

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ



**Енергомашиностроителен факултет
Катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“**

Доклад

Тема: „АР 1000 – Централа на пасивен принцип“

Изготвил: Даниел Огнянов Коларов

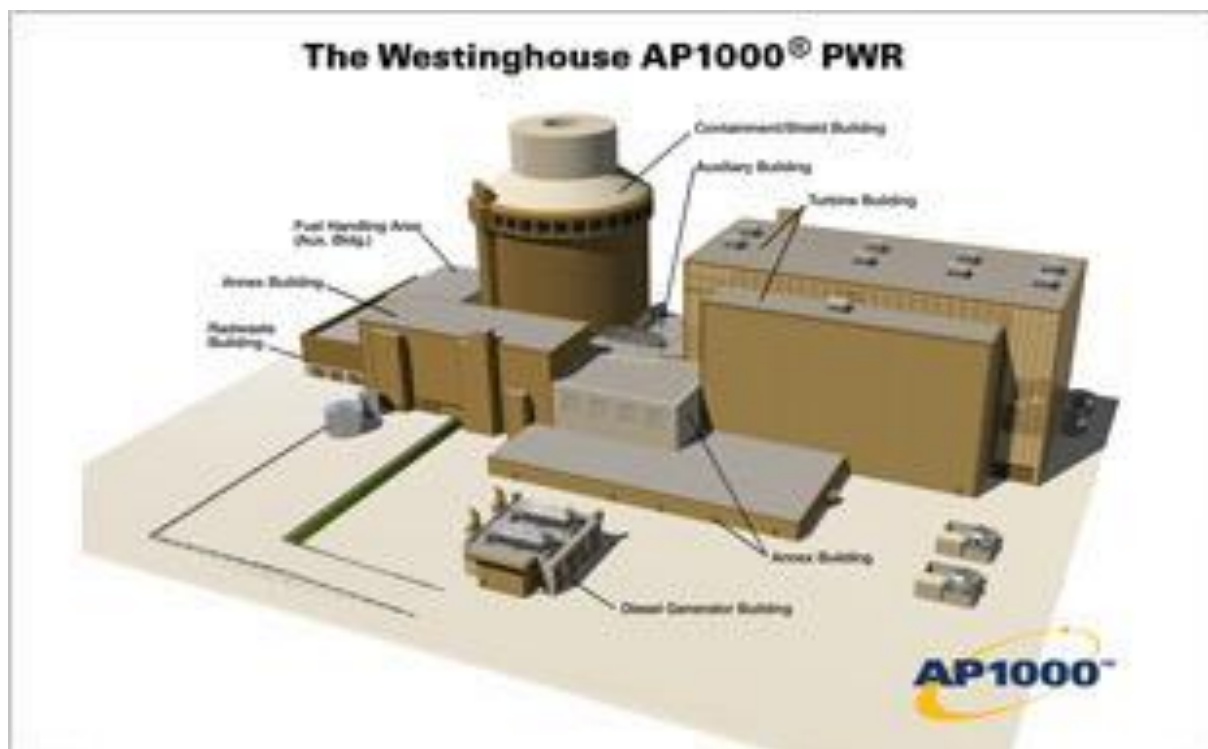
София, 2014 г.



Увод

Светът ни се разраства непрекъснато и заедно с това се увеличават и нуждите от електрическа енергия. До 2020 година ще има около 1,5 – 2 милиарда души повече отколкото в момента, които ще се нуждаят от енергия, а изкопаемите горива не могат да задоволят тези нужди без да се навреди повече на околната среда. Също така, възобновяемите енергийни източници като вятърна и слънчева енергия са все още недостатъчно развити и безопасни за околната среда, и когато се използват самостоятелно, не са реалистични решения, които да отговарят на това търсене.

Ядрената енергия е доказан, сигурен, достатъчен и чист източник на енергия. Компанията „Westinghouse Electric Company“, една от най-големите енергийни компании в света, е готова със своя най-нов водо-воден енергиен реактор AP1000. Той е единственият реактор от III+ поколение, който е получил одобрението на Комисията за Ядрено Регулиране на Съединените Щати (U.S. Nuclear Regulatory Commission). AP1000 е водо-воден енергиен реактор с 1154 MW електрическа мощност.





История

AP1000 е базиран на AP600. Екипът на AP600 цели да създаде опростен, сигурен и икономичен 600 мегаватов реактор, работещ с лека вода. По време на програмата се провежда цялостен тест на системите, целящ потвърждаване на сигурността на пасивните системи за сигурност. Тестовите завършват в края на 1994 година и AP600 става най-обстойно тествания реактор от NRC. Тестовите показват, че системите се държат добре в стресови ситуации и през септември 1998 година реакторът получава окончателното разрешение от комисията, а самият сертификат е издаден през 1999 година.

Също като AP600, AP1000 осигурява сигурност предимно чрез пасивни системи за сигурност. AP1000 получава окончателното одобрение на комисията (U.S. NRC) и получава сертификата си през януари 2006 година.

AP1000 работи с доказани технологии, иновативни системи за пасивна безопасност и предлага:

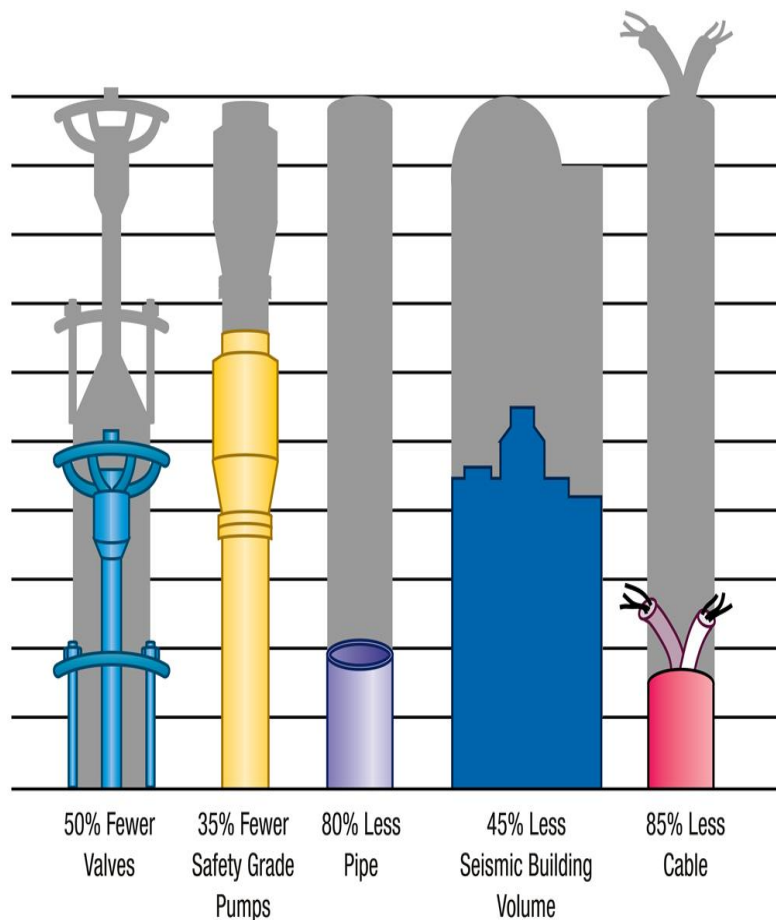
- Високо ниво на безопасност;
- Икономическа конкурентоспособност;
- Подобрени и по-ефективни операции.

Опростяването е основна цел при проектирането на AP1000. Опростеният дизайн на инсталацията включва общите системи за безопасност, операционните системи в режим на нормална работа, в контролната зала, строителните техники и контролните системи. Резултатът, който се цели, е централа, която е по-лесна и по-евтина да се построи, експлоатира и поддържа. Дизайнът на AP1000 спестява пари и време с ускореното си изграждане за период от време от около 36 месеца, от изливането на първия бетон до зареждането на горивото в активната зона.

Намаляването на разходите и времето за строеж следват от намаляването на необходимите материали и елементи. AP1000 има:



- 50% по-малко клапани, свързани с безопасността;
- 80% по-малко тръбопроводи, свързани с безопасността;
- 85% по-малко хранващи кабели;
- 35% по-малко помпи;
- 45% по-малък обем на сградите, улесняващ сеизмичната устойчивост;



Безопасност

Реакторът с вода под налягане AP1000 работи на концепцията, че в случай на проектна авария (каквато е скъсването на главен циркуляционен тръбопровод), инсталацията е създадена, за да се постигне и поддържа безопасно състояние и спиране на реактора без намесата на оператор и без да е необходимо използването на електрически ток или помпи. Вместо да разчита на активни компоненти като дизелови генератори и помпи, AP1000 е проектиран на базата на силите на гравитацията, естествената циркулация и компресираните газове, за да се запазят ядрото и херметичната обвивка от прегряване. Въпреки това, има много активни компоненти, които са включени в AP1000, но са определени като несвързани с безопасността.

Предвидени са няколко нива на защита за смекчаване на последиците от аварии, в резултат на което вероятността за повреждане на активната зона е много малка. AP1000 отговаря на критериите за



безопасност на U.S. NRC. Резултатите от тази оценка показват, че вероятността за повреда на ядрото е 1/100.

Защита в дълбочина

Много от защитните системи в съществуващите реактори с вода под налягане са запазени в AP1000, но са проектирани като несвързани със защитата на реактора. Те подпомагат нормалната работа и са първата защита при променливи режими на работа. Въпреки, че не се включват в оценката на безопасността на реактора, тези системи осигуряват допълнителна защита в дълбочина, като добавят още един слой от редундантни и разнообразни системи. Също така тези системи не подлежат на толкова строг контрол, и не се включват в техническите спецификации.

Примери за тези системи са:

- Система за химичен контрол;
- Система за нормално отвеждане на остатъчното топлоотделяне;
- Спомагателна подхранваща система.

Пасивни защитни системи на AP1000

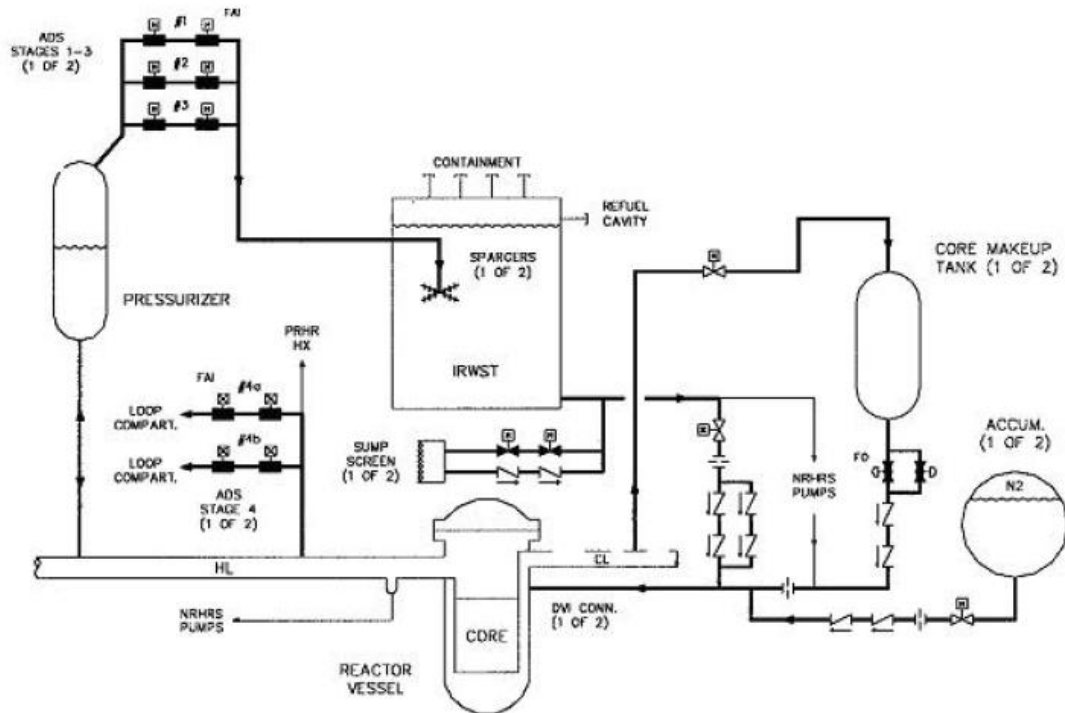
Голямо предимство в сигурността са пасивните защитни системи, тъй като осигуряват по-дълго време на нормална експлоатация без намесата на оператора. Използваните при AP 1000 са:

- Система за пасивно охлаждане на активната зона;
- Контейнмънт;
- Система за пасивно охлаждане на контейнмънта;
- Система, подsigуряваща обитаемостта на контролната зала.

Система за пасивно охлаждане на активната зона

Системата е категоризирана като Сеизмична категория I. Състои се от 2 резервоара -високо налягане, 2 резервоара – средно налягане (акумулатори), резервоар за събиране на вода (ниско налягане), система за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне, тръбопроводи, клапани и др. Системата е проектирана да осигурява нормалното топлоотвеждане в случай на проектни аварии.

Система за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне



AP1000 Passive Core Cooling System

За аварии при които няма загуба на топлоносител, системата за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне осигурява охлаждането на активната зона. Теплообменника се свързва към системата за охлаждане на реактора. Линията за отвеждане към теплообменника се свързва към един от горещите тръбопроводи на реактора чрез тройник, а към линията от теплообменника - към един от студените тръбопроводи на парогенератора. Входящата линия е свързана и към горната част на теплообменника като по този начин се осигурява естествената циркулация – топлата вода се издига над студената. Теплоносителя влиза в горната част на теплообменника, в долната му част е изхода където водата е по студена и тече в посока към реактора. Теплообменника се поддържа под същото налягане, каквото е в реактора $\sim 15\text{MPa}$.

Теплообменникът е потопен във вътрешният резервоар за вода на контейнента като топлината на водата в него е малко по-висока от тази в резервоара, за да се осигури охлаждането на топлоносителя. Теплообменника е разположен над системата от тръбопроводи на Първи контур, за да се осигури естествената циркулация. Разположението на тръбопровода на системата позволява задействането й също и от помпите на реактора. Когато Главните циркуляционни помпи работят те осигуряват

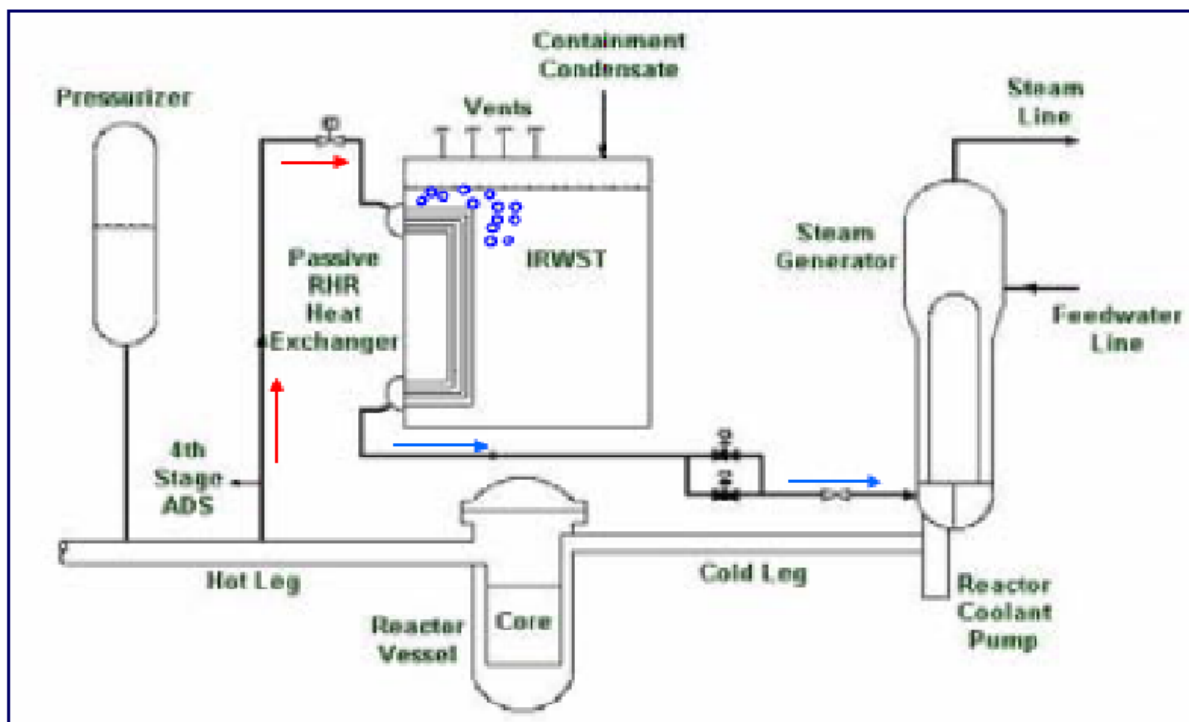


принуден поток в същата посока като естествената циркулация през топлообменника. Въпреки, че не се очаква натрупване на газове в системата, към входящата линия е свързана вертикална тръба в която има детектори, които да сигнализират на операторите в случай, че се натрупват газове в системата. Това позволява на операторите ръчно да отворят предпазните клапани и да изпуснат тези газове във резервоара на контейнмента, където да барбутират.

Тази система, ако работи заедно със пасивната система за охлаждане на контейнмента, може да осигури охлаждане на активната зона за продължителен период от време. Около 2 часа са нужни на температурата на водата в резервоара на контейнмента да достигне температура на кипене при аварийни ситуации. Започва да се образува пара, която кондензира във херметичната вътрешна част на контейнмента, изработена от стомана с дебелина между 4 и 5 сантиметра. Тази стоманена обвивка се охлажда от системата за пасивно охлаждане на контейнмента. Кондензатът се събира в улей разположен в най-ниската част на контейнмента и от там се отвежда до вътрешният резервоар на контейнмента. Възстановяването на водата в този резервоар осигурява неограниченото охлаждане през топлообменника за пасивно охлаждане на зоната.

Тази пасивна система се използва за да се осигури безопасното изключване на реактора. Отвежда топлината от реактора към топлообменника, от там към вътрешния резервоар на контейнмента, към обема на контейнмента, към обвивката на контейнмента и накрая към атмосферата. Освобождаването на топлина към контейнмента се постига след започването на кипене на водата в резервоара, който е отворен към контейнмента.

Система за аварийно охлаждане и борирание на реактора



Резервоарите с борен разтвор осигуряват подаването на топлоносител и борен разтвор към реактора в случаи, в които нормалното подаване е невъзможно или недостатъчно и няма загуба на топлоносител. Има два такива резервоара, разположени в контейнента, малко над нивото на охлаждащият кръг на реактора. По време на нормална работа резервоарите са напълно запълнени със студена борирана вода. Количеството на борен разтвор в тези резервоари е проектирано да бъде достатъчно за безопасното изключване на реактора в случай на авария. Всеки от тези резервоари е свързан към кръга на две места – директно в корпуса на реактора, и към един от студените тръбопроводи. Директните линии са затворени при нормална работа на реактора, чрез два паралелно свързани клапана, които се отварят при загуба на налягане и загуба на електричество.

Линията от резервоарите към студения тръбопровод обикновено е отворена за да се поддържа налягане равно на това в реактора и да не се допусне ефекта на воден удар при изливане на резервоарите в реактора. Линията от студения тръбопровод към резервоара (високо налягане) се нарича линия за баланс на налягането. Тя е свързана към горната част на резервоара. Температурата на водата в тези тръбопроводи е по-висока от тази на борираната вода в тръбопроводите за директно впръскване в реактора. И двата резервоара са свързани към реактора на една и съща височина, и при получаване на сигнал за отваряне на клапаните, те се



отварят с такава последователност, че да се осигури необходимият топлоносител.

Има два процеса за които са предвидени тези резервоари – вкарване на пара в резервоара и рециркулация на водата. Парата се вкарва, за да заеме мястото на борираната вода. Тя се вкарва през студения тръбопровод, в който се образува пара при неговото опразване. При рециркулация на водата, топла вода от студения тръбопровод се вкарва в резервоарите, а студената се излива в системата за охлаждане на реактора. Резултатът е повишаване на борния разтвор в системата за охлаждане на реактора.

Работата на тези резервоари зависи от състоянието на системата за охлаждане на реактора, и най-вече от изтичане от студените тръбопроводи. Когато тези тръбопроводи са запълнени и налягането е постоянно, впръскването в реактора става чрез рециркулацията. Ако масата на топлоносителя в реактора намалее достатъчно за да се получи изпразване на студените тръбопроводи, парата изтласква борираната вода от резервоарите в реактора. В случай на скъсване на тръбопровод, температурата и налягането в охладителната система намаляват. Поради охлаждането коефициентът на реактивност се покачва поради обратния температурен коефициент. Ако се приеме, че всички клъстери от поглъщащи пръти са блокирани и напълно изведени от активната зона, мощността на реактора започва да нараства. Активирането на системата за аварийно бориране, позволява вкарването на достатъчно количество борен разтвор в реактора за да се понижи реактивността и да се изключи безопасно реактора.

В случай на скъсване на тръба в парогенератора, системата за аварийно бориране заедно със системата за предпазване от препълване на парогенератора спират изтичането на топлоносител от реактора в парогенератора. Това се случва без да се активира системата за понижаване на налягането, и без намеса на оператора. В случай на такова скъсване резервоарите на системата за аварийно охлаждане и бориране на реактора работят в режим на рециркулация за да осигурят необходимото количество борен разтвор за компенсиране на загубите от изтичането и борирането на топлоносителя в реактора. В случай на изтичане от 10 галона на минута, системата може да забави активирането на системата за аварийно понижаване на налягането за 10 часа, като осигурява топлоносител за реактора. След активирането на тази система, системата за пасивно охлаждане на зоната, осигурява достатъчно количество борирана вода за да се компенсира намаляването на масата на топлоносителя.



Системи за аварийно подхранване при авария със загуба на топлоносител

Системата за пасивно охлаждане на активната зона се състои от четири различни системи за впръскване по време на аварии със загуба на топлоносител:

- Акумулаторите, които осигуряват голям поток от топлоносител за кратък период от време;
- Резервоарите (високо налягане) осигуряват сравнително голям поток за по-продължителен период от време;
- Вътрешният за контейнмента резервоар осигурява слаб поток, но за значително по-дълъг период от време;
- Контейнмента е последния източник на вода.

При авария със загуба на топлоносител (ЛОСА) резервоарите под високо налягане, осигуряват впръскване съпоставимо с изтичането на топлоносител. Очаква се, че при по-голямо разкъсване и активирането на системата за намаляване на налягането, студените тръбопроводи ще се изпразнят. В този случай резервоарите под високо налягане ще се изпразнят с голяма скорост. Предпазните клапани на линията за директно впръскване в реактора пречат на обратния поток към резервоарите от акумулаторите, при което би било възможно байпасирането на реактора. При малки ЛОСА резервоарите работят при режим на рециркулация, тъй като студените тръбопроводи са пълни с топлоносител. С напредването на аварията и изпразването на студените тръбопроводи, режимът на работа на резервоарите се сменя и се осигурява по-силен поток от борирана вода.

Двата акумулатора съдържат борирана вода и възглавница от азот под налягане, което осигурява бързо впръскване в реактора. Разположени са в контейнмента и също като резервоарите са свързани към линиите за директно впръскване в реактора. На входа на реактора са разположени дефлектори, насочващи потока към долната част на реактора за да се предотврати байпасирането на активната зона. Акумулаторите осигуряват няколко минути впръскване при аварии с големи разкъсвания.

Вътрешният за контейнмента резервоар за вода е разположен в контейнмента малко над нивото на реактора. Вкарването на вода в системата за охлаждане на реактора е възможно само след понижаване на налягането в кръга. В този резервоар се използват клапани, които се отварят автоматично при подаване на сигнал за четвърта фаза на системата за автоматично понижаване на налягането. Това се случва, когато налягането в реактора стане по-ниско от това в резервоара.

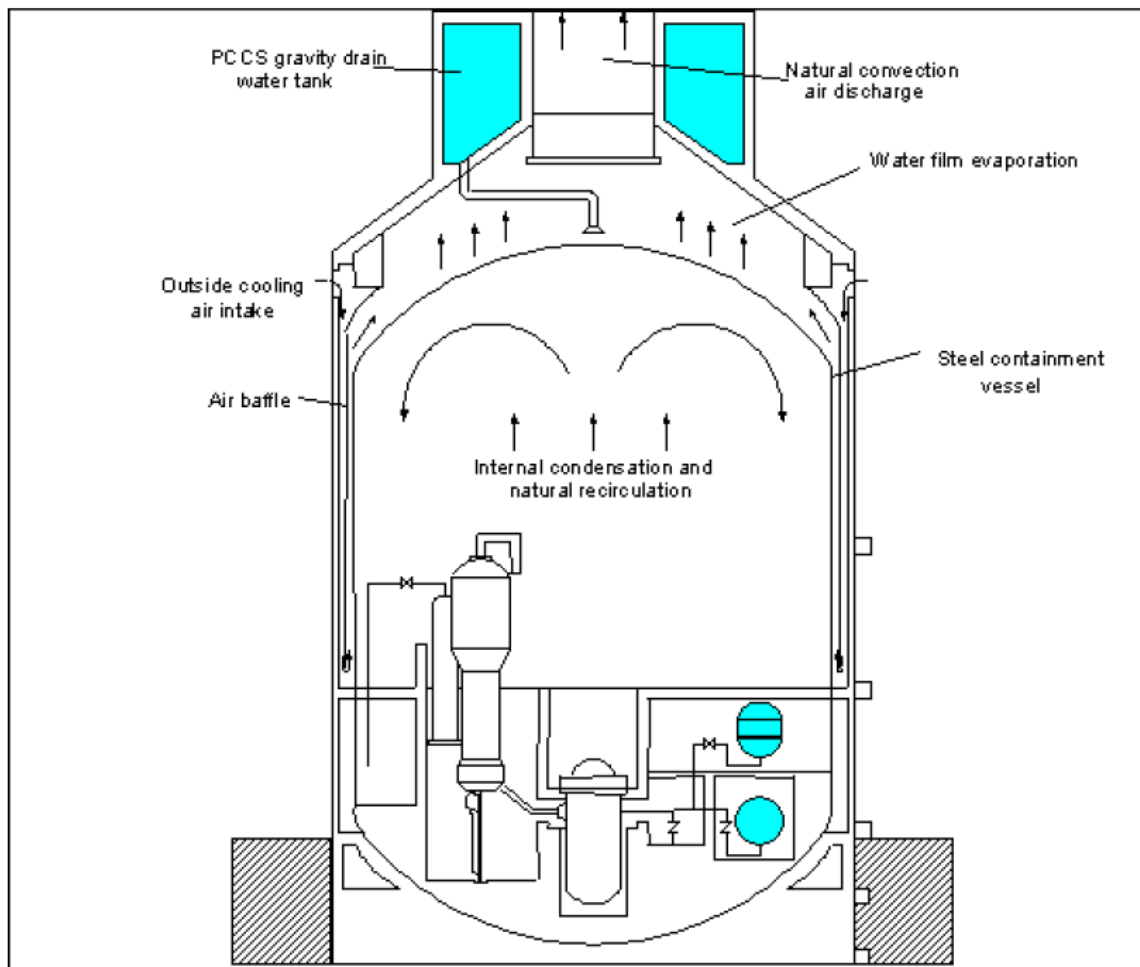
След активирането на всички тези системи контейнмента е наводнен до степен позволяваща рециркулацията на вода обратно в реактора под действието на гравитацията. Времето, необходимо за да се достигне тази



рециркулация е различно според това каква точно е аварията. При скъсване на някоя от линиите за директно впръскване в реактора съдържанието на вътрешният за контейнмента резервоар за вода се излива в контейнмента и го наводнява. В случай на автоматично понижаване на налягането без да има изтичане на топлоносител, нивото в този резервоар намалява много бавно и рециркулацията може да не започне в продължение на няколко дена. Рециркулацията в контейнмента е възможна, когато са отворени клапаните за рециркулация и запълването на контейнмента с вода е достигнало необходимото ниво. Когато нивото в резервоара намалее се отварят допълнителни клапани, осигуряващи редувантни линии за вкарване на вода в реактора. Възможно е да се отворят клапаните ръчно за да се наводни контейнмента при тежки аварии, при които има разтапяне на активната зона. Това се постига чрез Системата за вътрекорпусно задържане на кориума (разтопената активна зона).

Основната идея на тази система е да се наводни реакторното помещение. Водата циркулира около реакторната обвивка и отнема топлината, която се отдава от кориума. След това се изпарява в обема на контейнмента, където кондензира и отново служи за охлаждане. Целта е да се задържи кориума вътре в корпуса в реактора, вместо да бъде разрушен корпуса и кориума да се събира в уловител на стопилката извън него. Този метод се използва в Ядрената енергийна централа Ловийса, с реактори ВВЕР-440/В230.

Система за пасивно охлаждане на контейнмента



AP1000 Passive containment cooling system

Системата за пасивно охлаждане на контейнмента предава топлина от стоманената обвивка на контейнмента директно към околната среда за да не се превишават налягането и температурата за които е проектиран контейнмента в случай на авария. Системата трябва да извършва това охлаждане само когато нормалните средства за охлаждане не работят – когато вентилацията в контейнмента не работи продължителен период от време. Също така системата е проектирана да работи при аварии при които се изпуска големи количества енергия в контейнмента.

Пасивната система включва стоманената обвивка на контейнмента, която обгражда реактора и парогенераторите. Тази обвивка има горна, вътрешна, и външна обвивка. Стоманената обвивка е проектирана за 45 kPa налягане. Направена е от стомана, дебела от около 4-5 см. Диаметърът на контейнмента е около 36.5м. Бетонната обвивка обгражда стоманената част с около 1.5 м напрегнат железобетон. В горната част на външната



обвивка е изграден радиален въздухозаборник. В горната част на контейнента са поставени резервоар за вода и комин, който освобождава натрупаната топлина и повишава естествената циркулация. Височината му е около 15 метра над резервоара. Между бетонната обвивка и стоманената обвивка има множество отвори водещи към комина, разположен над контейнента.

В случай на авария, при която в контейнента се изхвърля голямо количество енергия, системата за пасивно охлаждане на контейнента може да осигури над 72 часа охлаждане на контейнента и време за реакция. В случай на авария със загуба на топлоносител във обема на контейнента се изхвърля топлоносител със висока температура. Теплоносителя се изпарява с голяма скорост, поради голямата разлика в налягането – в реактора е около 15MPa, а в контейнента налягането е атмосферно. Парата се издига до горната част на стоманената херметична обвивка на контейнента, където отдава топлината си на метала, охлажда се и кондензира. Пада на дъното на контейнента, събира се в улея за събиране на кондензата и се връща във вътрешния за контейнента резервоар за вода, откъдето постъпва в реактора.

През отворите между вътрешната и външната част на контейнента преминава въздух под действието на естествената циркулация, който охлажда стоманената повърхност и напуска отворите поради по-високата си температура, а на негово място постъпва по-студен въздух. В случай, че това охлаждане е недостатъчно и налягането в контейнента започне да се повишава, от външния резервоар започва да се излива вода през отворите, облива стоманената обвивка и я охлажда по-ефективно. Това може да продължи до 72 часа след което резервоарът трябва да се запълни повторно. Ако това е невъзможно налягането в контейнента ще започне да се покачва, но няма да превиши 90% от проектното за контейнента.

Работа и поддръжка

Работещите ядрени централи в Съединените Щати са конкурентни на централите работещи с изкопаеми горива. Това се подсигурира от факта, че 25% от цената на електрическата енергия се състои от цената на горивото, а другите 75% са от цената за работа на централата и нейната поддръжка. Това означава, че цената на енергията от ядренети централи се влияе сравнително по-малко от цената на горивото, отколкото цената на енергията от централите на изкопаеми горива, при които цената на горивото е около 75% от цената на произвежданата енергия. Също така, поради по-малкия и опростен дизайн, AP1000 изисква по-малко



съоръжения и инфраструктура за тестове и за поддръжка на централата. По-ниските изисквания за работата и поддръжката на централата също спестяват пари, поради необходимостта от малки екипи от хора. Подбраните за централата компоненти са се доказали като висококачествени и надеждни, което повишава надеждността на цялото съоръжение. Използват се стандартизирани компоненти, които намаляват нуждата от големи количества резервни части, по-малко тренировки и по-къси срокове за планови ремонти.

AP1000 е проектирана така, че да се намалят цялостните капиталовложения и да бъде икономически конкурентна на съвременните централи използващи изкопаеми горива. Количеството на системи и съоръжения, свързани с безопасността е значително намалено поради широкото използване на пасивни системи. Около 45 % по-малко сгради са класифицирани като сгради от I сеизмична категория, поради намаленото количество на защитно оборудване. Голяма част от конструкцията се изпълнява модулно като това допълнително намалява времето за изграждане.

Опростена схема на централата

AP1000 се разполага на площ, която е по-малка от тази на съществуващите ядрени централи със същата мощност и въпреки това съществува разделение между пряко свързаните със безопасността защитни системи и тези, които са непряко свързани. Схемата на централата е определена от това за какво са предвидени съоръженията в сградите:

- Ядрен остров (Nuclear island) – единствените сгради от I сеизмична категория;
- Машинна зала – помещения за турбините;
- Спомагателни сгради;
- Дизел-генераторни станции;
- Сгради за съхранение на радиационни отпадъци.

Ядрен остров

Обемът на тези сгради от I сеизмична категория е значително по-малък от този на по-старите концепции. Това позволява да се намали цената на конструкцията, тъй като сградите от тази сеизмична категория струват приблизително три пъти повече от другите сгради. Този ядрен остров е проектиран да издържи на земетресения, наводнения и пожари без



да се намали способността за нормално функциониране на реактора и защитните системи.

Сградите, които не са категоризирани като такива от сеизмична категория I са проектирани да издържат на ветрове и земетресения спрямо Единния сграден код (Uniform Building Code).

Заключение

Подобрената работа на ядрената централа означава повече електрическа енергия на по-ниска цена. AP1000 има няколко качества, които подобряват работата на централата и повишават сигурността на работещите в нея:

- Осемнадесет месечен горивен цикъл;
- Значително намалено време за планови ремонти, тестове и проверки;
- Намалено излагане на радиация и по-малко отпадъчни продукти;
- Време за експлоатация – 60 години.
- Пасивните системи за безопасност дават възможност за по-дълго време за взимане на решения при аварийни ситуации.

Към момента тече изграждането две централи с по два такива реактора в Китай и две централи в САЩ, като се очаква първата централа в Китай да заработи до 2016 година.

Използвана литература:

1. Официален сайт на AP 1000 - <http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/>
2. “ Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant“ - W.E. Cummins, M.M. Corletti, T.L. Schulz, *Westinghouse Electric Company, LLC*
3. Westinghouse AP1000®Nuclear Power Plant Seminar in Cooperation with Technical University of Sofia, Bulgaria, March 2014, Lecturer - Howard Bruschi
4. Westinghouse Technology Systems Manual - USNRC HRTD, Rev 0111