

2 DESCRIZIONE DEL REATTORE WWER-1000

2.1 INTRODUZIONE

Si danno in questo capitolo alcuni cenni sulle principali caratteristiche del reattore WWER-1000/320. Tale tipologia di impianto fu introdotta nei primi anni '80 ma la costruzione dei primi modelli, indicati con la sigla WWER-1000 V 302, risale agli inizi degli anni '70.

L'impianto deriva direttamente dall'esperienza maturata dai tecnici della ex URSS sui reattori ad acqua in pressione utilizzati nei sommergibili nucleare sovietici. I primi modelli WWER erano caratterizzati da una potenza di 440 MWe; quando poi il consumo di elettricità lo rese economicamente vantaggioso vennero introdotti i modelli attuali da 1000 MWe. In realtà non si è trattato semplicemente di un *repowering*, in quanto oltre alla taglia sono stati incrementati alcuni dispositivi di emergenza, migliorandone di conseguenza la sicurezza.

Le notevoli affinità esistente fra i WWER e i reattori ad acqua in pressione occidentali (PWR) rende possibile lo studio dell'impianto russo con gli stessi strumenti sviluppati in occidente per lo studio dei PWR, compresi naturalmente i codici di calcolo termoidraulici.

I reattori costruiti nella ex URSS appartengono sostanzialmente a due diverse classi: i reattori RBMK (reattore ad acqua in pressione che utilizza la grafite come moderatore, come il noto reattore di Chernobyl) ed i reattori WWER; del reattore WWER-1000, modello 320, sono in funzione o in fase di completamento circa 20 unità, in Ucraina, Russia, Bulgaria e nella Repubblica Ceca. In tabella 2.1 è riportato lo stato degli impianti operanti, in costruzione o di cui è prevista la realizzazione, aggiornata al 31 dicembre 1986.

COUNTRY AND PLANT SITE	UNIT NUMBER	STATUS
<i>BULGARIA</i>		
Kozloduy	5,6	Under construction
Belene	1,2,3,4	Planned
<i>CZECHOSLOVAKIA</i>		
Temelin	1	Under construction
	2,3,4	Planned
<i>EAST GERMANY</i>		
Stendal	1,2	Planned
<i>HUNGARY</i>		
Paks	5,6	Planned
<i>POLAND</i>		
Kujawy	1,2	Planned
<i>USSR</i>		
Novovoronezh	5 (V187)	Operational (1980)
Rovno	3	Operational (1986)
	4	Under construction

South Ukraine	1 (V302)	Operational (1983)
	2 (V302)	Operational (1984)
	3,4	Under construction
Kalinin	1 (V302)	Operational (1984)
	2 (V302)	Operational (1986)
	3,4	Planned
Zaporozhye	1	Operational (1984)
	2	Operational (1985)
	3	Operational (1986)
	4	Under construction
	5,6	Under construction
Khmel'nitskiy	1,2,3	Under construction
	4	Planned
Odessa ATETs**	1,2	Under construction
Balakovo	1	Operational (1985)
	2,3,4	Under construction
	5,6	Planned
Crimea	1,2	Under construction
Bashkir	1,2	Under construction
	3,4	Planned
Minsk ATETs**	1,2	Under construction
Rostov	1,2,3,4	Under construction
Tatar	1	Under construction
	2,3,4,5,6	Planned
Kharkov ATETs**	1,2	Planned
Volgograd ATETs**	1,2	Planned

Tab. 2.1 WWER-1000 operativi, in costruzione o pianificati al 31 Dicembre 1986

Fra i reattori costruiti nell'ex URSS e nei paesi satelliti, il WWER-1000 dell'ultima generazione presenta sicuramente gli aspetti di sicurezza migliori, soprattutto da un punto di vista della progettazione, anche se occorre considerare che l'affidabilità dei componenti compromette il buon comportamento di questo reattore. Le caratteristiche di base delle unità WWER-1000 sono riportate in tabella 2.2.

Da un punto di vista generale si può notare che il WWER è un impianto ad acqua in pressione (PWR) a quattro *loops* con potenza nominale di 3000 MWt, i *loops* sono disposti simmetricamente rispetto al *vessel* e su ognuno di essi è presente una delle pompe di circolazione principale. Ogni *loop* è accoppiato termicamente con un generatore di vapore (SG) a tubi orizzontali, vera e unica singolarità dell'impianto rispetto ai tradizionali PWR occidentali (fig. 2.1).

I WWER possono funzionare anche con una o più pompe fuori uso. Nel caso in cui l'arresto delle pompe riguardi due *loops* disposti simmetricamente rispetto al *vessel*, viene operato lo *scram* del

reattore. In alcuni impianti (in particolare quelli da 440 MWe e nei WWER-1000 di prima generazione) i quattro *loops* sono forniti di valvole di isolamento che permettono di ridurre sensibilmente la portata nei *loops* non operanti.

Rated thermal power	3000 MWt
Electric capacity	2*500 MWe or 1*1000 Mwe
Number of loops	4 without isolation
Type of turbine	K-500-60/3000 or K-1000-60/1500
Efficiency	33.7%
Coolant pressure in primary circuit	15.7 Mpa
Coolant temperature at reactor inlet	289.7°C
Coolant temperature at reactor exit	320.0°C
Coolant flow rate through reactors	84800 m ³ /hour
Pressure before turbine	6.0 Mpa
Temperature before turbine	276°C
Number of condensers	4 or 6
Number of separator/reheaters	4 or 2
Number of feedwater heaters	7
Fuel burnup: 3-years fuel cycle	40100 MWd/tU
Fuel burnup: 2-years fuel cycle	27000 MWd/tU

Tab.2.2 caratteristiche generali del WWER-1000

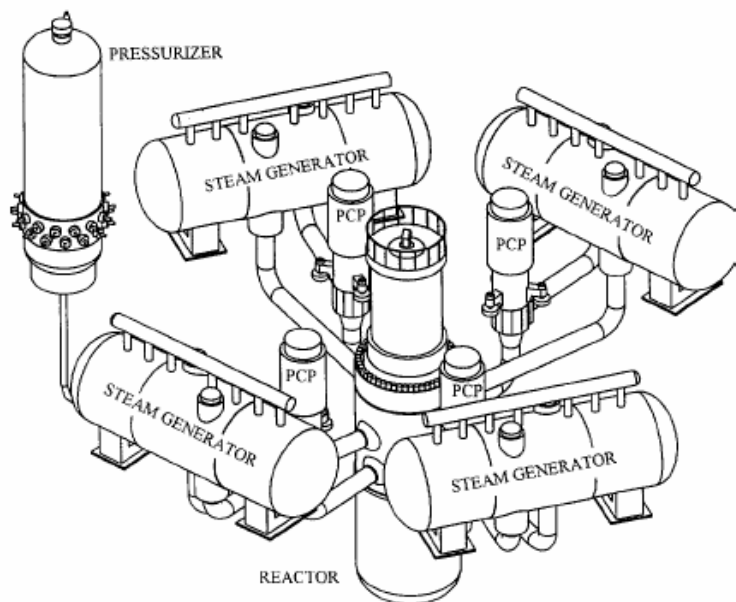


Fig.2.1 layout del sistema primario di un WWER-1000

La figura seguente (fig. 2.2) riporta una immagine del vessel con il sistema delle barre di controllo. La figura 2.3 mostra la disposizione dei principali componenti dell'impianto.

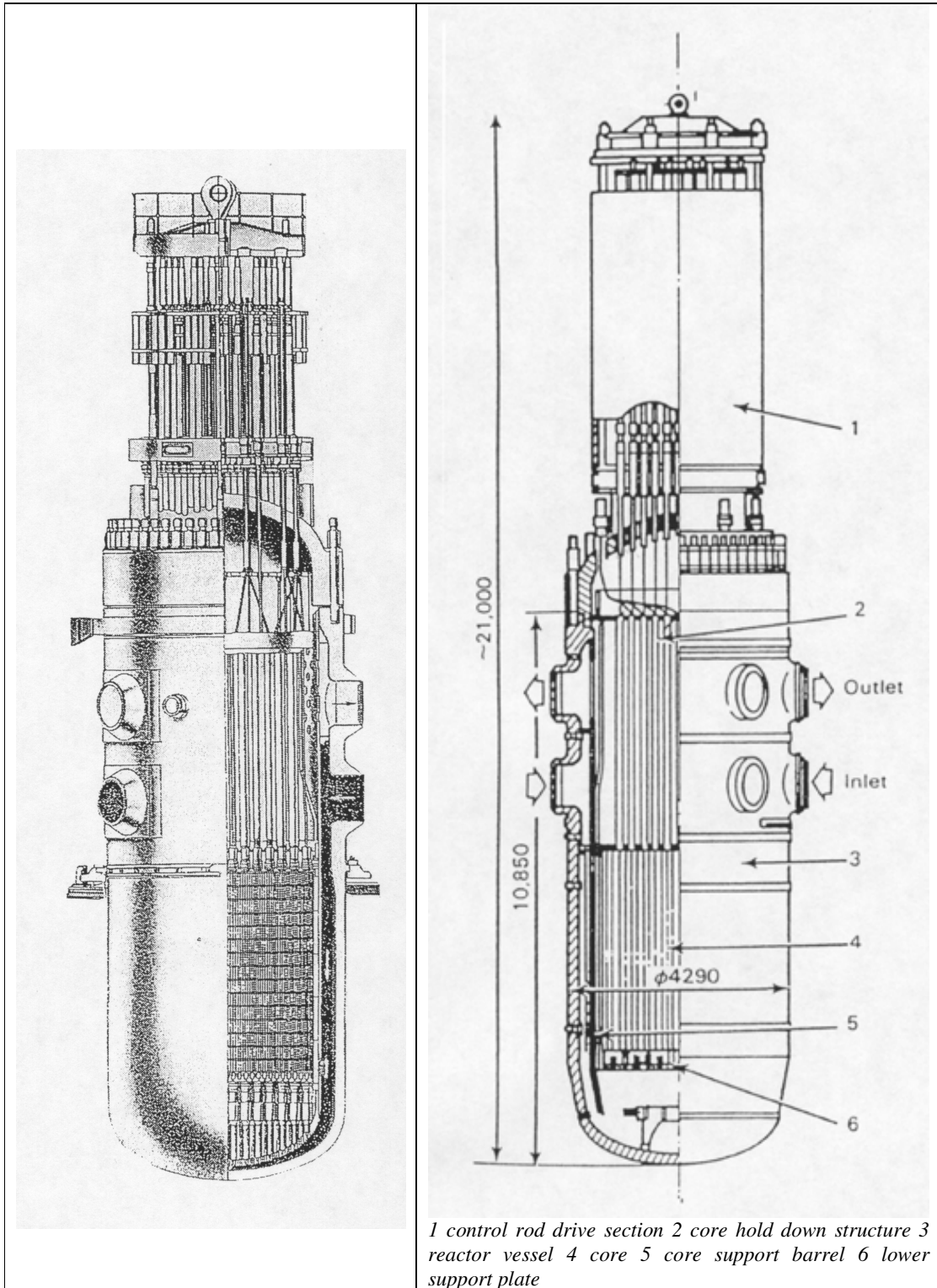
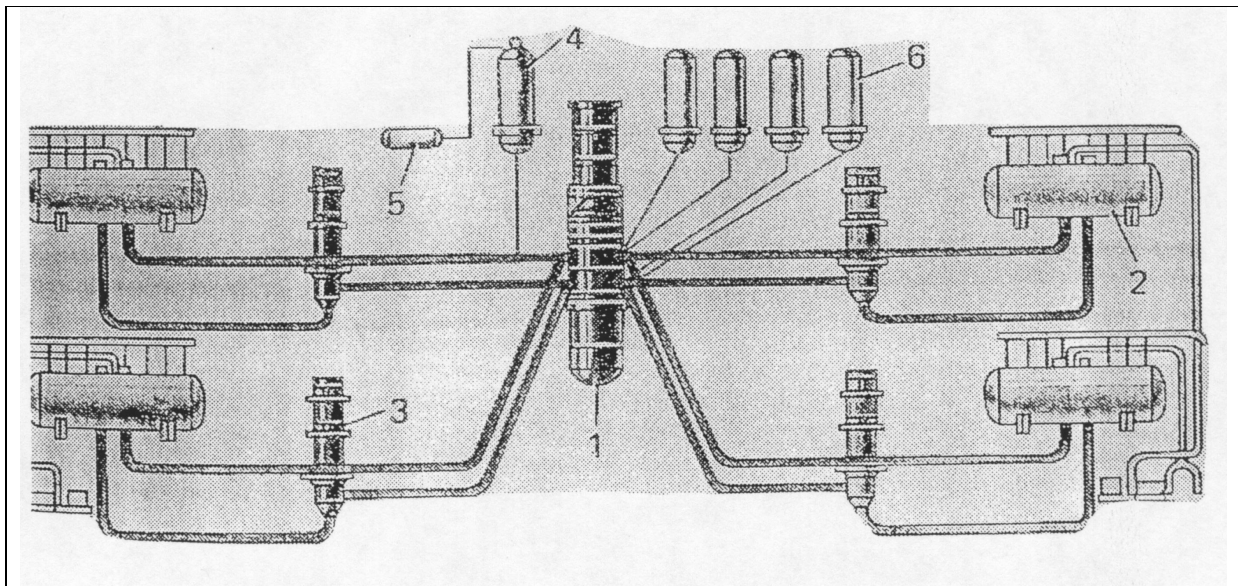


Fig. 2.2. schema del RPV del WWER-1000



1 reactor pressure vessel 2 steam generator 3 primary coolant pump 4 pressurizer 5 quench tank 6 emergency core cooling accumulators

Fig 2. 3. disposizione dei principali componenti in un impianto WWER-1000

Gli ultimi impianti della filiera WWER sono stati dotati di un *Emergency Core Cooling System* (ECCS) consistente in :

- un impianto di iniezione di acqua (fortemente o leggermente borata) ad alta pressione HPIS con derivazioni direttamente nei tre circuiti non connessi con il pressurizzatore.
- quattro accumulatori passivi (SIT, *Safety Injection Tank*) con relative derivazioni all'altezza del *downcomer*, del *vessel* e dell'*upper plenum*.
- due sistemi di iniezione di acqua a bassa pressione LPIS direttamente nelle *Hot e Cold Legs* del circuito connesso al pressurizzatore e nelle stesse derivazioni degli accumulatori.

I reattori WWER sono inoltre gli unici dell'ex blocco orientale ad essere dotati di un sistema di contenimento primario in calcestruzzo armato precompresso con rivestimento interno di acciaio e con sistema di spray per l'abbattimento della pressione tramite condensazione del vapore.

Le figure da 2.4 a 2.6 mostrano una vista di insieme dell'impianto e del contenimento. Le figure 2.7 e 2.8 mostrano una foto dell'interno e della sala controllo del reattore.

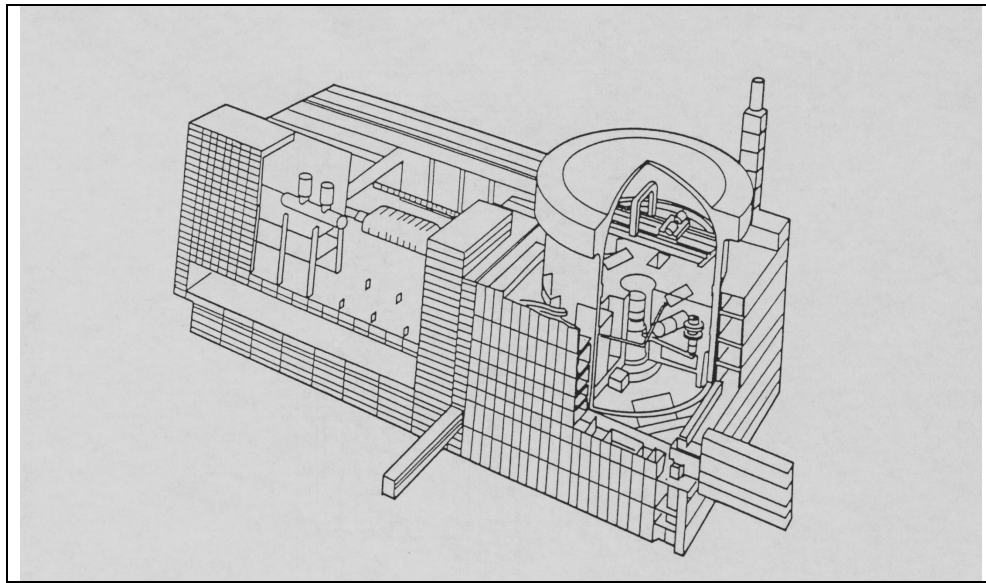


Fig. 2.4 vista esterna di un WWER-1000

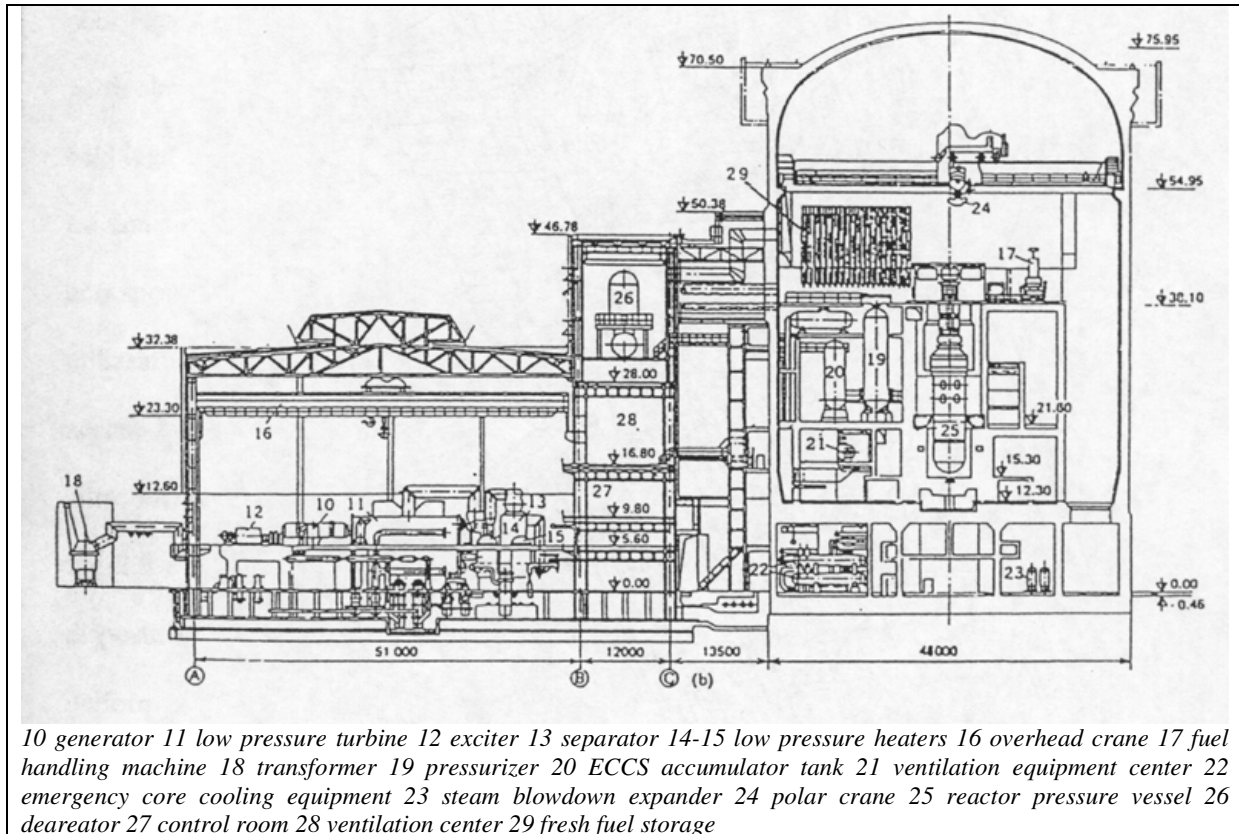


Fig. 2.5 schema dell'edificio reattore

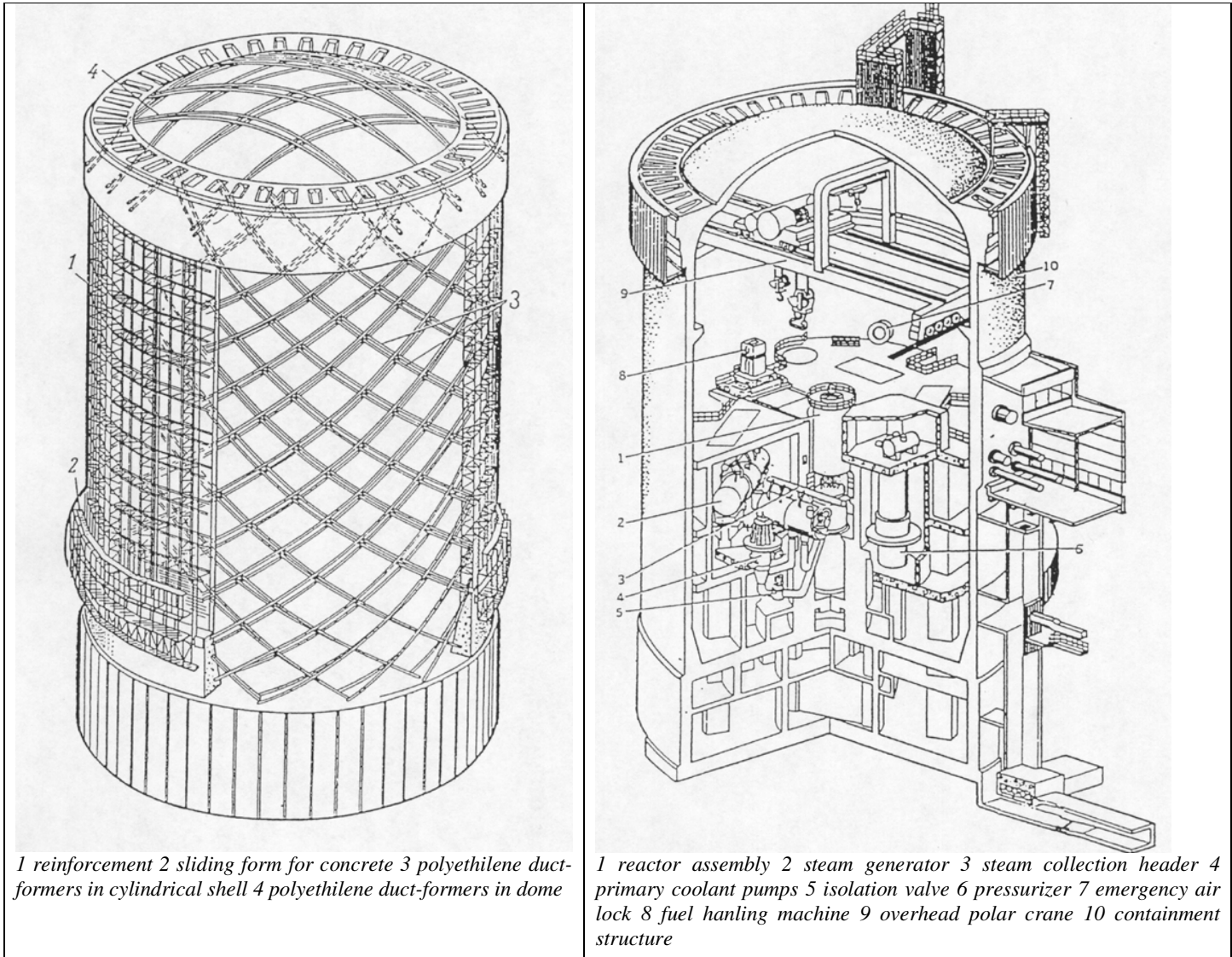


Fig.2.6 armatura del sistema di contenimento e spaccato dell'edificio reattore



Fig. 2.7 interno del reattore WWER-1000

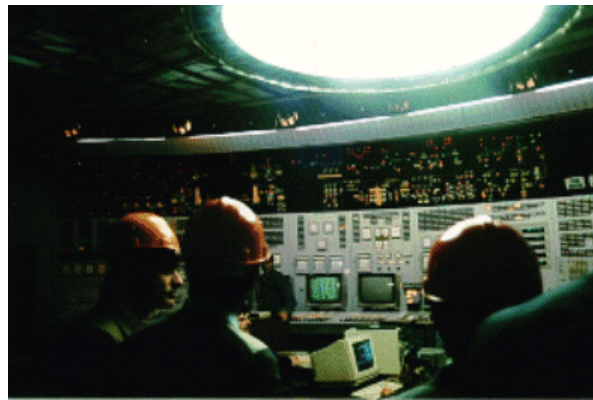


Fig. 2.8 sala controllo del reattore WWER-1000

2.2 VESSEL E CORE DEL REATTORE

La maggior differenza fra la struttura del *vessel* del WWER rispetto ai *vessel* dei reattori pressurizzati occidentali consiste nella diversa localizzazione degli ingressi delle *Hot e Cold Legs*. Nei WWER le 8 tubazioni hanno diversa elevazione (le 4 *Hot Leg* sono poste più in alto rispetto alle 4 *Cold Leg*) mentre nei reattori occidentali esse sono disposte sullo stesso piano; l'interasse fra i due livelli è di 1.8 m mentre il diametro interno delle tubazioni è di 0.85 m. Il *vessel* presenta anche altre due tubazioni addizionali, del diametro nominale di 0.30 m, che collegano ciascun livello ai sistemi ECCS. La parte superiore del *vessel* è provvisto di un'altra tubazione di diametro nominale 0.25 m per le *pulse lines* del sistema di controllo. Le *pulse lines* in totale sono nove: tre coppie per tre misure indipendenti delle perdite di pressione attraverso il *core*; una coppia per effettuare la misurazione del livello quando il reattore si trova in condizioni di *shut down* e una per misurare la concentrazione di boro. Le dimensioni del *vessel* del WWER, avente altezza di 11.5 m e spessore 0.26 m nella zona cilindrica e di 0.20 m nella zona sferica, sono analoghe a quelle dei PWR occidentali. Il materiale utilizzato è un acciaio al carbonio basso legato a grana fine con *cladding* in acciaio inossidabile austenitico.

Un altro elemento di distinzione rispetto ai reattori occidentali è la presenza nella zona dell'*upper plenum* di una struttura cilindrica coassiale al *barrel* e forata in più punti. Tale struttura oltre ad avere una funzione portante e di centraggio sulle due piastre presenti nell'*upper plenum* e nell'*upper head* ha il compito di uniformare la distribuzione del fluido refrigerante caldo in uscita dal *core* ed in ingresso alle *Hot Leg*. Il *barrel*, avente uno spessore di 0.6 m, delimita internamente il *downcomer*, a sua volta separato con un setto dalla zona di ingresso della *Hot Leg*. Questa ultima è delimitata oltre che dal suddetto setto anche dal prolungamento del *barrel*, opportunamente forato, che la mette in contatto con l'*upper plenum*. La tabella 2.3 riporta le principali caratteristiche del *vessel* di un WWER, mentre la figura 2.9 mostra una sezione del RPV.

Reactor Vessel	WWER-1000
Vessel height	10.88 m
Vessel weight	304 tonnes
External diameter on the cylindrical part	4.536 m
Internal diameter on the cylindrical part	4.136 m
Thickness of cylindrical part	0.2 m
Thickness in nozzle zone	0.268 m
Nozzle diameter	0.85 m
Thickness of the cladding layer	7 mm
Average heating of water in core	35° C
Coolant pressure at core outlet	15.7 MPa

Tab.2.3 caratteristiche principali del vessel di un WWER-1000

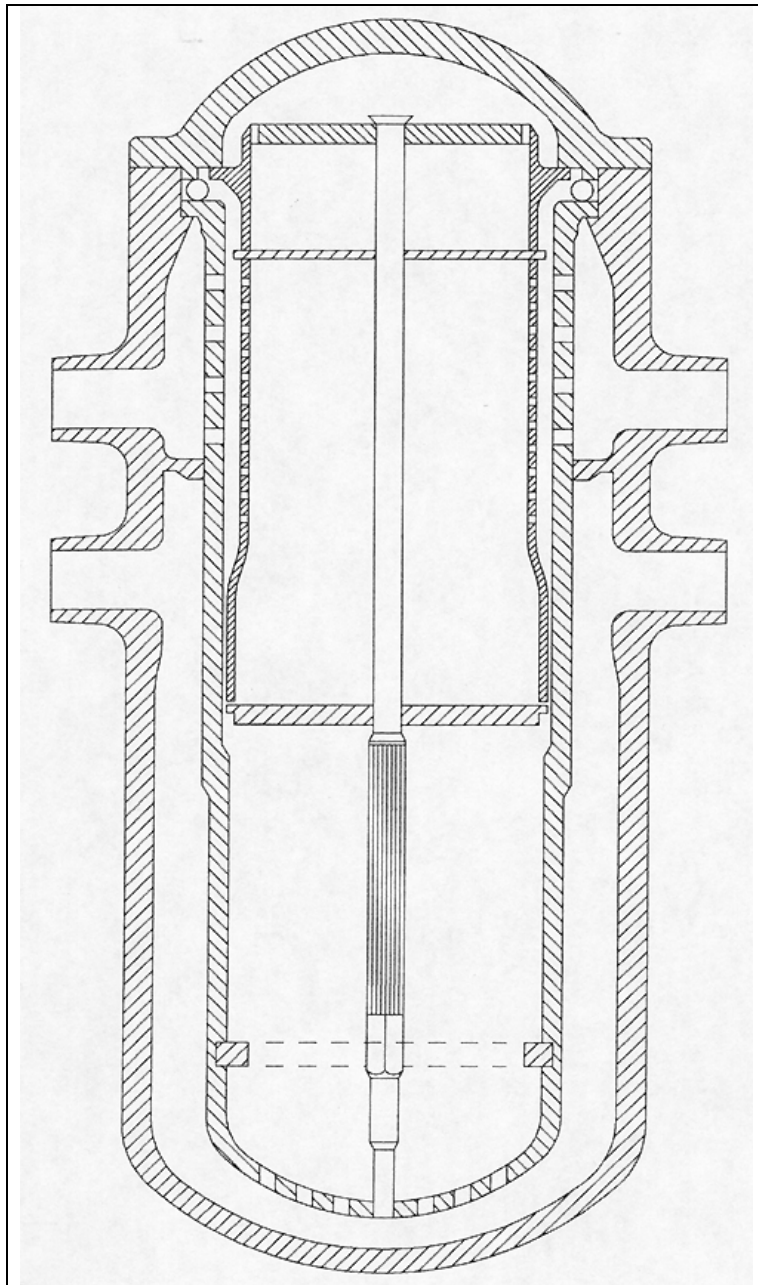


Fig. 2.9 spaccato del vessel di un WWER-1000

Il core del reattore WWER-1000 è composto da 163 elementi di combustibile esagonali (fig 2.10), provvisti ciascuno di *shroud* forato lateralmente per consentire il *cross flow* (flusso trasverso del refrigerante) attraverso il *core* stesso; presenta una altezza attiva di 3.53 m e un'area di efflusso di 4.172 m². La sezione del core può osservarsi in figura 2.11.

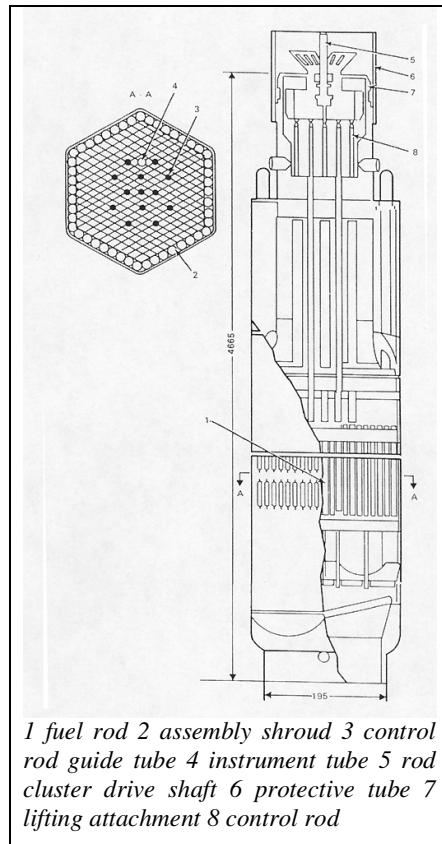


Fig. 2.10 elemento di combustibile

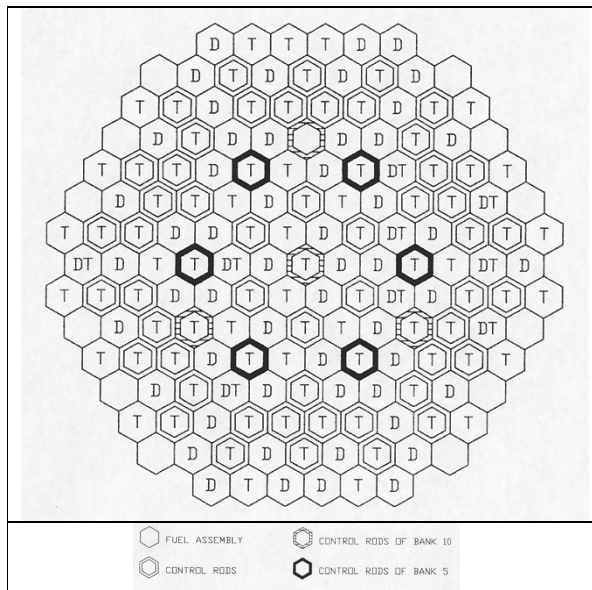


Fig. 2.11 sezione del nocciolo del reattore

In ogni elemento di combustibile trovano alloggio 312 barrette rettangolari di biossido di uranio arricchito, incamiciate con una lega di zirconio-niobio e distribuite secondo una matrice triangolare. Le pellets presentano una forma originale rispetto a quelle adoperate per i reattori di tipo occidentale; sono infatti a sezione anulare con diametro interno di 0.7 mm. La tabella 2.4 riporta i principali dati relativi agli elementi di combustibile.

Core	WWER-1000
Movable shim fuel assemblies	0
Fixed fuel assemblies	151
Total fuel assemblies	151
Core diameter	3.12 m
Core height	3.55 m
Core volume	27 m ³
Core power density	111 kW/lt
Uranium core load	66 tonnes
Uranium specific power density	45 kW/kg of UO ₂
Uranium-235 enrichment (%)	3.3 or 4.4 %**
Uranium mean burnup	40 megawatt-days/tonne
Uranium peak burnup	? megawatt-days/tonne
Lattice	Triangular
Pitch	24.1 cm
Fuel Rods	
Outer diameter	9.1 mm
Cladding thickness	0.65 mm
Length	386 cm
Active length	350 cm
Linear power	176 W/cm
Peak linear power	432 W/cm
Cladding material	Zr-1% Nb
Uranium weight	1.56 kg
Fill gas	Helium
Fuel Pellets	
Outer diameter	7.55 mm
Inner diameter	1.4-1.6 mm
Density (g/cm ³)	10.4 gr/cm ³
Material	UO ₂
Configuration	Annular
Fuel Assemblies	
Number of fuel rod locations	317 (311)*
Number of absorber rod locations	12 (18)*
Number of power density sensor locations	1
Hollow central tube location	1
Total rod locations/assembly	331
Fixed assembly length	4.655 m

Movable assembly length	N/A
Can configuration	Hexagonal
Can construction	Perforated
Can across flats	23.8 cm
Can thickness	1.5 mm
Can material	Zr-2.5% Nb
Fixed assembly weight	?
Movable assembly weight	N/A
Uranium weight	437.5 kg
Rod configuration	Triangular
Rod pitch	12.75 mm
Dimensions of guide and sensor channel	12.6 x 0.85 mm
Dimensions of central tube	10.3 x 0.65 mm

Tab. 2.4 dati relativi all'elemento di combustibile

Il reattore utilizza acqua borata sia come moderatore che come refrigerante ed è in grado di erogare una potenza termica di 3000 MW con un rendimento complessivo del 33%. In presenza di situazioni incidentali è possibile iniettare una soluzione acquosa ad alta concentrazione di acido borico sia nell'*upper* che nel *lower plenum*.

Il controllo della reattività a breve termine è affidato alle barre di controllo, mentre il controllo a lungo termine è affidato alla variazione della concentrazione di boro nell'acqua del primario tramite l'apposito sistema di purificazione.

Gli elementi di controllo sono 61, ognuno costituito da 18 barre di carburo di boro incamiciate in acciaio inox. I parametri delle barre di controllo sono riportati nella tabella 2.5.

Core	WWER-1000
Number of control assemblies	109 (61)*
Configuration	12 (18)* rods
Thickness	0.6 cm
Length	374 cm
Type	Bundle of 12 or 18 rods inserted in fuel
Absorber material	Europium in aluminum alloy matrix
Rod Description	
Cladding size	8.2 x 0.6 mm
Cladding material	Stainless steel
Absorber diameter	7 mm
Absorber rod material	1% boron in zirconium matrix
Maximum speed	?
Minimum speed	?
Total worth (% $\Delta k/k$ per second)	
260°C	5.2
280°C	?
Maximum rate of reactivity addition	
(% $\Delta k/k$ per second)	?
Scram actuation time	?

Rod travel time	1.5 to 4 seconds
Rod scram drive mechanism	Electromagnetic
Fixed Burnable Poison Rods in Fuel Assemblies	
Quantity of rods/assembly	12 or 18

Tab. 2.5 dati relativi alle barre di controllo

La sala controllo, durante il funzionamento del reattore, analizza i segnali provenienti dal sistema di misura del flusso neutronico (NFMS) e dal sistema di monitoraggio del *core* (CMS); le modalità di funzionamento dell'impianto previste sono cinque:

- funzionamento normale; il ricircolo del refrigerante è assicurato da tutte e quattro le pompe.
- funzionamento a potenza ridotta; una o due pompe sono ferme ed il reattore fornisce una potenza inferiore rispetto a quella nominale.
- mancato funzionamento di tutte le pompe (ad esempio per un black out di impianto); si opera lo *scram* del reattore e la potenza di decadimento dei prodotti di fissione viene smaltita in regime di circolazione naturale.
- situazioni incidentali dovute a perdita di refrigerante (SBLOCA o LBLOCA); è previsto lo *scram* e l'iniezione di acqua borata da parte degli ECCS.
- situazioni in cui la temperatura del circuito primario scenda al di sotto dei 130° C; è previsto l'intervento di sistemi di regolazione di emergenza della temperatura del reattore, per evitare l'insorgere di stress termici e conseguente infragilimento dei materiali.

La figura 2.12 riporta le caratteristiche geometriche dettagliate del *vessel* di un WWER-1000/320 (RPV = *Reactor Pressure Vessel*); nella tabella successiva (tab. 2.6) vengono indicati tutti i dati geometrici necessari [10,11].

I dati suddetti sono stati utilizzati sia per definire la nodalizzazione implementata nel codice termoidraulico *Relap5/mod3.3*, sia per costruire la mesh utilizzata nel codice strutturale *Ansys5.7*. Dalla stessa figura è possibile individuare la posizione ove è stata ipotizzata la cricca necessaria per l'analisi di meccanica della frattura.

Crack location

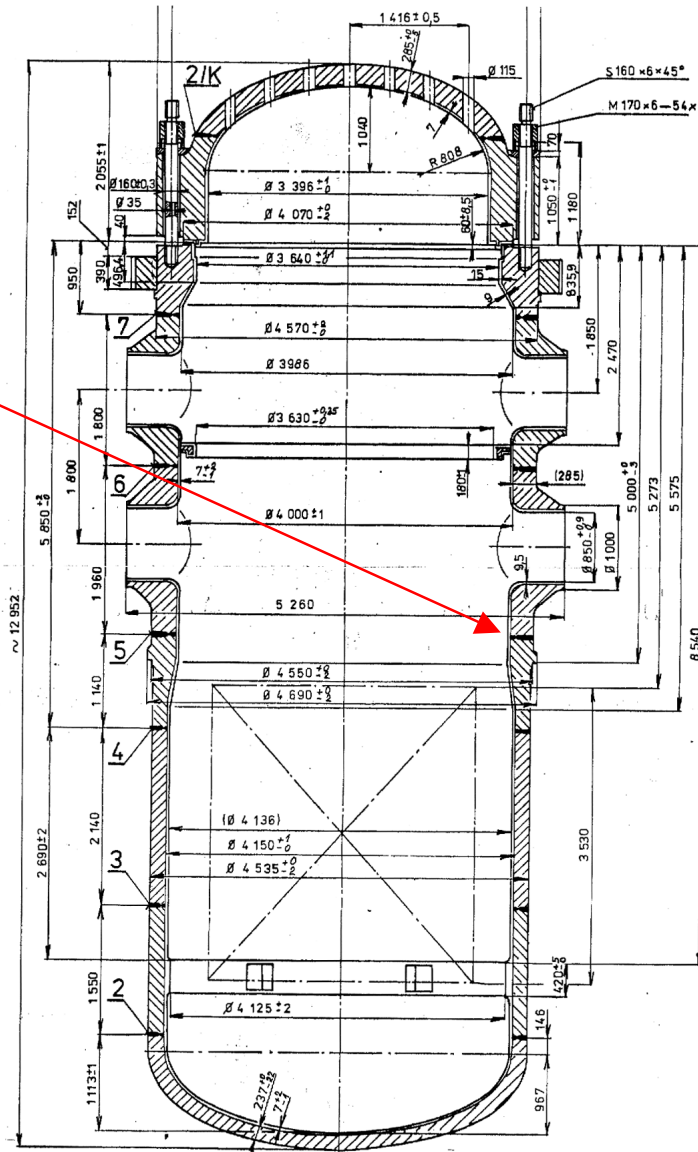


Fig 2.12 Caratteristiche geometriche del recipiente in pressione (RPV)

Item	Data
Overall height of RPV (m)	12.952
Total volume of the vessel (m ³)	~ 110
Cold Leg nozzles internal diameter (m)	0.850
Hot Leg nozzles internal diameter (m)	0.850
Inlet SIT pipe nozzles internal diameter (m)	0.05
Outer diameter of reactor pressure vessel (m)	4.570
Inner diameter of reactor pressure vessel (m)	3.986
Height of elliptical bottom (m)	0.967
Wall thickness of elliptical bottom (m)	0.244
Wall thickness of cylindrical part (m)	0.1995
Wall thickness of in the region of penetrations (m)	0.292
Height of elliptical top (m)	1.040
Wall thickness of elliptical top (m)	0.292
Elevation above inside bottom of reactor vessel (m)	
- inlet nozzles axis	7.003
- outlet nozzles axis	8.803

Tab. 2.6 Caratteristiche geometriche del recipiente in pressione (RPV)

Per quanto riguarda le proprietà del materiale del *vessel*, il dato principale cui porre attenzione è la temperatura critica di infragilimento a fine vita T_k ; questo dato risulta utile come termine di confronto con la temperatura critica determinata dall'analisi di PTS.

Valori cautelativi per T_k a fine vita [10] possono essere assunti come segue:

$$T_k = 49 \text{ °C per il materiale base}$$

$$T_k = 51 \text{ °C per il materiale della saldatura}$$

Questi valori sono stati determinati tenendo in considerazione l'effetto della fluensa neutronica sull'infragilimento del materiale; difatti, come si deduce dalla figura 2.13 e come spiegato nel capitolo 1, l'esposizione neutronica, specialmente in campo veloce, determina con il passare del tempo uno spostamento della temperatura critica verso valori più elevati con conseguente rapido decadimento delle proprietà meccaniche dei materiali esposti. Il livello di irraggiamento neutronico può crescere sensibilmente nel caso di problemi agli schermi neutronici; esempio rilevante il WWER 440/320 di Novovoronezh, ove a causa di una riduzione dello spessore di acqua fra nocciolo e *vessel* la fluensa raggiunse in breve valori di $6.5 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^{-2}$

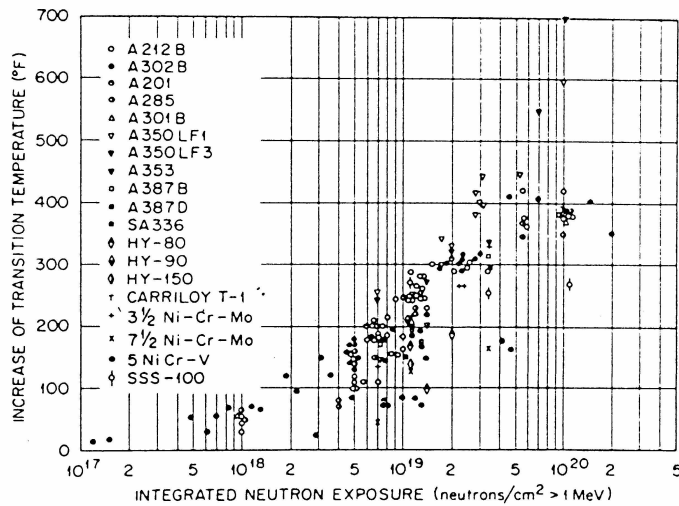


Fig. 2.13 incremento della temperatura critica con la fluenza neutronica per vari materiali del RPV

2.3 SISTEMI DI SICUREZZA

Il sistema di raffreddamento di emergenza del *core* ECCS (*Emergency Core Cooling System*), adottato negli impianti più recenti, prevede quattro sottosistemi indipendenti:

- sistema di iniezione ad alta pressione di acqua fortemente borata HPIS (*High Pressure Injection System*); il sistema viene attivato sul circuito per mezzo di tre pompe (sistema "attivo") che iniettano nelle *Cold Legs* acqua borata alla pressione di 12 MPa (pressione vicina a quella di funzionamento nominale); la valvola di immissione può essere comandata o da un segnale di bassa pressione (circa 9 MPa nel pressurizzatore), oppure da un comando manuale dalla sala di controllo.
- sistema di iniezione ad alta pressione di acqua leggermente borata (HPIS); agisce con le stesse modalità del sistema precedente ma preleva acqua da una tanca diversa.
- accumulatori (ACC); sistema di iniezione di tipo "passivo" essenzialmente costituito da quattro tanche di acqua borata tenuta in pressione da un battente di azoto a 5.8÷5.9 MPa; il volume delle tanche è di 60 m³ (50 m³ di acqua e 10 m³ di azoto gassoso); l'iniezione, tramite valvole di non ritorno, avviene nel *downcomer* e nell'*upper plenum* del *vessel* attraverso le derivazioni descritte nel paragrafo precedente; l'acqua viene automaticamente iniettata se la pressione scende al di sotto della pressione dell'azoto.
- sistemi di iniezione a bassa pressione LPIS (*Low Pressure Injection System*); iniettano acqua leggermente borata su una delle quattro *Hot* o *Cold leg* (quella connessa con il pressurizzatore) oppure sulle stesse derivazioni degli accumulatori; possono prelevare acqua sia da opportune tanche sia dalla piscina posta al di sotto del *vessel*. Lo stesso sistema è utilizzato per la rimozione del calore residuo. Strutturalmente LPIS ha la stessa configurazione del HPIS; le differenze sono legate alla portata della pompa, generalmente è maggiore di un fattore 10 per LPIS, e alla prevalenza, che viceversa è molto più bassa (la prevalenza è inferiore di un fattore 5 ed è circa 2 MPa). La portata del sistema di bassa pressione a 2.1 MPa è 250 m³/ora; quando la pressione scende a 0.98 MPa la portata sale a 700 m³/ora

Lo *scram* del reattore può avvenire in due modi diversi:

- *scram* determinato dall'inserimento delle barre di controllo
- *scram* determinato dall'iniezione di acqua fortemente borata prelevata dalla tanca dell'HPIS.

L'accoppiamento fra sistemi di *scram* fisicamente indipendenti assicura adeguata sicurezza all'impianto. Il contenimento del reattore è dotato di un sistema di abbattimento della pressione tramite condensazione del vapore; l'abbattimento avviene per mezzo di acqua erogata da appositi spray posizionati nella parte superiore dell'edificio reattore.

2.4 SISTEMA PRIMARIO

Il primario del reattore WWER-1000 è costituito da quattro *loops*. Ogni *loop* è costituito da un ramo di tubazione in cui scorre il fluido caldo (*Hot Leg*), da un generatore di vapore a tubi orizzontali (all'interno del quale avviene la cessione del calore al fluido del lato secondario che vaporizza), da una pompa di ricircolo e da un ulteriore ramo di tubazione (*Cold Leg*) che riporta il fluido all'interno del *vessel* (fig. 2.14). Le pompe di ricircolo, provviste di opportuno volano per consentire il funzionamento inerziale della pompa in caso di mancanza di alimentazione elettrica, sono di tipo centrifugo, con sistemi di tenuta a perdite controllate (fig. 2.15). Le caratteristiche principali delle pompe di ricircolo sono riportate in tabella 2.7.

I primi modelli di WWER-1000, il prototipo V187 ed il successivo V302, erano provvisti di valvole di isolamento dei quattro *loops*, estremamente utili sia in situazioni di manutenzione programmata o straordinaria dei generatori di vapore (senza lo spegnimento del reattore), sia per evitare fenomeni di flusso inverso nel caso di fuori uso di una pompa di ricircolo. Negli ultimi modelli (V320) le valvole di isolamento sono state eliminate a causa del loro alto costo. Da un punto di vista geometrico la *Hot Leg* presenta una lunghezza di circa 10 m, mentre la *Cold Leg* una lunghezza di 27 m; il diametro interno di entrambe è pari a 0.85 m. La circolazione naturale è favorita dalla diversa altezza delle due linee (1.8 m di interasse).

Lo spessore delle tubazioni, realizzate in acciaio al carbonio rivestito con acciaio inossidabile, è pari a 7 cm; le perdite verso l'ambiente sono stimate in 6 MW.

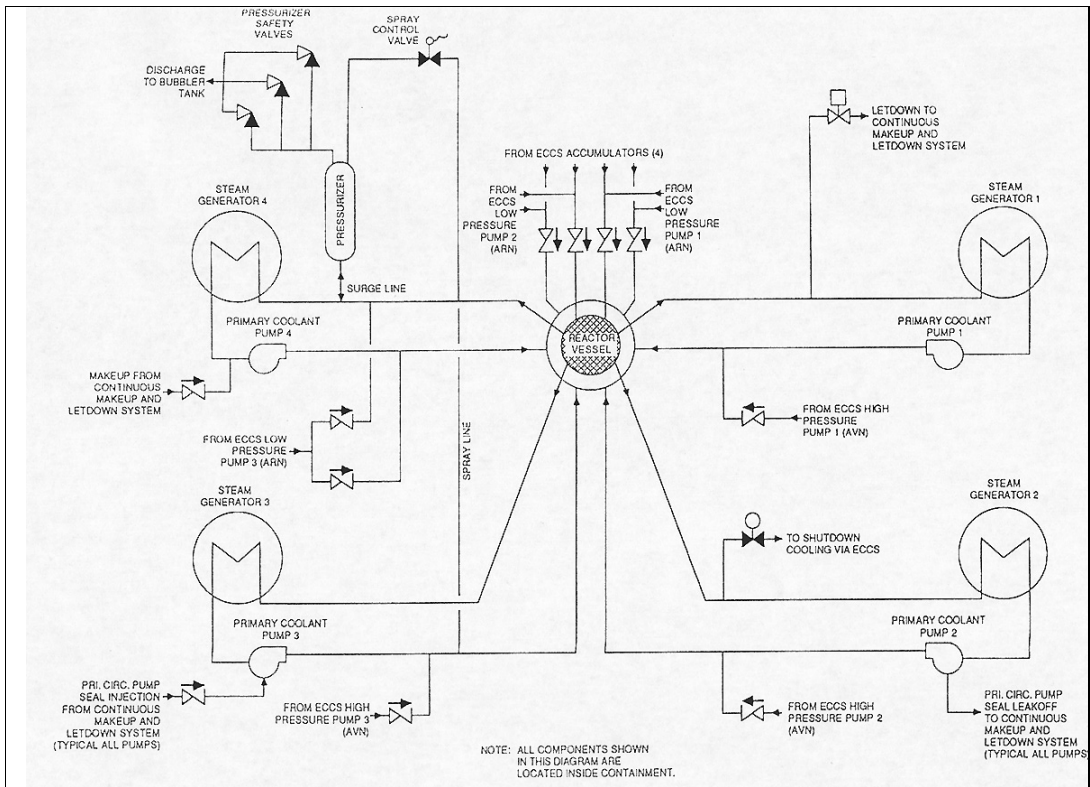
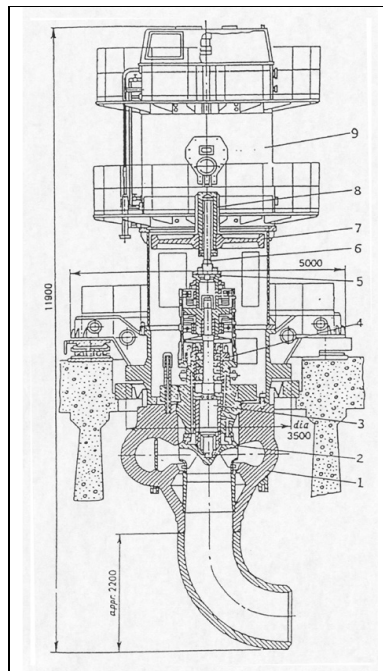


Fig. 2.14 schema del circuito primario del WWER-1000



1 pump housing 2 impeller 3 pump shaft 4 sealing 5 coupling 6 drive shaft 7 flywheel 8 electric motor shaft 9 electric motor housing

Fig. 2.15 schema della pompa di ricircolo

Primary Coolant Pumps	WWER-1000
Designation	GTsN-195
Pump capacity	20000 m/hour
Coolant temperature	300° C
Suction pressure	15.6 MPa
Pressure rise	0.62 MPa
Design pressure	18.0 MPa
Design temperature	350° C
Power consumption:	
Nominal	5300 kW
Cold water (20-60°C)	7000 kW
Rated voltage (50 Hz)	6000 volts
Speed	1000 revolutions/minute
Flywheel	Yes
Efficiency	.74
Weight	156 tonnes

Tab.2.7 caratteristiche di progetto della pompa di ricircolo

2.5 PRESSURIZZATORE E SISTEMA DI CONTROLLO DELLA PRESSIONE

Il sistema di controllo della pressione è costituito dai seguenti elementi:

- pressurizzatore: è connesso alla *Hot Leg* di uno dei *loops* (generalmente il n°4) attraverso una tubazione del diametro di 0.4 m e della lunghezza di 8 m (*surge line*); si compone di un *vessel* avente un'altezza di circa 11 m, un diametro interno di circa 3 m ed uno spessore di 0.3 m; il volume complessivo del *vessel* è di 79 m³ occupati per 55 m³ da acqua e per 24 m³ da vapore. In tabella 2.8 si riportano le caratteristiche principali di progetto del PRZ.

- vasca di soppressione (*quench tank*): collegata alle valvole di sfiato PORV (*Pilot Operated Relief Valve*) del pressurizzatore, tramite una tubazione di circa 6 m di lunghezza e di 0.2 m di diametro, è dotata di un sistema di raffreddamento e di un disco di rottura che superata la pressione di taratura, (pari a circa 4 atm) mette in comunicazione la vasca con il sistema di contenimento. La vasca di soppressione impedisce lo scarico del fluido radioattivo nel sistema di contenimento durante il normale funzionamento dell'impianto; l'aumento della pressione all'interno della vasca è uno dei segnali che portano alla chiusura delle valvole di isolamento dell'edificio reattore, ed al blocco della ventilazione.

- sistema di spray: preleva acqua fredda (290°C) tramite una tubazione lunga circa 18 metri nel punto di massima pressione dell'impianto (*Cold Leg*) e la manda al pressurizzatore. L'acqua spruzzata nel PRZ permette la condensazione del vapore a 340°C ivi contenuto e determina una diminuzione della pressione del primario.

- valvole di rilascio PORV: sono tre, comandate dall'azionamento di sei valvole elettromagnetiche, due per valvola, collegate con la vasca di soppressione. Hanno la funzione di proteggere l'impianto da sovra-pressioni, quando il sistema di spray risulta inefficace.

- riscaldatori elettrici HEATERS: entrano in funzione per aumentare la pressione nel circuito primario; sono quattro ed hanno potenze di 320 kW, 180 kW, 720 kW, 1260 kW; il secondo riscaldatore è sempre in funzione dovendo sopperire alle perdite di calore verso l'esterno e verso la *surge line*.

Pressurizer	WWER-1000
Volume	79 m ³
Steam	24 m ³
Temperature	346° C
Pressure	157 bars
Inner diameter	3.0 m
Height without support	13.66 m
Weight empty	212 tonnes
Heaters	
Number	28
Total power	2480 kW
Safety Valves	
First opening pressure	18.1 MPa
Closing pressure	17.0 MPa
Capacity	180 tonnes/hour (200 tons/hour)
Second opening pressure	18.6 MPa
Closing pressure	17.0 MPa
Capacity	180 tonnes/hour (200 tons/hour)
Third opening pressure	18.6 MPa
Closing pressure	17.0 MPa
Capacity	180 tonnes/hour (200 tons/hour)

Tab. 2.8 dati di progetto del pressurizzatore

2.6 SISTEMA SECONDARIO – GENERATORE DI VAPORE

I generatori di vapore (SG) in uso in tutti gli impianti WWER (sia in quelli da 440 MWe che in quelli da 1000 MWe) rappresentano la peculiarità che maggiormente distingue i reattori pressurizzati occidentali da quelli dell'ex URSS. La figura 2.1 mostra il layout dell'impianto dal quale si può vedere la disposizione dei generatori di vapore a tubi orizzontali mentre la figura 2.16 mostra il generatore di vapore PGW-1000M che equipaggia i reattori WWER-1000.

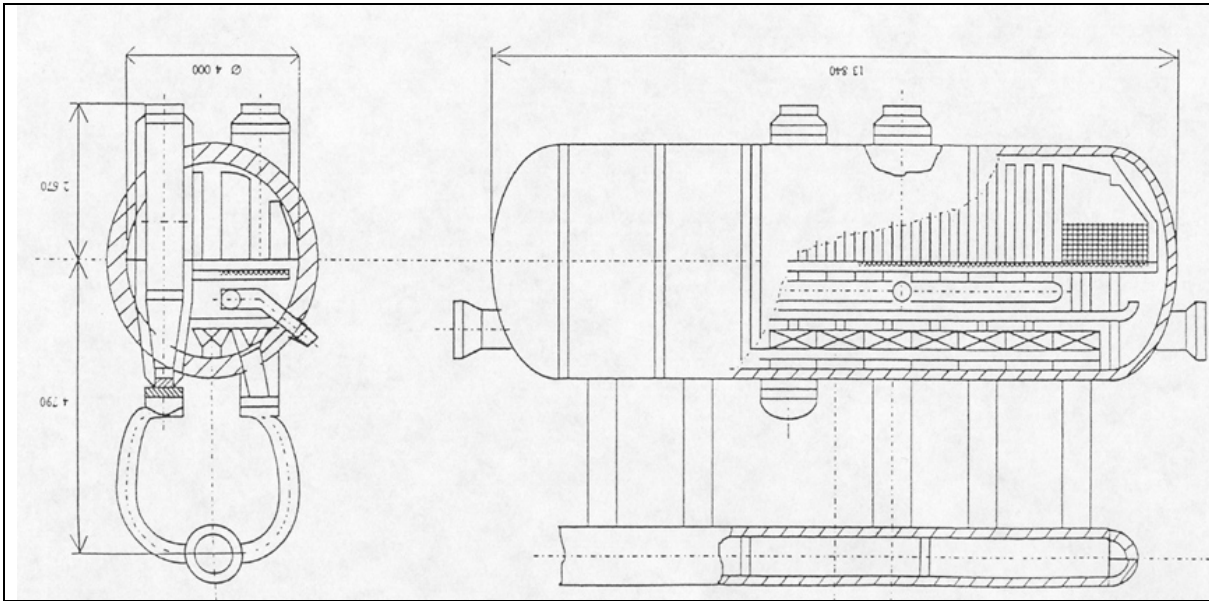


Fig. 2.16 schema del generatore di vapore

La disposizione orizzontale dei tubi consente una maggiore superficie di scambio (con conseguente incremento delle capacità di circolazione naturale) e la possibilità di far circolare il fluido senza concentrare le impurezze in esso presenti. La grande quantità d'acqua presente in questi generatori, permette di raffreddare il reattore più semplicemente, in caso di incidente.

Rispetto ai reattori WWER-440, che dispongono di sei SG, il reattore WWER-1000 dispone di quattro generatori di vapore di taglia più grossa. In condizioni nominali di lavoro il PGW-1000M fornisce una potenza termica di 750 MW con una produzione oraria di vapore pari a 1470 tonnellate, alla pressione di 6.28 MPa ed alla temperatura di 278.5 °C. In tabella sono riportate le principali caratteristiche del SG.

Il generatore di vapore può essere idealmente suddiviso in due parti:

1) SG lato primario

La *Cold Leg* e la *Hot leg* sono connesse rispettivamente a due collettori, denominati *cold e hot header*, collegati fra loro per mezzo di 11000 tubi di piccolo diametro ($\Phi 16 \times 1.5 \text{mm}$), attraverso i quali avviene lo scambio termico fra circuito primario e circuito secondario. L'acqua in pressione del circuito primario entra nell'*hot header*, passa attraverso i tubi ed esce dal *cold header*.

Il calore viene ceduto all'acqua presente nello SG che parzialmente evapora. I tubi, posizionati al di sotto di una piastra forata per permettere una distribuzione più uniforme del vapore prodotto, possono assicurare una superficie di scambio termico pari a 6115 m². I tubi vengono suddivisi in due gruppi in base alla temperatura del fluido; al primo gruppo appartengono i tubi nei quali il fluido refrigerante ha ancora una temperatura superiore alla temperatura media, al secondo gruppo

appartengono i restanti tubi. Una ulteriore suddivisione viene effettuata in base alla disposizione degli stessi all'interno del *vessel*: *small package*, più interni, e *large package*, più esterni.

2) SG lato secondario

E' costituito da un grosso *vessel* dal diametro interno di 4 m e di lunghezza pari a circa 13.8 m; il volume complessivo è di 127 m³, occupati per 81.5 m³ da acqua bollente in regime di circolazione naturale (livello di circa 2.4 m) e per 45.5 m³ da vapore. L'iniezione dell'acqua di alimento avviene al di sotto della piastra forata in corrispondenza dell'*hot package* al fine di bilanciare la maggiore produzione di vapore che avviene in questa zona.

Infatti l'iniezione di acqua "fredda" provoca la parziale condensazione del vapore prodotto rendendone più uniforme la produzione. L'acqua di alimento giunge nel *vessel* tramite 16 collettori del diametro interno di 80 mm, accoppiati a tubi di distribuzione ognuno dei quali comprensivo di 38 tubi forati del diametro di 25 mm.

Nel caso in cui venga a mancare l'alimentazione dell'acqua di alimento, o per rottura del lato secondario o per un black out di impianto, è prevista l'entrata in funzione di un sistema ausiliario di emergenza EFW (*Emergency Feed Water*) che attinge da tre serbatoi del condensato e dal deareatore; l'iniezione avviene su tre dei quattro SG. Il tempo di intervento della *emergency feed water* è al massimo di 60 secondi (in condizioni di normale alimentazione elettrica), mentre sale a 120 secondi nel caso di *station blackout*. Ogni SG viene dotato di un tubo di drenaggio, di un passo d'uomo, di due misuratori di pressione e di due gruppi di misuratori di livello idrostatici dei quali uno ad ampio range ed uno a basso range; il primo rileva escursioni di livello per tutta l'altezza del SG e viene utilizzato durante i rapidi svuotamenti o riempimenti (nel caso di situazioni incidentali o di normali drenaggi per manutenzione) mentre il secondo è in grado di misurare il livello solo tra 1 m e 2.5 m ed è usato durante il normale funzionamento. Il titolo termodinamico necessario al corretto funzionamento della turbina viene ottenuto prima per separazione gravitazionale e successivamente tramite passaggio del vapore umido in un separatore di vapore. La tabella 2.9 mostra le caratteristiche di progetto del generatore di vapore.

Steam Generator	WWER-1000
Thermal power	750 MW
Steam output	1469 tonnes per hour
Pressure of generated steam	6.48 MPa
Secondary coolant temperature at outlet	278.5° C
Secondary coolant temperature at inlet	220° C
Primary circuit working pressure	15.7 MPa
Heat exchange surface	5040 m ²
Primary coolant flow rate	14400 tonnes/hour
Primary coolant temperature at inlet to generator	322° C
Primary coolant temperature at outlet from generator	290° C
Log mean temperature difference	23.2° C
Heat transfer coefficient	7730 W/m ² K
Mean heat flux	184 kW/m ²
Number of coolant tubes	15648
Diameter and wall thickness of tubes	16 x 1.5 mm
Average tube length	8.5 m

Total length of tubes	133760 m
Weight of tubes	43.1 tonnes
Primary side pressure drop	0.135 MPa
Inside diameter of shell	4000 mm
Loner diameter where tubes flare out	834 mm
Thickness of wall at this point	168 mm
Number of rows of openings for flaring out of tubes	123
Spacing between rows	18 mm
Spacing between openings in a row	17 mm
Number of separator sections in a single row	11
Number of rows	8
Width of section	960 mm
Length of section	500 mm
Diameter of pipelines, primary inlet and outlet	850 mm
Diameter of pipelines, secondary inlet	375 mm
Diameter of pipelines, secondary outlet	500 mm
Thermal output of heat transfer surface of SG	17.3 MW/m ²
Mean velocity of coolant in tubes	4.9 m/second
Calculated moisture content of steam in SG	5 percent
Steam generator blowdown	7.3 tonnes/hour

Tab.2.9 caratteristiche di progetto del generatore di vapore

2.7 LINEA VAPORE, TURBINA, CONDENSATORE, FEED WATER

Il vapore prodotto nei generatori, percorsa la *steam line*, viene suddiviso in due parti: la parte più consistente viene inviata allo stadio di alta pressione della turbina, la seconda ai riscaldatori. In figura 2.15 è riportato uno schema semplificato della *Main Steam Line* del WWR-1000.

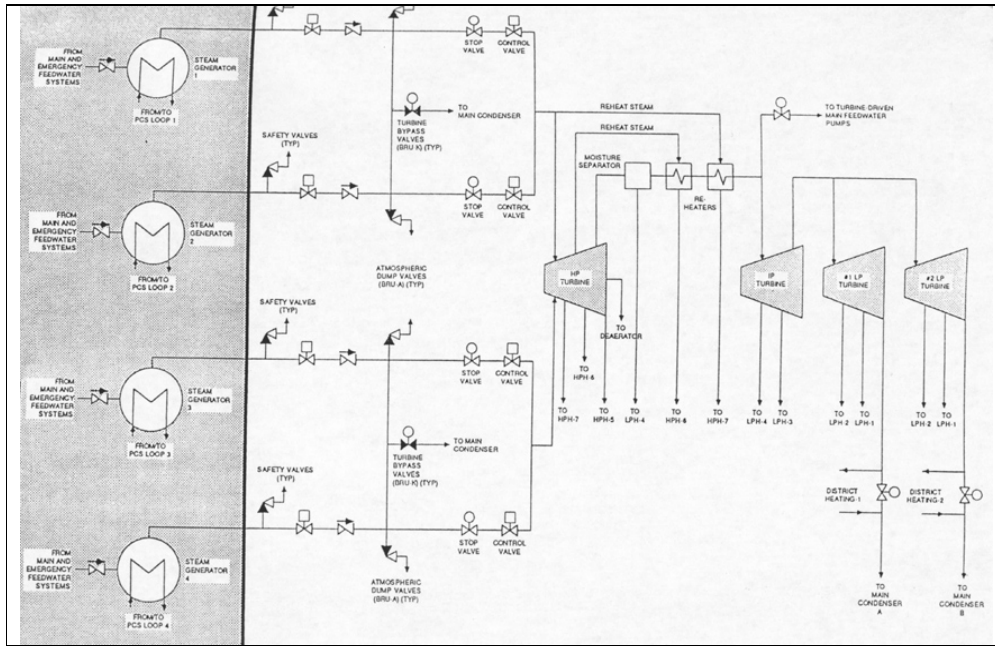


Fig. 2.17 Main Steam Line

Dalla turbina di alta pressione vengono effettuati degli spillamenti per provvedere al preriscaldamento dell'acqua di alimento. Uno spillamento serve anche a surriscaldare il vapore in uscita dalla turbina di alta pressione all'interno di appositi separatori-riscaldatori (i cui parametri costruttivi e funzionali più importanti sono riportati in tabella 2.10); un ulteriore spillamento di vapore prelevato prima dello stadio di bassa pressione provvede alla movimentazione della turbopompa dell'acqua di alimento.

Separator Model	SPP-220M	SPP-1000
Inlet steam flow rate	1180 tonnes per hour	?
First stage reheat steamflow	37.3 tonnes per hour	?
Second stage reheat steam flow	B4.4 tonnes per hour	?
Inlet steam temperature	150° C	194° C
Outlet steam temperature	272° C	250° C
Inlet moisture content	11.0 percent	11.4 percent
Outlet moisture content	.2 percent	.2 percent
Weight	11.5 tonnes	10.96 tonnes

Tab.2.10 caratteristiche dei separatori-essiccatori

All'uscita della turbina di bassa pressione il vapore giunge al condensatore. All'uscita dal condensatore il refrigerante viene pompato attraverso i preriscaldatori di bassa pressione, i demineralizzatori, e i degasatori. Il refrigerante viene ulteriormente riscaldato per mezzo dei preriscaldatori di alta pressione, percorre la linea di alimento e rientra come *feed water* nei generatori di vapore.

Per prevenire inaccettabili incrementi di pressione nel sistema secondario il vapore può essere scaricato dalle tubazioni tramite delle valvole di *by-pass* (BRU-K). Quando la pressione sale al di sopra del valore di set-point alcune di queste valvole si aprono ed il vapore si dirige direttamente nel condensatore. Nel caso in cui la pressione dovesse ancora aumentare, si aprono delle altre valvole (BRU-A), una per ogni generatore di vapore, che espellono il vapore direttamente nell'atmosfera. Nel reattore WWER-1000, le valvole vengono progettate per essere in grado di smaltire il 30÷50% della portata di vapore.

Tutti i WWER sono dotati di sistemi per deumidificare il vapore e per il suo surriscaldamento. Questo componente designato come SPP-1000 è costituito da due diversi stadi, nella parte alta avviene la separazione della gocce di acqua, mentre nella parte bassa avviene il surriscaldamento del vapore. La tabella 2.11 mostra alcune caratteristiche dei condensatori utilizzati nei WWER-1000 mentre la tabella 2.12 mostra le caratteristiche delle turbopompe utilizzate per movimentare l'acqua di alimento.

Parameter	K-22550	K-16360
Plant type	WWER-1000	WWER-1000
Turbine type	K-500-60/1500	K-1000-60/1500
Number per turbine	2	6
Inlet pressure	0.006 MPa	?
Temperature of cooling water	22° C	?
Heat transfer area	12150 m ²	16360 m ²
Cooling tubes		
28 x 1 mm	12752 mm	15280 mm
28 x 2 mm	214 mm	256 mm
Length of tubes	10 m	10 m
Pressure differential	0.04 MPa	?
Steam flow rate (tonnes per hour)	1800	?
Oxygen content (microgram/liter)	<20	?
Weight without water	900 tonnes	1800 tonnes

Tab.2.11 caratteristiche di due tipi di condensatori utilizzati nei WWER-1000

1. OK-12A Driving Turbine	
Power	11600 kW
Rotor speed	3500 rpm
Rundown time	20 minutes
Entrance steam pressure	.99 MPa
Condenser pressure	0.006 MPa
Rated temperature of cooling water	22° C
2. Feed Pump	
Flow rate	3760 m ³ /hour
Head	808 m
Inlet pressure	2.7 MPa
Outlet pressure	10.0 MPa
Power	9130 kW
Rotation speed	2500 rpm
Feedwater temperature	170° C
Pump weight	20 tonnes
Hieght	2130 mm
Width	2020 mm
Length	2130 mm
3. Booster Pump (PD-3750-200)	
Flow rate	3815 m ³ /hour
Head	214 m
Inlet pressure	.77 MPa
Outlet pressure	2.7 MPa
Power	2435 kW
Rotation speed	1800 rpm
Pump weight	6.48 tonnes
Height	2380 mm
Width	1760 mm
Length	1880 mm

Tab. 2.12 caratteristiche di progetto delle turbopompe per l'acqua di alimento