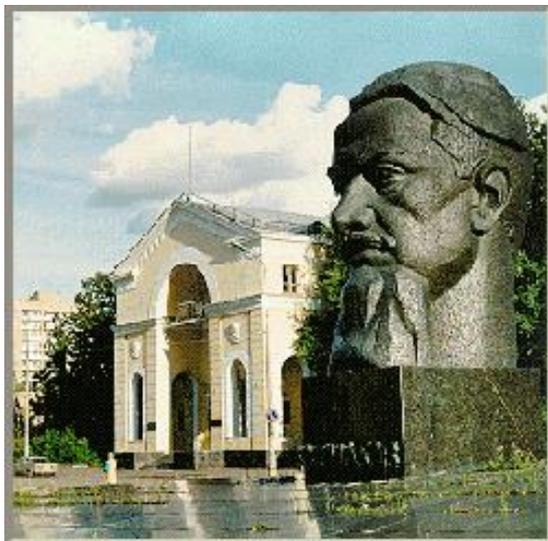




NATIONAL RESEARCH CENTRE
«KURCHATOV INSTITUTE»
«КУРЧАТОВ ИИИ»



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА



В.П. Будаев^{1,2}, Л. Н. Химченко³

1. Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
2. Национальный исследовательский университет «МЭИ»
3. ЧУ Госкорпорации «Росатом» «ИТЭР-Центр»

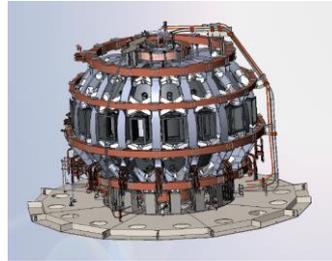
Москва, 2016 г.

Российская программа управляемого термоядерного синтеза (УТС)

- ❑ Направлена на овладение термоядерной энергией.
- ❑ В течение ближайших десятилетий планируются провести работы по проектированию и сооружению опытно-промышленных термоядерных реакторов: термоядерного источника нейтронов (ТИН) и гибридного реактора.

Россия. Плазменные и термоядерные исследования

Токамак Т-15 (с медными катушками и полоидальным дивертором)



Термоядерные установки в России сегодня

Глобус-М (полоидальный дивертор, сферический токамак)



Многопробочная магнитная ловушка, ГДЛ



Плазменные ускорители - КСТУ, МК-200



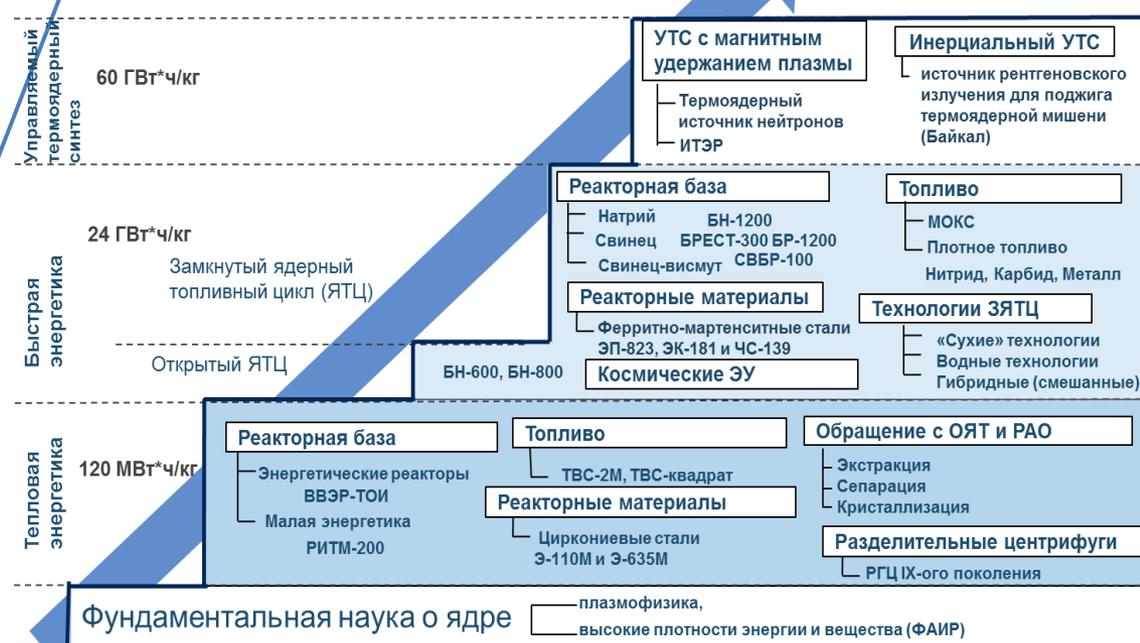
Лазерный УТС - УФЛ-2М



Ядерная энергетика. Карта инновационных проектов

Энергоэффективность вещества

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ЛИДЕРСТВО



Безальтернативность ядерной энергетика - основа энергетической политики РФ на долгосрочную перспективу

← 12 м →



Токамак позволяет создать стационарный источник нейтронов с интенсивностью 10^{16} - 10^{20} н/с

Гибридные реакторы «синтез-деление» предложены для повышения темпов вовлечения урана 238 и тория 232 в топливный цикл и создания безопасных реакторов

Жидкосолевые топливные циклы на основе гибридных наработчиков топлива будут использованы для снижения радиоактивности атомной энергетики суммарной мощностью менее 10% от общей.

Проведенные исследования показывают, что нейтронная нагрузка $P \ll 1$ МВт/м² достаточна для создания экономичного гибридного реактора-синтеза-деления, в котором камера окружена бланкетом, содержащим «ядерное сырье» — ²³⁸U (или ²³²Th). Дело в том, что ²³⁸U хорошо делится под действием нейтронов с энергией 14,1 МэВ, возникающих в результате D—T-реакции. Поскольку энергия деления на порядок величины превосходит энергию D—T-реакции, ²³⁸U значительно (примерно в 7 раз) увеличивает мощность реактора при неизменных его размерах, что делает допустимой умеренную нагрузку на первую стенку. Еще более важно значительное размножение нейтронов в уране, позволяющее, кроме воспроизводства сгоревшего ядра трития, получить на одну D—T-реакцию более 1,5 атомов ²³⁹Pu.

Задачи гибридных установок в России

- Стационарные гибридные установки могут решать следующие задачи:
- **Создание т.н. «зеленой ядерной энергетики»** на основе жидкосолевого топлива и **жидкосолевых технологий** непрерывного удаления высокоактивных продуктов деления. При этом исключаются реактивностные аварии (Чернобыль) и аварии, связанные с потерей теплоотвода (Фукусима).
 - **Производство $U233$ из тория** в жидкосолевом blankets с подавленным делением в топливном цикле с пониженной радиоактивностью.
 - **Трансмутация минорных актинидов** и попутная выработка электроэнергии с использованием жидкосолевых технологий.
 - **Выработка энергии** в системах с подкритической жидкосолевой активной зоной в Th-U цикле.
 - **Тестирование стационарных плазмofизических, электрофизических, ядернофизических технологий и материалов, необходимых для создания ДЕМО и ПТЭ.**

Предстоит большая работа по выбору приоритетов в развитии этого направления.

Задачи гибридных установок в России

Гибридный реактор помимо **производства энергии** может производить значительные количества **ядерного горючего** для питания реакторов деления. Он даст в 4—10 раз больше избыточного $P_{\text{и}}$, чем быстрый бридер той же мощности, и обеспечит горючим четыре-шесть реакторов на тепловых нейтронах современного типа. Это создало бы новые возможности топливообеспечения большой ядерной энергетики будущего, в основе которой реакторы на быстрых (крупные АЭС и АТЭЦ) и на тепловых нейтронах (средние АЭС и АТЭЦ, производство тепла низкого и высокого потенциала, транспортные установки).

Ранее предполагалось, что первым этапом практического применения УТС будут **гибридные реакторы**. Их освоение станет одновременно практическим шагом к чисто термоядерным реакторам, которые позволят на следующем этапе значительно-снизить, а в пределе — исключить опасности, связанные с радиоактивностью при производстве ядерной энергии. Но Чернобыльская авария и настойчивость американцев в нераспространении $P_{\text{и}}$ изменили тенденцию. **Россия выбрала приоритетом участие в международном проекте ИТЭР.**

В последние годы НИЦ «Курчатовский институт» совместно с организациями ГК РФ «Росатом» предлагает программу НИОКР и дорожную карту создания первой в мире ОПГУ к 2035 году, которая дополняет термоядерную программу России, базирующуюся на международном проекте ИТЭР

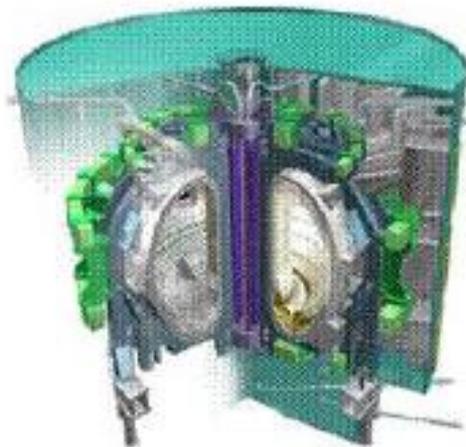
Следующий шаг-демонстрационный термоядерный реактор (ДЕМО)



JET

80 m³

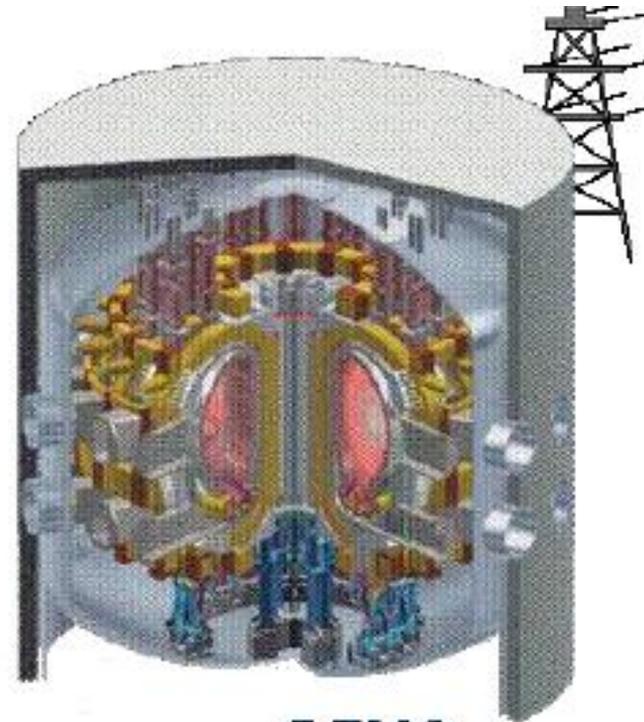
~16 MW_{th}



ITER

800 m³

~ 500 MW_{th}



DEMO

~ 1000 - 3500 m³

~ 2000 - 4000 MW_{th}

Топливо для термоядерной электростанции

- Дейтерий D: 88 кг/год для 1000 МВт электростанции
- Тритий T: короткоживущий изотоп (13 лет) генерируется в реакции
- $\text{Li}^6 + n \rightarrow \text{T} + \text{He}^4$
236 кг Li^6 / год для 1000 МВт электростанции



Ресурсы Li

почти неограничены

- Li : минералы и морская вода
- Резервы: 4-6 миллионов тонн
- Ресурсы: 8- 21 миллионов тонн
- Морская вода: 2×10^{11} тонн

- *Для масштабных образовательных задач кадрового обеспечения российской программы УТС стоит задача интенсифицировать усилия по подготовке инженерных кадров на базе существующих кафедр ведущих ВУЗов России.*
- *Предлагается дополнить образовательные программы курсами лекций ведущих российских специалистов проектного центра ИТЭР и НИЦ «Курчатовский институт», вовлеченных в создание систем международного токамака-реактора ИТЭР.*

Подготовка кадров для термоядерной энергетики. ВУЗы

НИУ «МЭИ»

НИЯУ «МИФИ»

МФТИ

МГУ

НГУ

МГТУ

СПбГУ

др.

Подготовка инженеров

- ❑ Не все эти кафедры имеют образовательные программы с инженерной направленностью для подготовки специалистов, способных обслуживать и проектировать инженерные системы современных термоядерных установок.
- ❑ Такие образовательные программы следует ввести на кафедрах в дополнение к существующим программам.
- ❑ Пилотный проект такой модернизации образовательной программы в области УТС можно реализовать на кафедре общей физики и ядерного синтеза «НИУ «МЭИ» (ОФИЯС).
- ❑ Кафедра ОФИЯС «НИУ «МЭИ» готовит бакалавров и магистров по специальности «Термоядерные реакторы и плазменные установки» в рамках направления «Ядерная энергетика и теплофизика», по профилю бакалавров «Термоядерные реакторы и плазменные установки» и магистерской программе «Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез».

1. Проблема стойкости первой стенки

- эрозия элементов камеры при больших удельных нагрузках
- перепыление материала первой стенки, покрытия
- образование сплавов, соединений и структур с необычными свойствами

2. Экономичность и безопасность реактора

- накопление трития в пыли и наноструктурированных продуктах эрозии первой стенки,
- химическая активность пыли (**разложение воды водород**) при прорыве воздуха и воды в камеру

3. Работа в различных режимах удержания плазмы

- срывы плазмы
- Генерация тока

4. Тритиевый цикл

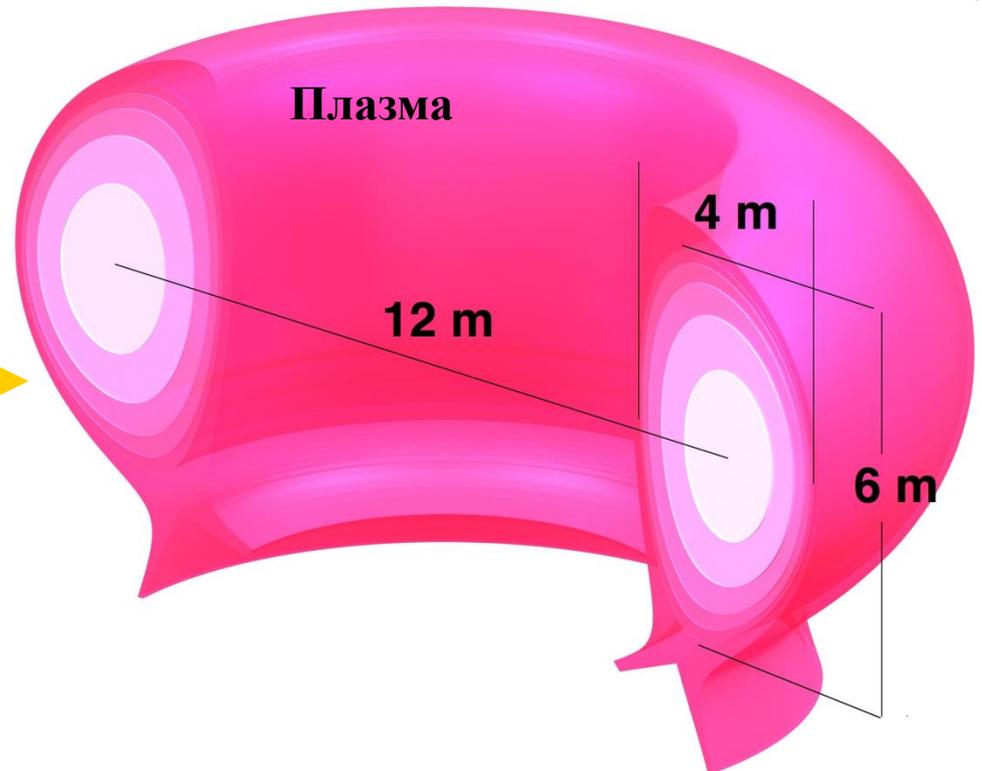
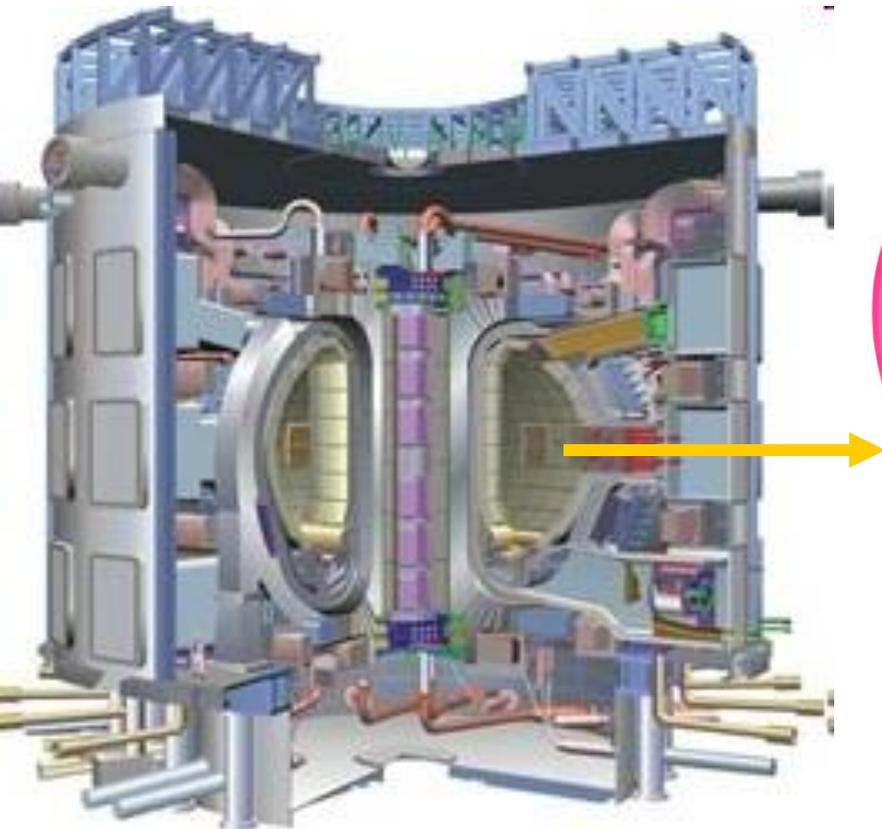
Требуются инженеры –специалисты в области материалов, физики плазмы, энергетики, электроники, сверхпроводимости и многие другие

Токамак ИТЭР

Международный термоядерный экспериментальный реактор (Россия, Европа, США, Япония, Китай, Корея, Индия, строительство 2010-2024 гг. во Франции)

$R/a = 6.2/2.0$ (м/м) , Объем = 831 м³

$B = 5.3$ Т, $I = 15$ МА, $\langle n_e \rangle = 10^{20}$ м⁻³ , $\langle T_e \rangle = 8.8$ кэВ, $\langle T_i \rangle = 8$ кэВ



ИТЭР – международное сотрудничество.

Семь сторон – **Европейский союз, США, Россия, Китай, Индия, Япония и Корея**, представляющих более половины населения земли и более 80% мирового ВВП объединили свои усилия в создании ИТЭР. 2006 год.



Основные задачи ИТЭРа :

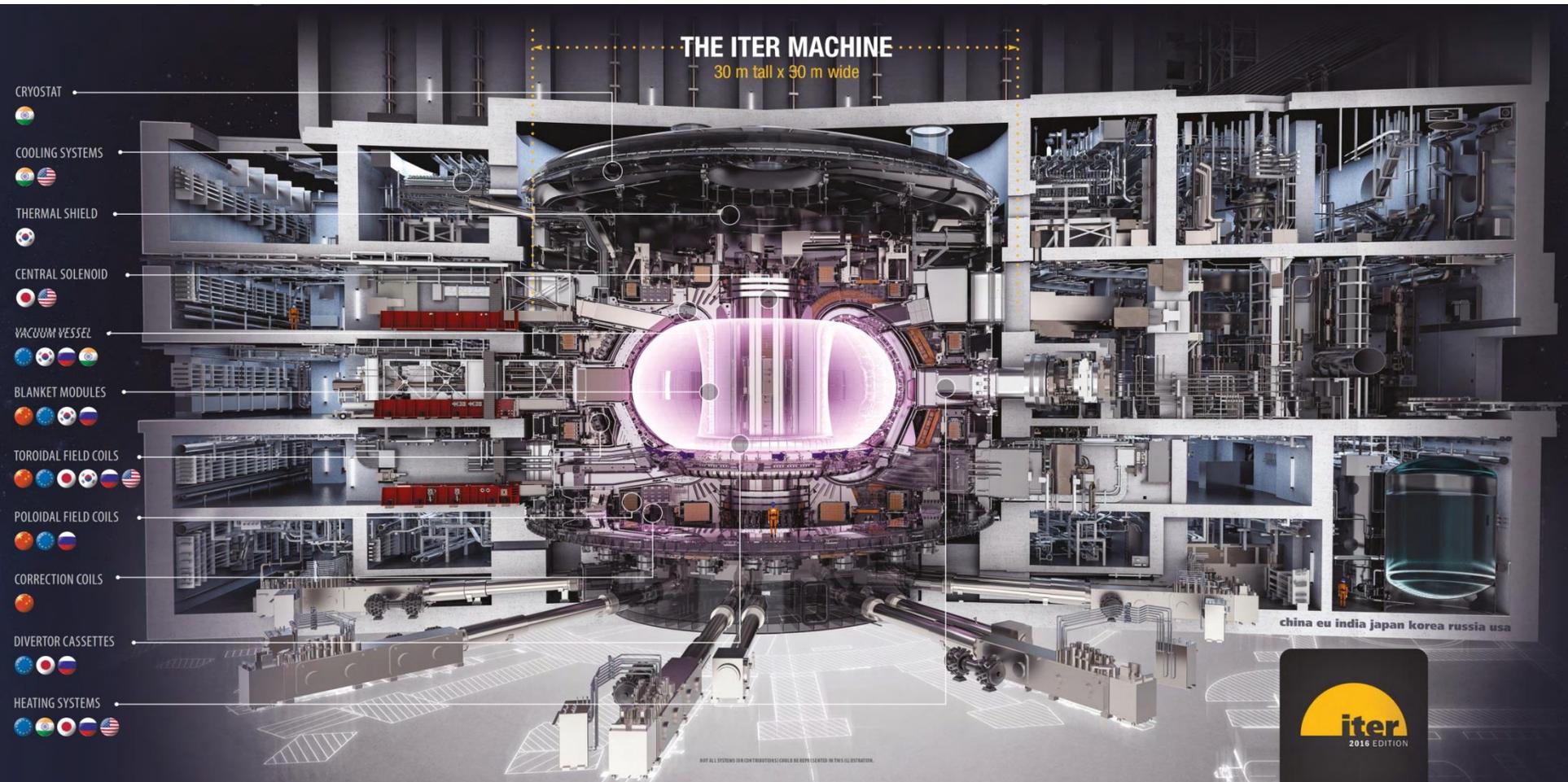
1. Достижение устойчивого DT горения в режиме индуктивного поддержания тока на протяжении 300-500сек при отношении мощности синтеза к мощности нагрева плазмы $Q \geq 10$
2. Демонстрация стационарного DT горения на уровне $Q \geq 5$ с неиндуктивным поддержанием тока
3. Возможность зажигания ($Q = \infty$) не исключена

Операционный период реактора - примерно 20 лет.

Инженерные задачи и тесты (испытания)

1. Демонстрация надежности и совместимости основных технологий синтеза.
2. Испытания компонентов будущих реакторов
3. Проверка концепций тритиевого размножения 14МэВ нейтронами со средней нагрузкой на первую стенку $\geq 0.5 \text{ МВт/м}^2$ и нейтронным флюенсом $\geq 0.3 \text{ МВт/м}^2$ в год

Токамак ИТЭР



Критическая система №1 – площадка токамака и здание

Токамак ИТЭР



Опирающаяся на 493 сейсмических подушки, плита нижнего уровня "B2" держит 440 000 тонный вес конструкций токамака. Заливка бетоном плиты нижнего уровня B2 закончена в августе 2014. Продолжается установка внутренней стены, опалубки уровня B1, усиление биозащиты.

7 систем ИТЭР с уникальным оборудованием

Магнитная катушка



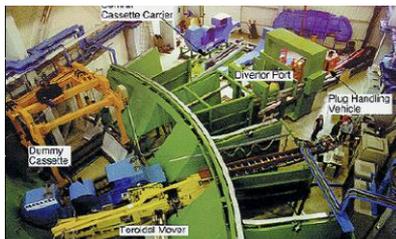
Radius 3.5 m
Height 2.8m
 $B_{max}=13\text{ T}$
 $W = 640\text{ MJ}$
 0.6 T/sec

Вакуумная камера



Точность $\pm 5\text{ mm}$

Манипулятор для установки узлов внутри



Attachment Tolerance $\pm 2\text{ mm}$

Модуль blankets

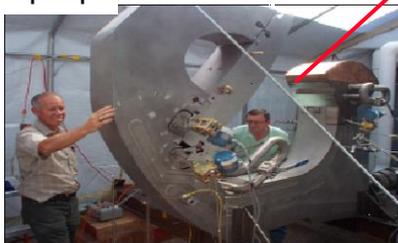


соленоид



Height 4 m
Width 3 m
 $B_{max}=7.8\text{ T}$
 $I_{max} = 80\text{ kA}$

дивертор



Heat Flux $>15\text{ MW/m}^2$, CFC/W

4 тонны blankets
Точность $\pm 0.25\text{ mm}$

Критическая система №2 - вакуумная камера ИТЭР

Корея

Россия



Сваренные половинки верхнего участка внутренней части вакуумной камеры.



Внутренняя оболочка PSE12 закончена. MAN, Германия

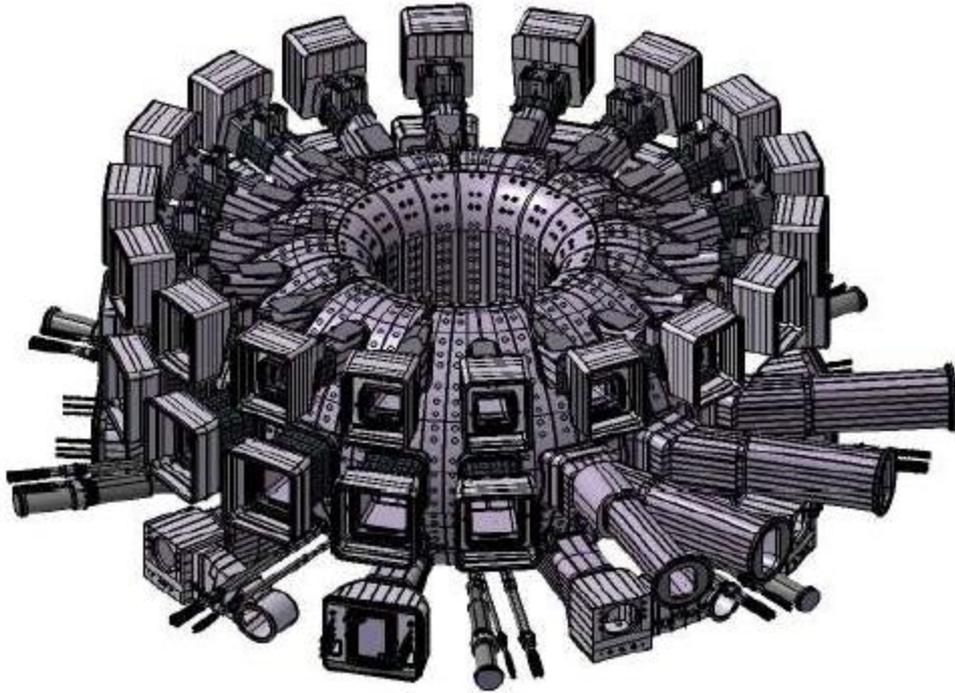


Формовка компонент PSE 12 верхнего патрубка. MAN, Германия

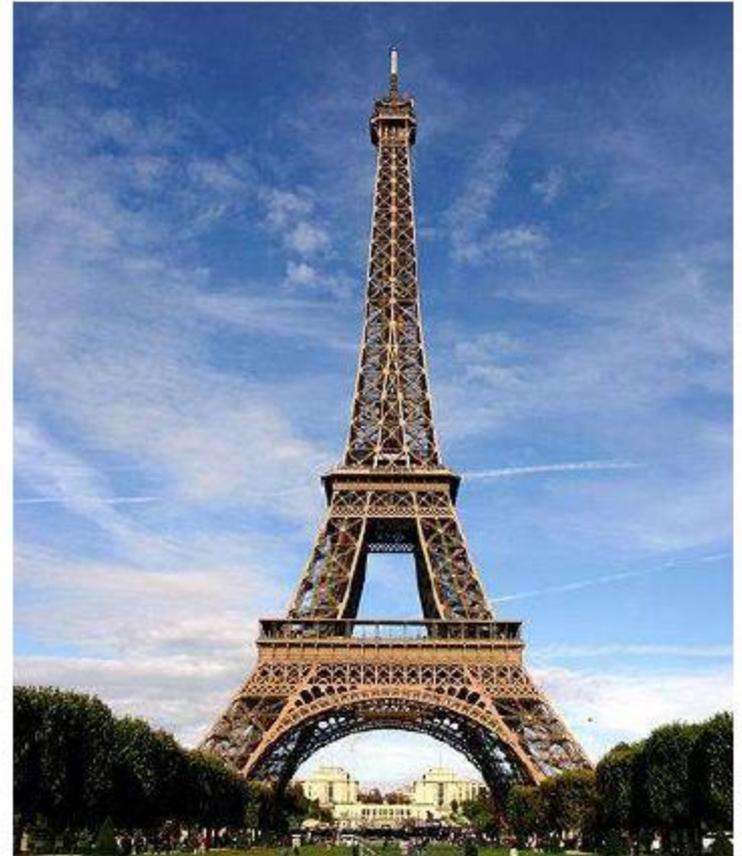
Изготовление PSE 02, 06, 08, 10, 12 стартовало на **MAN Diesel & Turbo SE**, Деггендорф, Германия

Вакуумная камера ИТЭР

Инженерные достижения



- Weighs about 25% less than the Eiffel Tower (more with in-vessel components included)

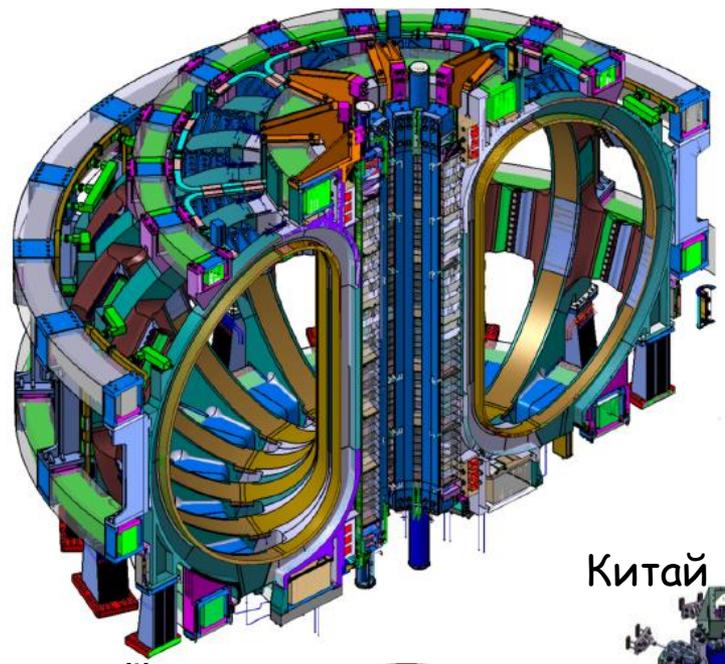


7300 tonnes
324 m tall

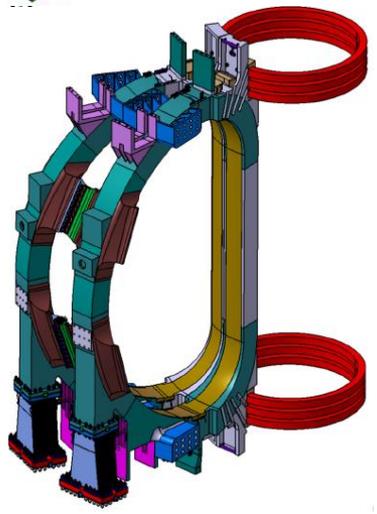
Магнитная система ИТЭР

Магнитная система ИТЭР - самая большая сверхпроводящая система, когда либо создаваемая

- 18 Nb₃Sn витков тороидального поля (TF),
- 6-ти модульный Nb₃Sn центральный соленоид (CS),
- 6 Nb-Ti катушек полоидального (PF) поля Coils,



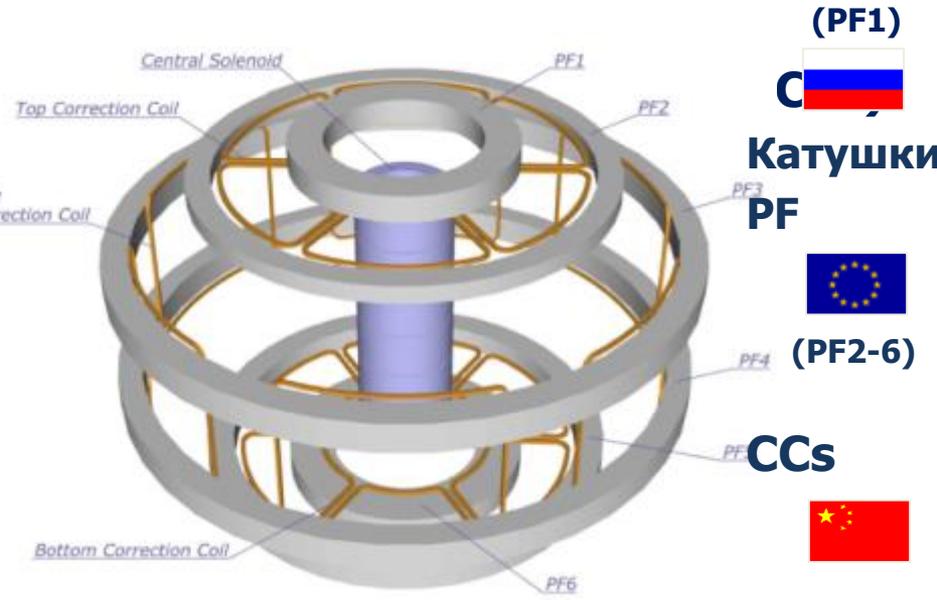
Пара TF
ВИТКОВ



Китай



Индуктор



Изготовление сверхпроводников тороидального поля

Россия.

Токамак ИТЭР

Nb_3Sn сверхпроводники тороидального поля



Изготовление сверхпроводящих стрендов. ЧМЗ. Глазов.



Процесс изготовления кабелей. ВНИИКП. Подольск.



Последнее джекетиование, ИТЭФ, Протвино.

Для ИТЭРовской магнитной системы тороидального поля Российская Федерация поставляет кабель в оболочке (CICC): **28 единичных длин или более 17 км Nb_3Sn кабелей CICC для витков тороидального поля.**



Сверхпроводник тороидального поля содержащий 900 Nb_3Sn стрендов и 522 медных стрендов



Тестирование утечек. НИЦ «КИ», Москва.



Последняя поставка, НИЦ «КИ», Москва

19 июня, 2015 года – последняя единичная длина кабеля ТП была заджекетирована в ИТЭФ, Протвино, завершая Соглашение о поставке. 28 сентября 2015 года три катушки сверхпроводников были отправлены в ИТАЛИЮ. Italy.

СП завершено, 41,54 kUA зачтено МО ИТЭР.

Критическая система №3 - катушки полоидального поля.

Европа

Токамак ИТЭР

Россия

Катушка PF-6



В институте ASIPP, Hefei, Китай, проводится квалификация изоляции витка

Катушка PF-1



Устройство намотки. НИИЭФА, С-Петербург

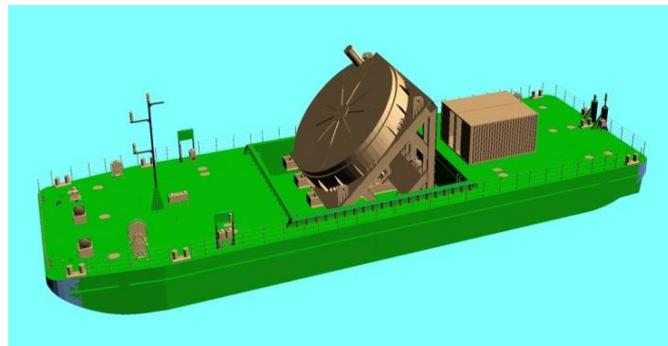
Катушка PF-5



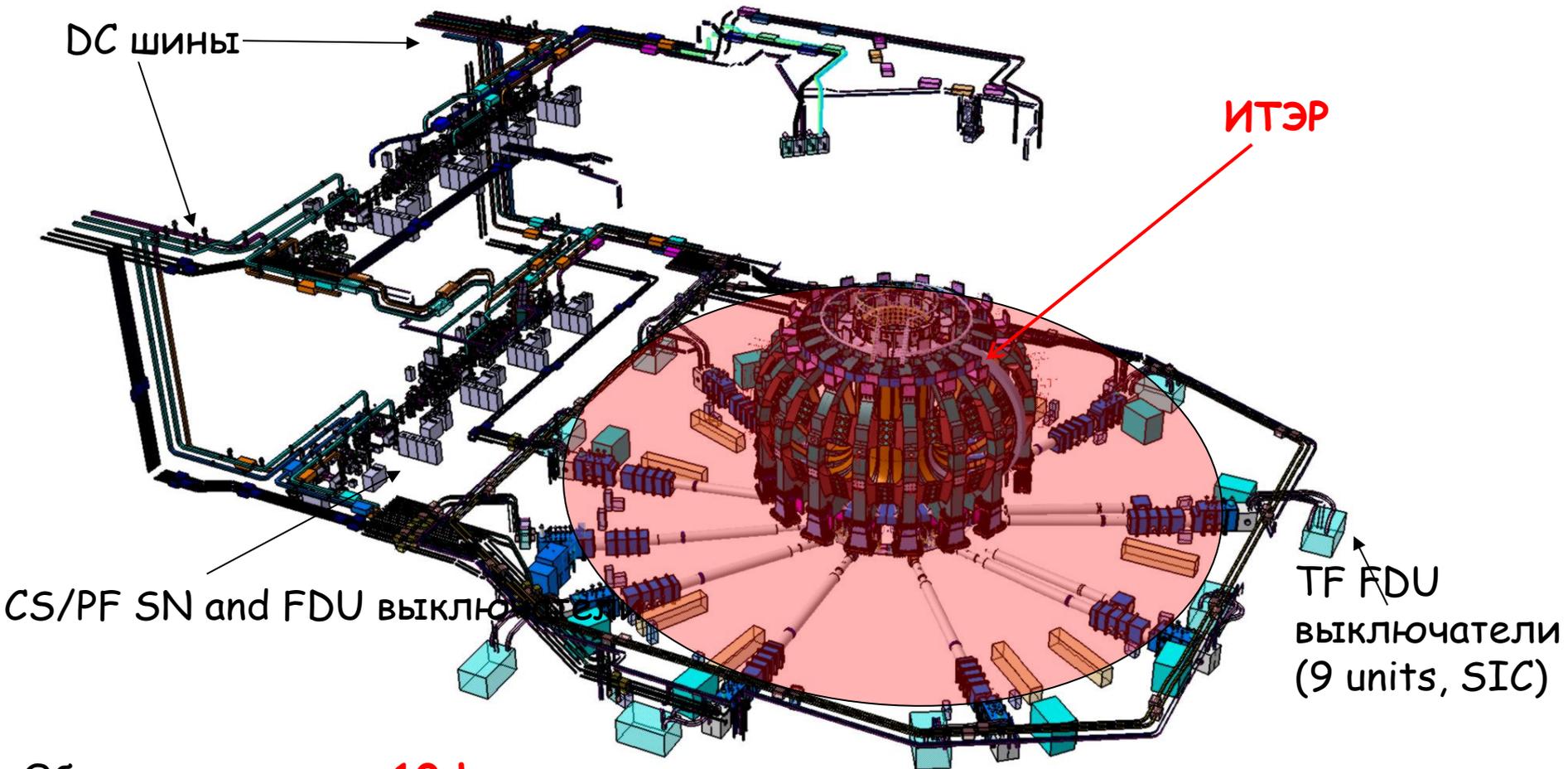
Два стола для намотки сдвоенного витка "double pancakes" на площадке ИТЭР



Намотка макета сдвоенной катушки. СНСЗ, С-Петербург



Квалификация была проведена на Средне-Невском заводе, С-Петербург. Был намотан макет сдвоенной катушки



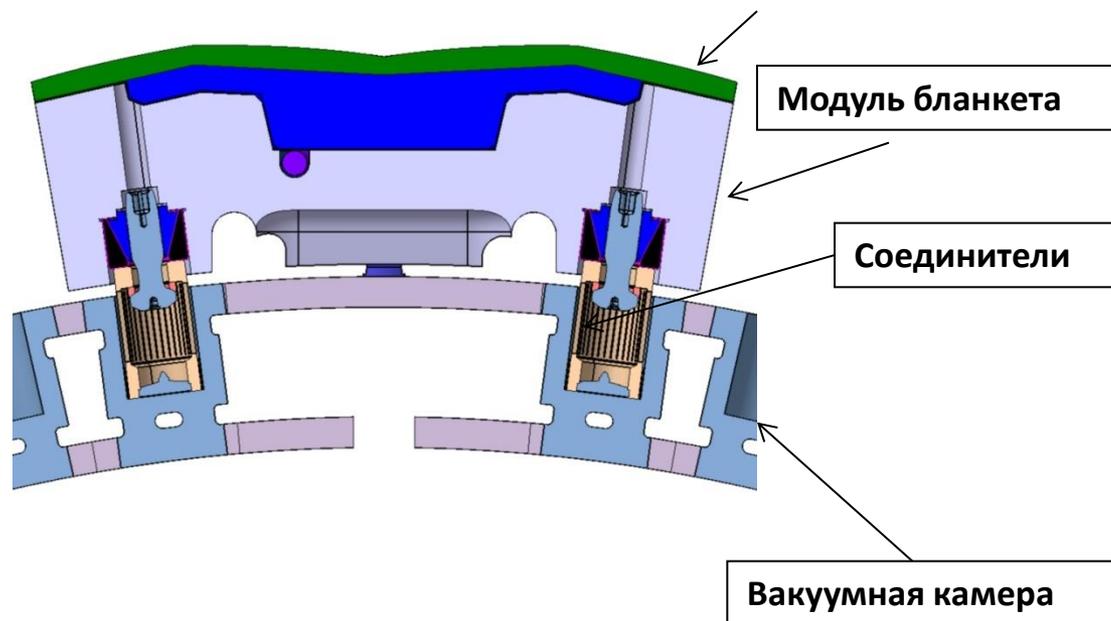
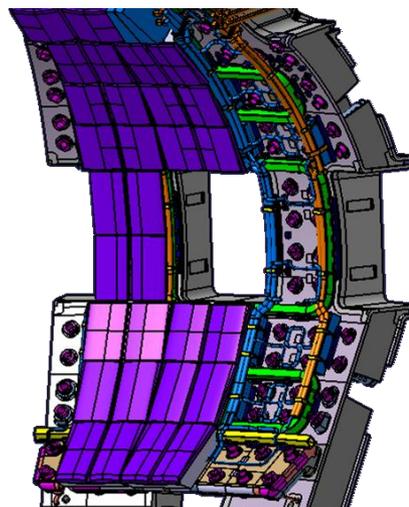
Общая длина шин: **10 km**

Мах. Поперечное сечение: 420*280 mm

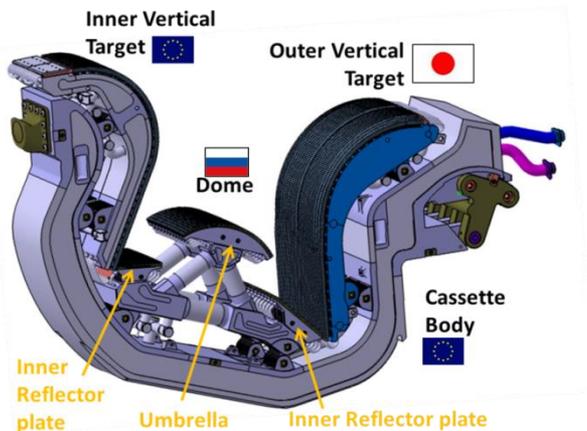
120 выключателей на токи 70 кА

Blanket system

Токамак ИТЭР



Купол дивертора



Россия ответственна за поставку 40% наиболее напряженных панелей Первой стенки с бериллиевым покрытием, 100% купола дивертора и 100% соединителей модулей blankets.

Тепловые испытания элементов дивертора

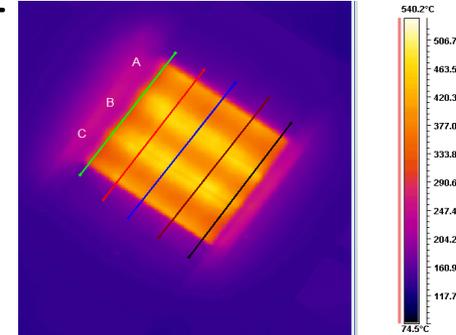
Россия

Тепловые испытания элементов, обращенных к плазме Токамак ИТЭР



Участок изготовления систем ИТЭРа в НИИЭФА

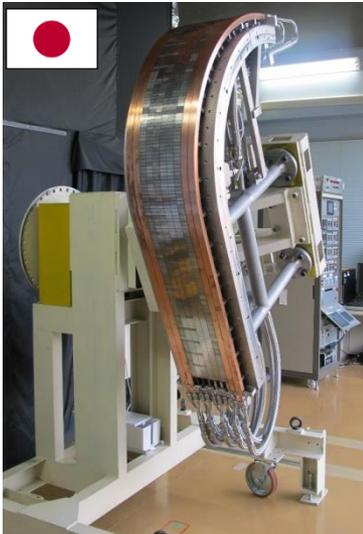
IDTF (ITER Divertor Test Facility), 800 кВт, электронный пучок. до - 20 MW/m², .



Купол дивертора

1000 циклов при 5 МВт/м² - выдержал
500 циклов при 8 МВт/м² - выдержал
326 циклов при 10 МВт/м² - протечка воды

Диверторная пластина



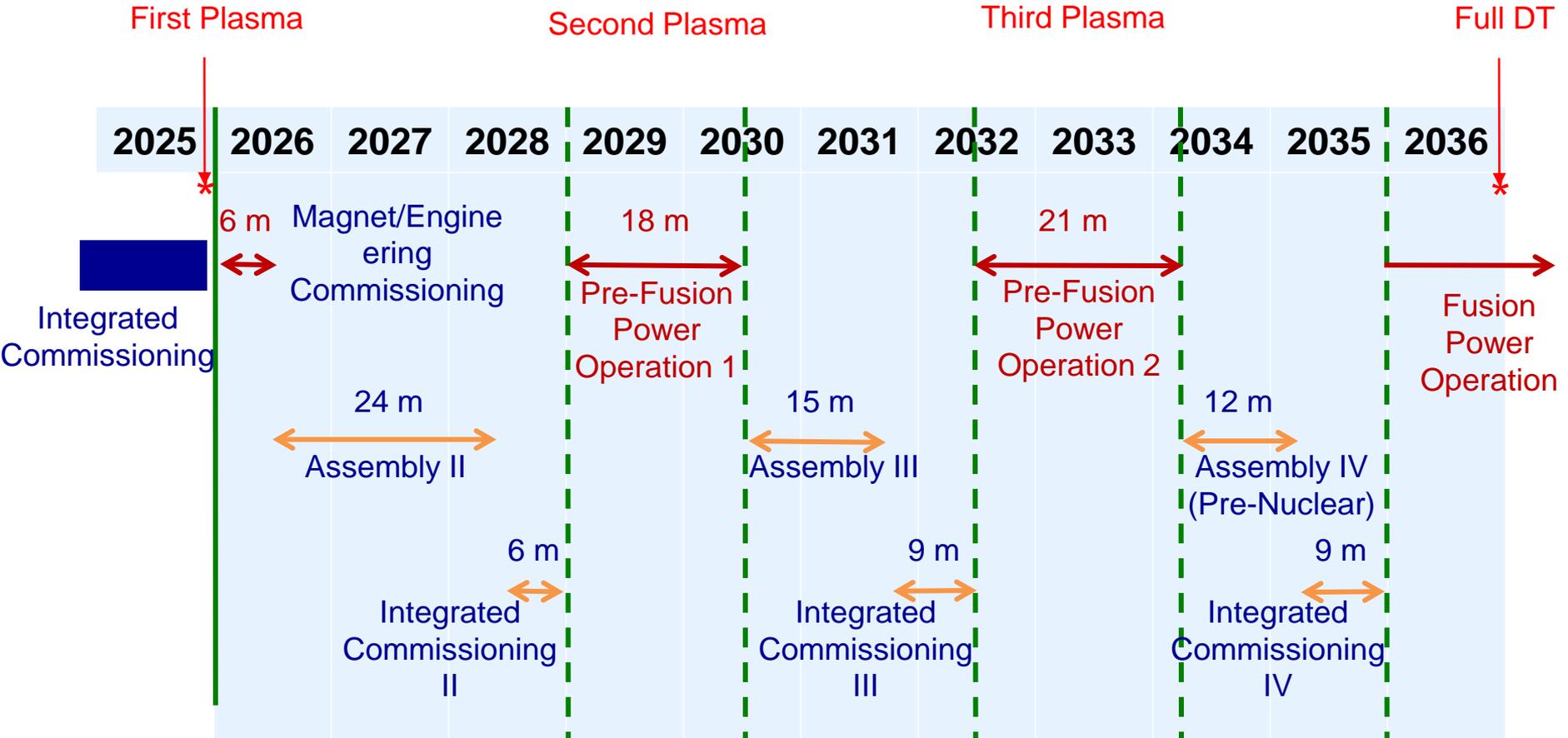
Полномасштабный прототип наружной диверторной пластины, изготовленной в Японии и испытанной на IDTF



Установка IDTF, НИИЭФА, С-Петербург

ITER Outline Operations Schedule

Four Stage Approach

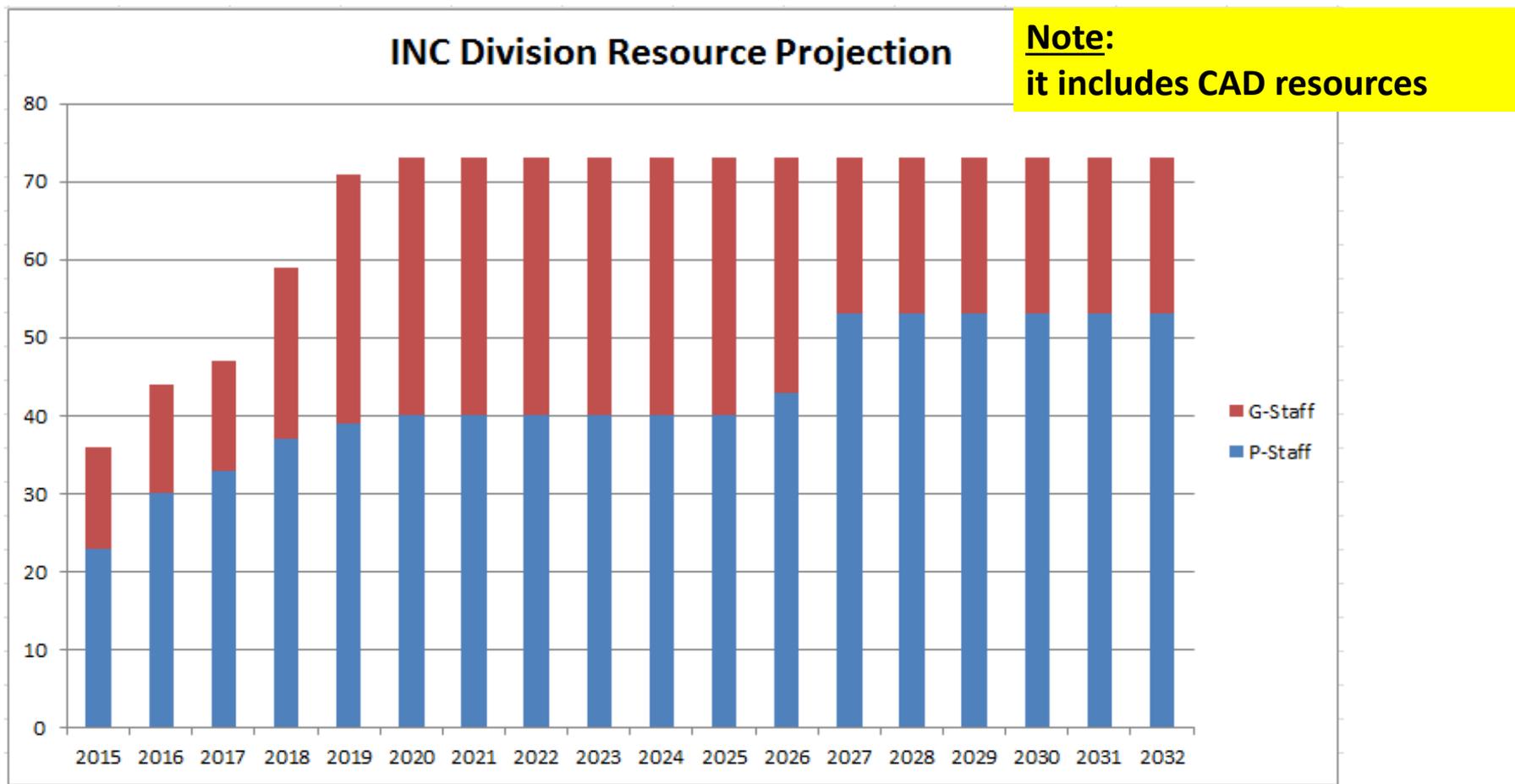


Токамак ИТЭР Expected Horizontal Support by IO-CT

The following horizontal support is expected by the project to the activities of the INC Division. **It is assumed hereinafter that the necessary support in those areas is accounted, planned and ensured by the corresponding Divisions, Offices and Departments**, therefore it is NOT included in the present estimate.

- Quality Assurance Responsible Officer (QARO)
- PA / TBMA Responsible Officer (PARO/TBMA RO)
- Project Schedule Responsible Officer (PSRO) and required schedulers
- Design Integration
- Design Office (excl. CAD staff)
- Safety Responsible Officer (SRO)
- Finance and Procurement
- Science & Operations

Токамак ИТЭР: план штата сотрудников Overall Staffing Plan



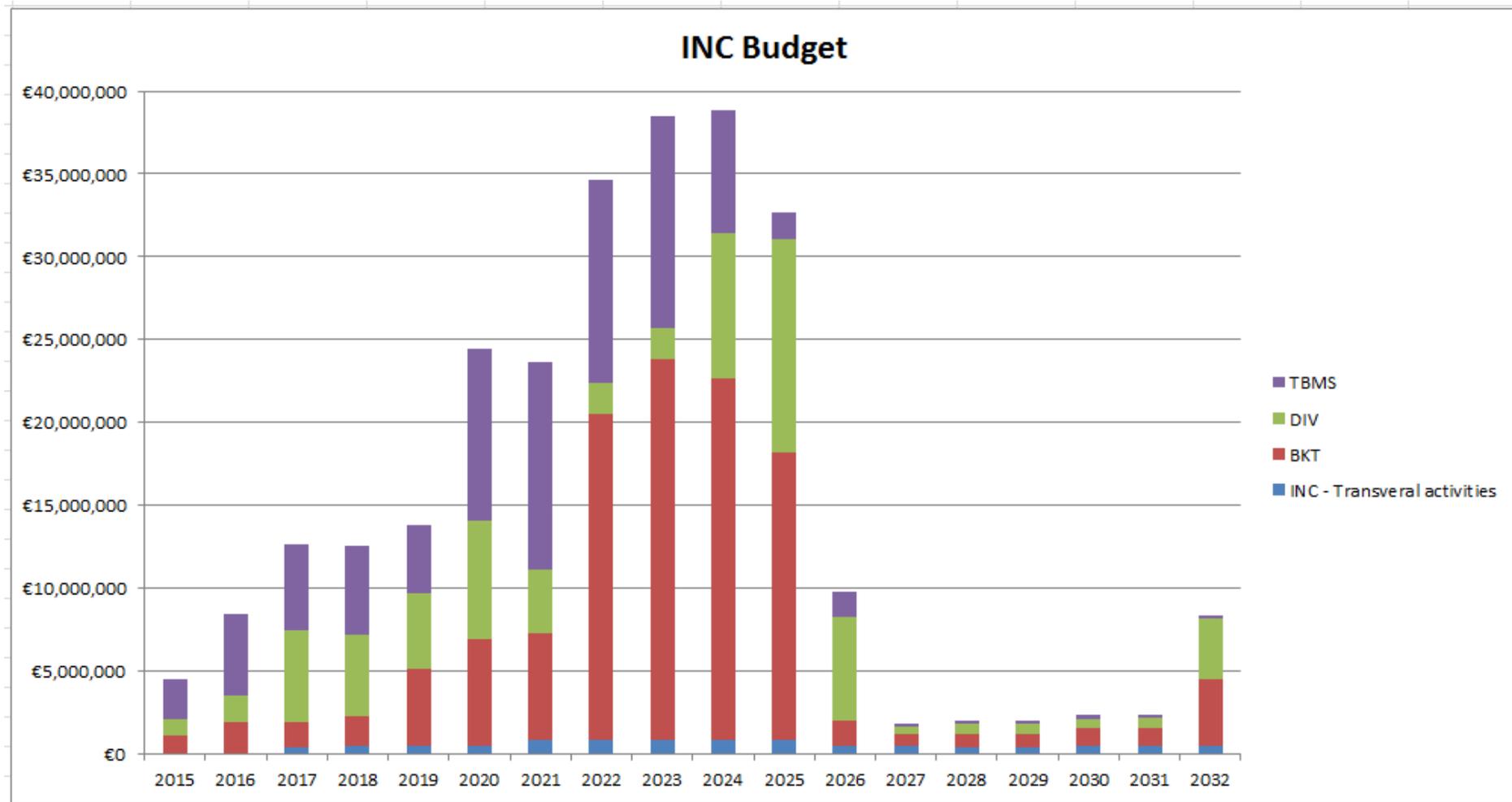
Design & Qualification

Series production

Assembly / Commission / Operation / Design

Токамак ИТЭР: план бюджета по годам

Overall Budget Profile per Year



Note: It includes management contingency and travel costs

Токамак ИТЭР: объявление о приеме инженеров специалистов в штат сотрудников

<http://www.iter.org/jobs>

To discover more about the region, please consult the tourist office websites of [Aix-en-Provence](#), [Manosque](#), and [Marseille](#).

Available Jobs at ITER

Title	Application Deadline	More Info
Legal Officer - CAB-004	20/Mar/2016	More info...
Hot Cell & Maintenance Nuclear Engineer - PED-046	27/Mar/2016	More info...
Detritiation System Engineer - PED-040	27/Mar/2016	More info...
Coil Power Supply Control Engineer - PED-037	27/Mar/2016	More info...
Occupational Safety Control Engineer - SCOD-013	20/Mar/2016	More info...
Cable Engineer - PED-038 & -039	27/Mar/2016	More info...
Tritium Plant Responsible Officer - PED-041	27/Mar/2016	More info...
Vacuum Engineer - PED-043	27/Mar/2016	More info...
Fusion Technologies Engineer - PED-044	27/Mar/2016	More info...
Requirements Management Engineer - CIO-050	27/Mar/2016	More info...
Process Engineer for Commissioning - PED-033	27/Mar/2016	More info...
Electrical Engineer - PED-036	27/Mar/2016	More info...
Nuclear Engineering Coordinator - CIO-054	27/Mar/2016	More info...
Thermal Shield Manufacturing Engineer - TED-070	27/Mar/2016	More info...
Vacuum Vessel Technician - TED-072	27/Mar/2016	More info...

Вакансия инженера-электрика на токамаке ИТЭР: требования к кандидату

Electrical Engineer - PED-078

Main job	Electricity
Department	PED / Plant Engineering Department
Division	PED / Electrical Engineering Division
Section	PED / EED / Cable Management Sub-Section
Job Family	Engineer - 2
Application Deadline (MM/DD/YYYY)	11/13/2016
Grade	G6
Direct employment	Required
Purpose	-To support the Electrical Engineering Division in the lightning protection, insulation requirements and earthing. -To provide guidelines and assistance to the system design, to be compatible with the lightning protection, insulation requirements and earthing.
Main duties / Responsibilities	-Responsible to define the protection measures to reduce the risk of permanent failures of electrical and electronic systems due to lightning and earthing policy in the ITER plant; -Defines the protection measures, and produces guidelines and ITER specific rules to reduce the risk of permanent failures of electrical and electronic systems, caused by lightning strikes and overvoltage due to ground faults; -Produces design documentation, engineering analyses and technical specification related to lightning protection system for civil structures, electrical and electronic systems, insulation requirements and earthing; -Performs the integrated Lightning Protection engineering analysis for the full ITER facility (including buildings and Systems) and produces the Lightning Risk Analysis document; -Follows-up the implementation of the lightning protection and earthing by buildings and systems; -Produces the technical specifications and follows up the procurement of the lightning protection devices; -Tests of the lightning protection devices and earthing points and participates in the integrated commissioning and tests with the Systems; -Performs other duties in support of the project schedule; -May be requested to be part of any of the project teams and to perform other duties; -Maintains a strong commitment to the implementation and perpetuation of the ITER Safety Program, values and ethics. -Under the coordination of the Cable Management Sub-Section Leader reports to the Electrical Engineering Division Head; -Acts as an interface between all members of the Electrical Engineering Division, ITER Design Office, Engineering Support Companies contracted by the ITER Organization and the ITER domestic Agencies;
Measures of effectiveness	-In response to requests from the Director-General and/or PED Department Head, or proactively, informs the DG/ PED Department Head of any important and urgent issues that cannot be handled by the concerned line management and may jeopardize the achievement of the Project's objectives. <ul style="list-style-type: none">• Produces accurate and relevant Risk Analysis documents associated to specific technologies;• Develops the technical Study of Integrated Lightning Protection for the full ITER facility (including buildings and Systems).

Level of study Master or equivalent degree

Diploma Electrical Engineering

Level of experience At least 5 years

Technical experience/knowledge – Extensive experience in similar jobs (involving similar work responsibilities) and/or additional training
dge certificates in relevant domains may be considered a reasonable substitute for the required educational degree.

-At least 5 years' experience in the design of lightning protection of civil structures and electrical equipment.

-At least 2 years' experience in the procurement, installation and testing of lightning protection components and systems for civil structures and electrical equipment.

-Experience in technical integration/coordination for the construction of large (science or industry) projects would be an advantage;

Social skills Ability to work effectively in a multi-cultural environment

Ability to work in a team and to promote team spirit

Specific skills CATIA
MS Office standard (Word, Excel, PowerPoint, Outlook)

General skills -Work experience in large scientific or industrial facility is required;
-Basic Project Management experience is required.

Others -Software tools designed to accurately analyze problems involving grounding/earthing electromagnetic fields, electromagnetic interference (such as CDEGS) is mandatory.

-MicroSoft Office suite

-Database knowledge would be an advantage

-CATIA V5, See System Design and/or AVEVA would be an advantage

Languages English (Fluent)

Подготовка кадров для ИТЭР



- Construction phase

- Best way to support ITER is through the Members facilities → PhD, postdocs, R&D
- Only a handful of physicists on the ITER team
- Staff cannot increase much more before end of construction
- 5 “Monaco fellows” (postdocs) every 2 years
- Expect collaborative efforts with Members academic institutes (e.g. Masters, Phd) → is being developed slowly (political and bureaucratic issues)



Российские выпускники имеют реальную перспективу поработать на ИТЭР и вернуться высококвалифицированными кадрами для участия в строительстве российских термоядерных реакторов



Ежегодная конференция студентов физических вузов в Агентстве ИТЭР

2012. First seven Russian researchers to explore the ITER world



Лекции по проекту ИТЭР в МФТИ

Подготовка специалистов

В 2014 году осуществлен выезд **12 стажеров** во Францию в Международную организацию ИТЭР продолжительностью от **30 до 90 дней**.

Тематически программы соответствовали направлениям работ по российским обязательствам: сверхпроводники, энергонапряженные компоненты реактора, нагрев плазмы, диагностические программные коды, силовая электрофизическая аппаратура и др.

В стажировках участвовали молодые специалисты из ОАО ТВЭЛ, НИИЭФА, ВНИИКП, ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», МИФИ, ИОФ РАН, ИЯФ СО РАН.

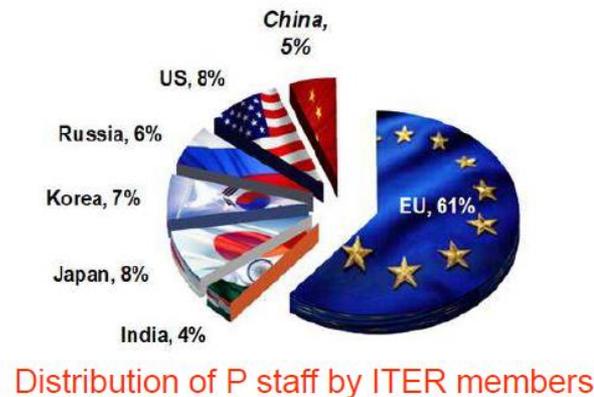
2017 год – 65 новых вакансий на ИТЭР : <http://so->

[i.ru/news/show/glava_iter_v_2017_godu_u_nas_mozhet_otkriysya_65_n](http://so-i.ru/news/show/glava_iter_v_2017_godu_u_nas_mozhet_otkriysya_65_n)

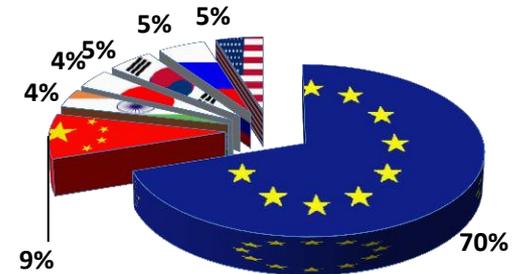
Personnel

As of end 2010, the ITER Organization had a total of 69 staff members, comprising of 301 professional and 168 technical support staff members.

	Professional staff	Support staff	Total
CN	16	4	20
EU	182	125	308
IN	12	16	28
JA	25	7	32
KO	22	5	27
RU	19	3	22
US	24	8	32
Total	301	168	469

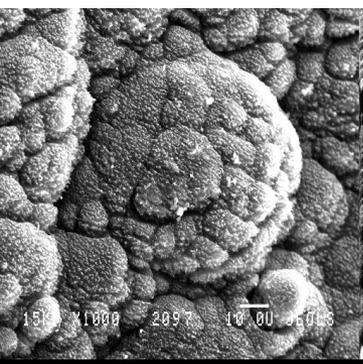


2016

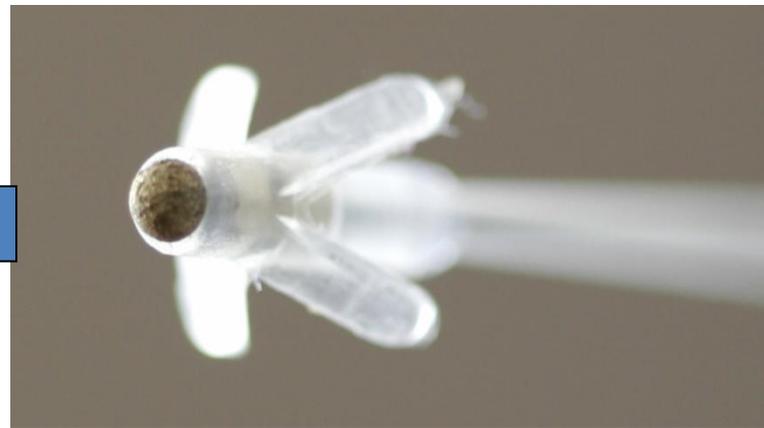
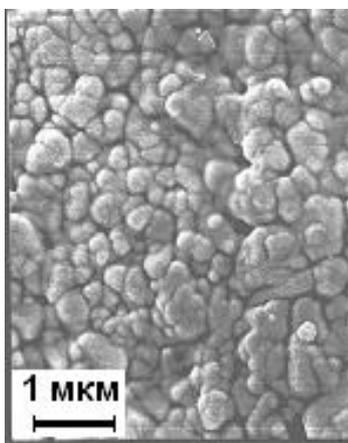
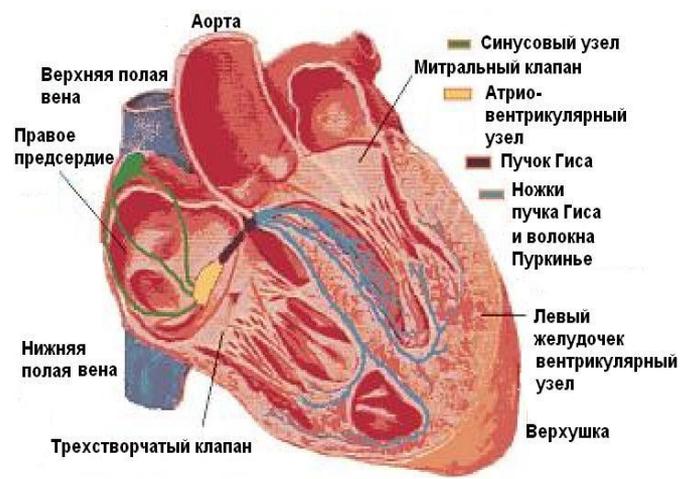


- By end May 2016, the IO had 684 staff members (including 24 staff for TCWS, 5 Post-doc Fellows, 2 staff for Vacuum Auxiliary System (VAS)), comprising 407 P and 277 G staff;
- IO is implementing the staffing levels agreed by the IC for 2016 (staff cap to 736). Between 1 January and 31 May 2016, 65 newcomers were appointed and the departures of 16 staff were decided. The IO has advertised 102 positions; 2535 applications have been received through the DAs and 312 candidates were shortlisted/interviewed;
- The first ITER Project Associates (IPA) contract is expected to begin in Summer. The discussion on 10 IPA requests is ongoing.

Взаимодействие плазмы в термоядерных установках со стенкой ведет к образованию новых наноразмерных материалов с высокой пористостью



Перспектива: применение наноструктурных материалов в технологии, медицине и биотехнологии



для производства современных кардиостимуляторов

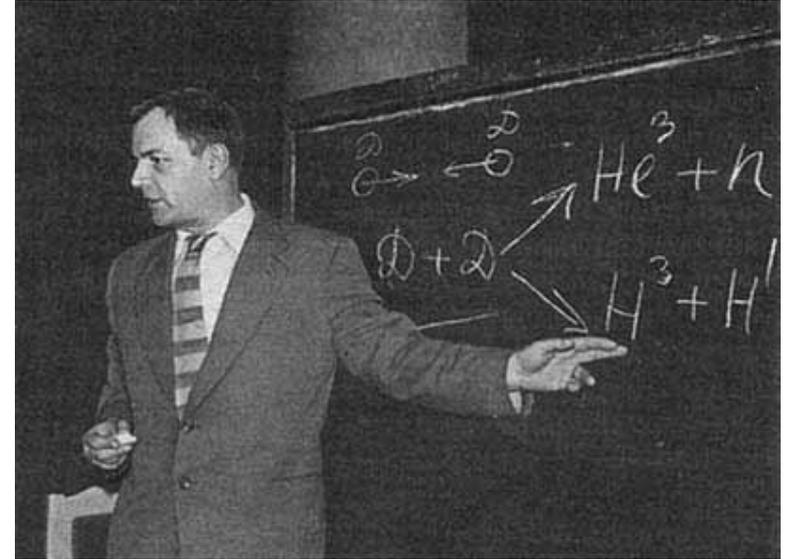
- ❑ Стоит задача обеспечить основной инженерный штат комплекса токамака Т-15. Такие специалисты станут кадровым резервом для обеспечения российского участия в проекте международного токамака ИТЭР. Дальнейшая подготовка (в течение 3-5 лет) такого кадрового резерва на базе Российского агентства ИТЭР позволит направлять этих специалистов на работу в ИТЭР
- ❑ Эти кадры в дальнейшем составят основу инженерного штата при сооружении отечественного токамака-реактора по национальной программе УТС.
- ❑ Следует отметить, что в настоящее время представимость российских специалистов в ИТЭР недостаточна и этот острый вопрос необходимо решать в ближайшие годы.
- ❑ Для обеспечения потребности российской программы УТС инженерно-физическими кадрами требуется подготовить в ближайшие 10 лет более 300 специалистов.

Выводы

- Подготовка специалистов по специальности «Термоядерные реакторы и плазменные установки» относится к приоритетным задачам образования для кадрового обеспечения отечественной программы УТС.
- Для обеспечения потребности российской программы УТС инженерно-физическими кадрами требуется подготовить в ближайшие 10 лет более 300 специалистов.
- Стоит задача интенсификации подготовки инженерных специалистов для участия России в международном проекте ИТЭР. Для таких масштабных образовательных задач следует интенсифицировать усилия по подготовке инженерно-физических кадров на базе существующих кафедр ведущих ВУЗов России.
- Предлагается дополнить образовательные программы курсами лекций ведущих российских специалистов проектного центра ИТЭР и НИЦ «Курчатовский институт», вовлеченных в создание систем ИТЭР.



Лев Андреевич
Арцимович
1909-1973



«Вряд ли есть какие-либо сомнения в том, что в конечном счёте проблема управляемого синтеза будет решена. Природа может расположить на пути решения этой проблемы лишь ограниченное число трудностей, и после того, как человеку, благодаря непрерывному проявлению творческой активности, удастся их преодолеть, она уже не в состоянии будет изобрести новые».

«Термоядерная энергетика появится тогда, когда она станет действительно необходима человечеству».



Иван Айвазовский

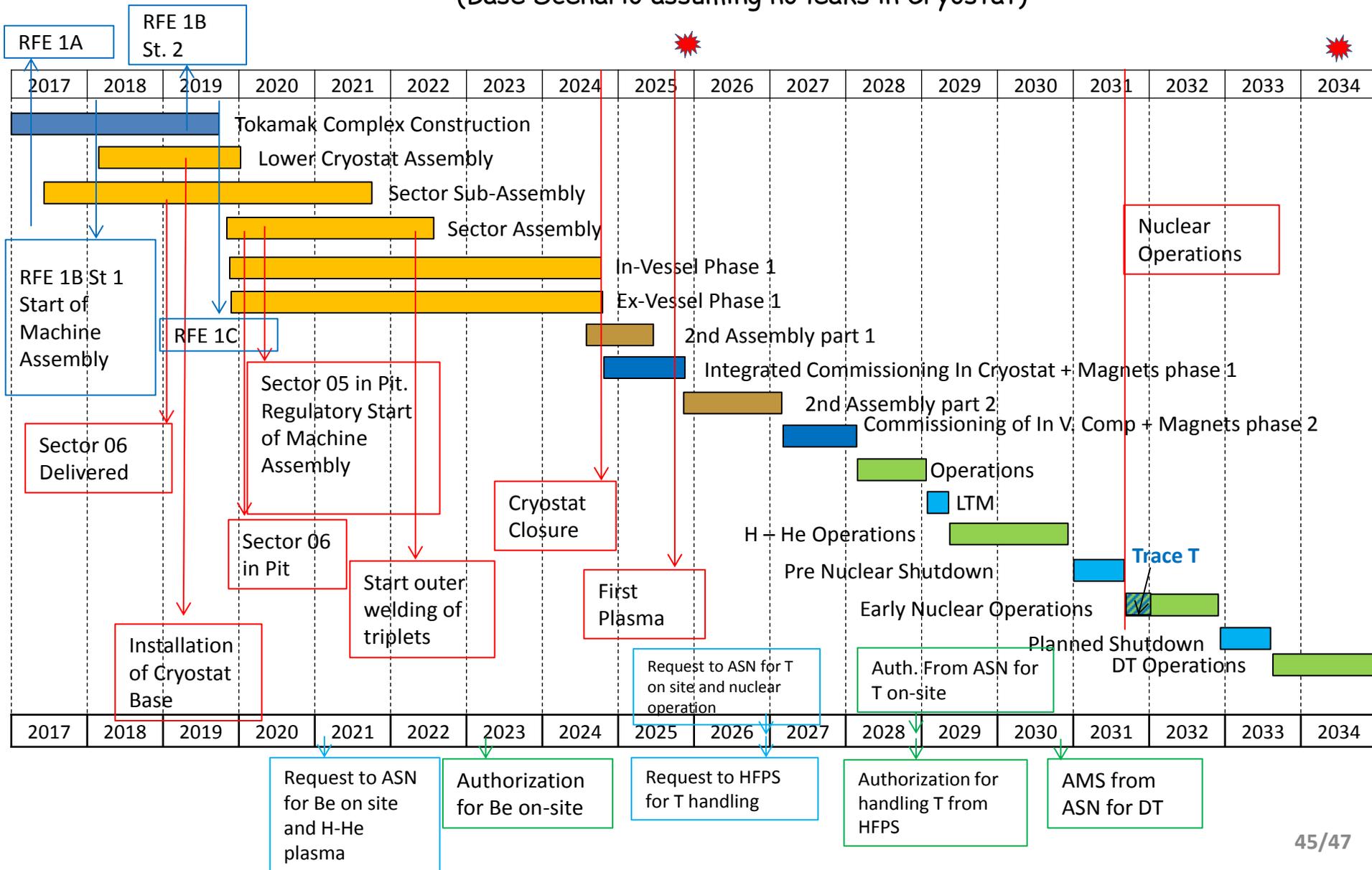
“Хаос. Сотворение мира”

1841

**Спасибо за
внимание!**

График работ (Level 0) от начала сборки до начала работы на DT

- Предполагается полная обеспеченность ресурсами
(Base Scenario assuming no leaks in Cryostat)



Необходимые ресурсы для одного года работы реактора на 1000 МВт на D-T топливе:

Дейтерий D₂ ~ 100 кг (в океане ~ 5*10¹⁶ кг) (250 руб/г)

Тритий ~ 150 кг (необходимо нарабатывать в реакторе)



Бридинг на литии > ${}^6\text{Li} + n = {}^3\text{T} + {}^4\text{He} + 4,8 \text{ МэВ}$ (необходимо 300 кг/год ${}^6\text{Li}$
(в земле лития около 10¹¹ кг, в океане - около 10¹⁴ кг)

Безопасность и экология:

- невозможность взрыва реактора
- отсутствие выбросов, воздействующих на климат
- отсутствие продуктов деления тяжелых ядер

Installation of First Large Scale Components



Установка первого 400 кВ трансформатора (4 из 7 уже поставлены). Ответственность за поставку - США, изготовлено в Южной Корее, установлено EUDA.

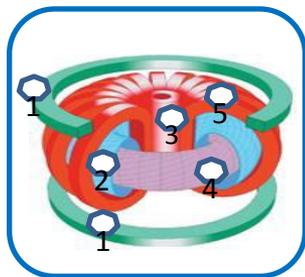
Россия. Основные вехи.

1951 - 1960

ТОКАМАК (ТОроидальная КАмера МАгнитная Катушка)



И.Е.Тамм А.Д.Сахаров



1971 - 1990

1972 году Л.А.Арцимовичем и В.Д.Шафрановым предложена концепция вытянутого сечения с полоидальным дивертором.

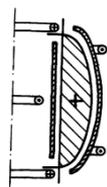


Рис. 2

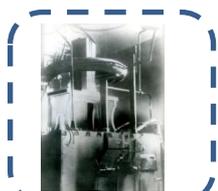
Т-9 Вытянутое поперечное сечение
↓
Т-12 Полоидальный TVD дивертор



Л.А.Арцимович В.Д.Шафранов

Термояд в России.
История

1961 - 1995



Токамак ТМП - 1953 г.



Т-3а

Т-7
NbTi



Т-15



Т-10

Гибридный термоядерный реактор (1978)

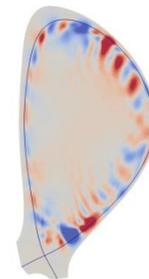


ТСП

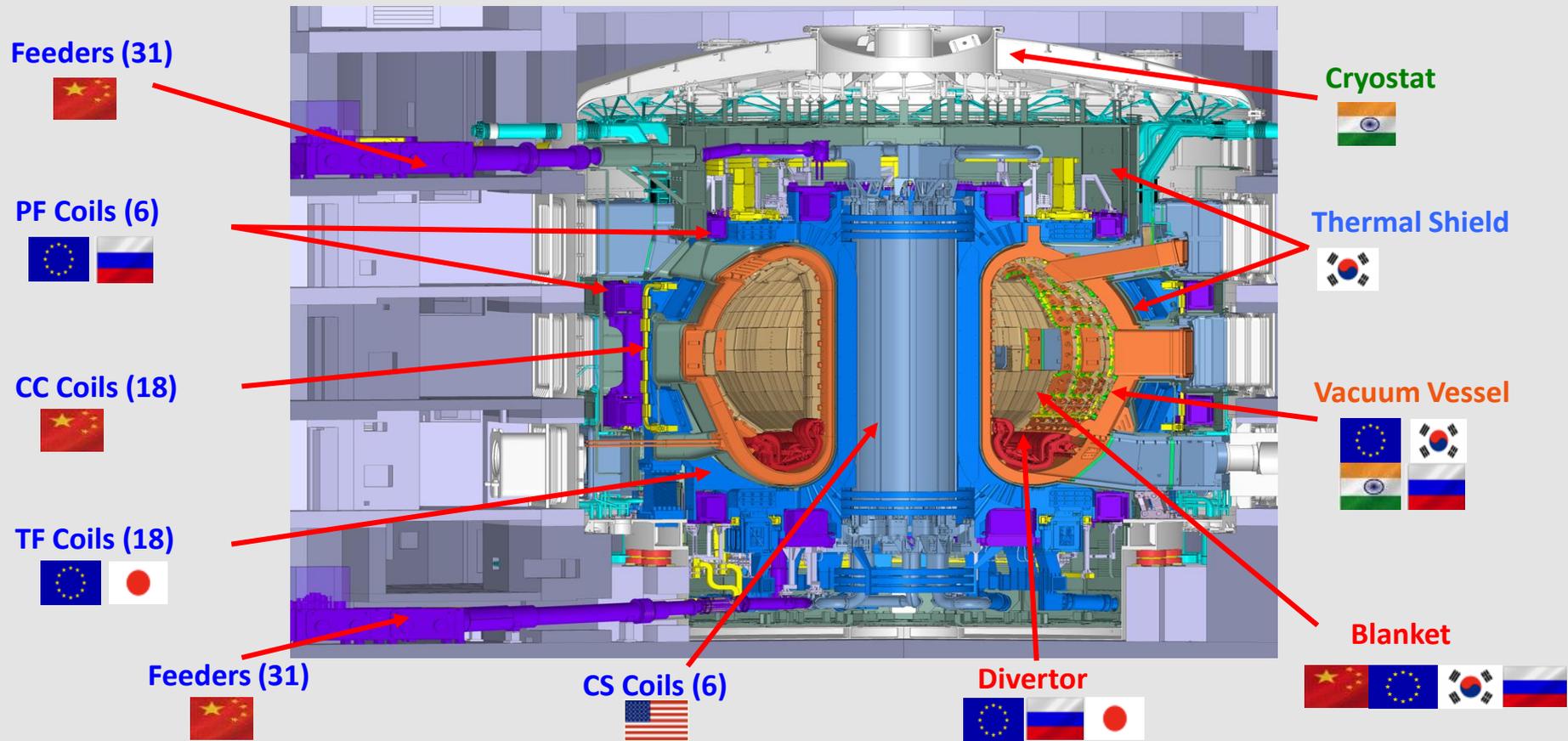
Направление Токамаков

ОТР (РФ, 1988)

INTOR (1980)
↓
ITER



Поставки в натуральном виде (In-kind Contribution)



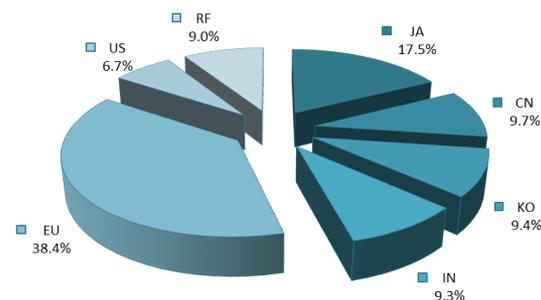
- Крупнейший международный проект in-kind кооперации, реализующий уникальные инновационные технологии
- EPC(Engineering, Procurement and Construction) проект, базирующийся на НИОКР
- Совместимость однотипных систем, изготовленных различными Поставщиками.
- Системы должны соответствовать требованиям Ядерного Регулятора Франции (Installation Nucléaire de Base - INB)

Прошло 10 лет - можно проанализировать

Проект по мере развития: видоизменяется - уникальность проекта
усложняется - глубина проработки

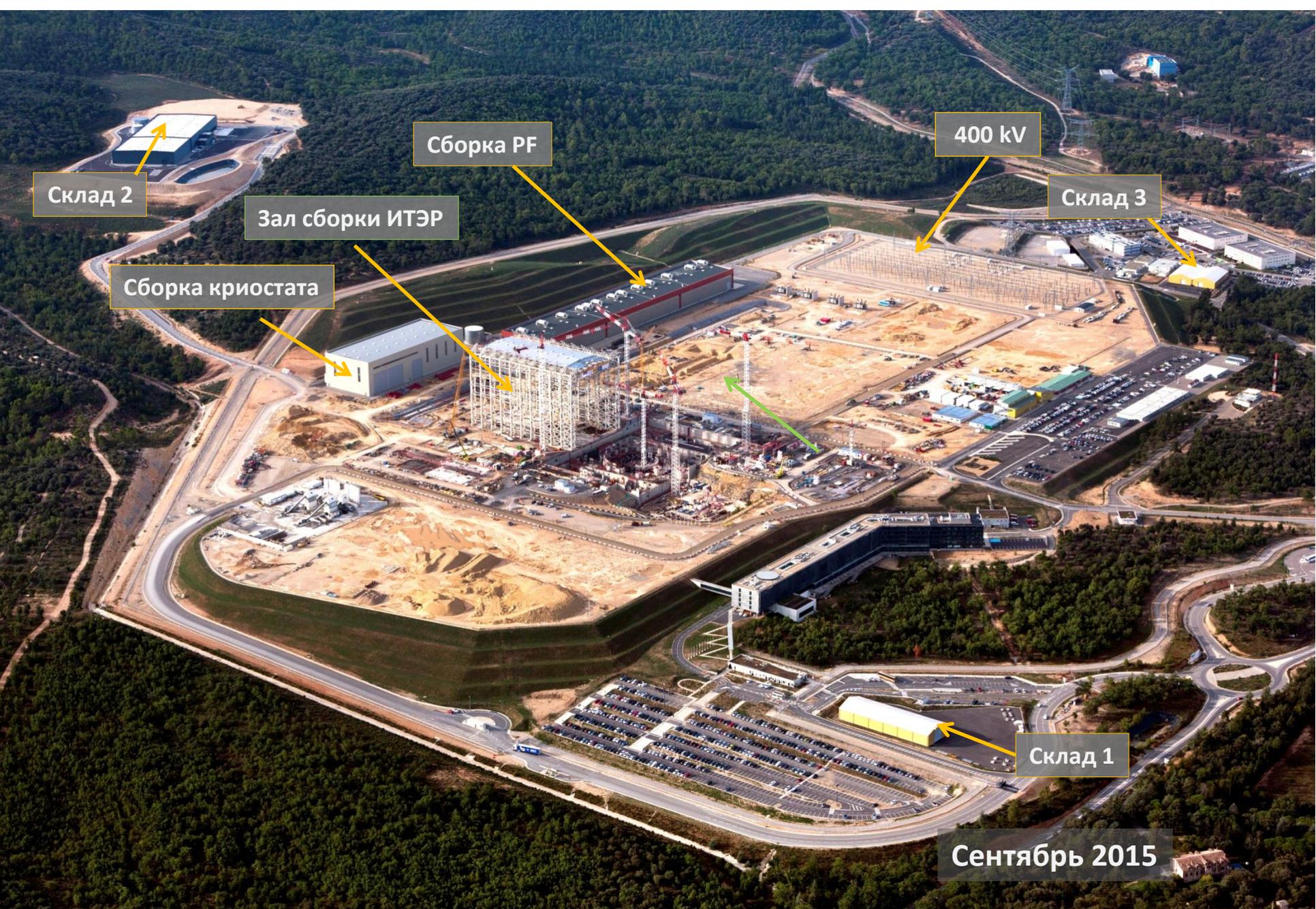
Закладывалось:

- Межправительственное соглашение
- In kind / поставка в натуральном виде
- Инновационные решения
- Система качества
- Глубина проработки проекта - постепенность рассмотрения (Rolling wave)
- Возможность заказывать работы и материалы по всему миру
- Участвуют и получают информацию только члены проекта.
- Решения принимаются консенсусом (как в Совете Безопасности)



Выгода: платим 9.8% от стоимости, получаем 100% информации.
получаем - реальный токамак + виртуальный токамак
развиваем наукоемкие производства в России

Просчеты: Первая плазма = 2016 > 2019(20) > 2025



Склад 2

Зал сборки ИТЭР

Сборка криостата

Сборка PF

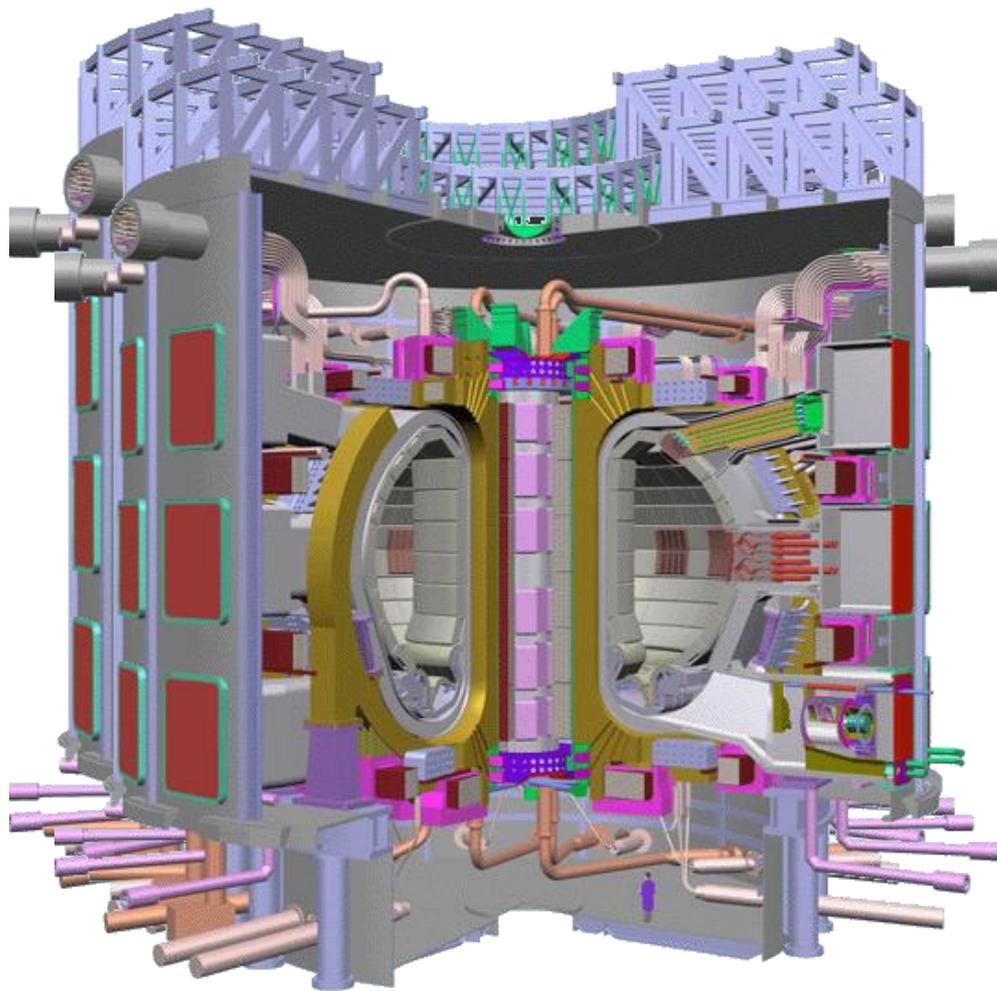
400 kV

Склад 3

Склад 1

Сентябрь 2015

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР ИТЭР

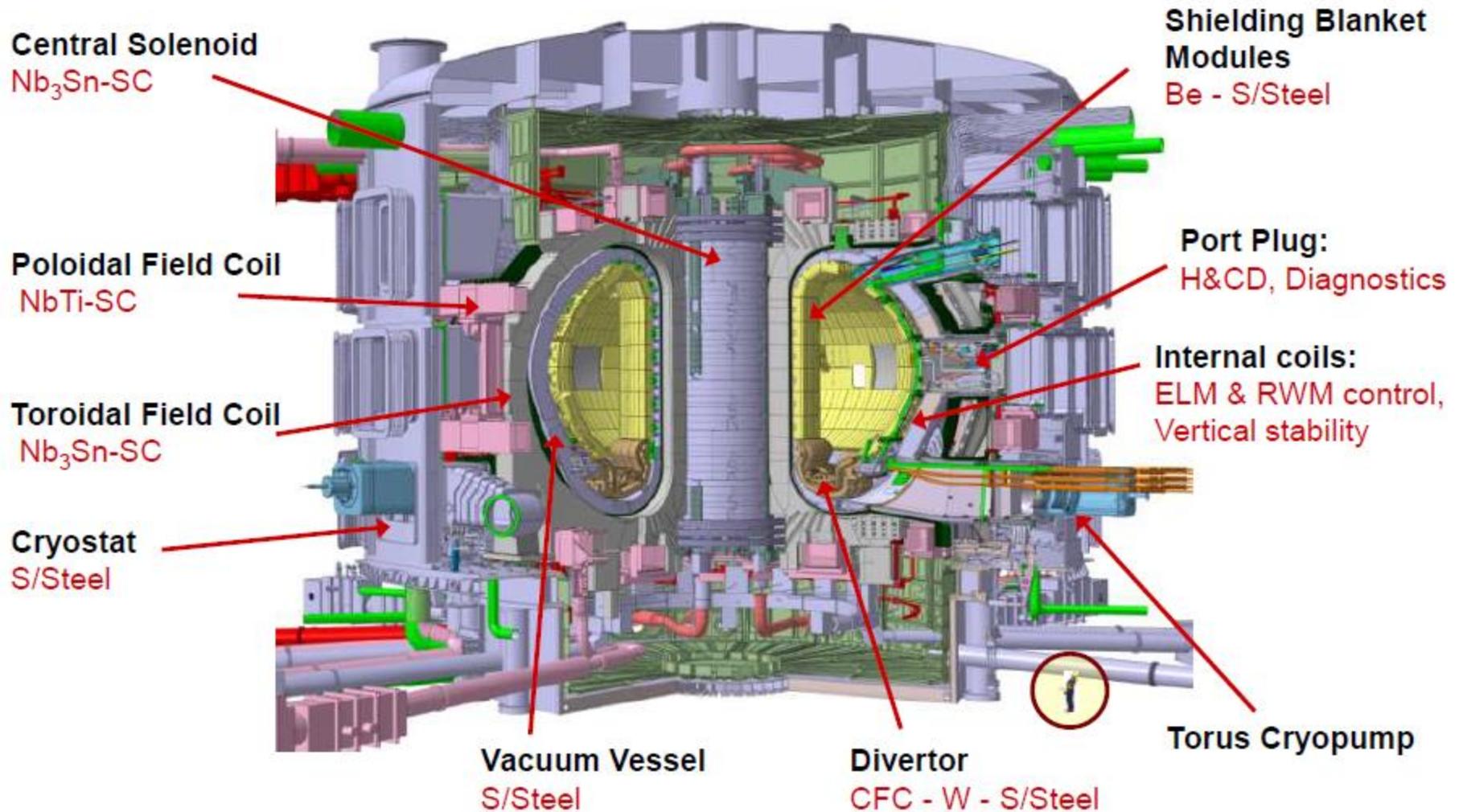


- ✧ Достижение 500 МВт термоядерной мощности при $Q=10$ при индуктивном поддержании тока в течение 400 с
- ✧ Возможность постоянного режима ($\tau \cong 3000$ с) с $Q \sim 5$ при безындуктивном поддержании тока
- ✧ Испытание существенных технологий и компонент реактора
- ✧ Испытание модулей blankets для наработки трития

Срок сооружения \sim 2024 год

Первый эксперимент по физике термоядерного горения

Токамак ИТЭР – использование различных конструкционных материалов



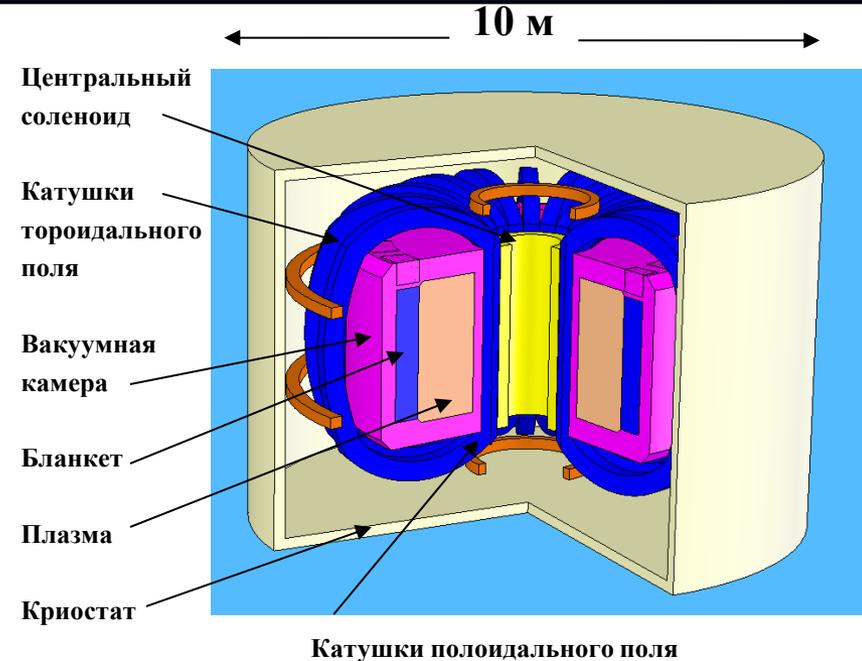


Опирающаяся на 493 сейсмических подушки, плита нижнего уровня “В2” держит 440 000 тонный вес конструкций токамака. Заливка бетоном плиты нижнего уровня В2 закончена в августе 2014. Продолжается установка внутренней стены, опалубки уровня В1, усиление биозащиты.

Новые технологии: термоядерный источник нейтронов (ТИН) – наработчик топлива АЭС

Основные параметры плазмы

Мощность синтеза D+T	5	МВт
Мощность деления U238, Th232	145	МВт
Наработка Pu	85	кг/год
Потребление T	275	г/год
Электрическая мощность	50	МВт
Энергия термоядерного нейтрона	14,06	МэВ
Нейтронная нагрузка (14 МэВ)	0,1	МВт/м ²
Интенсивность источника нейтронов	$1,8 \cdot 10^{18}$	1/с
Большой радиус	2,34	м
Малый радиус	0,75	м
Вытянутость	2	



ТИН обеспечит демонстрацию новых технологий:

- наработки ядерного топлива на промышленном уровне
- выработки энергии синтез-деление
- трансмутации нуклидов облученного ядерного топлива
- воспроизводства трития

- Россия участвует в проектировании и сооружении международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Обеспечение этих отечественных работ в области УТС кадрами является приоритетной задачей системы образования РФ.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

- В настоящее время экспериментальные исследования в области УТС проводятся в научных центрах Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска и др. В Москве экспериментальные работы проводятся на токамаках Т-10 (НИЦ «Курчатовский институт»), Т-11М (ТРИНИТИ), стеллараторе Л-2 (ИОФ РАН), исследования в обеспечение технологии термоядерных материалов проводятся на плазменных установках КСПУ-Т (ТРИНИТИ), ЛЕНТА (НИЦ «Курчатовский институт») и других экспериментальных стендах.

- Значительное продвижение экспериментальных исследований ожидается после планируемого в 2018 г. запуска в эксплуатацию токамака Т-15, сооружаемого в НИЦ «Курчатовский институт». Кадровый состав существующих лабораторий научных центров, занимающихся исследованиями в области УТС, характеризуется высоким средним возрастом сотрудников и недостаточным персоналом для обеспечения работ по проектированию и сооружению реакторных систем следующего поколения. **Кадровое обеспечение продолжения работ в России по проблеме УТС на настоящий момент можно считать неудовлетворительным.** Это связано как с известными экономическими проблемами прошлых лет, так и с изменением задач и уровня сложности высокотехнологичных систем современных токамаков, что демонстрируется уровнем систем ИТЭР. Наиболее остро стоит вопрос подготовки специалистов инженерной направленности для проектирования, строительства и обслуживания систем токамака-реактора, таких как системы диагностики плазмы, нагрева плазмы, магнитная и вакуумная, электрические и инженерные сети.

- Подготовка специалистов для работы по программе УТС ведется на кафедрах НИУ «МИФИ», НИУ «МЭИ», МФТИ, МГУ, МГТУ, СПбГУ, НГУ и др. Не все эти кафедры имеют образовательные программы с инженерной направленностью для подготовки специалистов, способных обслуживать и проектировать инженерные системы современных термоядерных установок. Такие образовательные программы следует ввести на кафедрах в дополнение к существующим программам. Пилотный проект такой модернизации образовательной программы в области УТС можно реализовать на кафедре общей физики и ядерного синтеза «НИУ «МЭИ» (ОФИЯС).

- Кафедра ОФИЯС «НИУ «МЭИ» готовит бакалавров и магистров по специальности «Термоядерные реакторы и плазменные установки» в рамках направления «Ядерная энергетика и теплофизика». по профилю бакалавров «Термоядерные реакторы и плазменные установки» и магистерской программе «Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез». Занятия согласно образовательным программам и учебным планам проводят как преподаватели кафедры – штатные сотрудники НИУ «МЭИ», так и сотрудники филиала кафедры в НИЦ «Курчатовский институт». Студенты начинают практические занятия в лабораториях НИЦ «Курчатовский институт» на профилирующей практике в конце 4-го семестра обучения, далее продолжается производственная практика в конце 6-го семестра обучения в бакалавриате, научно-исследовательская работа и научно-производственная практика в магистратуре. Выполнение студентами практики и дипломной работы в НИЦ «Курчатовский институт» обеспечивает возможность пройти глубокую подготовку для работы на диагностических и инженерных системах сооружаемого токамака Т-15.

- Стоит задача, чтобы такие специалисты стали основой инженерного штата комплекса токамака Т-15. Такие специалисты станут кадровым резервом для обеспечения российского участия в проекте международного токамака ИТЭР. Дальнейшая подготовка (в течение 3-5 лет) такого кадрового резерва на базе Российского агентства ИТЭР позволит направлять этих специалистов на работу в ИТЭР (см. информацию в [1]), учитывая квотирование участия России в строительстве и эксплуатации ИТЭР. Эти кадры в дальнейшем составят основу инженерного штата при сооружении отечественного токамака-реактора по национальной программе УТС. Следует отметить, что в настоящее время представимость российских специалистов в ИТЭР недостаточна и этот острый вопрос необходимо решать в ближайшие годы. Для обеспечения потребности российской программы УТС инженерно-физическими кадрами требуется подготовить в ближайшие 10 лет более 300 специалистов.

- Исходя из этого предлагается дополнить образовательную программу инженерными дисциплинами, востребованными при выполнении проектных и эксплуатационных работ при сооружении токамака-реактора. Основой подхода к такой программе будет изучение систем сооружаемого токамака-реактора ИТЭР, которые на настоящий момент представляют собой высокотехнологические системы самого передового мирового уровня (включая сверхпроводящие магнитные системы, материалы нового поколения, мощные высокочастотные нагревные системы и т.д.). Основой дополнительных программ будут курсы лекций ведущих российских специалистов проектного центра ИТЭР и НИЦ «Курчатовский институт», вовлеченных в создание систем ИТЭР. Занятия следует проводить с привлечением технических средств удаленного доступа к базам данных ИТЭР и с демонстрацией натуральных макетов систем ИТЭР, изготавливаемых в России. Следует обеспечить дистанционный доступ к таким лекциям студентов других ВУЗов. Такие возможности, существующие в настоящий момент в российском агентстве ИТЭР, обеспечат подготовку специалистов мирового уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

- Подготовка специалистов по специальности «Термоядерные реакторы и плазменные установки» относится к приоритетным задачам образования для кадрового обеспечения отечественной программы УТС. Для обеспечения потребности российской программы УТС инженерно-физическими кадрами требуется подготовить в ближайшие 10 лет более 300 специалистов. Стоит задача интенсификации подготовки инженерных специалистов для участия России в международном проекте ИТЭР. Для таких масштабных образовательных задач следует интенсифицировать усилия по подготовке инженерно-физических кадров на базе существующих кафедр ведущих ВУЗов России. Предлагается дополнить образовательные программы курсами лекций ведущих российских специалистов проектного центра ИТЭР и НИЦ «Курчатовский институт», вовлеченных в создание систем ИТЭР.