi *apa ușoară*, *apa grea* și *substanțe organice*.

Metalele în stare lichidă și sărurile topite asigură cel mai bun coeficient de transmisie a căldurii, sunt stabile termic și la iradiere și necesită presiuni mici.

Au dezavantajul că metalele alcaline (Na, K) sunt reactive față de apă, hidrogenul degajat prezentând pericol de explozie.

Controlul reacției în lanț se face prin intermediul **barelor de control**.

Barele de control sunt realizate din materiale absorbante de neutroni.

Acestea trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- ❑ capacitate mare de absorbție pentru neutroni cu energii cuprinse într-un spectru cât mai larg;

- ❑ rezistență mecanică, stabilitate chimică și compatibilitate cu celelalte materiale ale reactorului;

- ❑ produsele rezultate prin iradiere să aibă timp de înjumătățire mic.

Dintre materialele absorbante folosite se poate aminti: *borul; cadmiu; hafniu; iridiul; aliaje de argint, cadmiu, iridiu și tantal*

La orice reactor nuclear sunt necesare și materiale de protecție biologică care au rolul de a reține neutronii și radiațiile emise în afară. Se utilizează *apa, betonul, fierul și plumbul*.

3.2.3 Clasificarea reactoarelor nucleare de fisiune. Filiere nucleare

De la construirea primului reactor nuclear, în 1942, în concepția și sub conducerea lui Enrico Fermi, s-au realizat mii de reactori nucleari de tipuri și destinații diferite.

După tipul de neutroni care realizează reacția de fisiune:

☐ **reactori cu neutroni termici;**

☐ **reactori cu neutroni rapizi.**

După modul de dispunere a componentelor în zona activă avem:

☐ reactori omogeni;

☐ reactori heterogeni.

După destinație, avem:

☐ reactori de cercetare;

☐ reactori de încercări de materiale;

☐ reactori energetici;

☐ reactori pentru propulsie.

Alegerea unei filiere pentru implementarea energiei nucleare într-un sistem energetic național nu este o problemă simplă. Ea necesită o analiză multidimensională a o serie de factori, dintre care cei mai importanți sunt:

- ❑ cererea și consumul de energie electrică și termică și evoluția acestuia;
- ❑ disponibilitatea investițiilor;
- ❑ existența unor rezerve proprii de uraniu natural;
- ❑ posibilități de depozitare a deșeurilor radioactive;
- ❑ nivelul de dezvoltare al infrastructurilor.

Tabelul 3.3. Clasificarea reactorilor după filiere

| Filiera | Variante de filiere |
|---|--|
| LWR=Light Water Reactor (Reactor răcit și moderat cu apă ușoară) | PWR=Pressurized Water Reactor (Reactor cu apă sub presiune) |
| | BWR=Boiling Water Reactor (Reactor cu apă în fierbere) |

| | |
|---|---|
| HWR=Heavy Water Reactor (Reactor răcit și moderat cu apă grea) | PHWR=Pressurized Heavy Water Reactor (Reactor cu apă grea sub presiune, ex: CANDU=CANadian Deuterium Uranium) |
| | BHWR=Boiling Heavy Water Reactor (Reactor cu apă grea în fierbere) |
| Reactor răcit cu gaz și moderat cu grafit | GCR=Gas Cooled Reactor (Reactor răcit cu gaz) |
| | AGR=Advanced Gas Cooled Reactor (Reactor răcit cu gaz îmbunătățit) |
| | HTGR=High Temperature Gas Cooled Reactor (Reactor răcit cu gaz de temperatură înaltă) |
| | UHTGR=Ultra High Temperature Gas Cooled Reactor (Reactor de temperaturi foarte înalte) |
| TBR=Thermal Breeder Reactor (Reactor reproducător cu neutroni termici) | LWBR=Light Water Breeder Reactor (Reactor reproducător cu apă ușoară) |
| | CANDU-Th (Reactor de tip Candu cu amestec fertil de thoriu) |

| | |
|--|---|
| FBR=Fast Breeder Reactor (Reactor reproducător cu neutroni rapizi) | LMFBR=Liquid Metal Fast Breeder Reactor (reactor reproducător cu neutroni rapizi răcit cu metal lichid) |
| | GCFBR=Gas Cooled Fast Breeder Reactor (Reactor reproducător cu neutroni rapizi răcit cu gaz) |
| MSR=Molten Salt Reactor (Reactor cu combustibil circulant din săruri topite și moderat cu grafit) | MSBR=Molten Salt Breeder Reactor (Reactor reproducător răcit cu săruri topite) |
| Alte tipuri | OMR=Organic Moderated Reactor (Reactor moderat cu lichide organice) |
| | LMFR=Liquid Metal Fuel Reactor (Reactor cu combustibil dispersat, dizolvat în metale topite) |
| | SNAP=Systems for Nuclear Auxiliary Power (Reactor pentru aplicații spațiale) |
| | NERVA=Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application (Reactor pentru propulsia vehiculelor spațiale) |

3.3. Schemele termice ale centralelor nucleare electrice

3.3.1. Generalități

Materialele din care este construit reactorul limitează temperatura și presiunea maximă a agentului termic. Astfel la reactoarele răcite cu apă, temperatura maximă admisă este de 350°C, la cele răcite cu gaz 400°C, iar la cele răcite cu sodiu topit 500°C. Nici presiunea de lucru a agentului termic nu poate atinge valorile utilizate la centralele termoelectrice clasice. Aceste limitări sunt impuse din motive de securitate, orice avarie având aici urmări deosebite datorită pericolului de iradiere a mediului și a persoanelor.

3.3.2 Scheme cu un singur circuit termic

Schemele termice cu abur cu un singur circuit presupun că reactorul produce direct abur saturat prin vaporizarea agentului de răcire (reactoare BWR sau BHWR). În mod obișnuit reactorul produce abur saturat uscat.

Presiunea ciclului este de circa 70 bar corespunzător nivelului de siguranță impus de materialele nucleare. Schema unui astfel de circuit este prezentată în figura 3.3.

Destinderea în turbină are loc sub curba de saturație și aburul ar putea atinge umidități nepermise, motiv pentru care este necesară uscarea și supraîncălzirea intermediară. Aceste operații de uscare a aburului se realizează prin mai multe metode:

- la intrarea în turbină, folosind în acest scop supraîncălzitoare sau tamburi separatori;
- între două trepte succesive de destindere folosind în acest scop separatoare mecanice și supraîncălzitoare termice;
- în corpul de joasă presiune prin practicarea drenajului.

Supraîncălzirea se poate realiza:

- în reactorul nuclear, care este prevăzut în acest scop cu canale supraîncălzitoare;
- într-un cazan supraîncălzitor în care se arde combustibil clasic.

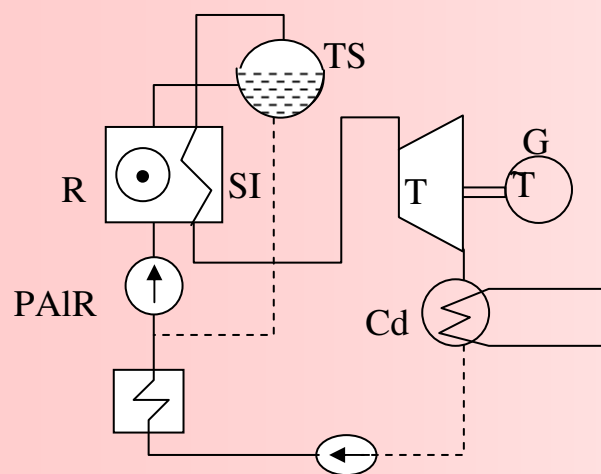


Fig. 3.3. Circuit termic pentru CNE cu o singură treaptă și tambur separator:
R-reactor; *T*-turbina cu abur; *G*-generator;
Cd-condensator; *PAIR*-pompă de alimentare reactor; *TS*-tambur separator.

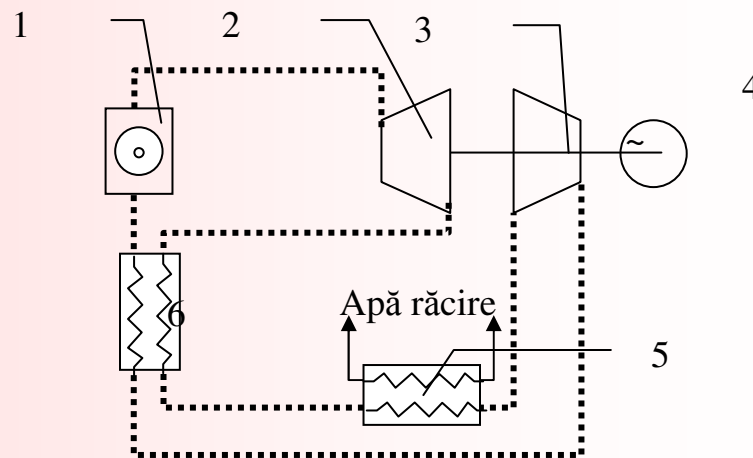


Fig.3.4. Schema termică a unei CTE cu turbină cu gaze în circuit închis:
1 – reactor; *2* – turbină cu gaze; *3* – compresor; *4* – generator electric; *5* – răcitor de gaze; *6* – recuperator de căldură.

Până în prezent reactorul BWR este o soluție tehnică aplicată la un număr mare de CNE cu puteri electrice unitare de până la 1100 MW.

O altă schemă de circuit termic cu o singură treaptă este cea care utilizează turbine cu gaze și bineînțeles reactoare răcite cu gaze, schemă prezentată în figura 3.4.

Această schemă s-a folosit la primul reactor nuclear construit în lume de către echipa lui Enrico Fermi, la Chicago în 2 Decembrie 1942.

Gazele se încălzesc în reactorul **1**, apoi se destind în turbina cu gaze **2**, și se răcesc în schimbătoarele de căldură **6** și **5** pentru a merge apoi în compresorul **3** de unde sunt trimise din nou în reactor, închizându-se astfel circuitul.

Deoarece gazele trecând prin reactor nu devin radioactive, nu trebuie luate măsuri de protecție biologică a turbinei cu gaze ca în cazul turbinelor cu abur.

Se utilizează de regulă gaze inerte (*He*). Circuitul termic cuprinde de obicei trei trepte de comprimare și o destindere unică, cu o răcire a gazelor după fiecare treaptă de comprimare (lucru nefigurat în figura de mai sus).

3.3.3 Scheme cu două circuite termice

Ideea de bază a acestei scheme este de a restrânge cât mai mult aria de contaminare radioactivă. La schemele termice cu două circuite, reactorul poate avea agenți de răcire diferiți: apă, apă grea, gaze sau lichide

organice. Schimbătorul de căldură, denumit **generator de abur** este elementul care desparte centrala nucleară în două.

Nivelul de presiune și de temperatură în circuitul secundar depinde de tipul reactorului și de agentul de răcire primar. În cazul agentului de răcire lichid (centrale PWR sau PHWR), temperatura din reactor este limitată la aproximativ 300°C iar încălzirea apei în reactor se face cu doar 15-30°C, valoarea redusă fiind impusă de uniformitatea puterii de moderare și a condițiilor de schimb de căldură.

Schema principială a unei centrale PWR cu două circuite termice se prezintă în figura 3.5.

Această schemă, cu două circuite, se aplică și la centralele nucleare-electrice CANDU (CANadium Deuterium Uranium), care folosesc drept combustibil uraniu natural, implementate și la noi în țară.

3.3.4 Scheme cu trei circuite termice

Acest tip de schemă (figura 3.6) se aplică în cazul utilizării reactoarelor cu neutroni rapizi, reactoare care se caracterizează prin densități termice în zona

activă cu mult mai mari decât în cazul reactorului termic. Pentru evacuarea căldurii se folosesc săruri sau metale topite. Pentru evitarea unui posibil contact între mediul radioactiv din circuitul primar și apa din circuitul termic al centralei se folosește un circuit intermediar cu sodiu topit sau amestec eutectic $Na-K$. Pentru evitarea contactului $Na-H_2O$, generatorul de abur din circuitul secundar are o construcție specială folosind în acest sens pereții dubli, în spațiul dintre ei circulând un fluid intermediar (mercur sau lichide organice).