

Технически университет – София
Енергомашиностроителен факултет
Катедра Топло и ядрена енергетика

Доклад

Тема: Малки модулни реактори
(Small Modular Reactors - SMRs)

Студент: ПЛАМЕНА СПАСЕВА
I курс, магистър, ЯЕ

2013

Въведение.

С развитието на ядрената технология и с натрупания опит в областта на ядрената енергетика при приблизително 60г. експлоатация, се произвеждат реактори с най-различни мощности (от 60 до 1600MW). Едновременно с това се въвеждат в работа стотици малки реактори с мощност до 190MW за нуждите на флота и за източници на неутрони за експериментални цели. Поради това по-късно Международната агенция за атомна енергия (МААЕ) въвежда понятието малки модулни реактори (Small Modular Reactors- SMRs) за реактори с мощност не повече от 300MW. Те могат да бъдат два вида: Леко-водни реактори (LWR) или не-Леко-водни реактори (non-LWR). Първият тип могат по-малък технологичен риск, а при вторият има възможност за по-голяма компактност и простота, и голямо удължаване на кампанията на горивото (времето до следващо презареждане на активната зона). За пръв път е показан проект на малък реактор от поколение 3+ с мощност 300MWe през 1984г., наречен Central Argentina Modular Element (CAREM) проектиран от CNEA & INVAP, Аржентина. След аварията във Фукушима през 2011г. Аржентина започва разработване на прототип на малък реактор с вода под налягане с мощност 25MWe. Други реактори от такъв тип са: IRIS (Westinghouse-led, International, PWR, 100-335MWe), Westinghouse SMR (Westinghouse, USA,PWR, 200MWe), SMR-160 (Holtec, USA, PWR, 160MWe), SMART (Kaeri, South Korea, PWR, 100MWe), ACP-100 (CNNC & Guodian, China, PWR, 100MWe), HTR-PM (Inet&Huaneng, China,HTR, 2x105MWe), EM2 (General Atomics, USA, HTR, 240MWe), SC-HTGR Antares (Areva, HTR, 250MWe), BREST (RDIPE, Russia, FNR, 300MWe), SVBR-100 (Rosatom/En+,Russia, FNR 100MWe), Prism (GE-Hitachi,USA, FNR, 311MWe), Gen4 module (Gen4 hyperion,USA, FNR, 25 MWe), FUJI (ITHMSO, Japan-Russia-USA, MSR, 100MWe) и други проекти за мобилни ректори .

С тяхното въвеждане могат да се направят различни иновативни решения на редица технически проблеми в използването на ядрената енергетика. Едно от основните предимства на SMRs е развитието на чистата и достъпна ядрена енергия чрез поддържане на високо ниво на ядрена безопасност. Те се проектират с надеждни пасивни системи за безопасност, вградено саморегулиране и защита при загуба на функции и неизправности в оборудването. Американското ядрено общество доказва с различни анализи и оценки липсата на необходимост от много системи за безопасност при малките реактори, в сравнение с големите мощности.

Сравнение между системите на безопасност на по-широко използваните типове реактори и потенциалните проекти на SMRs :

Сегашно поколение системи за безопасност	Системи за безопасност при SMRs
Система за заливане на АЗ-високо налягане Система за заливане на АЗ-ниско налягане	Пасивни системи за заливане на АЗ
Необходимост от осигуряване на смукателна височина на помпите за осигуряване на безопасната им работа	Не се използват помпи
Аварийни дизел генератори	Пасивния проект не изисква аварийно подаване на електроенергия за поддържане на охлаждането на АЗ.Топлината от АЗ се предава посредством съда под налягане

Активна система за понижаване на топлината (налягането) в контеймънта	Пасивно изхвърляне на излишната топлина извън контеймънта
Сплинклерна система в контеймънта	Не е необходима, тъй като няма нужда от намаляване на налягането и премахване на радиоактивни вещества в контеймънта
Система за аварийно охлаждане на активната зона (CAOЗ) и система за контролно-измервателни уреди; нуждаят се от постоянна проверка и тестване, което допринася до една степен за ненадеждността на централата и склонност към непреднамерени аварийни събития	Прости и/или пасивни системи за безопасност, които подлежат на по-малко тествания и не са толкова склонни към непреднамерени събития
Аварийна система за подхранваща вода, цистерни за съхранение на кондензат, както и свързаните с тях аварийни системи за захранване	Възможност за отвеждане на топлината от АЗ без системи за подхранваща вода, което е значително повишаване на безопасността

Сравнение на системите за подпомагане на по-широко използваните типове реактори и потенциалните проекти на SMRs

Сегашно поколение системи за подпомагане	Системи за подпомагане при SMRs
Уплътнение на помпата за охлаждане на реактора; теч от уплътнението може да засегне безопасността; поддръжката и подмяната на уплътнението е скъпо и отнемащо доста време	Интегрирания проект елиминира нуждата от уплътнения
Оптимално отвеждане на топлина; реките и водата от моретата е активна система, която може да спре да работи при редица екстремни условия или био-замърсяване	Пасивна система за отвеждане на топлината на основата на процеси като конвекция и топлопроводимост; не е необходимо отвеждането на топлина
Затворени системи за охлаждане на вода са необходими за поддържане на системите за безопасното отвеждане на топлина от АЗ и от оборудването	Не е необходимо използването на затворени системи за поддържане на системите за безопасно извеждане на топлина от АЗ и оборудването
Отопление, вентилация и климатизация (ОВК) са задължителни за правилното изпълнение на функциите на системите за безопасност	Централата елиминира или свежда до минимум използването на ОВК системи

SMRs могат да се строят независими или като модули, състоящи се от комплект от няколко малки реактора, като има капацитет за добавяне на повече мощности. Капиталовложенията за тяхното построяване, експлоатация и извеждане от експлоатация са много по-ниски в сравнение с тези на големите ядрени енергийни реактори (1000MW и повече). Главно се очаква с комерсиализирането на този тип малки реактори да се опрости самото проектиране, да се постигне минимално използване на материали от висок клас на честота, и намаляване на разходите за всеки един от процесите в жизнения цикъл на ядреното съоръжение.

Основно предимствата могат да се очертаят в няколко насоки :

- **Модулност** – терминът в контекста означава възможност за производство на компоненти от различни системи на място във фабрика, което значително скъсява периода на строителство и ремонт на различни части на централата в сравнение с по-големите мощности. SMRs предоставят опростеност на проекта, подобрени функции за безопасност и защита на околната среда и населението, икономичност, качество при фабричното производство и по-голяма гъвкавост, изразяваща се във финансиране, избора на площадка, оразмеряване и указания за извеждане от експлоатация. Допълнително могат да се поставят постепенно повече модули, тъй като търсенето и употребата на енергия се увеличава с всяка изминала година.
- **Малки капиталовложения** – могат да намалят разходите на собственика при всички етапи от жизнения цикъл на съоръжението. Това се постига именно чрез модулните компоненти и фабриката за производство;
- **Гъвкавост при избора на площадка** - SMRs могат да осигурят енергия на такива места, които големите мощности не са необходими или при липса на добра инфраструктура да подпомогнат големите мощности. Това може да включва малки пазари на електричество, изолирани райони, малка енергийна система, места с ограничен източник на вода и ограничение на площта или уникални индустриални приложения;
- **Увеличение на ефективността** – SMRs могат да работят съвместно с други източници на енергия като възобновяеми и природно-изкопаемите (въглища и газ), да свърже източниците, да осигурява по-висока ефективност и намаляване на отпадните продукти като същевременно се увеличава стабилността и защитата на електрическата мрежа. Някои съвременни проекти за SMRs могат да произвеждат пара с много висока температура за производство на електричество чрез всякакви електрически генератори или за различни индустриални приложения ;
- **Неразпространение** – повечето SMRs ще бъдат построени с по-нисък клас на безопасностни и защитни подобрения от гледна точка на уязвимости за саботаж и опасност при сценарий с природни бедствия. Някои SMRs ще се проектират да се експлоатират продължителен период от време без презареждане на горивото. Последният тип реактори могат да се произвеждат и зареждат в една фабрика, запечатани и транспортирани до обекти за производство на електроенергия или топлинна енергия за технологични процеси, и след това връщане във фабриката за презареждане в края на жизнения цикъл. Този подход може да спомогне за намаляването на транспортирането и манипулиране на ядрен материал.

През 2009г. според оценка на МААЕ по програма за Иновативни ядрени енергийни реактори и горивни цикли (INPRO) до 2030г. в света ще се оперират близо 96 малки модулни реактора (в най-добрия случай). Също така въвеждането им може да подобри икономиката на редица страни с ядрени програми и такива, които имат намерение да ги въведат. Докладите на МААЕ показват, че близо 10-20% от проектите са довършени, а останалите в процес на затвърждаване и подготовка за тяхното производство. Основно обаче се казва, че малките модулни реактори имат качествата да намалят в пъти финансовите рискове и да се превърнат в потенциални конкуренти на много източници на енергия, които се предлагат в момента на енергийния пазар.

През януари 2012г. Министерството на енергетиката в САЩ (DOE of USA) спонсорира програма за развитие на няколко реактора на стойност 452 милиона за около 5г., като одобрените компании са Babcock&Wilcox mPower, Hyperion, Holtec и NuScale. Съществуват и други програми за подпомагането на развитието на не леко-водни реактори.

Най-съвременни проект за малък модулен реактор е в Китай. Реакторът е от типа високо температурен реактор с охлаждане от газ (HTRs), който се основава на няколко германски проекта от шестдесетте и осемдесетте години на миналия век.

Компанията URENCO е призовала за европейско развитие на малки реактори с мощност от 5 до 10MW основно за реактори от типа HTRs с вградена безопасност и търси подкрепа за изработването на прототип на „Уранова батерия“ (U-Battery), която може да работи от 5 до 10г. без презареждане и обслужване.

Вече има пуснати в експлоатация в отдалечено място като Сибир четири малки мощности в когенерационната централа „Билибино“. Тези реактори са с топлинна мощност 64MW и са необикновени кипящи реактори с графитов забавител с канали за вода/пара между забавителя. Те произвеждат пара за топлопреносната мрежа в района и 11MW електроенергия. Тяхната цена е много по-ниска за Арктическият регион от тази на централите, използващи полезни изкопаеми.

В тази категория попада също и индийският реактор с тежка вода под налягане (PHWRs) с 220MW, разработен на основата на канадска технология.

1. Видове Малки модулни реактори :

1.1. Леко-водни реактори (Light Water Reactors)

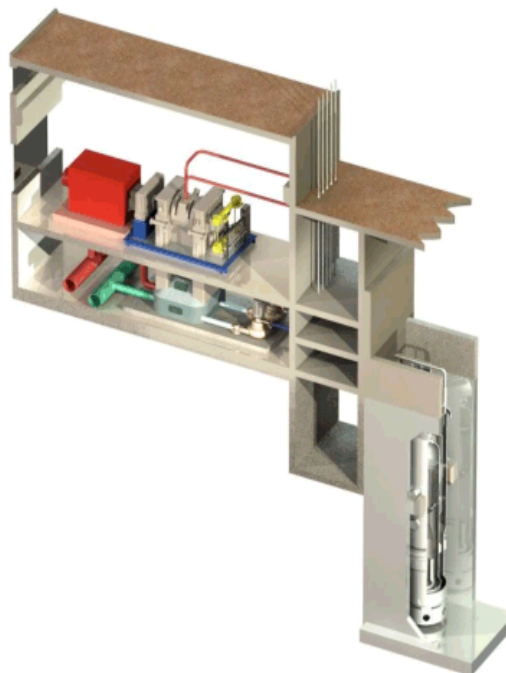
1.1.1. NuScale

Компанията NuScale LLC представи през 2008 проект за малък модулен реактор с мощност 45MW с възможност за поставяне на комплект от няколко реактора (1 до 12). Всеки от реакторите представлява отделен модул съставен от собствен контейнмънт и реакторна система, собствен комплект турбина – генератор. Когато се експлоатира повече от един реактор не се оказва влияние върху другите реактори от комплекта при оперирането на всеки един от тях.

Реакторите са компактни. Всеки компонент е модулен и е проектиран да се произвежда извън площадката в многобройни съществуващи фабрики, навсякъде по света. Конструкцията е проста, разходите са по-предвидими и контролируеми в сравнение с по-големите мощности.

Размерите на контейнмънтът и реакторният съд са приблизително: 20m дължина и 4,5m диаметър. Реакторът и другите компоненти са лесно транспортируеми чрез автомобилен или железопътен транспорт. Обогащването на ядреното гориво е по-малко от 5% а продължителността на горивната кампания е 24 месеца.

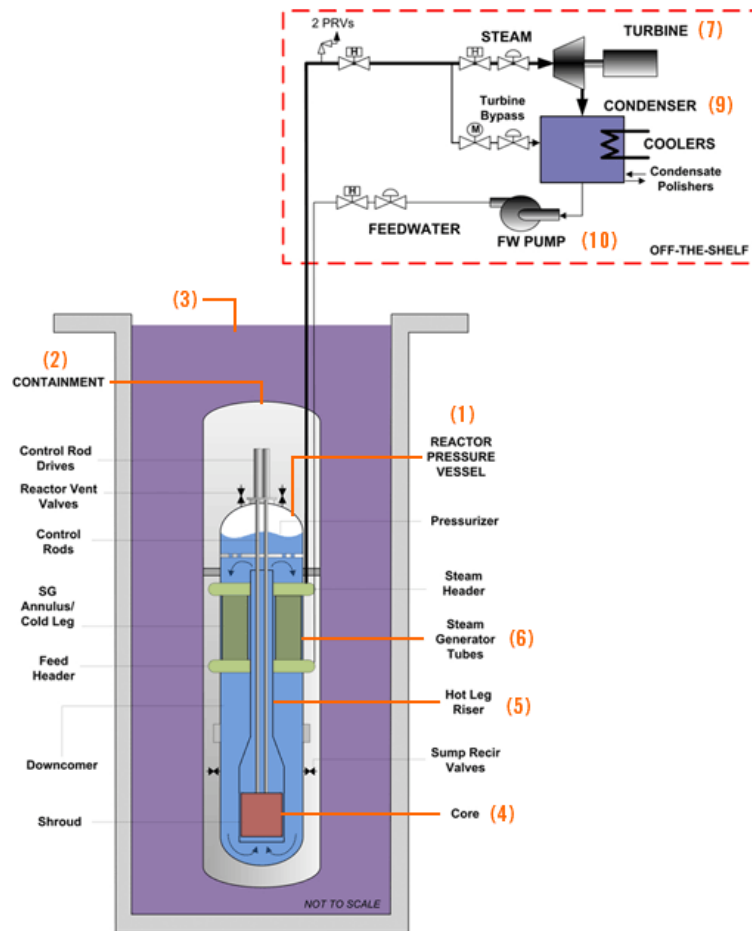
В системата на NuScale реакторният съд под налягане съдържа реактор (ядрено гориво) и парогенератор. Водата в реактора се движи чрез естествена циркулация, което се явява пасивна система за защита при аварийни ситуации.



Single-unit side view of the NuScale system design

Начин на работа: Във всяка ядрена централа тип NuScale съдържа мулти-модулна конфигурация като всеки модул е независим от останалите. Но всички модули се управляват от една контролен пункт.

Реакторният съд под налягане(1) е разположен в херметичен съд (2), който от своя страна се разполага в басейн, запълнен с вода (3). Реакторът се охлажда посредством процеса конвекция т.е. чрез естествена циркулация, без наличие на помпи. Водата преминава през долната част на активната зона (4), където е разположено ядреното гориво като същевременно отнема топлината получена от деленето на ядрата, и се изкачва по височината на съда,. След това се движи по гореща възходяща тръба (5) и достига до парогенератора (6). Там по-студената част от водата има по-голяма плътност и посредством силата на гравитацията се стича надолу до дъното на реактора, от където започва наново нейното изкачване. Горещата вода пък преминава около стотиците тръби на парогенератора и предава своята топлина на водата, която се движи в тях. Водата в тръбите се превръща в пара поради по-ниското налягане и се придвижва до парната турбина, свързана в комплект с електрическият генератор (7). Предавайки енергията си в турбината, парата кондензира в кондензатора (8) и посредством подхранваща помпа (10) се връща отново в парогенератора.



Предимства на проекта NuScale :

- Простота на проекта и системите, наличност на компоненти от съоръжението на склад, а не произвеждане по поръчка : по време на проектирането подхранващата ядрена система за пара (Nuclear Steam Supply System (NSSS)) т.е. разположението на реактора и парогенератора в един съд под налягане има за цел да сведе до минимум или в много случаи да елиминира за в бъдеще нуждата от допълнителни изследвания и модернизация. Движението на първичния топлоносител чрез естествена циркулация премахва нуждата от използването на активни системи за охлаждане, които работят посредством външен източник на енергия. Системата NSSS и безопасната пасивна система за охлаждане се помещават в компактен, стоманен контейнмънт.
- Ускорено производство – всеки модул, съдържащ реактор и контейнмънт може да бъде произведен от съществуващо вече производствено съоръжение в Съединените щати. Като резултат проектантите на ядреното съоръжение могат да бъдат готови с проект за сравнително малък срок. В сравнение с стандартните PWRs този тип малки реактори имат по-ниски параметри и топлинната мощност им е няколко пъти по-малка (160MW) . Също така налягането на охладителя е с 50% по-ниско. Системата за генериране на електрическа енергия е значително опростена. Комплектът парна турбина-генератор може да бъде заменена в процес на ремонт от резервно звено. NuScale използва подобно на горивото, използвано в днешните ядрени

реактори. Единствената разлика е в дължината и броя на касетите от активната зона;

- Допълнително приложение - този тип модулни реактори могат да се използват за когенерация, т.е. след преминаването на парата в турбината тя може да се използва за подгряване на вода с по-ниска температура и налягане. Също така реакторът може да бъде проектиран с цел подхранване на пара или топлина за различни производствени процеси. Такива процеси могат да бъдат централно отопление на градове, големи съоръжения и инсталации или производство на синтетични горива.

Безопасност и защита: Проектът на този тип реактори включва изчерпателен набор от функции по безопасност, които осигуряват стабилна активна зона в продължителен период от време и процес на охлаждане в различни условия, познати от няколко ядрени инцидента. Тези функции включват съд под високо налягане, две пасивни системи за отнемане на остатъчното топлоотделяне и намаляването на налягането и температурата в контейнмънта, акумулатор при спиране на реактора, задържане в съдовете под налягане при тежки аварии. Също така в прокта са включени минимално количество активни системи, съдържащи помпи и клапани, които увеличават вероятността за риск от отказ и последващо достигане на аварийна ситуация. Защитата се състои от :

- Реакторният съд под налягане и контейнмънта са потопени във вода, което се явява като биологична бариера срещу разпространението на някои радиоактивни вещества и йонизиращи лъчения в околната среда или на територията на централата и в случай на разтопяване на активната зона;
- Реакторът се помещава в съд под високо налягане, способен да издържи седем пъти по-голямо вътрешно налягане в сравнение с типичните конвенционални ядрени централи;
- Охлаждането на ядреното гориво става по естествен път без активни системи, което прави централата по-малко уязвима като цяло особено в случаи на загуба на външен източник на електрическа енергия.

Към днешна дата тече лицензирането и одобряването на представения проект от компанията NuScale и се очаква въвеждане в експлоатацията му най-рано през 2020г.

1.1.2. B&W mPower

Този проект за малък модулен реактор е представен от корпорацията Babcock & Wilcox (B&W) mPower през 2009г. Проектът представлява интегриран реактор под налягане (iPWT), който съдържа реактор и парогенератор разположение в един съд под налягане. Контейнмънта, за разлика от предния тип реактор е изграден под земята. Електрическата мощност на съоръжението е 180MW, а топлинната мощност е 530MW. Особеност на този проект е голямата продължителност на кампанията на горивото, която може да продължи около 4 години без презареждане. Други предимства са подобни на проектът NuScale , а именно пасивни системи за безопасност, голяма гъвкавост спрямо необходимостта от енергия на определен район, по-малко от 5% обогатяване на горивото, комплект от няколко ядрени съоръжения (1 до 10+).



Отделни модули, съставени от реакторна система и контейнмънт, разположени под земята



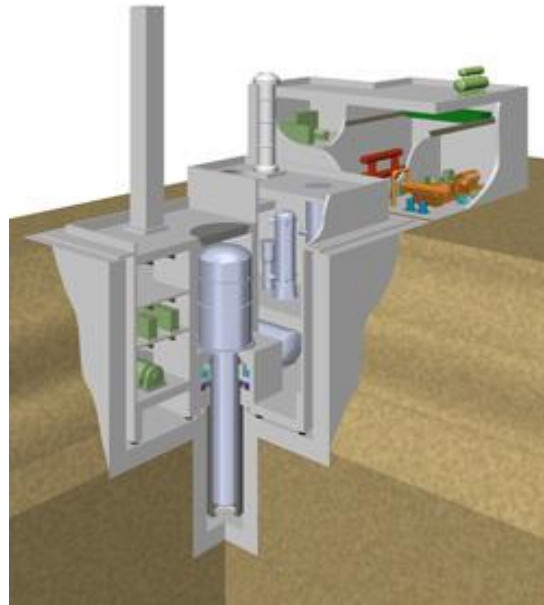
Реакторният съд под налягане съставен от реактор и парогенератор

1.2. Реактори на бързи нейтрони :

1.2.1. Super – safe, small and simple (4S) :

Проектът е представен от компанията Toshiba и е наречен още микро ядрен реактор. Представлява малък подземен реактор на бързи нейтрони с топлоносител течен метал-натрий (550°C), задвижван от електромагнитни помпи. Около активната зона се поставят нейтронни отражатели (панели), които намаляват значително нейтронния поток и служат като заместители на контролните пръти при аварийно спиране на реактора.. Топлинната мощност на съоръжението е 30MW, а електрическата 10MW. Включва пасивни системи за защита. Възможно е да работи 30 години без

презареждане, като първоначалното обогатяване е около 20-25 %, в зависимост от вида на горивото. Има възможност за използване на голямо количество Плутоний (15-25 % от цялото количество заредено гориво).

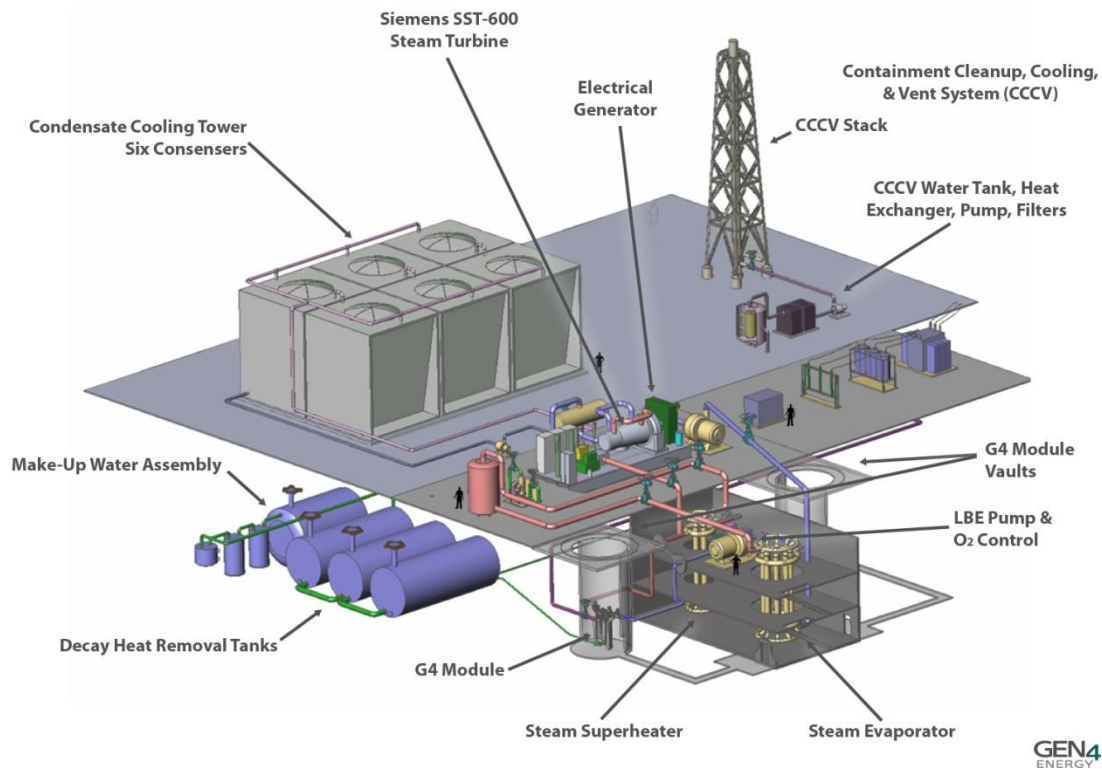


1.2.2. Gen4 (Hyperion) Power module :

Представен от компанията Hyperion Power Generation Inc. с участието на Los Alamos National Laboratory (USA) този проект представя съвременен модел на мини ядрен реактор с електрическа мощност 25MW. Той е проектиран за нуждите на електропотребителите от малки и транспортируеми източници на енергия, които са безопасни, чисти, устойчиви и с малко капиталовложения.

Реакторът работи с бързи неутрони, топлоносителя е течен метал (евтектична смес от олово-бисмут (LBE)) с ниско налягане, а горивото е керамично - ураниев нитрид (UN) с 20% обогатяване.Топлоотделящите елементи са от неръждаема стомана и има радиално разположени кварцови отражатели на неутрони. Контролът на реактивността се осъществява чрез пръти от V_4C като има разположени три независими системи в активната зона, които могат поотделно да доведат до безопасно заглушаване и спиране на реактора. Продължителността на горивната кампания е около 10 години без презареждане. Разположението на реактора е под земята, за да предотврати от аварийни ситуации породени от най-лошите сценарий на природни бедствия (урагани, наводнения, торнадо) и човешки грешки. При наличие на такива обаче, радиоактивните вещества се задържат в подземния контейнмънт. Проектиран е да издържа на високи степени на земетресения. За отнемане на остатъчното енергоотделяне има две независими пасивни системи за охлаждане, които могат да работят в продължение на повече от 14 дни.

Conceptual Drawing of Gen4 Module (G4M)-based 25MWe Electric Power Plant



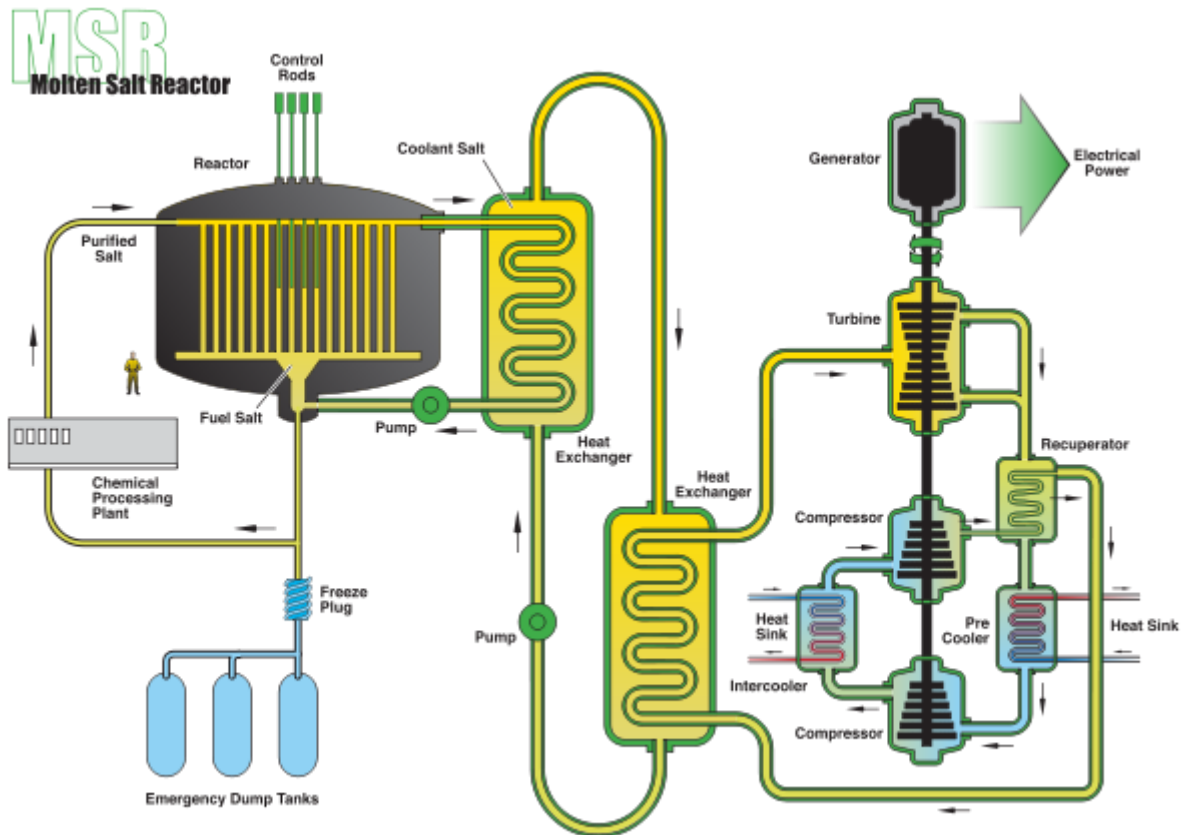
Реакторната инсталация от този тип може да се прилага в производства свързани с процеси на добив на нефт и газ (въгледобив, рафиниране, извличане на минерали и нефтопродукти), за електроенергия в отдалечени изолирани места и общности, различни процеси в големи съоръжения, които да са независими от локалните електропреносни мрежи.

1.3. Реактори с разтопени соли (Molten salt reactors):

Използват като топлоносител (охладител) разтопени соли с ниско налягане в първи контур. В много от проектите ядреното гориво е разтворено в топлоносителя. През 1960г. САЩ разработва реактор размножител с разтопени соли като първоначална идея за реактор размножител като създават и оперират в рамките на няколко години 8MW прототип. В него горивото - уранов флуорид (UF) е смесено с разтопен натрий и циркониев флуорид при температура 830⁰C, което се движи около забавителя от графит. Сега интересът към този тип реактори е подновен като един от шестте избрани реактори от четвърто поколение от страна на Япония, САЩ, Франция и Русия.

В реактора с разтопени соли горивото е във вид на смес от соли на литиев и берилиев флуорид с разтворен в нея обогатен ураниев (²³⁵U или ²³³U) или ториев флуорид. Активната зона се състои от непокрит въглерод, което позволява преминаването на потока със сместа гориво и соли при 700⁰C и ниско налягане. Топлината се пренася към втори контур отново чрез соли и оттам в друг кръг, използващ като топлоносител пара. Това не е реактор на бързи неутрони, но с някои модификации на забавителя графит може да се работи с неутрони със средна енергия. Продуктите на делене се натрупват в сместа от соли и гориво и подлежат на непрекъснато отделяне в специална линия за преработка и заменяни с ²³²Th или ²³⁸U. Различните активните остават в реактора

докато се разделят или докато преминат в друг вид актиниди. Реакторът има отрицателен коефициент на реактивност т.е. има обратна връзка по реактивност при увеличение на температурата в активната зона.



1.3.1. Реактор с течен ториев флуорид (LFTR) :

Този реактор е разновидност на типа реактори с разтопени соли, в който има способност също за размножение на ^{233}U , който има почти същите свойства като ^{235}U . Има възможност за бърза смяна на изходната мощност и следователно да се използва за . Тъй като се очаква проектът да е евтин и бърз за производство може да се използва като покриване на върхови натоварвания и резерви в електропреносната мрежа. Също така могат да се използват за получаване на топлинна енергия, тъй като параметрите, при които работят са много високи. Разтопените соли също могат да се използват с вторичен топлоносител хелий чрез цикъла на Брейтън (използване на газова турбина).

Този тип източник на топлина е предпочитан пред друг източник като различни химически централи. Тъй като опита с разтопяването на алуминий може да се използва за пример като безопасен процес на боравене с разтопени соли и метали.

Като предимства могат да се отбележат следните :

- Вградена безопасност – пасивна ядрена защита от отрицателния температурен коефициент на реактивност;
- Устойчив топлоносител (охладител);
- Експлоатация при ниски налягания;
- Издръжливост при изтичане на топлоносител;
- Без допълнително натоварване от натрупаните продукти на делене;

- Лесен контрол и управление;
- Бавно повишаване на температурата на топлоносителя;
- Пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне;
- По-малко активни отпадъци;
- Намаляване на появата на нови дългоживущи радиоактивни отпадъци;
- Устойчивост срещу разпространение на радиоактивни вещества в околната среда;
- Използване на ниско корозионни и дълго устойчиви материали ;
- Високо ефикасно предаване на топлината между контурите;
- По-малко количество дялящи се изотопи;

Като недостатъци могат да се изброят следните: необходимостта от стартово гориво, възможност за замръзване на солите при определени условия, висока токсичност на берилия, загуба на закъсняващи неутрони (възможност за по-добро управление на реактора), ограниченото време на използване на графита и др.

1.3.2. FUJI MSR :

Реакторът е 100MWe и може да се експлоатира като реактор размножител използващ и ториев горивен цикъл. Разработен е от САЩ, Япония и Русия, които работят съвместно. Предимствата при горивния цикъл на реактора са следните : високо ниво на компресиране на продуктите на делене, тъй като се намалява техния брой от краткоживущите продукти; много нисък разход на гориво (Френския проект включва 50кг торий и 50кг уран 238 за производството на 1милиард kWh електроенергия); безопасност, дължаща се на пасивността при охлаждане.

Извод : С въвеждането и лицензирането на проекти за SMRs се цели основно постигане на производство на достъпни, гъвкави и ефективно струващи и с висока степен на безопасност ядрени енергийни реактори. Предимствата като внедряване на безопасността чрез пасивни системи, значително удължаване на кампанията на горивото, модулност, използване на потенциални горива, по-малък брой обслужващ персонал, широко приложение и компактност. След аварии като тези в Чернобил и Япония са причина за отнемстване на погледа и развиването на SMRs като една много добра алтернатива при използването на ядрена енергия по света.

Използвана литература :

1. Световно ядрено сдружение, World Nuclear Association, www.world-nuclear.org
2. Министерство на енергетиката в САЩ, Department of energy USA, www.energy.gov
3. NuScale Power LLC, www.nuscalepower.com
4. Babcock&Wilcox Company, www.babcock.com
5. Hyperion Power Generation Inc., www.gen4energy.com
6. Toshiba Company, www.toshiba.com