

Академик РАН,
Президент Российского научного центра
«Курчатовский институт»
Е.П. Велихов,
Д.ф.-м.н., начальник отдела
Троицкого института инновационных
и термоядерных исследований,
профессор МЭИ **С.В. Мирнов**

Управляемый термоядерный синтез выходит на финишную прямую

Она (эта задача) обязательно будет решена, когда термоядерная
энергия будет совершенно необходима человечеству
Академик Л. А. Арцимович

28 июня этого года в термоядерных исследованиях произошло событие, которое, по общему мнению, следовало бы назвать историческим. На встрече в Москве министров шести стран – участников международного проекта Интернационального Термоядерного Экспериментального Реактора – ИТЭР (Европа, Китай, Россия, США, Южная Корея, Япония) – подписано соглашение о совместном строительстве этого реактора в ближайшее десятилетие во Франции.

Что мы понимаем под финишной прямой? Очевидно, что у разных людей, вовлеченных в цикл производства энергии, понятие это различается существенным образом. Известно, например, что Эдисон, изобретая электрическое освещение, одновременно изобретал все: лампочку, знаменитый патрон, которым пользуемся по сей день, электросети и даже генераторы электроосветительных подстанций. И, тем не менее, тогда это ему мало помогло – внедрение электрического освещения в повседневную жизнь затянулось чуть ли не на полвека после создания первой лампочки. Не было «совершенной необходимости».

Продолжая эту аналогию, можно было бы сказать, что сегодняшние физики-термоядерщики пока еще сосредоточены на проблеме «нити» своей лампочки, полагая, что ее техническое решение и явится тем финишем, после которого они смогут передать дело в руки специалистов, более близких к практической энергетике и ее эксплуатации. А те уже вплотную займутся «патроном и цоколем».

Техническое решение «для нити» должно стать ключевым научным итогом проекта ИТЭР. А именно, в нем предполагается осуществить стационарное (длительностью 200 – 1000 секунд) термоядерное горение

дейтерий-тритиевой (ДТ) смеси 50/50% – той самой, которую с успехом использовали в водородных бомбах. Разумеется, при этом не будут забыты и проблемы «патрона с цоколем», более того, некоторые работы в этом направлении уже начаты, но основной задачей ИТЭРа остается демонстрация практически стационарной термоядерной реакции.

Фигурально выражаясь, задача состоит в том, чтобы «растянуть» термоядерный взрыв с уровня микросекунд в бомбе до часов и дней. Устройства, которые предназначены для этого, называются магнитными термоядерными реакторами. Основная их функция – с помощью магнитных полей изолировать от материальных стенок реактора ДТ-смесь, нагретую до сверхсолнечных температур (100 млн $^{\circ}\text{C}$, а в центре Солнца только около 15 млн $^{\circ}\text{C}$!). Вещество при таких сверхзвездных температурах оказывается полностью ионизованным. Это его состояние называют плазмой. Проблема термоизоляции горячей плазмы составляет основную «интригу» исследований в области магнитного удержания на протяжении последних 50 лет.

Наибольшие успехи в термоизоляции плазмы были достигнуты за это время на так называемых токамаках – тороидальных камерах с магнитным полем. Их идея была предложена в нашей стране академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом в начале 50-х годов XX века, а техническая реализация, завершившаяся получением первой «высокотемпературной термоядерной плазмы» (Госпремия СССР 1971 года), осуществлена в Курчатовском институте под руководством академика Л. А. Арцимовича в конце 60-х – начале 70-х. Этот успех породил массовое подражание во всем мире. И как часто бывает, ученики превзошли учителей.

Уже в конце 70-х годов прошлого столетия в США на токамаке PLT была получена плазма с температурой реакторного масштаба 70 млн $^{\circ}\text{C}$. И, наконец, 30 октября 1997 года в одном из экспериментов с ДТ-смесью 50/50% на объединенном европейском токамаке-реакторе JET (Англия) удалось достичь мощности ядерного энерговыделения более 16 МВт, что примерно сравнялось с мощностью плазменных потерь. Этот принципиальный рубеж в исследованиях по управляемому синтезу получил название режима «перевала» – равенства тепловых потерь горячей зоны реактора и энерговыхода реакции термоядерного синтеза. Правда, пока этот рекордный результат получен лишь в переходном импульсном режиме длительностью в секунду.

Скажем прямо, это еще только «чирканье» термоядерными спичками. Для энергетического реактора необходим режим стационарного или квазистационарного (многосекундного) горения. Похожие режимы длительностью в десятки секунд уже реализованы в некоторых крупных токамаках, но тепловые потери в них пока еще заметно превышают возможное энерговыделение. А в энергетическом реакторе ядерное энерговыделение должно быть раз в пять выше плазменных потерь.

Дело в том, что продуктами ДТ-синтеза являются быстрый нейтрон (14 МэВ, $1\text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$) и достаточно энергичный (3,6 МэВ) ион ^4He ,

который в отличие от «свободного» нейтрона «связан» магнитным полем и не может покинуть плазму. Его энергия по мере торможения идет на нагрев плазмы как бы изнутри. Как только мощность этого внутреннего нагрева, составляющая 1/5 от полного ядерного энерговыделения, компенсирует тепловые плазменные потери, станет возможным самоподдерживающееся термоядерное горение. При этом системы внешнего нагрева плазмы – пучки нейтральных атомов высоких энергий, ВЧ и СВЧ-генераторы – можно будет отключить, что, несомненно, упростит и удешевит реактор. Этот момент называют «зажиганием». Можно ожидать, что оно произойдет, когда полная тепловая мощность ядерного синтеза достигнет 300 – 500 МВт.

Таким образом, следующим логическим шагом программы токамаков становится большой проект, который на основе базовых достижений физики и существующих технологий соединил бы идеи зажигания и стационарного термоядерного горения. Таким проектом и является ИТЭР.

ИТЭР

Стоимость подобного проекта ориентировочно оценивалась в \$10 млрд. С учетом того, что самые крупные токамаки, действовавшие в мире в конце 80-х годов XX века, стоили не более \$0,5 млрд, было очевидно, что квазистационарный реактор желательно делать сообща.

Идея кооперации была выдвинута нашей страной в 1990 году и поддержана руководством США, Японии и Европейского сообщества. Проекту было дано название Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор.

Главная задача ИТЭРа заключалась в зажигании и получении квазистационарной (1000 секунд) ДТ-реакции синтеза, которая позволила бы испытать основные функциональные узлы энергетического реактора, в том числе различные варианты модулей для воспроизводства из лития второго компонента топлива – трития.

Первая версия проекта была завершена в 1998 году. Разработка его велась объединенным многонациональным коллективом физиков и инженеров. Создание проекта стоило странам-учредителям около \$1,5 млрд и пяти лет работ. Работы велись главным образом внутри стран-учредителей. России, с учетом ее трудностей, был засчитан эквивалентный вклад около \$200 млн. Реально, к сожалению, было затрачено существенно меньше. Основной поток средств шел в основном на развитие новых и адаптацию известных уникальных технологий (в области сверхпроводимости, материалов, конструкций и т.д.). Это оказало серьезную поддержку нашим инженерам и технологам в трудное время, которое переживает наша наука и техника.

В результате впервые в инженерной практике в рамках реально существующих технологий удалось создать проект квазистационарного термоядерного реактора с расчетной тепловой мощностью около 1,5 ГВт. И не только проект. В натуральном виде были сделаны и испытаны некоторые ключевые элементы конструкции. Все чертежи проекта выполнялись по нормам, действующим на Западе, и могли быть там прямо переданы в

производство. Предполагаемая стоимость проекта оказалась близка к первоначальной оценке – \$7,5 млрд за десять лет – и вызвала волну ожесточенной критики: очень дорого. Штаты предложили уменьшить стоимость в 2 раза. Остальным учредителям идея понравилась, и проектировщики взялись за удешевление. Однако это не спасло четырехсторонний альянс. Конгресс США не продлил участие страны в проекте. Причина – несоответствие проекта государственным интересам США. Четверка учредителей превратилась в тройку.

Альянс, между тем, не распался. Проект нового удешевленного ИТЭРа (\$5 млрд в новых ценах) был завершен в 2001 году. Как и следовало ожидать, уменьшились размеры и ожидаемые параметры. Поперечный размер горячей зоны сократился с 5,6 до 4 метров, предполагаемая длительность горения уменьшилась в 2,5 раза, до 400 секунд, а мощность – до 500 МВт. Основные цели остались примерно теми же, хотя планки и понизились.

Проделанная работа была с удовлетворением принята учредителями (Европа, Япония, Россия) и «положена на полку», где и пролежал без малого четыре года. Решался мучительный вопрос, где строить: в Европе (Франции) или Японии? И Франция, и Япония – страны с мощно развитой атомной энергетикой (60–70% всей производимой в стране электроэнергии). Получить международный проект стоимостью \$5 млрд означает для них дать мощный импульс высоким технологиям в своих странах. Очень соблазнительно. За время торга в учредители вступили КНР, Южная Корея и вернулись США. Установился ничейный баланс «3:3» – Европа, Россия, КНР за Францию против Японии, США и Южной Кореи. Вопрос о строительстве ИТЭРа оказался причудливо связан сначала с проблемой мирового лидерства американской науки, потом с поиском отравляющих веществ в Ираке, потом с эмбарго на продажу оружия Китаю...

На заключительном этапе переговоров весной этого года в бой вступили политические тяжеловесы: президент Франции и премьер-министр Японии. Финалом споров явился долгожданный консенсус – строить во Франции, но ряд наиболее дорогостоящих заказов и значительная доля в подготовке специалистов передаются Японии. Детали разделения еще подлежат уточнению, но сам факт окончательного выбора места строительства – выдающаяся победа, к которой участники проекта ИТЭРа шли почти 15 лет. Строительство займет около 10 лет. Половина затрат ложится на Европу и по 10% на Россию, США, Южную Корею и Японию.

Перспективы

Что обещает человечеству управляемый термоядерный синтез? Для специалистов давно очевидно, что ДТ-энергетика – естественная часть атомной. Их роднит быстрый (14 МэВ) нейтрон и неизбежная активация реакторных конструкций. Более того, сегодня активно обсуждается перспектива использования ДТ-синтеза для «дожигания» радиоактивных

отходов реакторов деления, то есть для улучшения экологии существующей атомной энергетики. Удивительно, но все составные элементы, которые при этом могут потребоваться, уже есть, только в разных странах и разных лабораториях. Когда экологически чистая энергетика деления станет «совершенно необходима», собрать все воедино не составит большого труда.

Что же касается электроэнергетики, ДТ-энергетика почти не ограничена ресурсами. Литий – элемент, широко распространенный в природе, а запасы дейтерия практически безграничны (на каждые 7000 атомов водорода в обычной воде приходится атом дейтерия). ДТ-энергетика, по оценкам экспертов, будет безопасней примерно на два порядка энергетики деления урана. Главным образом, за счет того, что в ней должны отсутствовать газообразные и жидкие радиоактивные отходы, а твердые, по мнению экспертов, не представляют большой опасности. Наконец, термоядерная энергетика, в отличие от деления, практически безынерционна. Ситуации типа чернобыльской исключены в ней по определению. И она не требует урана. Соединение же ее с урановой (гибридные реакторы) сулит последней большие перспективы в области реакторной безопасности, но эти вопросы уже выходят за рамки нашей статьи.

Может ли ДТ-энергетика быть использована для производства оружия? Может. Как любая, где фигурируют нейтроны. Потребуется международный контроль.

Каков суммарный вклад России в ИТЭР? Наше согласованное участие в сооружении ИТЭРа – \$50 млн в год на протяжении 10 лет строительства. Деньги для нашей науки большие, но умеренные по сравнению, скажем, с расходами на содержание серьезной футбольной команды. Тратиться они будут, в основном, внутри страны и наверняка опять будет система зачетов.

Но какова выгода России в строительстве реактора во Франции? Главная выгода – мы почувствовали это уже в процессе проектирования – выход на высокие технологии и импульс к их развитию в нашей стране. Однако процесс «расползания» высоких технологий, похоже, раздражает некоторых наших союзников.

Когда можно ожидать выхода управляемого синтеза в большую энергетику? ИТЭР, к сожалению, еще не прототип энергетического реактора. Это реактор экспериментальный, создаваемый на базе сегодняшних (точнее, вчерашних) апробированных технологий. Его цель – продемонстрировать практическую возможность термоядерного зажигания и стационарного горения, а не горения с производством электроэнергии. Это – цель следующего уже демонстрационного реактора – ДЕМО. Его контуры пока еще плохо различимы, они будут определены ИТЭРом. Однако предполагаемые ключевые технологии ДЕМО обсуждаются, разрабатываются, а некоторые даже испытываются уже сегодня. Не исключено, что в итоге ДЕМО станет одной из очередных модификаций ИТЭРа. Это сэкономило бы время и средства. Но при всех даже самых благоприятных вариантах процесс создания первого энергетического

реактора растянется не менее чем на 20–30 лет. Очевидно, что этот срок следует отсчитывать от начала реального строительства ИТЭРа.

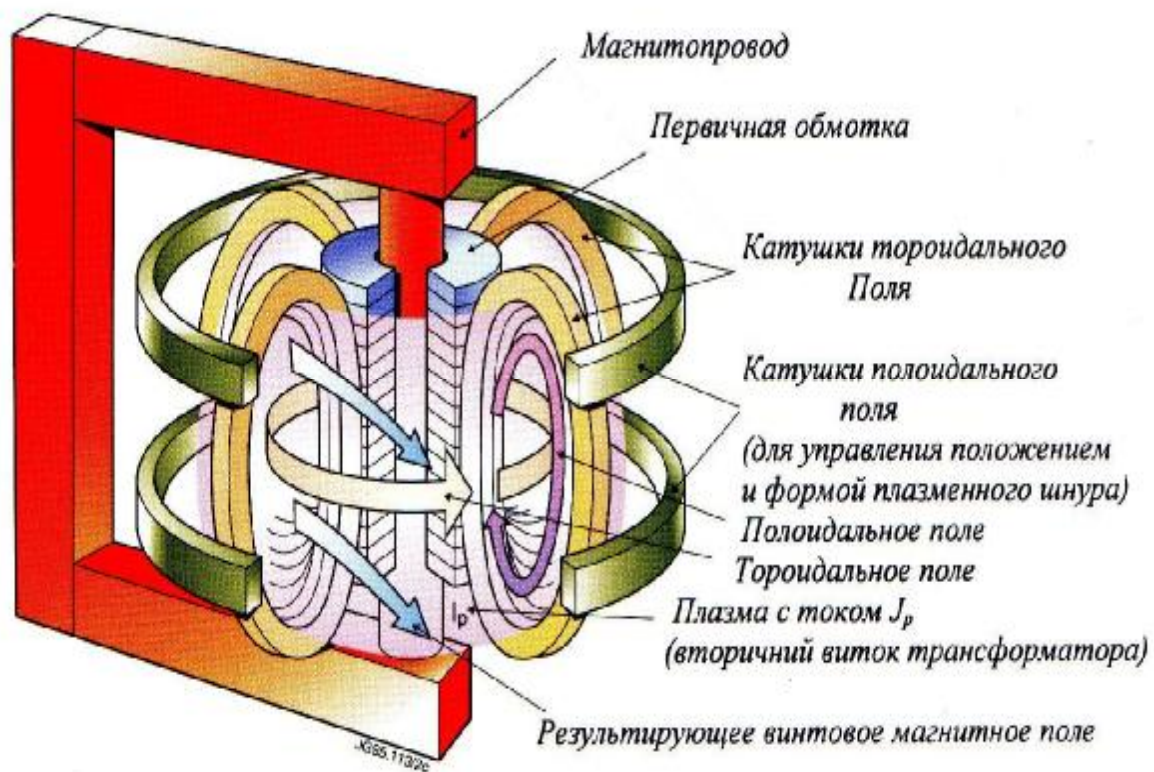


Рис.1. Принципиальная схема токамака-реактора:

1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – катушки тороидального поля; 4 – катушки полоидального поля (для управления положением и формой плазменного шнура); 5 – полоидальное поле; 6 – тороидальное поле; 7 – плазма с током J_p (вторичный виток трансформатора); 8 – результирующее винтовое магнитное поле.

Смесь тяжелых изотопов водорода дейтерия и трития нагревают в тороидальной плазменной камере реактора до температуры термоядерного

горения ($100 \text{ млн } ^\circ\text{C}$) сильноточным (до 20 МА) газовым разрядом. Такой ток в плазме создают с помощью обыкновенного тороидального трансформатора. Плазма при этом выполняет роль вторичного короткозамкнутого витка. Чтобы он не «разорвался» и не коснулся стенок, его «подвешивают» в пространстве и стабилизируют так называемыми «полоидальным» и «тороидальным» магнитными полями, которые создают с помощью специальных магнитных обмоток. Получающаяся в итоге замкнутая винтовая магнитная конфигурация оказывается для термоядерной плазмы почти идеальной ловушкой. Она позволяет эффективно защитить материальные стенки камеры от воздействия температур в миллионы градусов. Главный продукт термоядерного синтеза – быстрые (14 МэВ) нейтроны – преобразуются в тепло и пар в специальном устройстве бланкете, окружающем плазменную камеру.

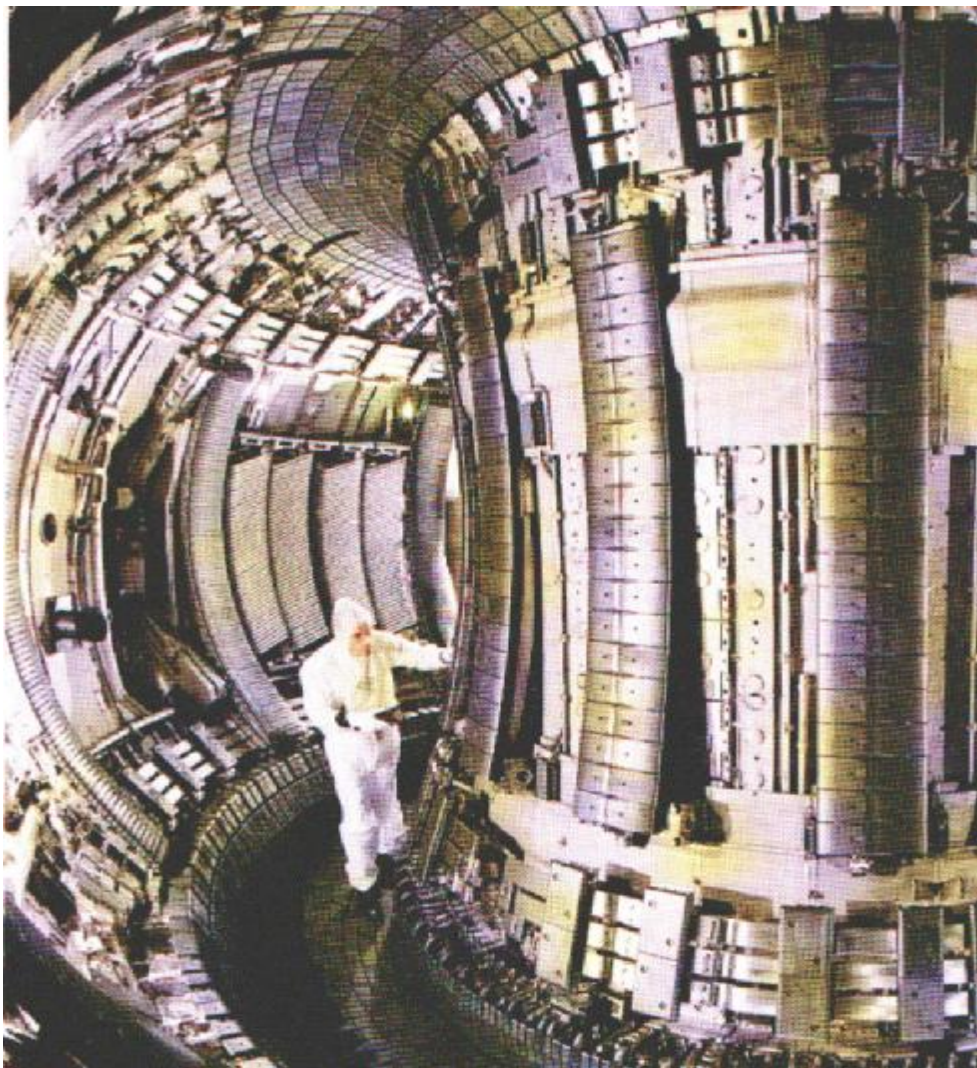


Рис. 2. Внутренний вид плазменной камеры самого мощного из действующих токамаков – JET (Англия). Ее поперечный размер около двух метров, высота – около четырех. Максимальный плазменный ток, полученный в этом токамаке, равен 7,5 МА, тороидальное магнитное поле достигает 3,5 Тл, максимальная мощность термоядерной реакции – 17 000 кВт (Или «более 16 МВт», как в основном тексте?). Многочисленные пластины – защитные элементы плазменной камеры – изготовлены из графитовых композитов. Для снижения эрозии они покрыты тонким слоем бериллия. Решетчатые конструкции – антенны высокочастотного дополнительного нагрева плазмы.

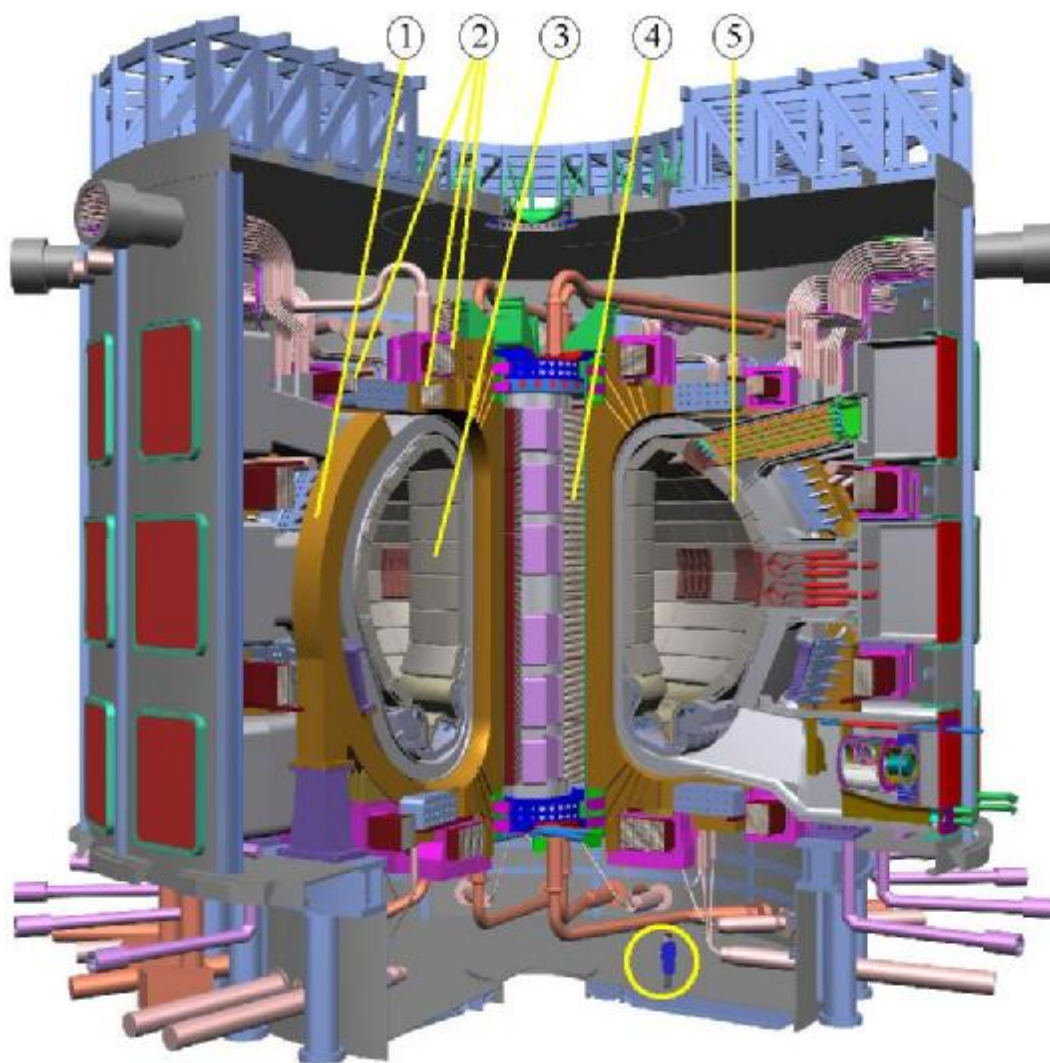


Рис. 3. Модель термоядерного реактора ИТЭР в разрезе.

Высота плазменной камеры 3 около 8 метров, ее поперечник – около 4 метров. Тороидальное магнитное поле, создаваемое сверхпроводящими катушками 1, должно достигать на оси камеры 6 Тл, полный плазменный ток – 18 МА. Первичная обмотка трансформатора 4 и обмотки полоидального поля 2 также являются сверхпроводящими. Это принципиально позволяет получать импульс термоядерного горения длительностью 400–1000 секунд. Мощность термоядерного горения должна достичь при этом 500 МВт, что уже превысит полный уровень энергозатрат на его поддержание. Для изучения процессов наработки трития и утилизации энергии быстрых нейтронов в ИТЭРе будут установлены различные варианты бланкетных модулей 5. От прямого плазменного воздействия они будут защищены пластинами бериллия.