

# Доклад

Конструкция и системи в международния термоядрен  
експериментален реактор ITER

Изготвил: **Венцислав Валериев Арсов**

## Вакуумна камера

Вакуумната камера е двустенна стоманена структура, която съдържа модулите на бланкета, диверторните касети и портове за достъп. Бланкета и дивертора са монтирани във вътрешността на камерата. Портовете осигуряват достъпа на антената за радио-честотното загряване, тестовия модул за бланкета, модулите за диагностика и за дистанционно командване. Вакуумната камера е херметично затворен стоманен контейнер във вътрешността на криостата, който предоставя среда за синтезната реакция и действа като първа преграда за осигуряване на безопасността. В тази камера с тороидална форма, или още тороид, частиците на плазмата обикалят непрекъснато в спирала без да докосват стените.. Размерът на вакуумната камера определя обема на плазмата. По-голямата камера дава възможност да се произведе по-голямо количество енергия. Вакуумната камера на ITER ще бъде 2 пъти по-голяма и 16 пъти по-тежка от всеки предишен токамак, с вътрешен диаметър от 6м. Пълният диаметър ще е малко над 19м, 11м височина и тегло 5000 тона. С цел постигането на по-голямо качество и улеснен транспорт и монтаж на този голям елемент от системата на токамака, вакуумната камера се състои от девет сектора. Стените ще са двойно-стоманени, с възможност охлаждащата вода да циркулира между тях. Вътрешната повърхност на вакуумната камера ще се покрие с модулите на бланкета, който ще осигурява защита от високоенергетичните неутрони, произвеждани при реакцията. Някои от модулите на бланкета ще бъдат използвани на по-късен етап да тестват материали за развитие на концепцията за възпроизводство на тритий. 44 порта ще осигуряват достъп до вакуумната камера за дистанционно управление, за диагностициращите системи, системите за загряване и вакуумните системи.

Вакуумната камера има горни, екваториални и долни портове. По-голямата част от техните елементи също са двустенни с укрепващи ребра между стените. Изборът на материали използвани за вакуумната камера има значително влияние върху цената, характеристиките, поддръжката, отделянето на примеси и др. Основният параметър за избора е високата механична устойчивост при работна температура, от химическите свойства на водата, фабрични характеристики и ниска цена спрямо останалите кандидати. В пространството между двете стени ще бъде поставен т.нар. щит, направен от аустенитна неръждаема стомана с добавени 2% бор.Добавката от бор е възприета за подобряване на ефективността на неутронния щит. Феритна неръждаема стомана е използвана като защитен материал под тороидалните намотки, за да се намалят смущенията в полето. Тази стомана има висока точка на насищане. И двата материала имат висока корозионна устойчивост във вода и отлични фабрични характеристики.

## Бланкет

Бланкета покрива вътрешната повърхност на вакуумната камера, осигурявайки защита на камерата и суперпроводимите магнити от топлината и неутронния поток, генерирани при синтезната реакция. Неутроните се забавят в бланкета, където тяхната кинетична енергия се преобразува в топлинна и се отнема от охладителя. В бъдещата централа тази топлина, ще се

използва за производството на електричество. Бланкета има модулна структура с механически свързани елементи. Състои се от 440 индивидуални сегмента, всеки с размери 1x1, 5m и тегло до 4,6 тона. Модулната конфигурация се състои от един защитен блок, към който са окачени отделните панели на първата стена. Използването на голям брой плоски панели за първата стена опростява дизайна и минимизира стойността на машината. Силно сегментираната конфигурация ограничава индуцирането на вихрови токове и електромагнитното натоварване на модула. Бланкета на ITER е един от най-важните и отправящи технически предизвикателства компоненти. Заедно с дивертора, директно взаимодействат с горещата плазма. Поради уникалните си физични и химични свойства, за елемент покриващ първата стена ще се използва берилий. Останалата част от бланкетния щит ще се изработи от висококачествена мед и неръждаема стомана. В по-късен етап от проекта ITER ще бъдат тествани модули за производство на тритий. Бъдещата централа ще трябва сама да произвежда тритий, който и е необходим за провеждане на ядрен синтез. Модулите на бланкета са окачени директно към вакуумната камера. Тръбите за протичане на охлаждащата вода са монтирани зад модулите. Топлината натрупвана в модулите на бланкета се отнема от три независими кръга на първичната система за охлаждане на бланкета. Всички кръгове са с еднакъв капацитет и захранват три 40°-ни сектора. Близкостоящи едни до други 40°-ни сектори се захранват от различен кръг за по-голяма безопасност. Максималното топлинно натоварване на бланкетните модули е 690MW. Системата охлажда 421 модула на бланкета и 18 елемента във вътрешността на горните портове. В екваториалната зона, 12 елемента от портовете се охлаждат от същата система, 2 ограничителя на портовете се охлаждат от кръга за охлаждане на дивертора и ограничителите.

## **Дивертор**

Основната функция на диверторната система е да извлече основната част от енергията на  $\alpha$ -частиците, а също така и примесите от плазмата. Разположен на самото дъно на вакуумната камера, дивертора на ITER е направен от 54 дистанционно премахвани касети, всяка с по три пряко изложени на плазмата повърхнини. Това са вътрешната и външната „мишени“ и изпъкнала част. Те са позиционирани на мястото на пресичане на магнитните силови линии, където високоенергетичните частици от плазмата бомбандират тези повърхности. Тяхната кинетична енергия се преобразува в топлина. Нагряването на диверторните елементи е изключително силно и затова е необходимо сериозно водно охлаждане. Много е важен избора на материал за дивертора. Само много малко материали са способни да устоят на температура от около 3000°C за предвидените 20 години живот на машината ITER. Това ще се тества в ITER, защото въпреки, че физиката на дивертора през последните години е сравнително изучена, все още има доста несигурности и този компонент от машината непрекъснато се тества и подменя. ITER ще започне работа с подсилени карбоно-композитни диверторни повърхности. Материалът позволява висока топлопроводност и улеснява изследванията през първите години

на ITER. Вторият дивертор ще бъде направен от волфрам, който има по-голяма ерозоустойчивост и съответно по-дълъг живот.

## **Криостат**

Криостата е голяма структура, обхващаща вакуумната камера и суперпроводимите магнити, осигурявайки суперохладена вакуумна среда. Стената му е подсилена с хоризонтални и веритикални ребрения. Пространството между стените е запълнено с хелиев газ при дълбок вакуум, който действа като термична бариера. Криостата е висок 30м и широк 29м. Той осигурява вакуумна среда, за да се спре конвективното пренасяне на топлина до суперпроводимите магнити и студени структури и формира вторична задържаща бариера за радиацията от вътрешността на вакуумната камера. Термичната защитна система минимизира затоплянето на елементите в резултат на излъчването на топлина от топлите към студените елементи. Криостатът е напълно обграден от слой бетон наричан биоцит.

Над криостата, биоцита е дебел 2м. Ако в много рядък случай се наложи някой от големите компоненти в криостата да се демонтира, горната плоча на биоцита може да се свали. Общото ѝ тегло е приблизително 3500 тона, което надвишава капацитета на главните кранове (~1500 тона). Затова тази плоча е проектирана да се инсталира и демонтира на части.

Диаметърът на криостата под вакуумната камера е намален със стъпка до 18м, за да се осигури силна странична връзка между подпорите на машината и сградата, за да се сведе до минимум страничното движение в случай, например, на земетресение. Криостата е изцяло заварен, от неръждаема стомана, с голям брой отвори, някои с диаметър над 4м, които осигуряват достъп до вакуумната камера за охладителната система, захранването на магнитите, допълнителното загряване, диагностиката и на системите за демонтиране на елементите на бланкета и дивертора. Дизайн на криостата е базиран на принципа за минимизиране на себестойността и функционалността. Неговият вътрешен диаметър е образуван от размерите на най-големите компоненти във вътрешността, полоидалните намотки PF4 и PF5, с прибавено малко радиално пространство от ~1м за инсталация на компонентите.

## **VVPSS (Vacuum Vessel Pressure Suppression System)**

Тази система, чиято задача е да понижава налягането вътре във вакуумната камера в случай на загуба на охлаждане на компонентите вътре в камерата, се дава като част от криостатната система, тъй като най-вероятно ще се изработи като един общ пакет с криостата. Това е защитна система, тъй като голямото налягане може да наруши задържащата бариера. Състои се от голям линеен резервоар с дължина 46м и кръгло сечение с диаметър 6м, съдържащ достатъчно количество вода (~1200 тона) за кондензиране на изпаренията в резултат на теч в охладителната система на камерата. Резервоара се свързва към вакуумната камера през две от кутиите на NBI системата и кутията на DNBI. От тези места тръгват три тръби към

резервоара на VVPSS, като всяка тръба съдържа двойнопрекъснато събрани дискове, установяващи границата между вакуума във вакуумната камера и водата, която се намира при стайна температура. При наличие на пробив в охладителната система на камерата, VVPSS действа съвместно с дренажната система на вакуумната камера. Тази система се задейства автоматично с отварянето на прекъснатите дискове в дренажните линии на вакуумната камера, в случай на голям пробив или с отварянето на дренажните вентили при малък пробив. Тези дренажни дискове и вентили са част от VVPSS. Освен това, VVPSS е свързана към системата за обработка на радиоактивните газове, долното ниво на системата за обработка на отпадъците, системата за разпределение на течностите и системата за засичане на пробивите.

## **Термичен щит**

Включва термичния щит на вакуумната камера(VVTS), между вакуумната камера и студените структури;термичния щит на криостата(CTS), покриващ стените на криостата, като по този начин се възпрепятства прекия достъп на елементи, които са при стайна температура до студените структури; преходен термичен щит(TTS), който обгражда свързващите канали за портовете и обслужващите линии прекарани между стените на криостата и вакуумната камера;поддържащ термичен щит(STS), който обхваща гравитационните подпорни елементи на машината. STS също така осигурява термичната връзка между вакуумната камера и подпорите на машината за намаляване топлопроводността към студените структури. Във всички случаи, термичните щитове се състоят от панели от неръждаема стомана, които се охлаждат от He-газ при температура 8K. Охлаждащите линии отнемат натрупваната топлина от топлите повърхности. Студените магнитни структури, работещи при температура около 4K, обхващат единствено повърхността на термичния щит. Провеждането на топлина от термичните щитове е ограничено до малки загуби през техните подпори. За да се минимизира топлината получавана от топлите елементи и да се намали топлоизлъчването към 4K повърхности, панелите на термичните щитове са покрити от двете страни с тънък, ниско-емисионен слой сребро. Отпадането на охлаждането на термичните щитове, особено на VVTS, ще доведе до загряване на студените структури. Тъй като възстановяването може да отнеме дълго време, охлаждащата система е презапасена. Пространствената обвивка е критичен момент за VVTS. Свободното място между вакуумната камера и тороидалните намотки, където е VVTS, е необходимо да се сведе до минимум. Значителни усилия са правени с цел, VVTS да се направи максимално тънък. Основният дизайн на вътрешността на VVTS се състои от един панел от неръждаема стомана, по който са монтирани две независими линии за охлаждане с He. Външната част от VVTS е направена от двустенни панели за механична устойчивост и за намаляване на топлинното натоварване на магнитните структури без излишно усложняване на охлаждането. Основните фактори влияещи на цената са сложността на дизайна, необходимост от висока точност на изпълнение и общата площ. За CTS, TTS и STS е предвиден опростен дизайн на панелите, като те са плоски и с правоъгълна форма. Въпреки всичко, VVTS трябва да следва от близо формата на вакуумната камера и затова има сегментиран тороидален дизайн.

## **Магнитна система**

Магнитната система на ITER се състои от 18 суперпроводими тороидални и 6 полоидални намотки, централен соленоид и набор от корекционни намотки, които магнитно задържат, оформят и контролират плазмата във вътрешността на вакуумната камера. Използват се допълнителни намотки за борба с т.нар. „Edge Localized Modes”(ELMs), които представляват колебания близо до повърхността на плазмата, които, ако не се контролират, стават причина за загуба на част от енергията на плазмата. Силата на магнитните полета необходими за задържането на плазмата във вакуумната камера на ITER е екстремно голяма. За постигането на максимална ефективност и ограничаване консумацията на енергия, ITER използва суперпроводими магнити, които губят своите съпротивителни свойства при охлаждане до много ниска температура. Тороидалните и полоидални намотки са разположени между вакуумната камера и криостата, където те се охлаждат и са защитени от топлината, генерирана от неутроните. Суперпроводимия материал, използван за направата на централния соленоид и тороидалните намотки е проектиран да понася условия на силно магнитно поле (13Т) и представлява специална сплав от ниобий и калай(Nb3Sn). Полоидалните и корекционните намотки използват различна сплав (от ниобий и титан NbTi). За да се достигнат суперпроводимите свойства на материала, всички намотки се охлаждат с He до около -269°С. Работния ток е от 40-46кА за централния соленоид и полоидалните намотки, а за тороидалните намотки е 68кА. Проводника, от който ще се изработят намотките и соленоида е многожилен кабел от типа „кабел в кабелна тръба” с около 1000 жила комплектовани около малка централно-охлаждана спирална тръба. Корекционните намотки използват проводник с редуциран брой жила (около 300) и без централен канал.

### **Система за тороидално поле**

18 тороидални магнити произвеждат магнитното поле около торуса, чиято основна функция е да се задържат плазмените частици. Тороидалните намотки на ITER са проектирани да имат обща магнитна енергия от 41GJ и максимална магнитна индукция от 11,8Т. Намотките ще тежат 6540 тона. Освен вакуумната камера, те са най-големия елемент в машината на ITER.

### **Система за полоидално поле**

Магнитите, създаващи полоидалното поле, ограничават плазмата далеч от стените и по този начин спомагат за оформяне и стабилизиране на плазмата. Тази система се състои от 6 хоризонтални намотки, поставени извън тороидалната магнитна система. Поради размерите, пет от шесте намотки ще се изградят в седалището на ITER в Кадараш в специална извита сграда с дължина 250м. Най-малката от полоидалните намотки ще бъде изработена навън и ще бъде доставена последна. Произведени са на същия технологичен принцип като тороидалните намотки(кабел в кабелна (изолационна) тръба). Използват се два различни типа проводници в зависимост от необходимото действие, всеки позволяващ различно поведение при силен ток и висока температура.

## Централен соленоид

Токът в плазмата основно се индуцира от промяната на тока в централния соленоид, който на практика представлява един голям трансформатор и е „гръбнака“ на магнитната система. Той подпомага движението на плазмата, оформя силовите линии в зоната на дивертора и подпомага стабилизирането на плазмата във вертикална посока. Състои се от набор от 6 независими намотъчни модула разположени във вертикална посока, които са задържани заедно от вертикална стягаща структура. Тя представлява свързани помежду си метални плочи, разположени от вън и от вътре на намотъчните секции, оказвайки осово натоварване върху секциите. Броят на тези елементи е избран според изискването за равновесие. Целия този пакет е окачен от горната страна на тороидалната намотка чрез гъвкави елементи, а отдолу е укрепен от наместващ механизъм, който действа като опора срещу хоризонталните динамични сили.

.На външната страна на полоидалните намотки са разположени три независими групи от корекционни намотки, всяка състояща се от по 6 намотки, подредени около извивката на тороидалната намотка- горни, странични и долни. Тези намотки се използват да коригират несиметриите в полето, възникващи поради неточности в монтажа на трите основни намотки.

## Захранваща система

Електрическите изисквания на ITER варират от 110MW до 620 MW в пиковия период от 30 сек по време на работата на плазмата. Електричеството ще се осигурява от 400 kV кръг който снабдява комисариат по атомна енергия в Кадараш. Едно километрово допълнение ще бъде достатъчно за да свърже ITER към мрежата. Резервно захранване ще се осигурява от 2 дизел генератора. Охлаждащата вода и криогенната система ще възприемат около 80 % от снабдената енергия. Втора захранваща система ще бъде използвана по време на управлението на плазмата за да подсигурни суперпроводимите магнитни намотки подгревателите и другите системи с нужда от голямо количество енергия. Електрически ток от кръга с 400 kV ще се трансформира до 69 kV чрез понижаващи трансформатори.

## Диагностика

---

В ITER ще бъде инсталирана обширна система за диагностика, за да се осигурят необходимите данни за контрол, изчисления, оптимизиране на плазмата и за изучаване физиката на плазмата. Това включва измерване на температура, плътност, концентрация на примесите, времето за задържане на частиците и енергията. Системата ще се състои от около 50 индивидуални измервателни системи, включващи пълен набор от съвременни техники за диагностика на плазмата: лазери, рентгенови лъчи, неутронни камери, датчици за наличието на примеси, радиационни болометри, анализ на газовете и налягането, оптични фибри. Поради тежките условия във вътрешността на вакуумната камера, тези системи ще трябва да се справят с редица явления, които все още не са наблюдавани при досегашната диагностика, а освен това са необходими голяма точност и прецизност. Нивата на потока от неутрални частици, неутрони и радиоактивност {неутрални частици неутронен поток и неутронен флуенс}, ще бъдат съответно около 5, 10 и 10000 пъти по-високи от най-тежките опити, провеждани в досегашните машини. Дължината на импулсите, или времето за което ще се поддържа реакцията ще е с около 100 пъти по-голямо

## Зареждане с гориво

---

Системата за зареждане с гориво включва главната система за осигуряване на газ и няколко системи за разпределение, например Gas Injection System (GIS), Pellet Injection System (PIS),

система за осигуряване на газ за NBI и DNBI, система за прекратяване на системите(Fusion Power Shut-down System(FPSS)). GIS се използва за зареждане с гориво и за снабдяване с газ на системата за обработка на стените. Газта се осигурява от тритиевата централа.

## **Главна система за снабдяване с гориво**

Тази система набавя цялото количество газ, което е необходимо, от тритиевата централа. 6 линии се използват за снабдяване на GIS и PIS, две от тези линии снабдяват с газ и FPSS, а други две линии осигуряват газ за неутрализаторите и източника на лъчението на NBI и DNBI. Обща 50mm изходна линия е служи за връщането на газа в тритиевата централа от подсистемите, когато не е необходим. За да се изпомпват и почистват линии преди да се смени вида на газа. Тритиевата централа осигурява тази евакуации и почистваща функция. Газовете снабдяващи различните системи са от общ газопровод, който от тритиевата централа се отправя към отделните точки на разпределение около биоцита. Система за инжектиране на газ (GIS) /Gas Injection System/ По време на работата на реактора, GIS служи за осигуряване на необходимото количество газ( $H_2$ ,  $D_2$ ,  $DT$  и  $He$ ) за първоначалното получаване на плазмата; за осигуряване на газ с цел повишаване на плътността; за контрол на плътността на плазмата по време на „steady-state” горене; осигуряване на контрол на топлинния поток от дивертора при топлинното му излъчване(поражда примеси). Системата позволява инжектирането на до 6 газа и основно това са три разновидности на водорода и три примесни газа( $D$ ,  $T$ ,  $DT$ ,  $Ar$ ,  $Ne$ ,  $He$ ).

## **Fusion Power Shut-down System(FPSS)**

Способността в торуса да се инжектират примесни газове(например  $Ar$ ,  $Ne$  и др.) е необходима, за да се осигури организирано погасяване на реакцията за  $\sim 3s$  така, че да се ограничи температурната ерозия на първата стена и бланкета. Прекратяването на производството на енергия за такова кратко време може да се осъществи, чрез впръскването в торуса на примесни газове със скорост  $\sim 200 \text{ Pam}^3/s$ . Това количество газ се осигурява от 6 газови цилиндъра, всеки зареден с  $1000 \text{ cm}^3$  газ при налягане  $0,12 \text{ MPa}$ . По време на нормален режим на работа, съдържанието на всеки цилиндър е изолирано от торуса чрез специална клапа, която се отваря при получаване на сигнал от системата за контрол на прекратяването на процеса.

## **Инжекция на пелети(PIS)**

Системата за инжекция на пелети ще осигури скорост на зареждане от  $50 \text{ Pam}^3/s$  с 90% тритий и 10% диутерий под формата на пелети и  $100 \text{ Pam}^3/s$  за други пелетирани форми на водорода с размери от  $3\div 6 \text{ mm}$  в диаметър, като размера е избран, за да се ограничи промяната на плътността и генерираната мощност до 10%. Честотата на всеки изстрел е от 7Hz за 6mm пелети до 50Hz за 3mm пелети и позволява продължителност на импулсите до 3000s. За целта ще бъдат инсталирани два инжектора, осигуряващи не само обезшечаването на системата, но така също и гъвкавост, давайки възможност единия инжектор да се използва за инжектирането на примесни пелети за изследователски цели.

## Охлаждане с вода

---

Системата за охлаждане с вода служи за контролиране на температурното нагряване по време на работата на токамака. Вода от близкия канал „Canal de Provence” ще се използва за охлаждане на вакуумната камера и нейните елементи, за системите за диагностика, системите за загреване, за захранване и криогенните системи. Системата е разделена на два затворени кръга плюс един кръг с отворена охладителна кула. Водата протича от ITER до първичните и вторичните топлообменници за охлаждане на водата до 50°C. Топлината се освобождава в околната среда през охладителната кула при средна термична мощност от 450MW. Тъй като ITER е изследователска програма, а не централа, по-голямата част от водата просто ще се отделя в охладителните кули под формата на водни пари. Останалата вода преминава през серия от охладителни басейни. Първият басейн събира водата от централата. После водата се тества за различни параметри като температура (максимум 30°C), pH, въглеродороди, хлориди, сулфати и тритий. Резултатите се представят на местните власти. Само чиста вода се освобождава в река Дуранс.

## Дистанционен контрол

---

Системата за дистанционно извършване на ремонти ще играе важна роля в ITER. След като започне работата на реактора, ще бъде невъзможно да се правят промени, да се извършват огледи или да се ремонтира някой от компонентите на токамака в активната част по друг начин освен с дистанционна автоматика. Изключително здрави и надеждни средства ще са необходими за извършване на манипулации и подмяна на компоненти тежащи до 50 тона. Надеждността на тези методи също така ще определя времето за извършване на ремонтите. Дистанционен манипулатор ще се използва да отдели компонентите. Те се отстраняват през един порт, порта се затваря с временна врата на вакуумната камера и се поставят в транспортния контейнер и той се затваря, за да се предотврати замърсяване. После се предвижва по въздух през „горещата клетка”. Процеса се повтаря по обратния път, за да се достави компонента.

## Гореща клетка

---

„Горещата клетка” ще е необходима, за да се осигури безопасна среда за работа, ремонтни дейности или обновявания, тестове и преместване на компоненти, които са били изложени на неутроните. Въпреки, че няма радиоактивни продукти на реакцията, енергетичните неутрони, взаимодействайки със стените на вакуумната камера, ще направят материалите радиоактивни. Също така материалите могат да бъдат замърсени с берилиев или волфрамов прах, или с тритий. Тежките операции в „горещата клетка” ще се извършват от системата за дистанционна автоматика, способна да премества много големи детайли. В „горещата клетка” ще се намира и оборудване за симулации на действията и репетиции. „Горещата клетка”, също така ще отстранява трития от взаимодействалите с него елементи. Тази дейност ще се извършва в

обезопасена, затворена и защитена зона, съдържаща аналитична система за измерване съдържанието на тритий и детритираща система. Всички остатъци от материалите ще бъдат обработвани, пакетирани и временно съхранявани в „горещата клетка“, преди да бъдат поставени под отговорността на френските власти. „Горещата клетка“ представлява една четири етажна сграда над земята и етин напълно подземен етаж, на две нива. Размери на сградата 70m/62m и височина около 22m.

## External Heating Systems

Температурата във вътрешността на токамака на ИТЕР трябва да достигне 150 милиона градуса или 10 пъти температурата в ядрото на слънцето, за да може газа в вакуумната камера да премине в състояние на плазма и да стане възможна реакцията на синтез. Горещата плазма трябва да бъде подържана в тази екстремна температура по контролиран начин за да може да се добива енергия. Токамакът на ИТЕР ще разчита на 3 източника на външно загряване, които чрез съвместната си работа ще осигурят енергия за загряване 50 MW, която се изисква за да започне синтеза. Източниците са инжекция на сноп от частици и 2 броя високо честотни електромагнитни вълни. Изследователите се надяват да постигнат „гореща плазма“ в която енергията на хелиевото ядро отделена при синтеза е достатъчна за подържане температурата на плазмата. В такъв случай външното загряване може силно да се редуцира или напълно да се изключи. Горещата плазма, в която поне 50 % от енергията нужна за задвижването на синтезасе генерира вътрешно е основна стъпка към целта към новото поколение централи.

## Neutral Beam Injection

Инжектирането се използва за да се изстрелват незаредени високоенергийни частици в плазмата където при стълкновение си с нея те й предават енергията си. Преди инжекцията атомите на деутерия трябва да бъдат ускорени извън токамака до кинетична енергия 1 MeV. Само атоми с положителен или отрицателен заряд могат да бъдат ускорени чрез магнитни полета. За да се създаде положително зареден йон трябва да се премахне електрон от неутрален атом. Процесът трябва да се обърне преди инжектирането в плазмата. В противен случай наелектризирания йон ще бъде отклонен от магнитното поле удържашо плазмата затова йоните преминават през камера съдържаща газ където те възвръщат липсващия си електрон и инжекцията на неутрална частица може да се извърши. Огромният капацитет на плазмата налага нови изисквания за този доказан метод на инжекция. Частиците трябва да се движат от 3 до 4 пъти по бързо отколкото при предишните системи за да проникнат достатъчно дълбоко в плазмата. При тези високи скорости е трудно положително зареденият йон да се неутрализира.

## Ion Cyclotron Heating

Нагревателите с ускорени йони и електрони използват радио вълни с различни честоти с цел да вкарат допълнителна топлина в плазмата, както микровълновата печка загрява храната чрез

микровълни. При йонното циклотронно резонансно нагряване енергията се предава на йоните в плазмата чрез високо енергийни снопове от електромагнитни вълни с честота 40 до 55 MHz. Генераторът, предаващите линии и антената са необходими за йонното циклотронно нагряване. Генераторът създава високо мощни радио честотни вълни които се придвижват през предаващите линии до антената разположена във вакуумната клетка изпращайки вълните в плазмата.

## Electron Cyclotron Heating

Електронният циклотронен резонансен нагревател подгръва електроните в плазмата с високо енергийни снопове електромагнитни вълни с честота 170 GHz (резонансната честота на електроните). Електроните предават абсорбираната енергия на йоните последователно чрез стълкновението си с тях. Тази система за загряване се използва за влагане на топлина в много специфични места от плазмата като механизъм за минимизиране на натрупването на известна нестабилност която води до охлаждането ѝ. В сравнение с йонното нагряване електронното нагряване има предимството че вълните могат да се предават през въздуха което опростява дизайна и позволява на източника да бъде далеч от плазмата и опростява експлоатацията. Енергията ще се осигурява от мощни високо честотни гиротрони. Проектът на ИТЕР ще включва разработката на 1 MW гиротрон работещ при 170 GHz с продължителност на пулсациите повече от 500сек.

## Cryogenics

Криогенната технология ще бъде с широка употреба в ИТЕР за създаване и подържане на условията на ниски температури за магнитите, вакуум помпите и някои от системите за диагностика. Магнитите в реактора ще се охлаждат със суперкритичен хелий до 4 K (-269°C) за да работят нормално с магнитните полета необходими за удържането и стабилизирането на плазмата. Те ще бъдат оградени от криостата и активно охлаждания термичен щит с принудено течение на хелий с температура 80 K. В допълнение огромни криоабсорбаторни панели охлаждани от 4K суперкритичен хелий ще се използват за реализирането на високи параметри на помпите и дълбок вакуум в криостата и торуса. Криоагрегата на ИТЕР ще произвежда необходимата охлаждаща мощност и ще я разпределя през системи от криолинии и „студени кутии“ които реализират криоразпределителна система. Криоагрегата се състои от хелиеви и азотни хладилни съоръжения комбинирани с 80 K хелиев циркуляционен кръг. Складирането и възстановяването на хелиевия запас (25 тона) се осигурява от топли и студени (80 K и 4 K) газови хелиеви резервоари. 3 хелиеви хладилни съоръжения ще снабдяват необходимата енергия посредством взаимно свързани кутии осигуряващи интерфейса на криоразпределителната система. 2 азотни хладилни съоръжения ще осигуряват охлаждаща енергия за термичния щит и за 80 K преохлаждане на хелиевото хладилно съоръжение. Криогенната система на ИТЕР ще осигурява охлаждаща енергия при 3 различни температури: 4K, 50 K и 80 K. Разпределението на охлаждащата енергия се постига чрез криоразпределителните кутии с хелиево циркулиращи помпи и комплексна система от линиите за криогенно трансфериране. Криогенната система е проектирана да гарантира охлаждането и устойчивата работа на магнитите, криопомпите и термичния щит въпреки безпрецедентното топлинно натоварване дължащо се на колебанието на магнитните полета и генерирането на неутрони от пулсиращата реакция на синтез. Криогенната система на ИТЕР ще бъде с най-голямата (концентрирана на едно място) криогенна система в света с инсталирана охлаждаща мощност от 65 kW при 4,5K (хелий) и 1300 kW при 80 K (азот). След адронния колайдер в ЦЕРН

тя е най голямата криогенна система строена някога. Дизайнът на криогенната система на ИТЕР се валидира чрез тестове спрямо съществуващите устройства по целия свят.