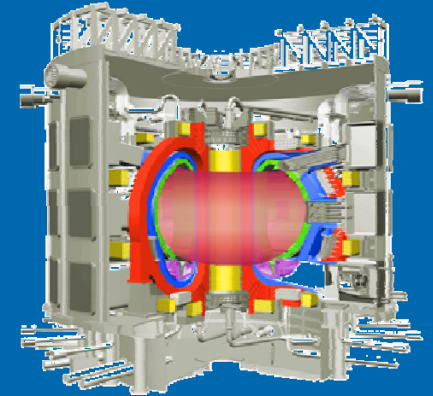


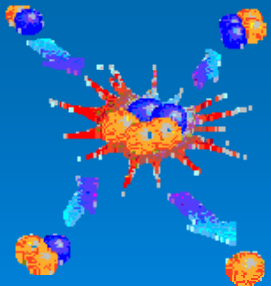
Физички факултет Универзитета у Београду

*Интернационални
Термонуклеарни
Експериментални
Реактор*



КАКО НАПРАВИТИ ЗВЕЗДУ У ЛАБОРАТОРИЈИ

Др Иван Дојчиновић



A world map at night, showing city lights and illuminated landmasses against a dark background. The map is centered on the Atlantic Ocean, with North and South America on the left and Europe and Africa on the right. The map is overlaid with a dark blue semi-transparent layer.

Clean Energy: Humankind's Challenge

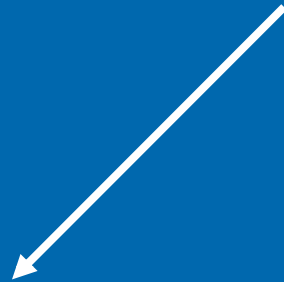
- Заштита животне средине

- Недостатак енергије

- Ефекат стаклене баште

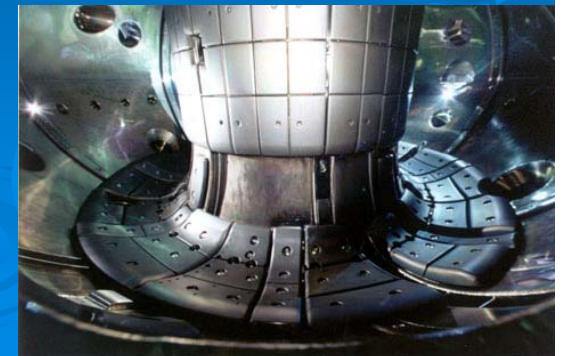
Решење проблема недостатка енергије: *Фузија*

- Температура средине 100-200.000.000 К

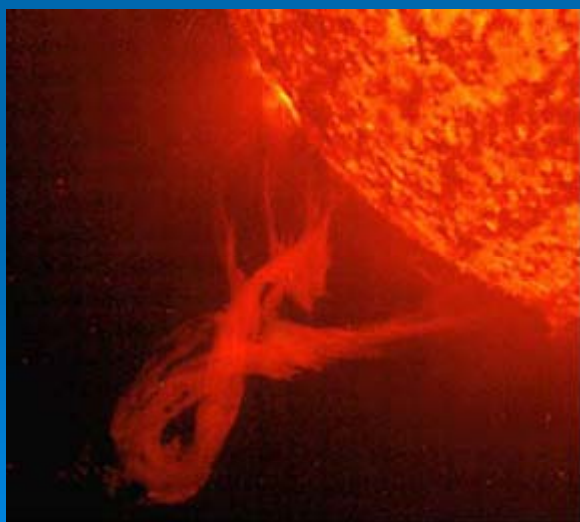


Фузиона плазма

- Магнетно конфинирање
- Инерцијално конфинирање



1. Плазма





Електрична пражњења



ПРИМЕНЕ ПЛАЗМЕ:

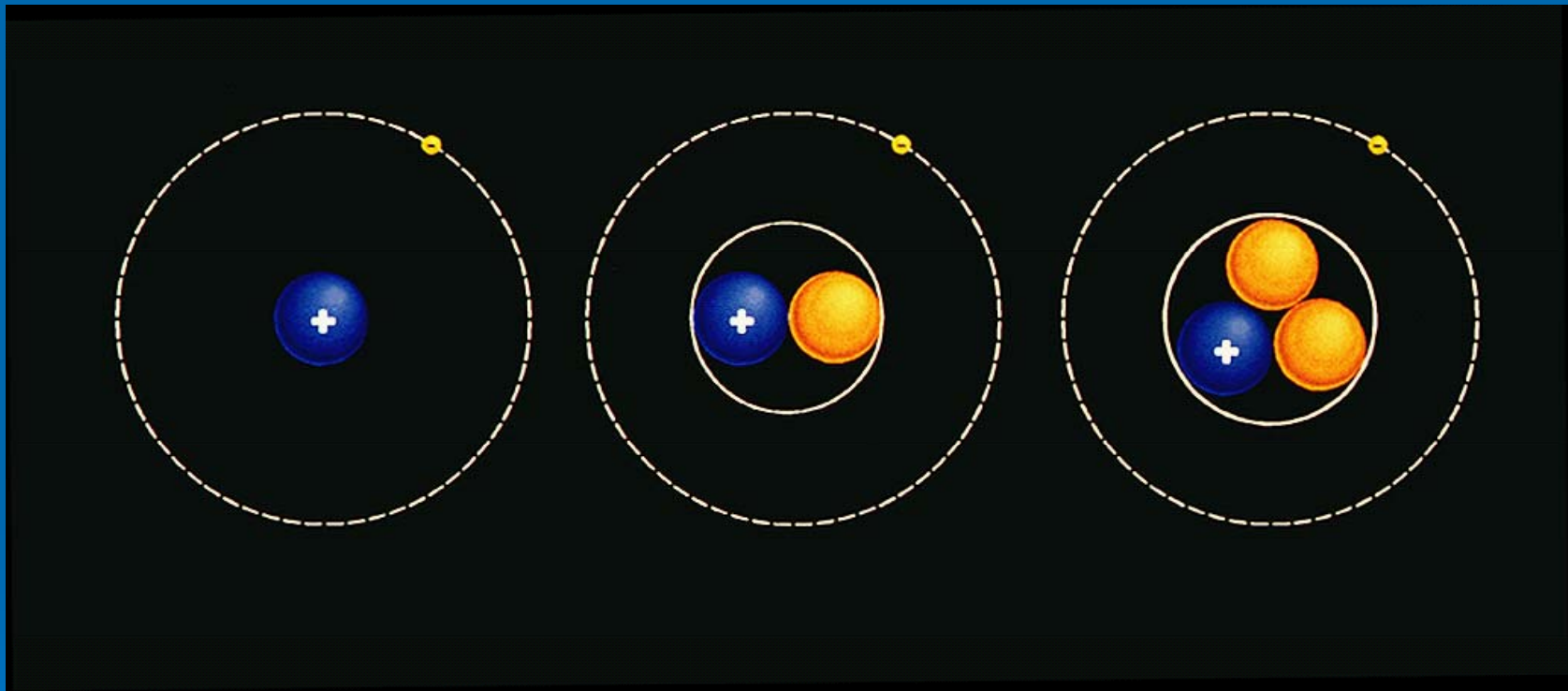
- Од фузионе плазме до израде чипова и плазма екрана
- Очвршћивање и обрада поршина, наношење танких слојева
- Деградација хемијских једињења, стерилизација

Израда полупроводничких компоненти:

- 4-битни микропроцесори:
депозиција у електролитичком раствору
- 64-битни микропроцесори, гигахерцне брзине и гигабајтне меморије:

плазма

2. Фузија

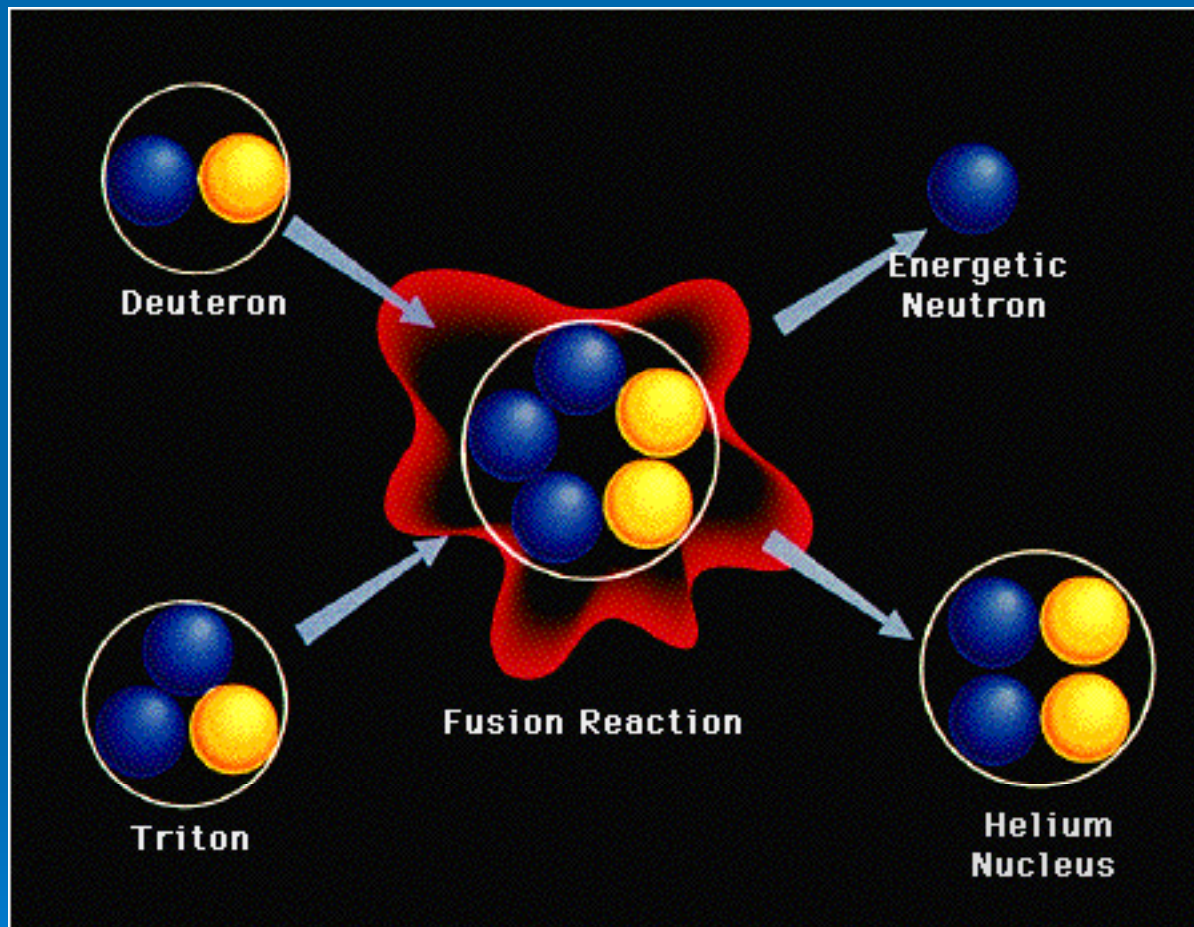


Водоник

Деутеријум

Трицијум

D-T реакција



- Позитивни енергетски биланс термонуклеарне реакције

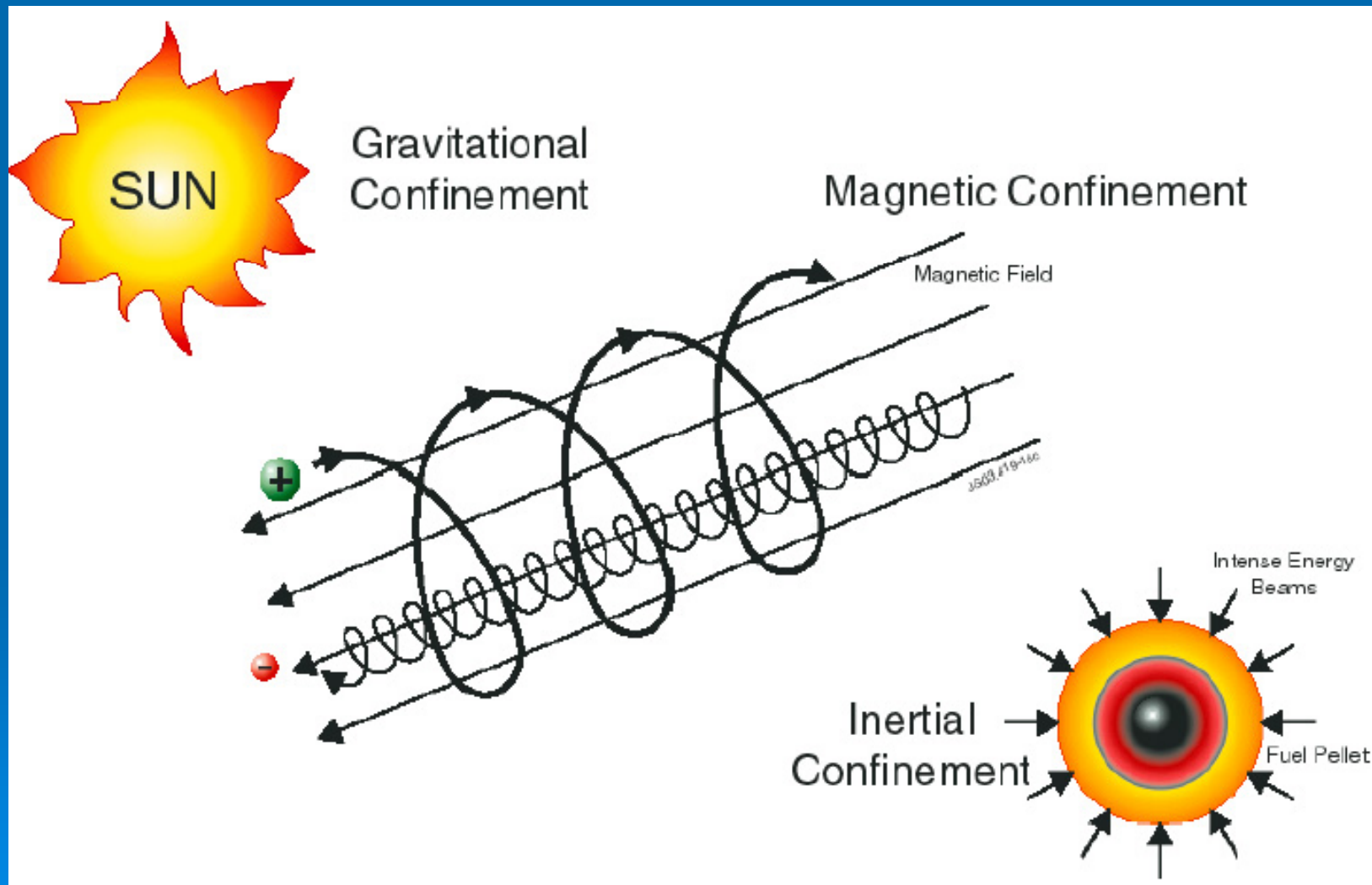
- Енергетски праг за D-T реакције $\sim 20 \text{ keV}$ (D:T=50:50)

- Температура плазме $100\text{-}200 \text{ MK}$

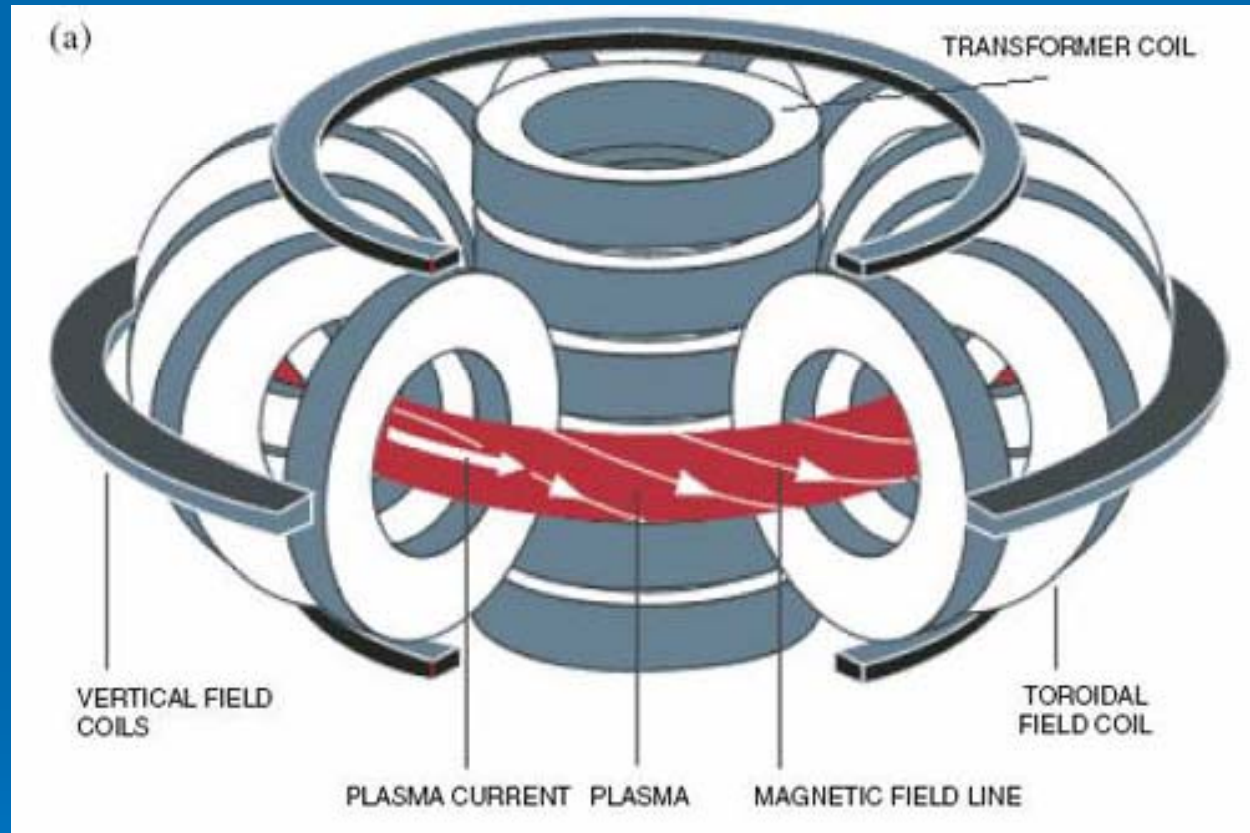
- Лавсонов (Lawson) критеријум: $n \cdot \tau \geq 3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$

- FTP (Fusion Triple Product): $n \cdot T \cdot \tau > 6 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s}/\text{m}^3$

3. Конфинирање плазме



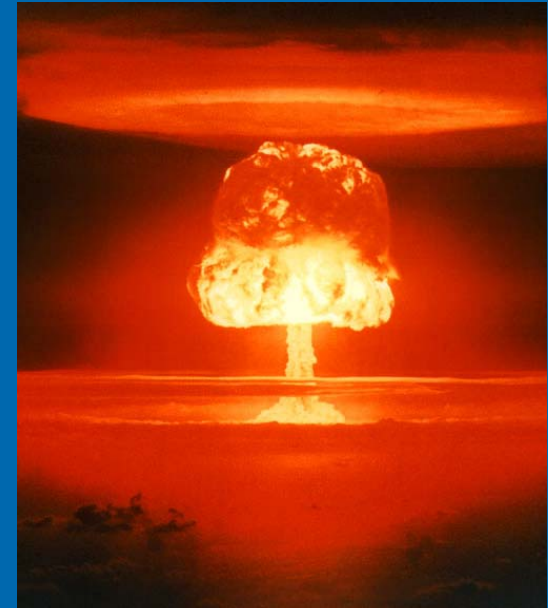
Магнетно конфинирање у токамаку



- Магнетно поље ~ 5 T
- Струја плазме 5-10 MA
- За ТН реакције неопходно конфинирање ~ 1 s при $10^{20} m^{-3}$

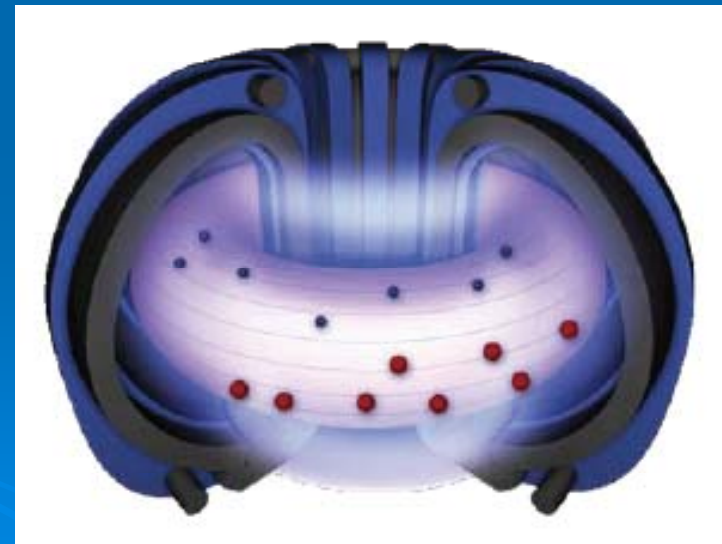
Неконтролисана фузија - експлозија

- Фузија је први пут остварена на Земљи 1952. године, приликом пробе прве хидрогенске бомбе

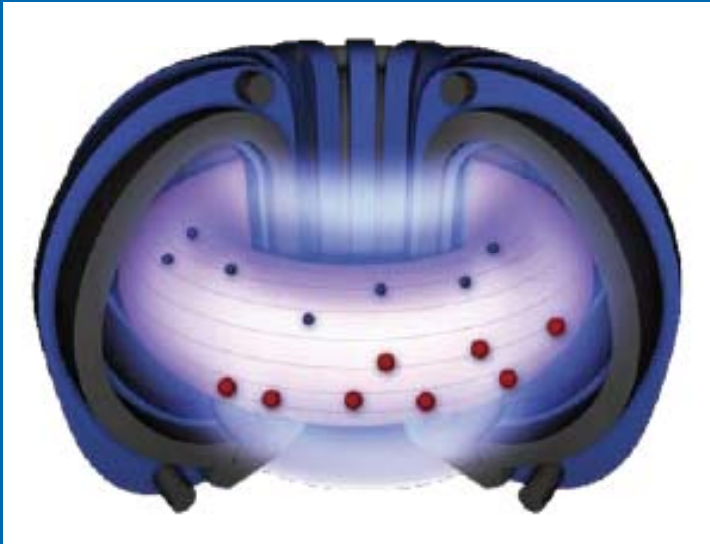


Контролисана фузија

- Термонуклеарни реактори

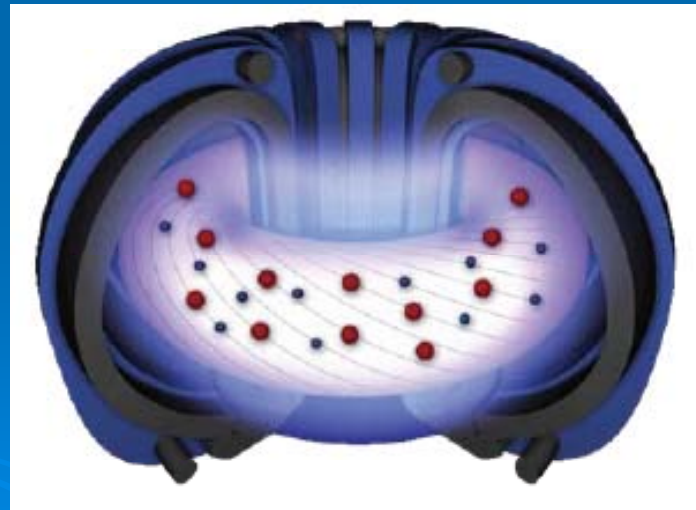


Торус



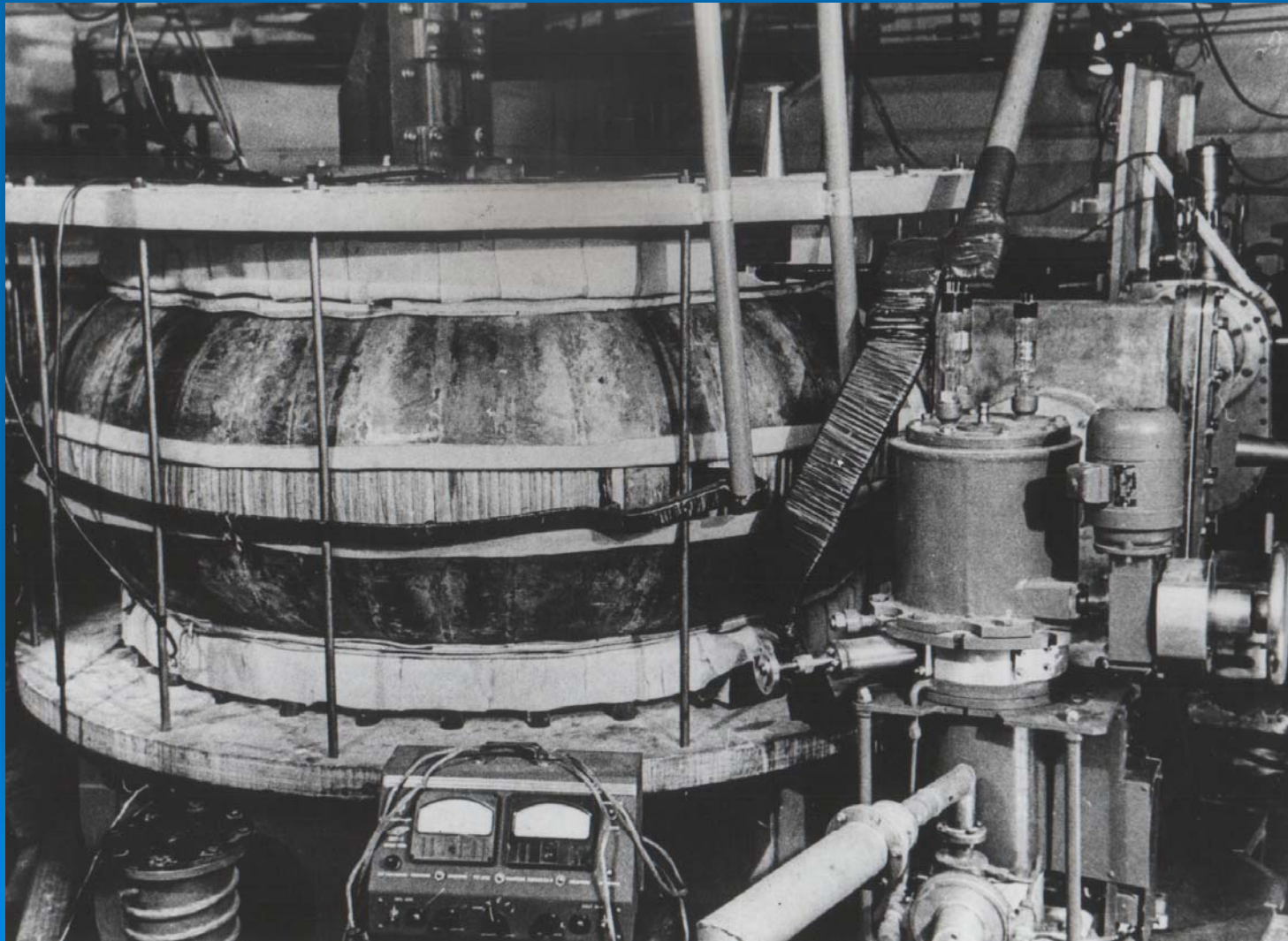
Торус

Хеликоидно
поље



Токамак Т-1 (1957.)

Институт Курчатов, СССР



1951. ТОКАМАК: Сахаров и Там

1957. T-1 (1,25 m)

1968. T-3 (2 m): 10 МК, 20 ms

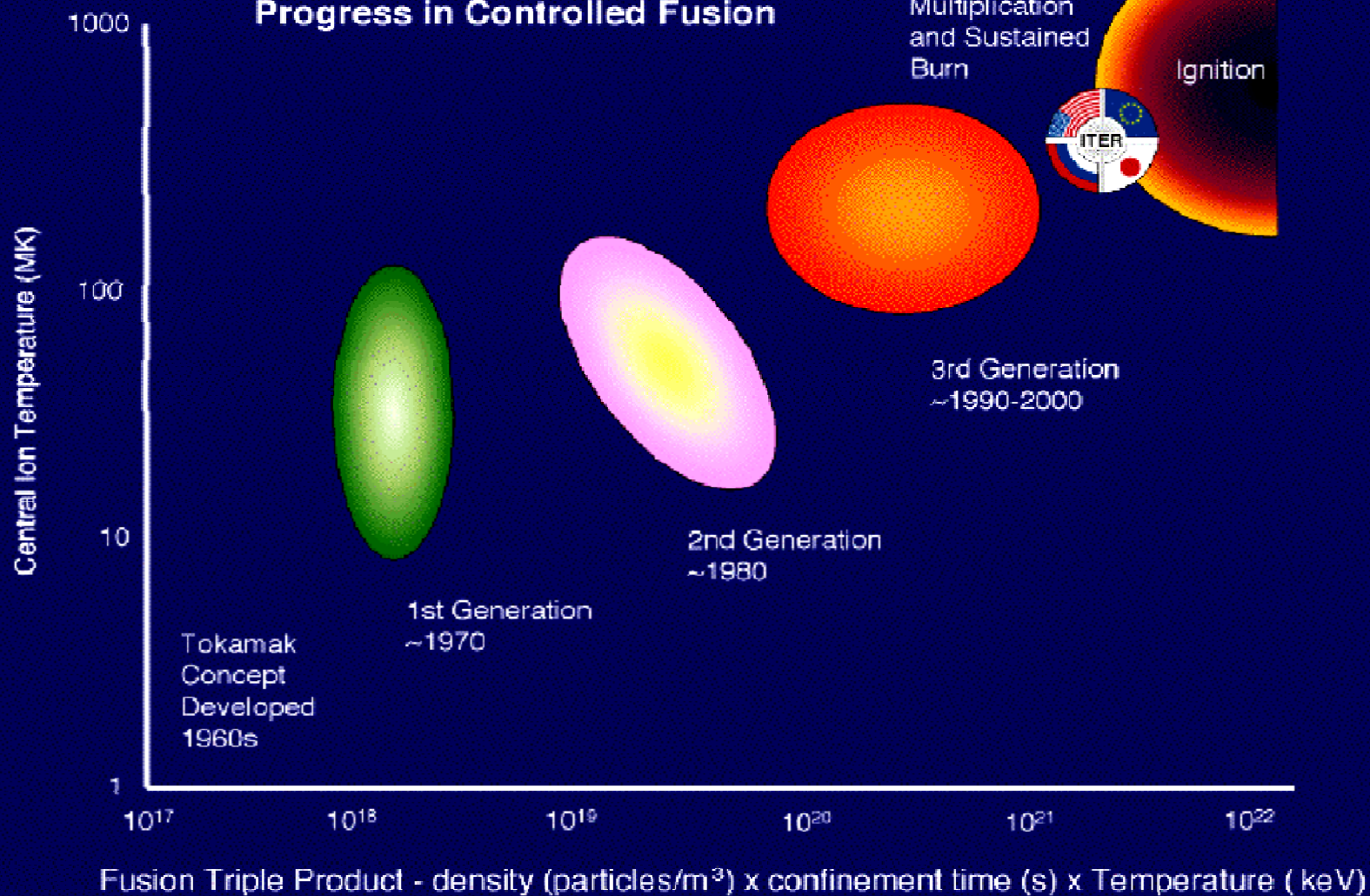
1969. Тим из Калама у Иституту "Курчатов"

1969. T-3: први термонуклеарни неутрон

1979. T-7: први токамак са суперпроводницима



Progress in Controlled Fusion



1991. JET: прва D-T плазма

100 МК, $Q \approx 0.05$, фузиона снага 1.7 MW

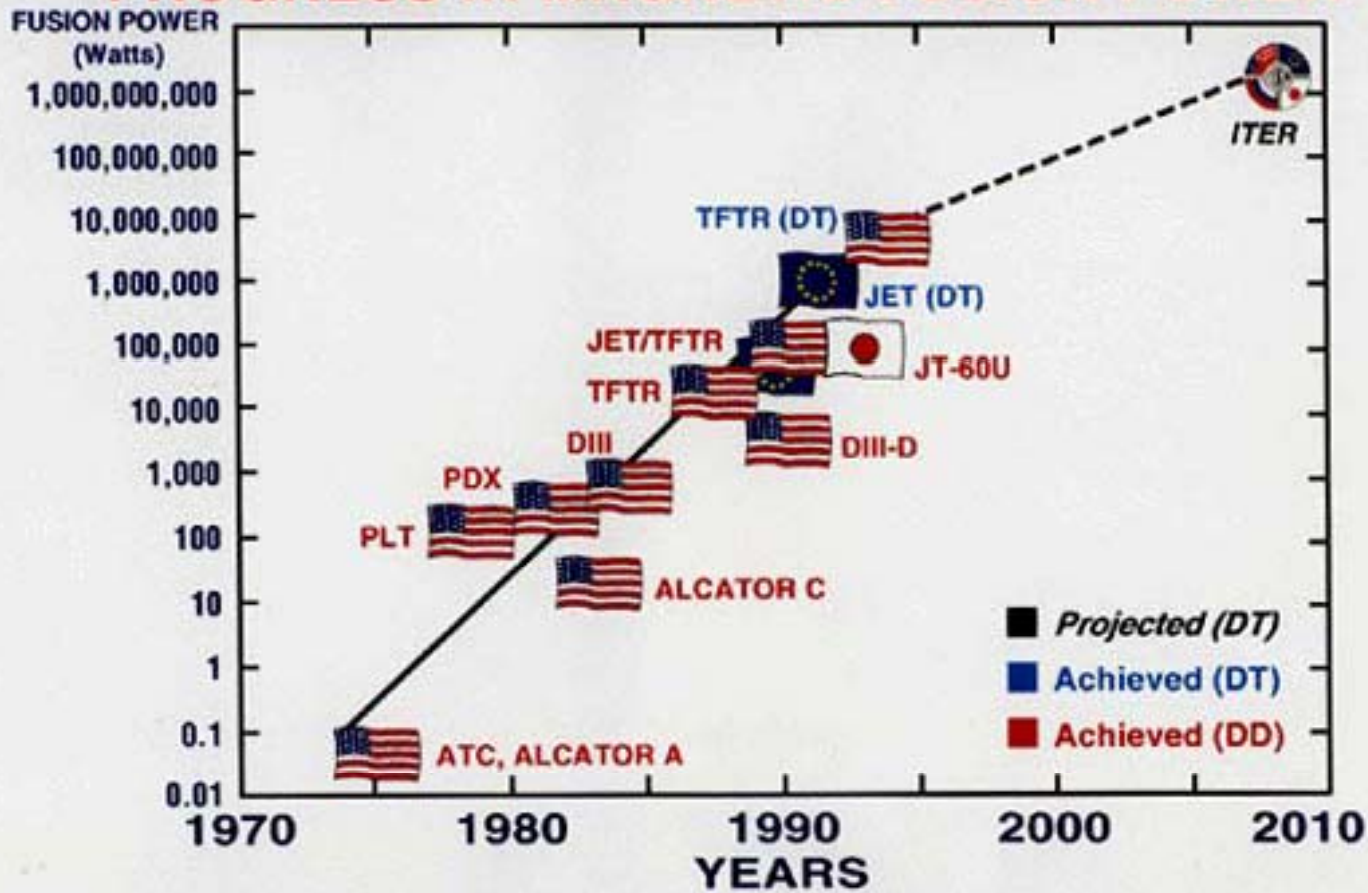
1994. TFTR: $Q \approx 0.3$, фузиона снага 10.7 MW

1995. TFTR: 510 МК

1997. JET: 300 МК, $Q \approx 0.65$, фузиона снага 16.1 MW

2003. JT-60U: време конфинирања 65 s

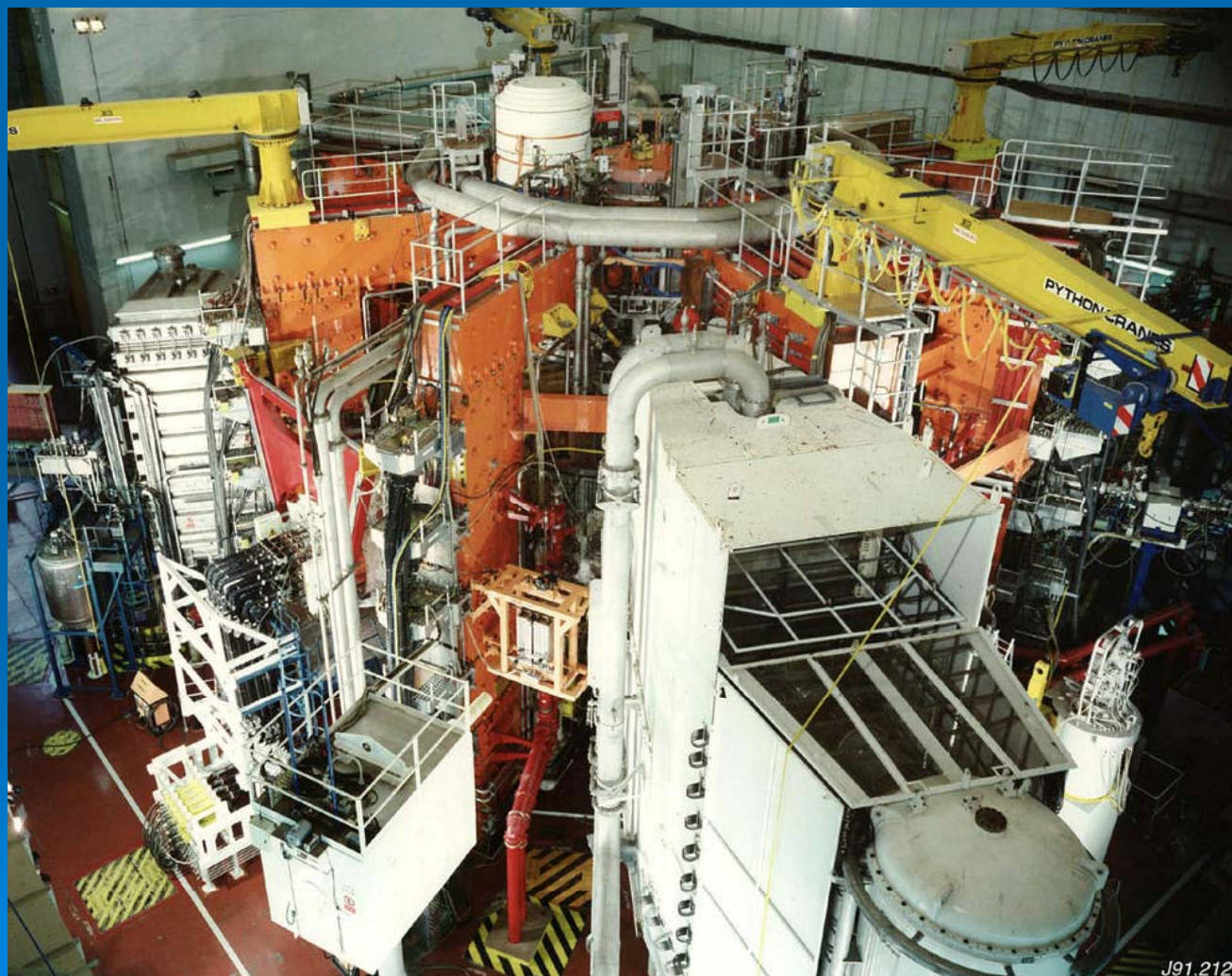
PROGRESS IN MAGNETIC FUSION POWER



PLT	Princeton Large Torus	ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
PDX	Princeton Divertor Experiment	DIII & DIII-D	General Atomics Tokamak Experiments
JET	Joint European Torus	ATC & TFTR	Princeton Plasma Physics Laboratory
JT-60	Japan	ALCATOR A, C	Massachusetts Institute of Technology

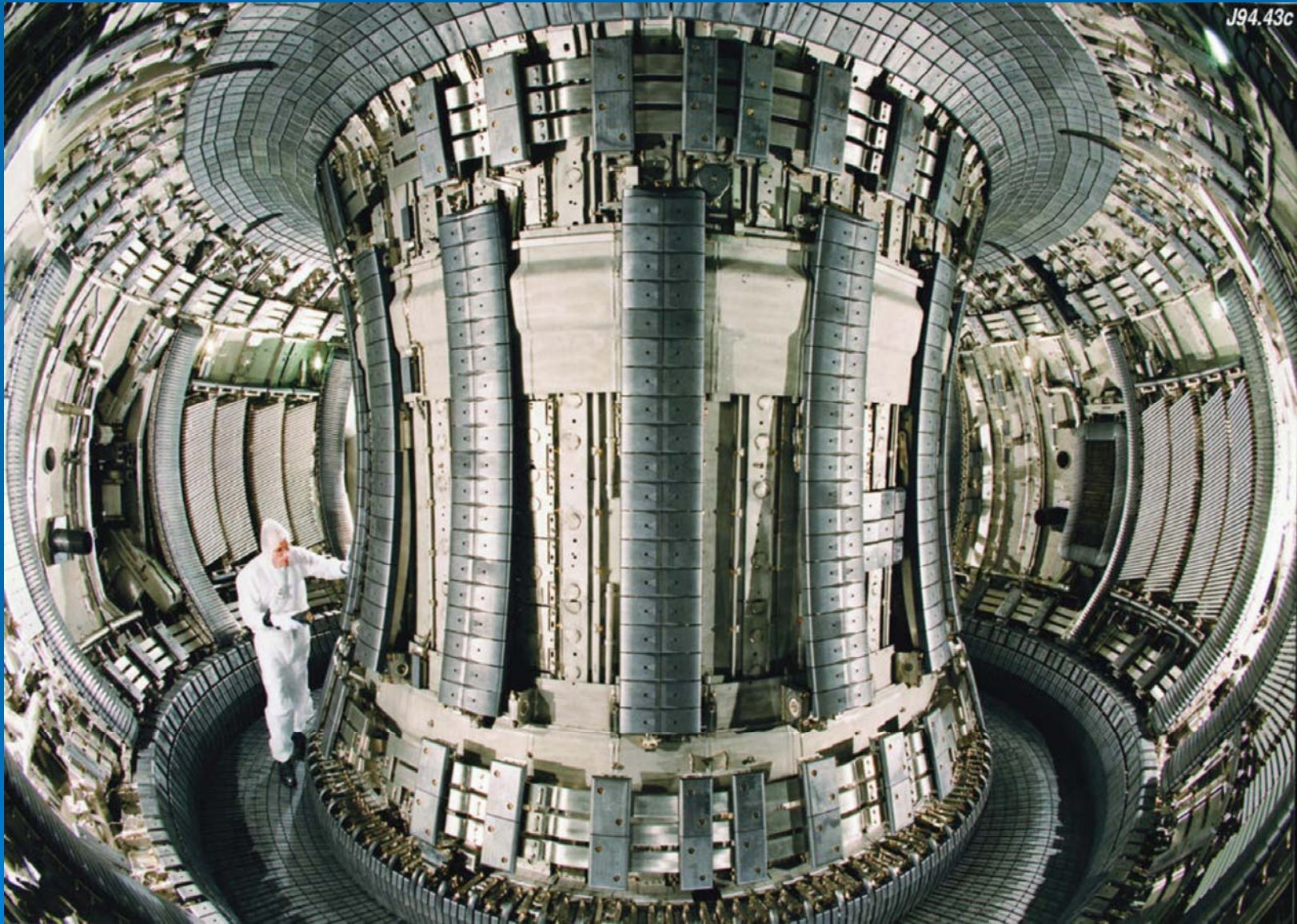
JET (Joint European Torus)

највећа фузиона машина на свету, једина која ради са трицијумом;
рекордна снага фузије **16,1 MW (1997.), 6 MA**

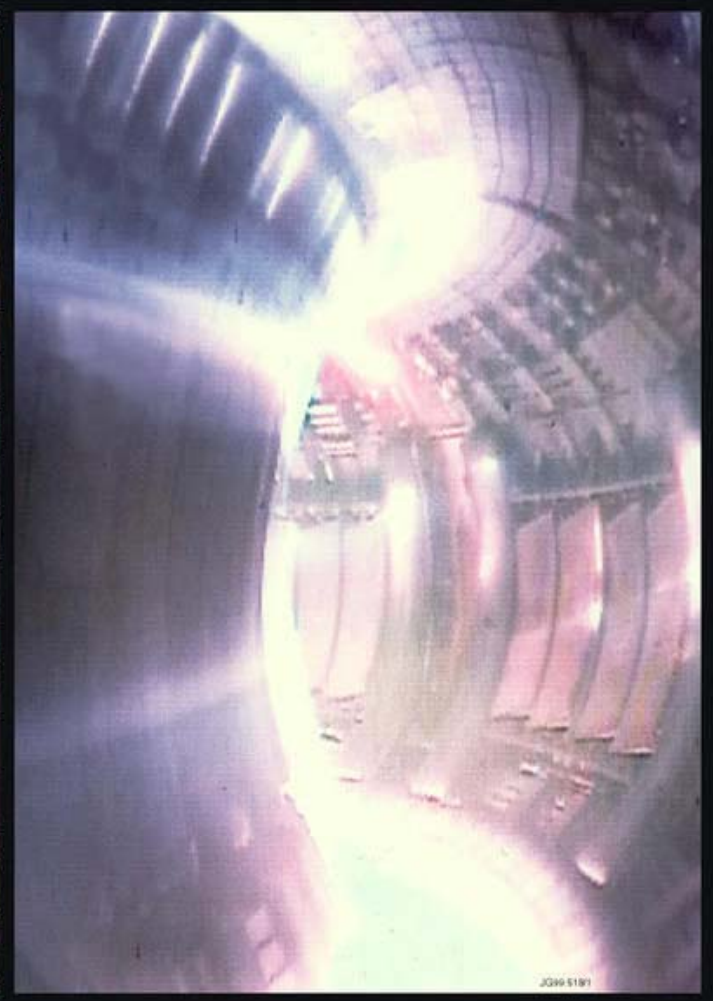
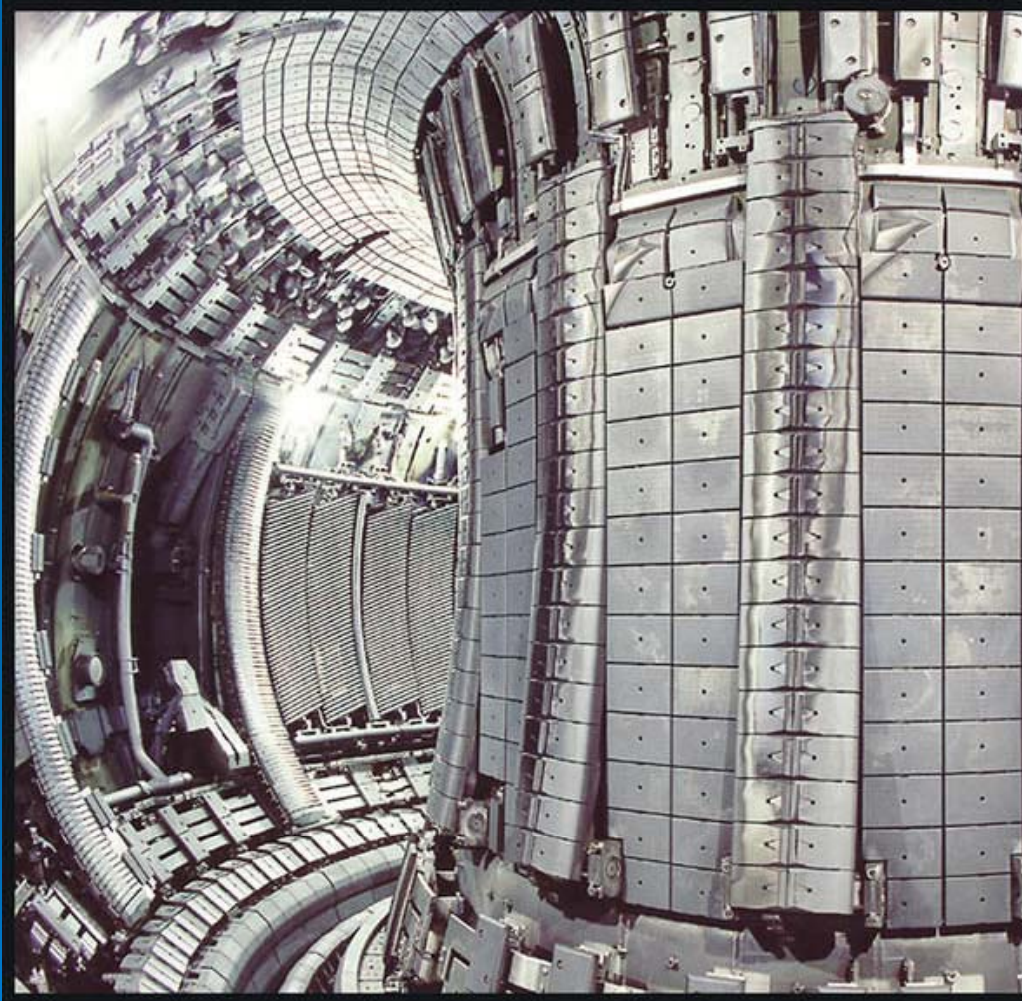


1983→
1992→

- Први експеримент са трицијумом 1991.



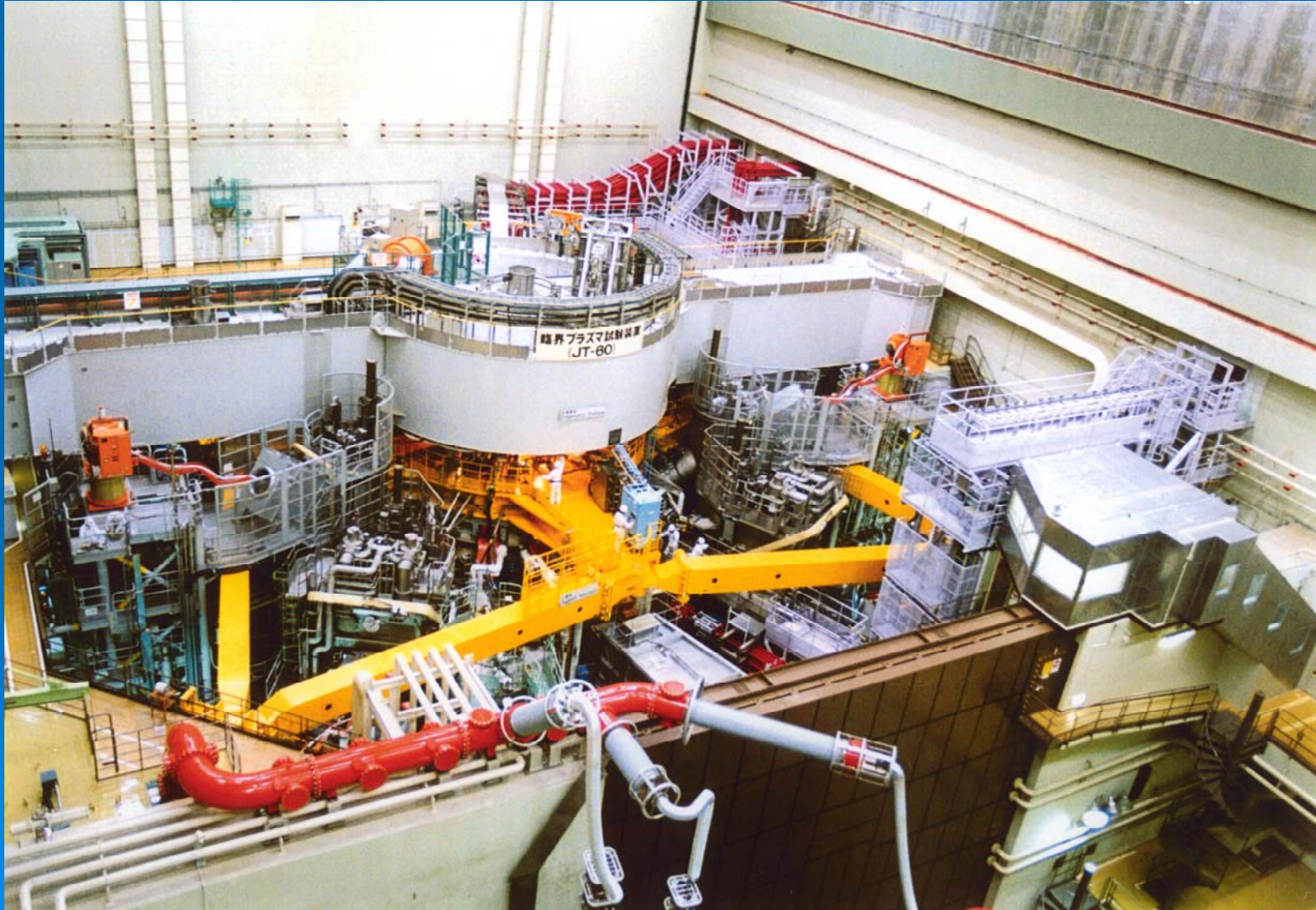
JET



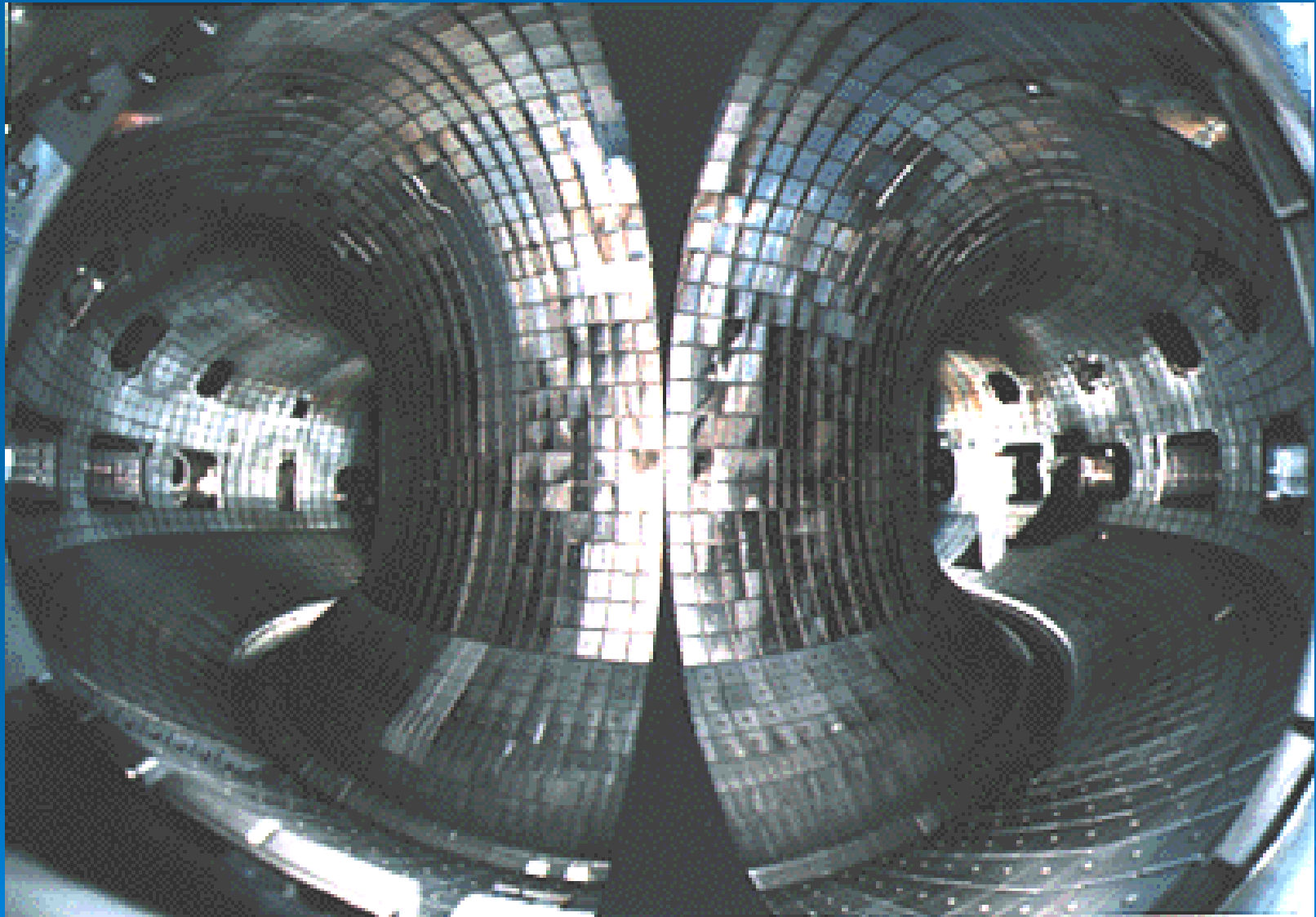
JET

Токамак JT-60U

JAERI, Naka, Japan
65 s (2003.), $Q \sim 1.25$, 520 MK



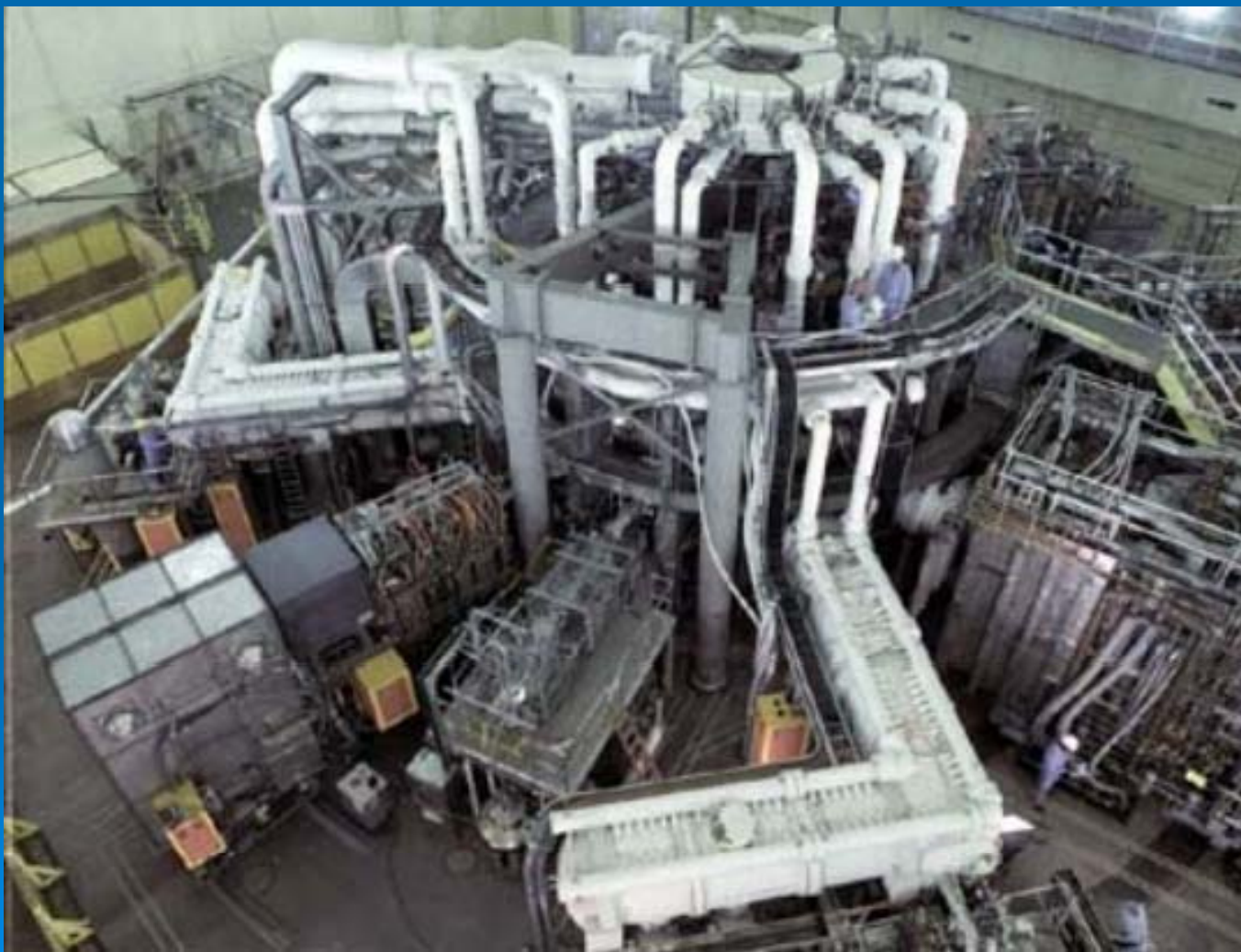
1985→
1991→



JT-60U

TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)

PPPL, Princeton, USA



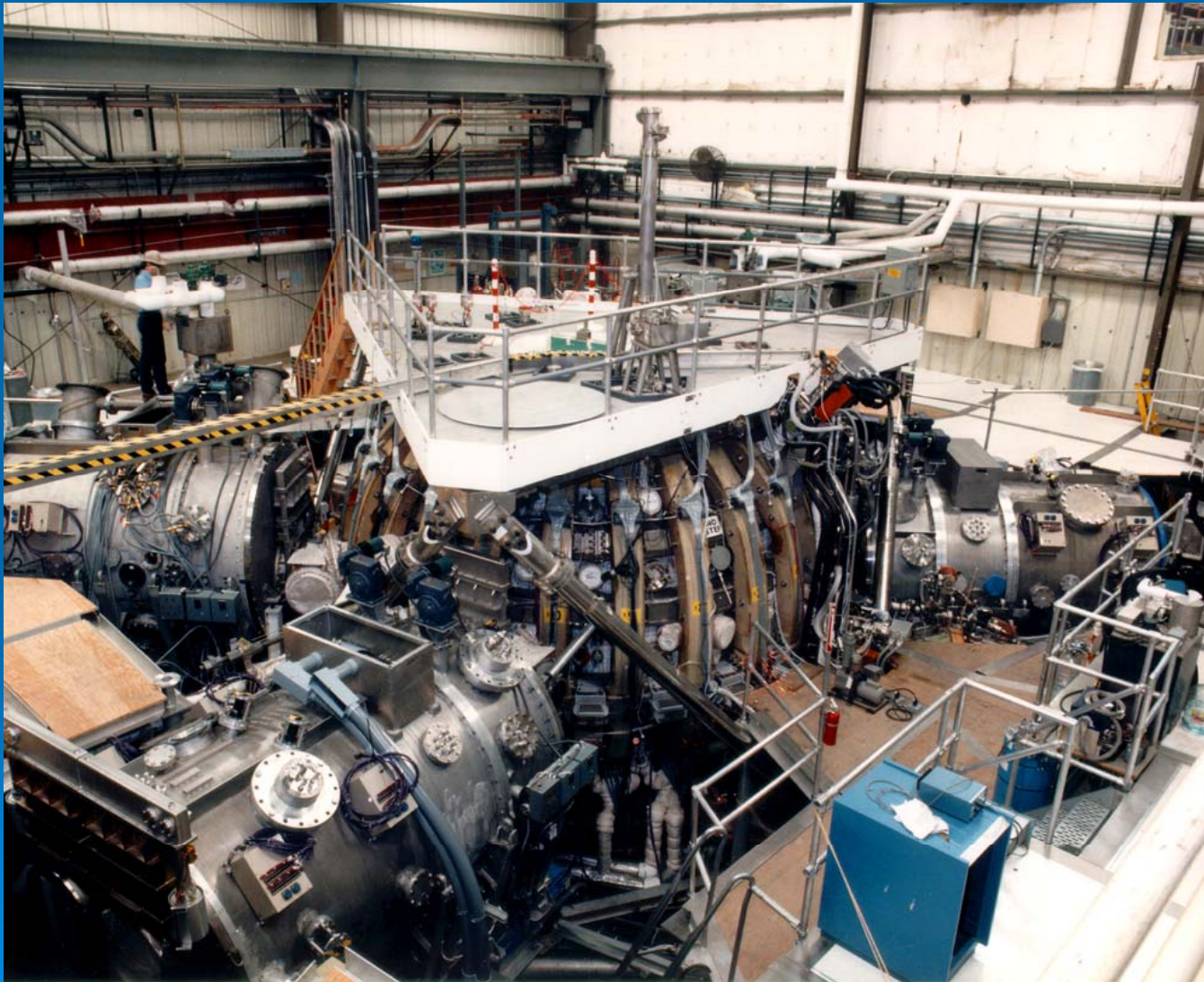
1982-97.

510 MK
(1995.)

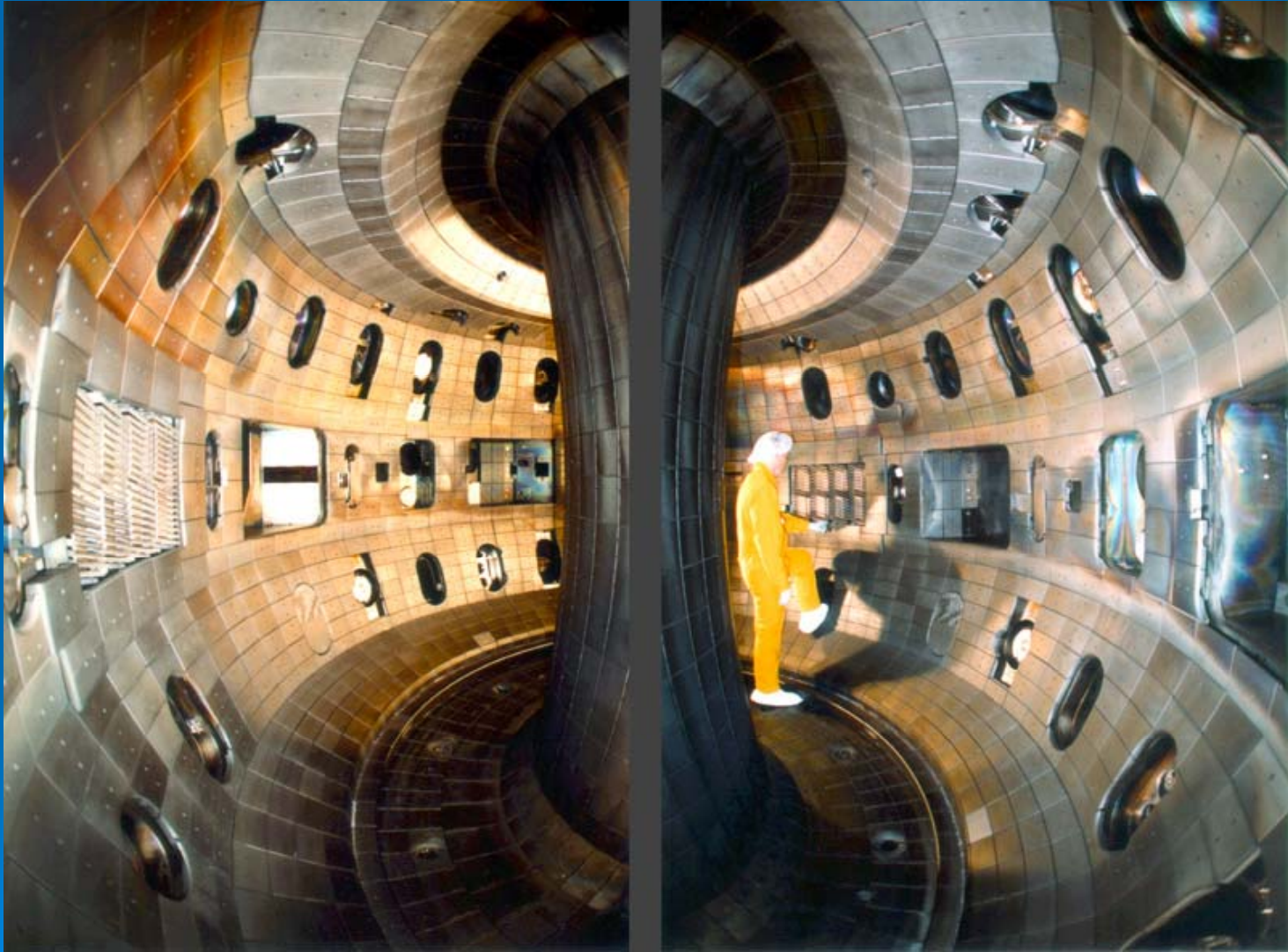
- Први експеримент са трицијумом у САД 1993-97.

Токамак DIII-D

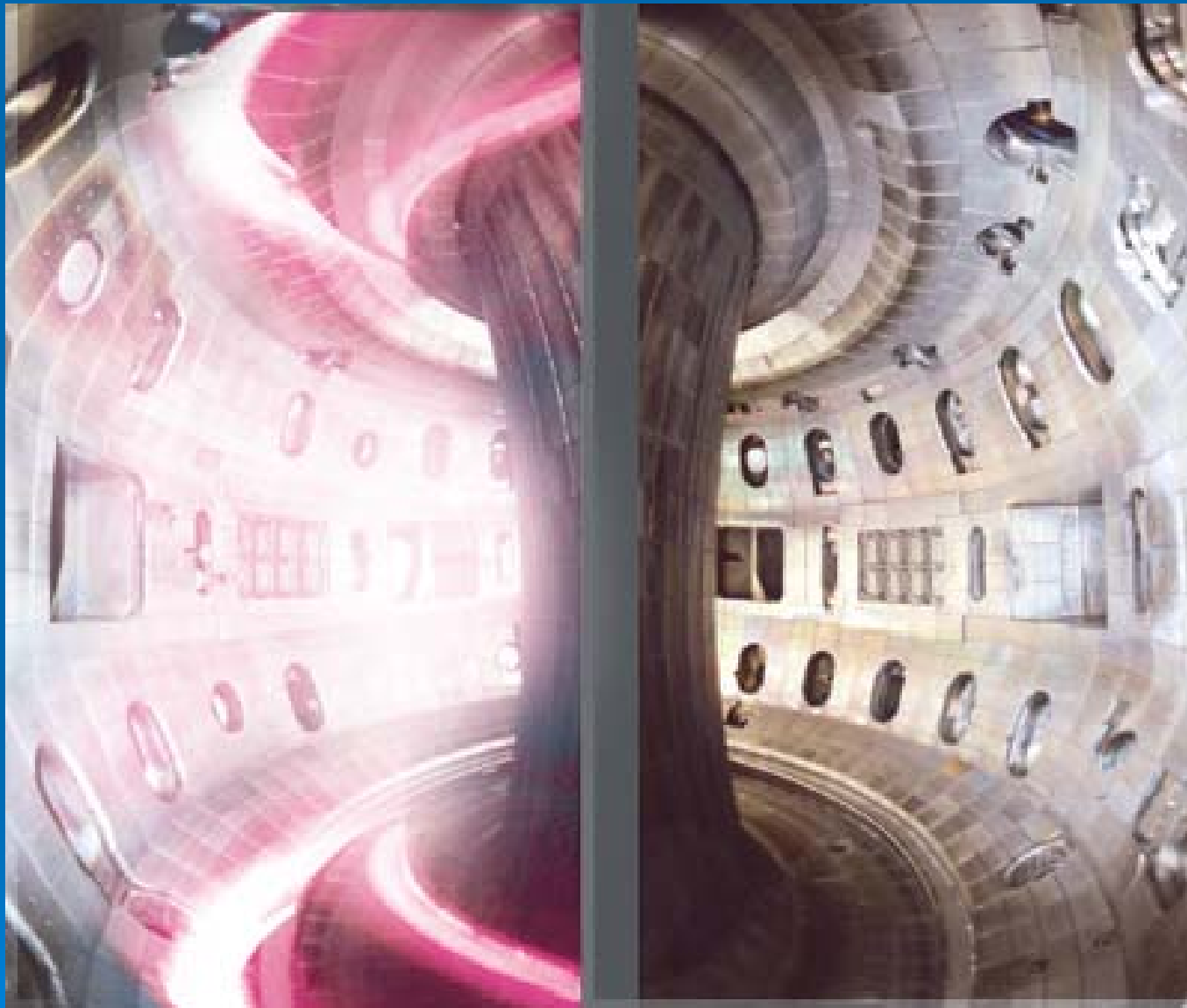
General Atomics, San Diego, California



1986→



DIH-D



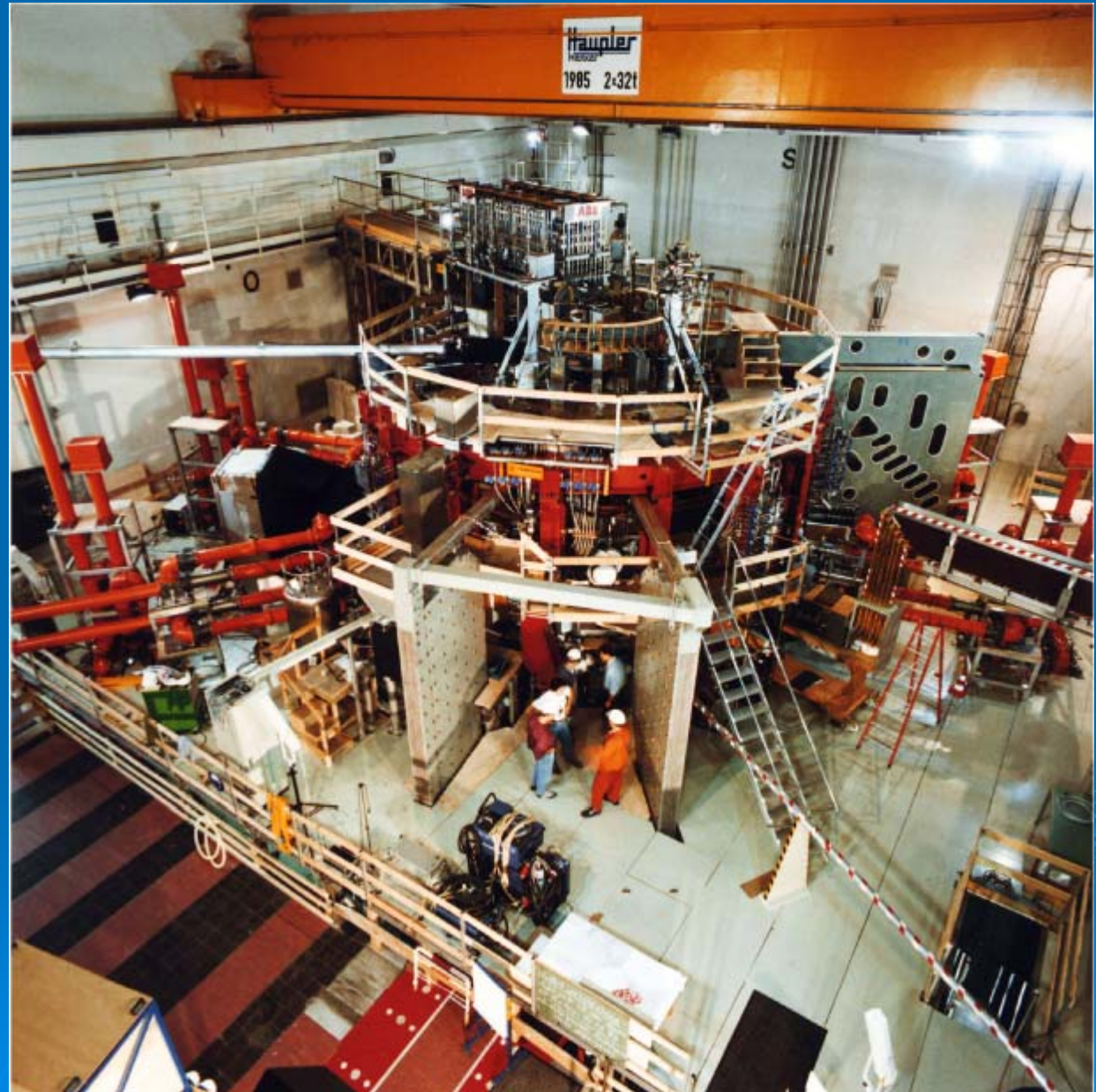
DIII-D

ASDEX (Axially Symmetric Divertor EXperiment)

IPP, Garching,
Germany

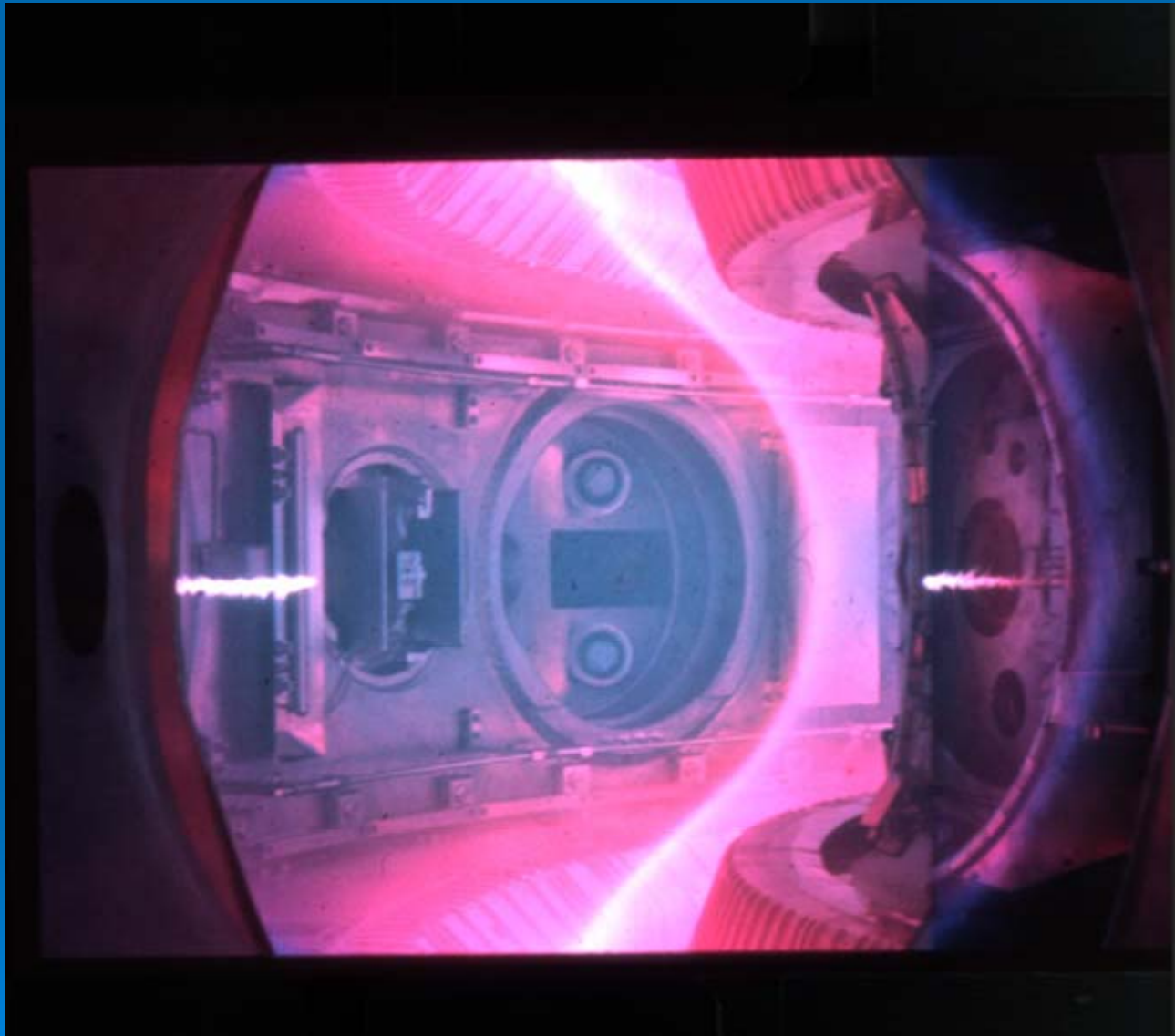
1980→

1991→





ASDEX

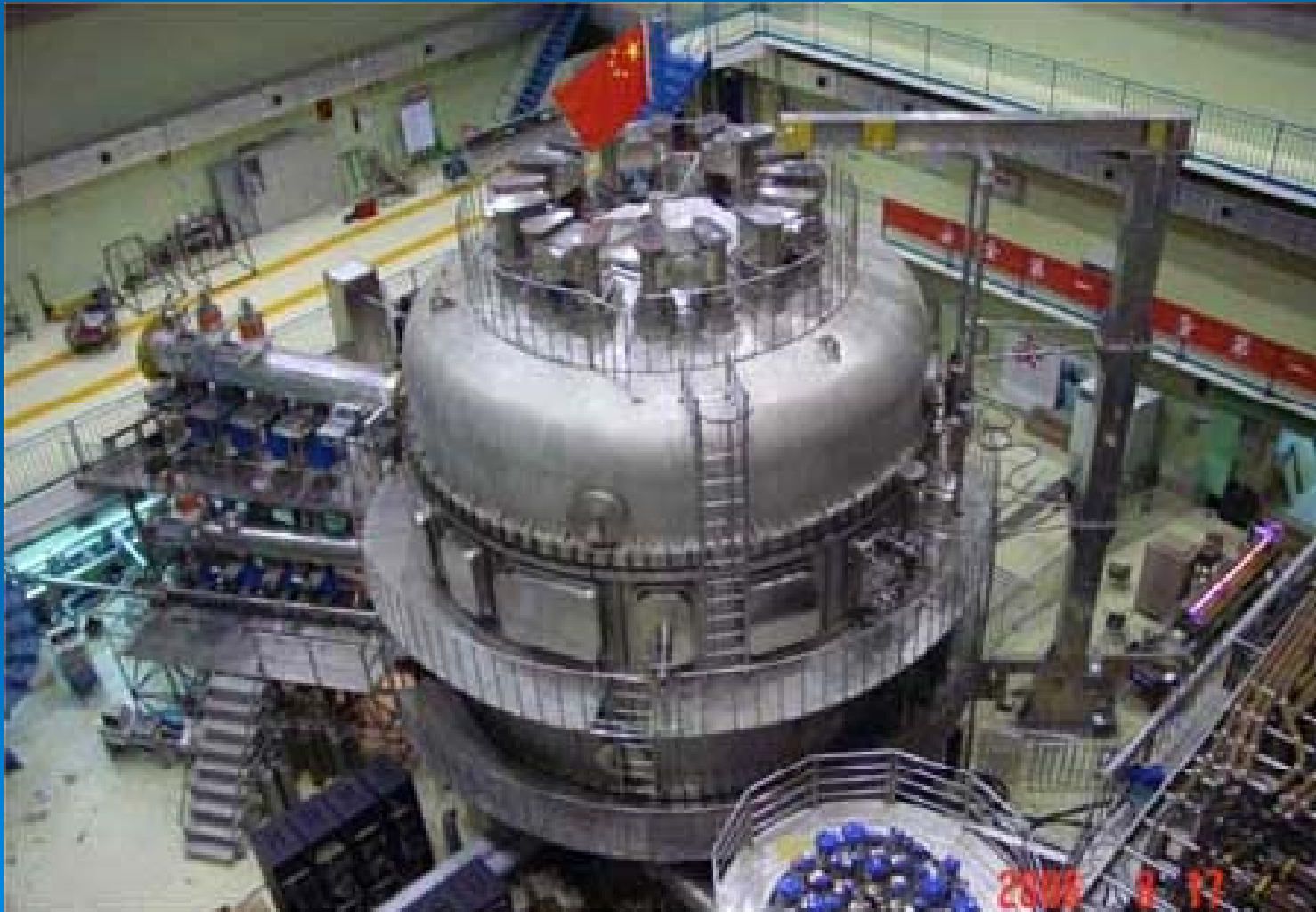


ASDEX

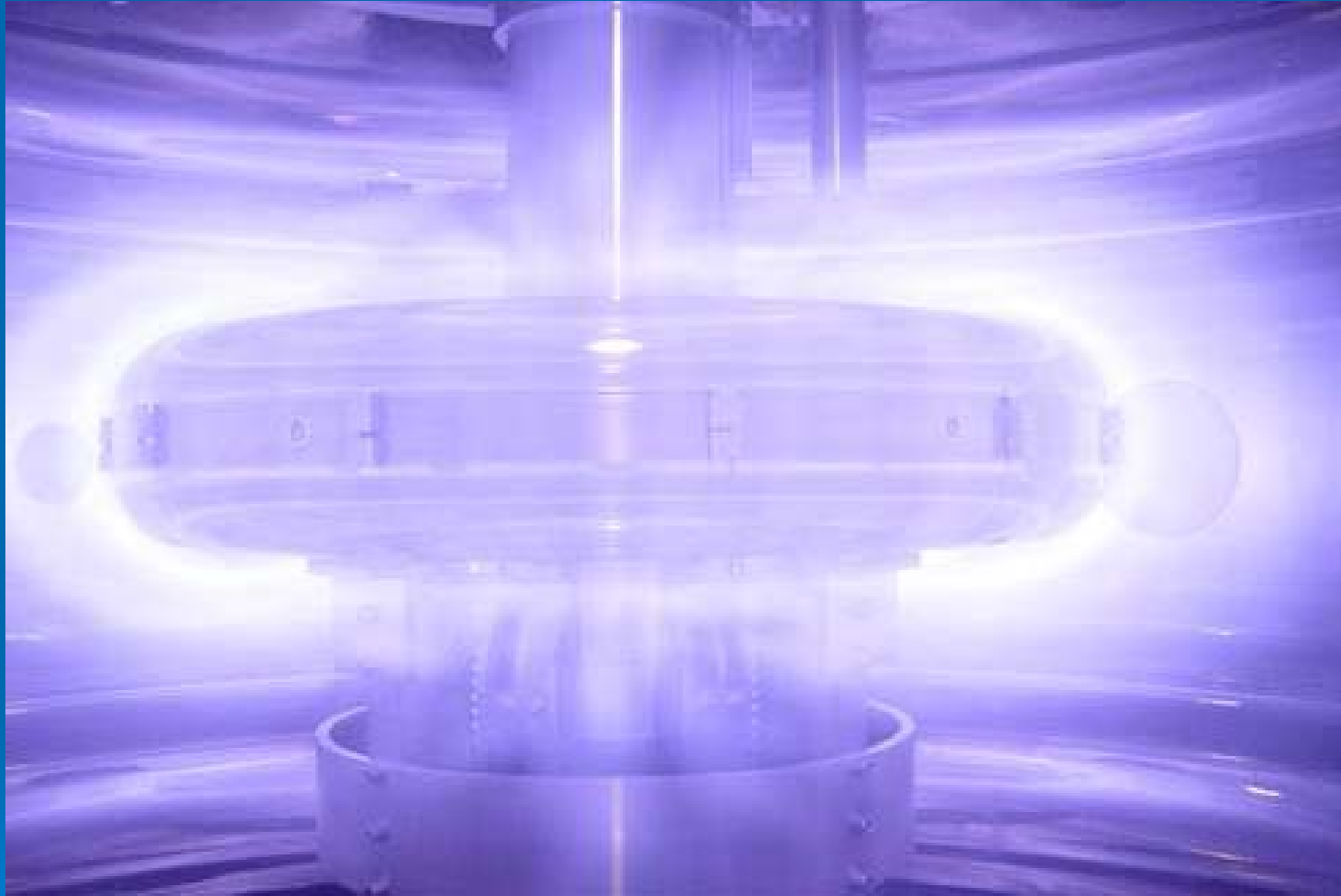
EAST

(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)

IPP, Hefei, China



2006→

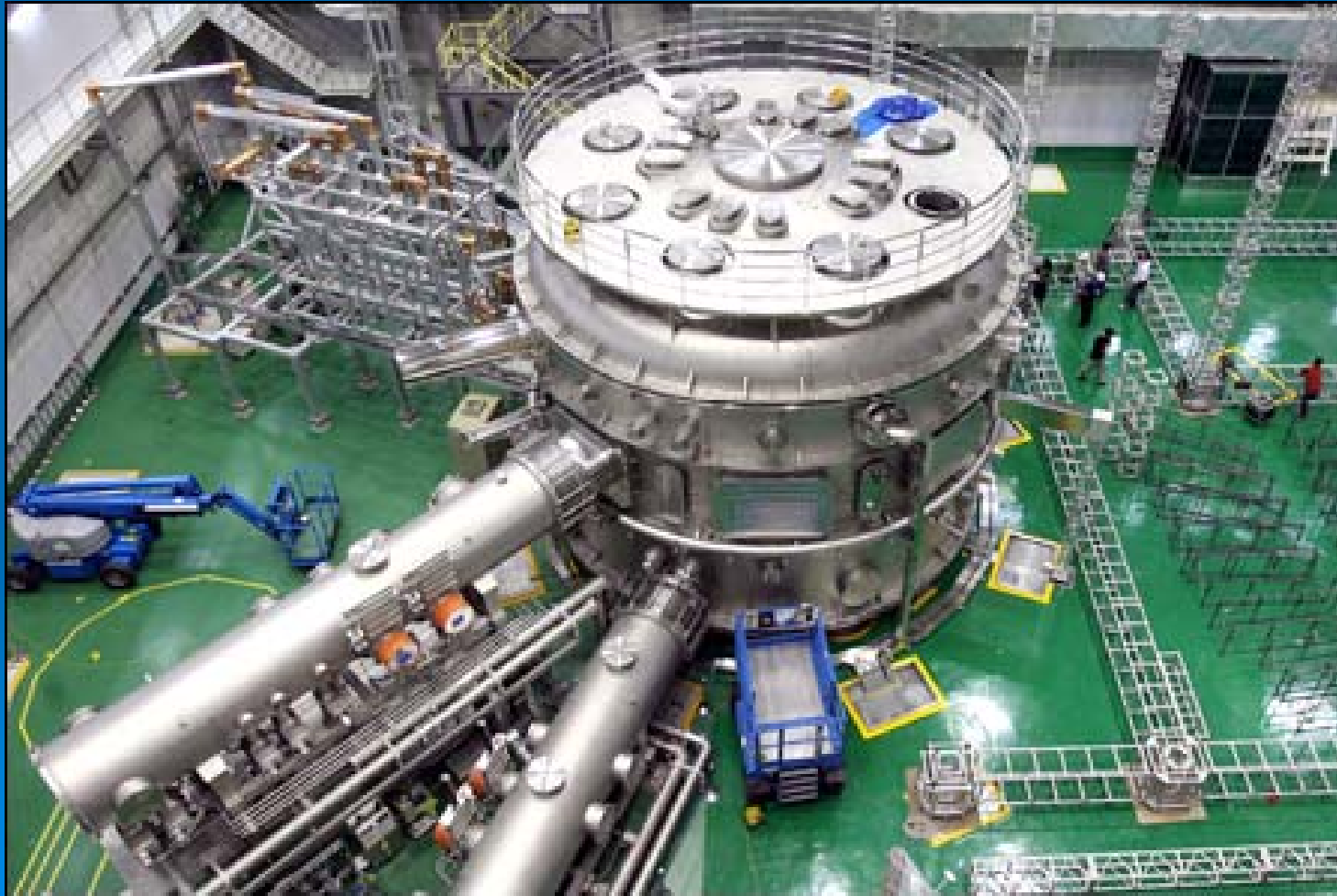


EAST

KSTAR

(Korean Superconducting Tokamak Advanced Research)

Daejeon, Korea



2008→

SST-1

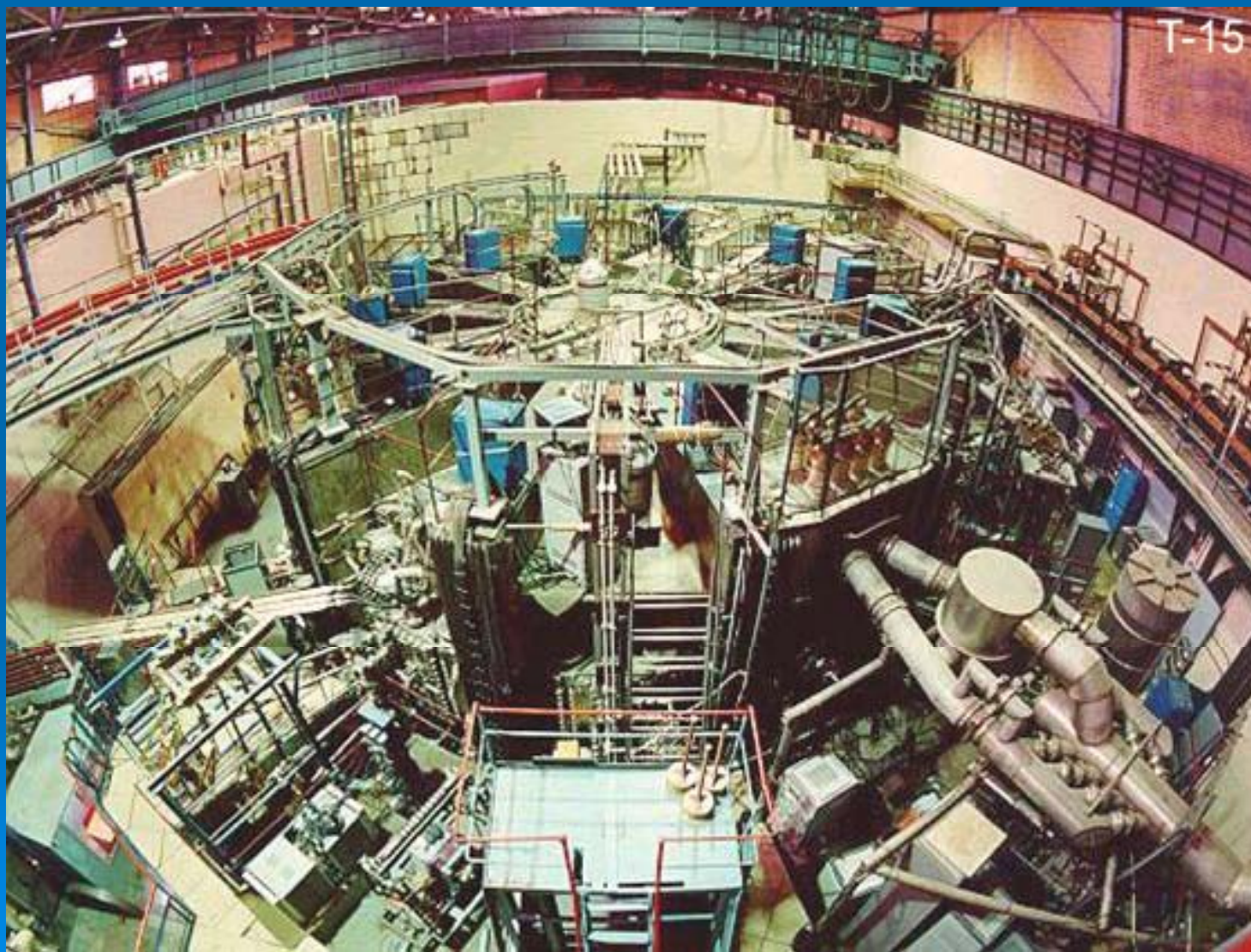
(Steady-state Superconducting Tokamak)
Gandhinagar, India



2009→

Токамак Т-15

Институт Курчатов, Русија



2009→

*Интернационални
Термонуклеарни
Експериментални
Реактор*



ИТЕР - Интернационални термонуклеарни експериментални реактор



EU:Japan : Russia:China:India:Korea : USA - 4:2:1:1:1:1 : 1.5

- JET и JT-60U: $Q > 1$

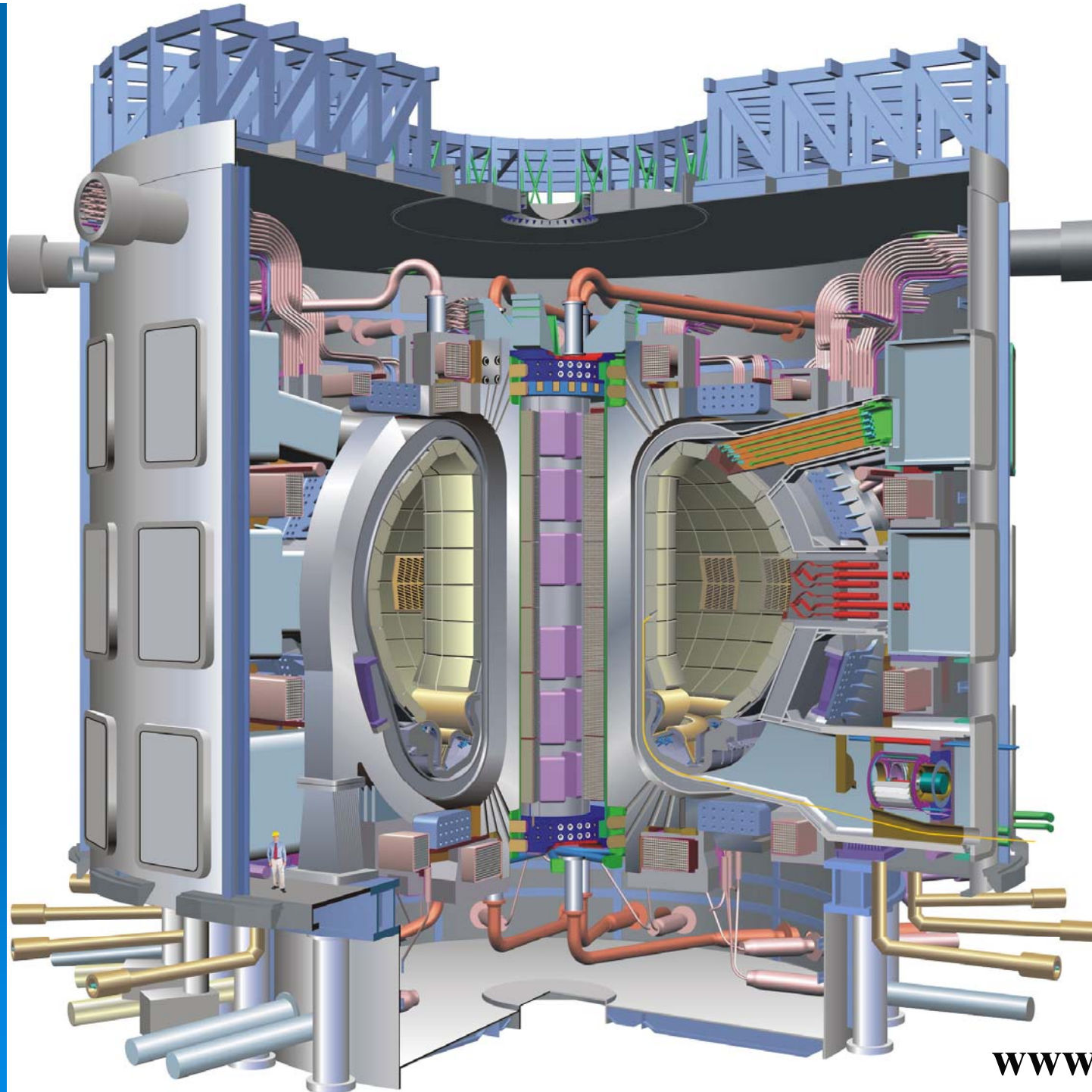
ИТЕР

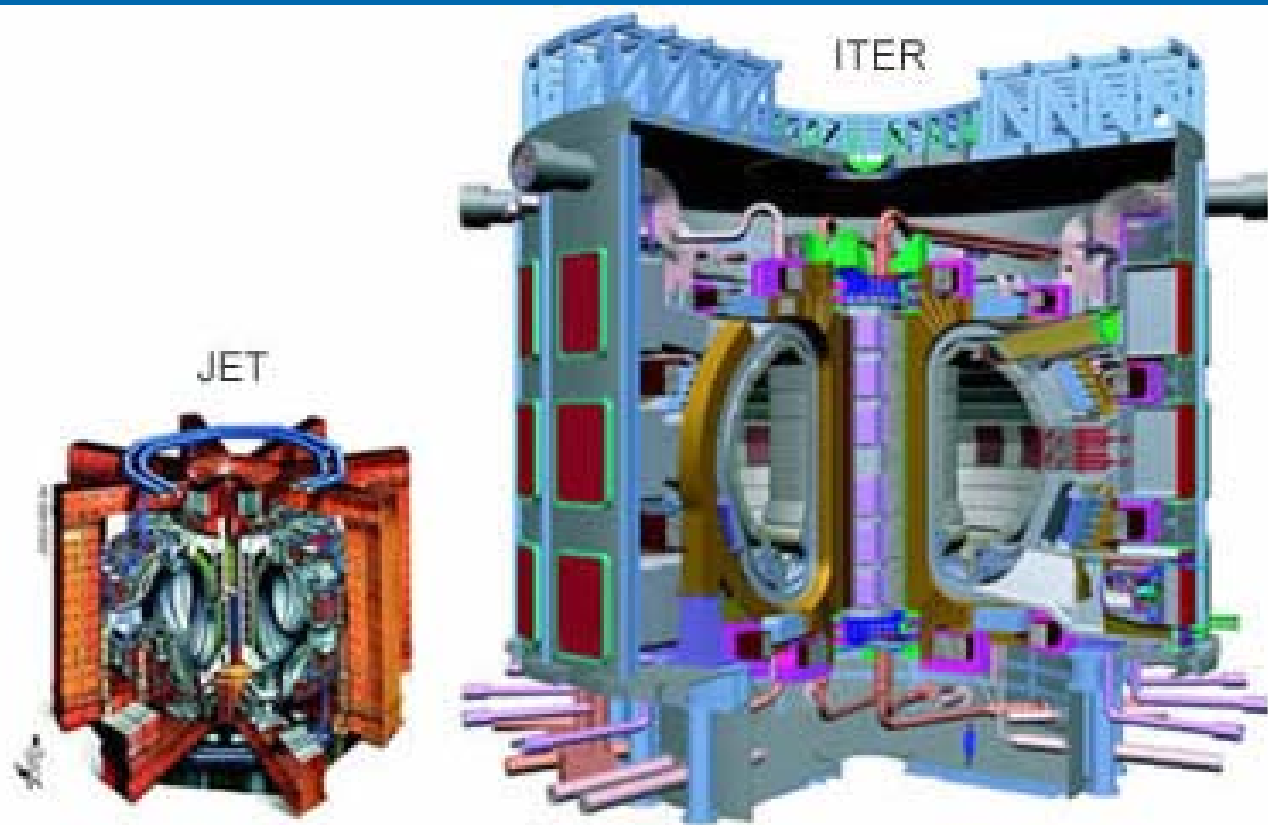


- Тороидално магнетно поље

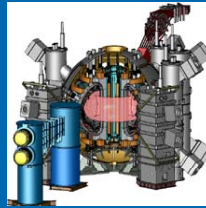
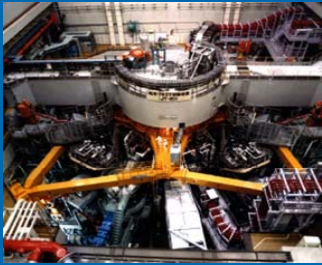
- Фузионе реакције се одржавају РФ загревањем алфа честица

- 500 MW, 15 MA, $Q \geq 10$: $\tau \sim 5 \text{ s}$ ($\tau \Rightarrow 1000 \text{ s}$)





12.4 m



Satellite Tokamak



Computer Simulation Center for Fusion Science

JT60-U

+

JET

+

T15

+

DIII-D

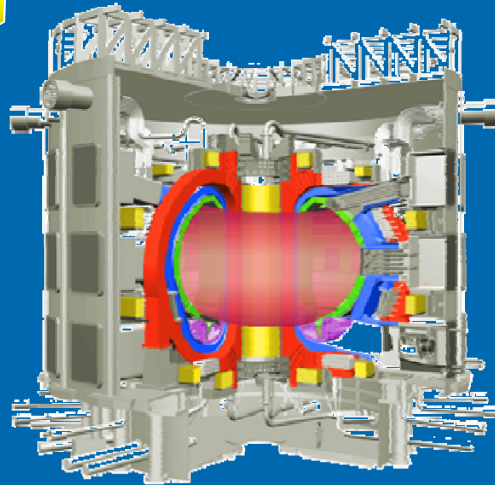
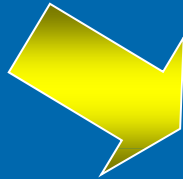
+

ASDEX

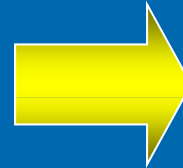
+

EAST,
KSTAR,

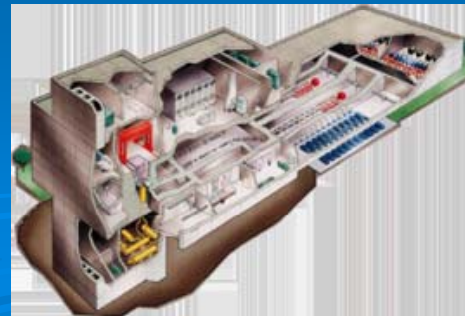
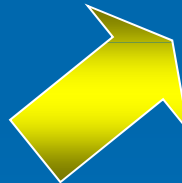
SST1



ITER



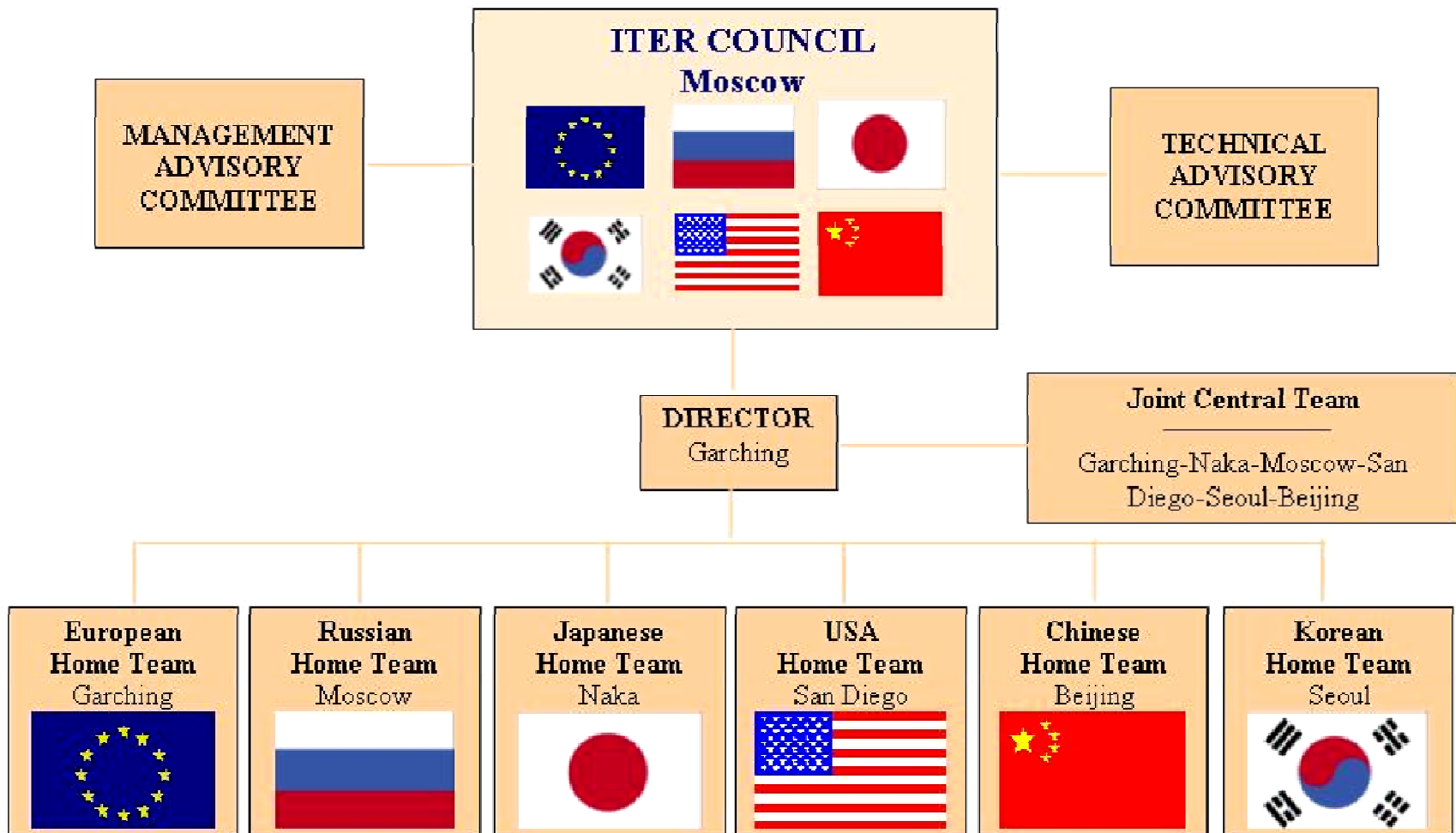
DEMO



IFMIF-EVEDA



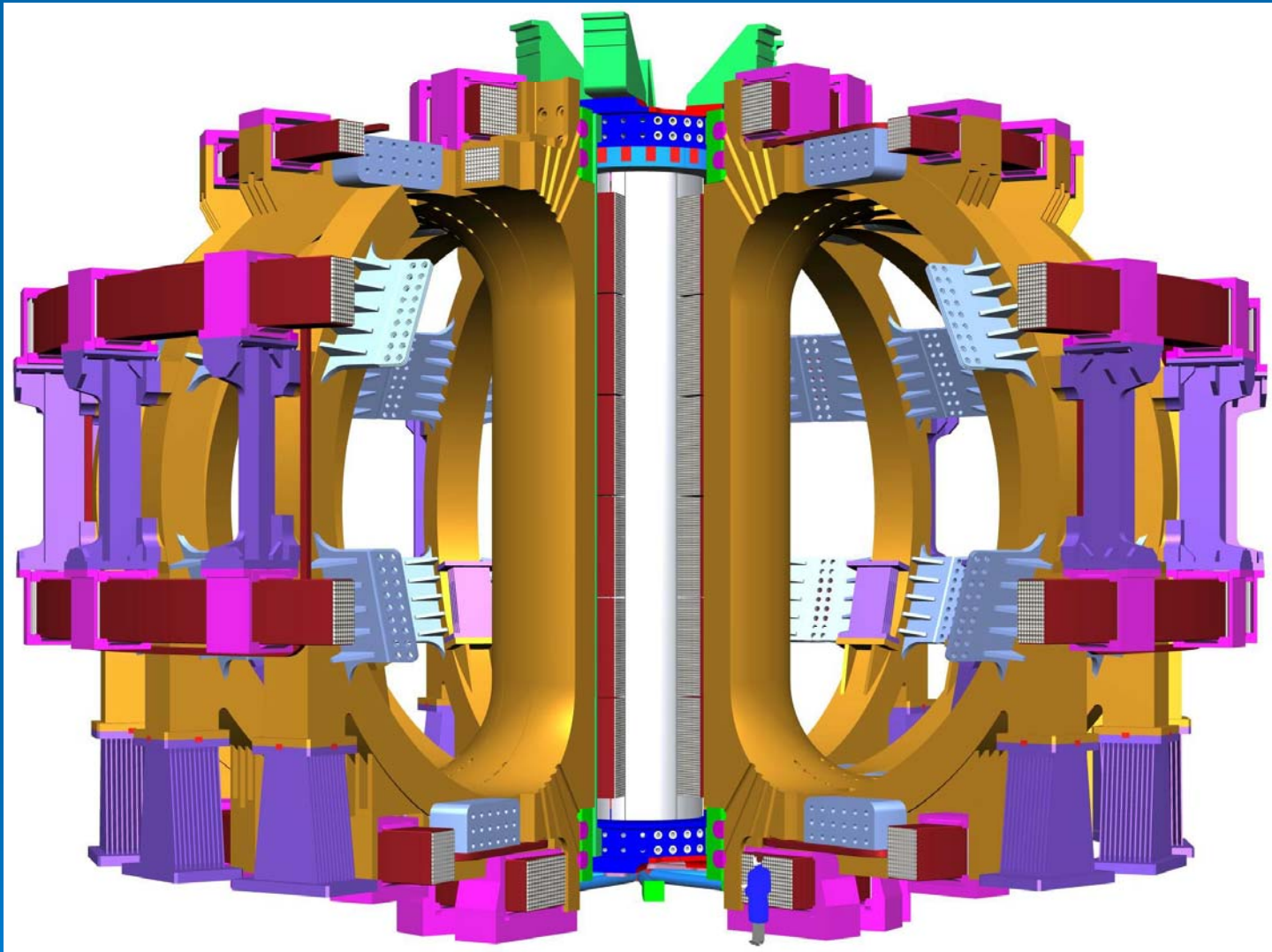
INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR



THE EUROPEAN FUSION DEVELOPMENT AGREEMENT

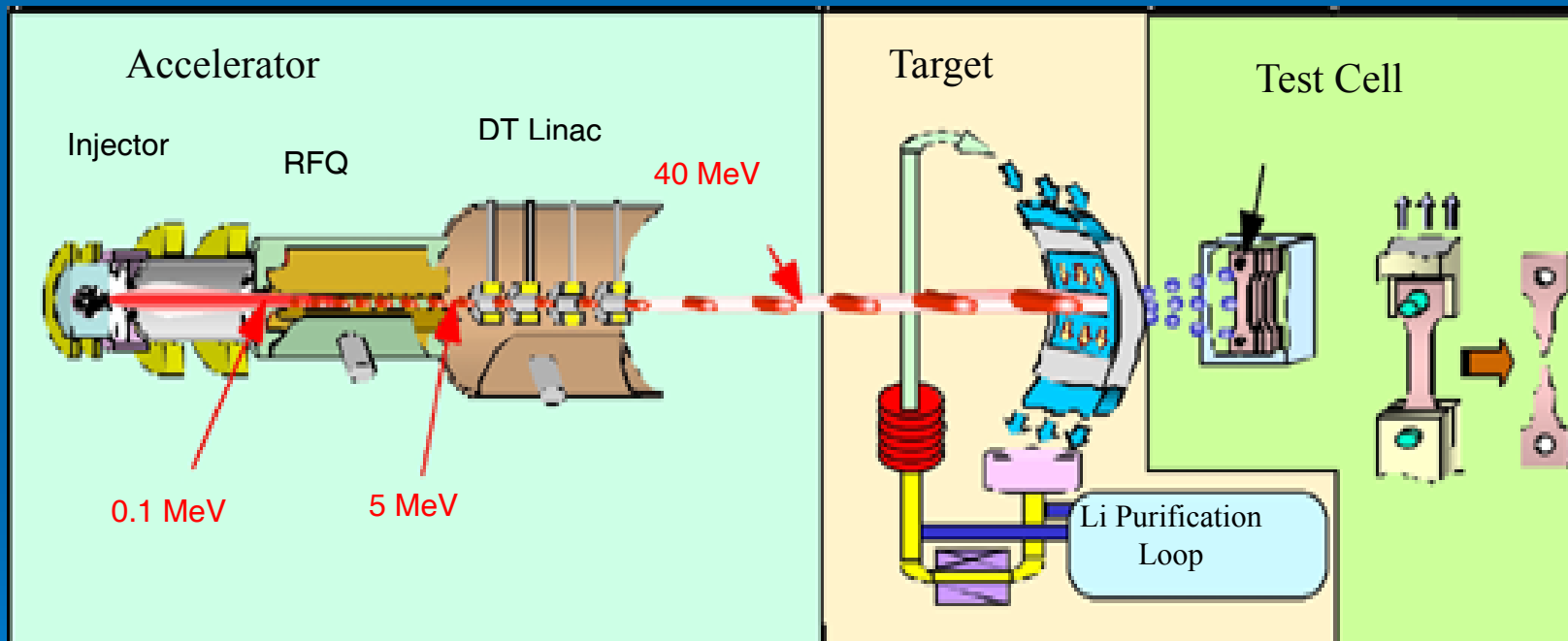
EURATOM IN ASSOCIATION WITH:

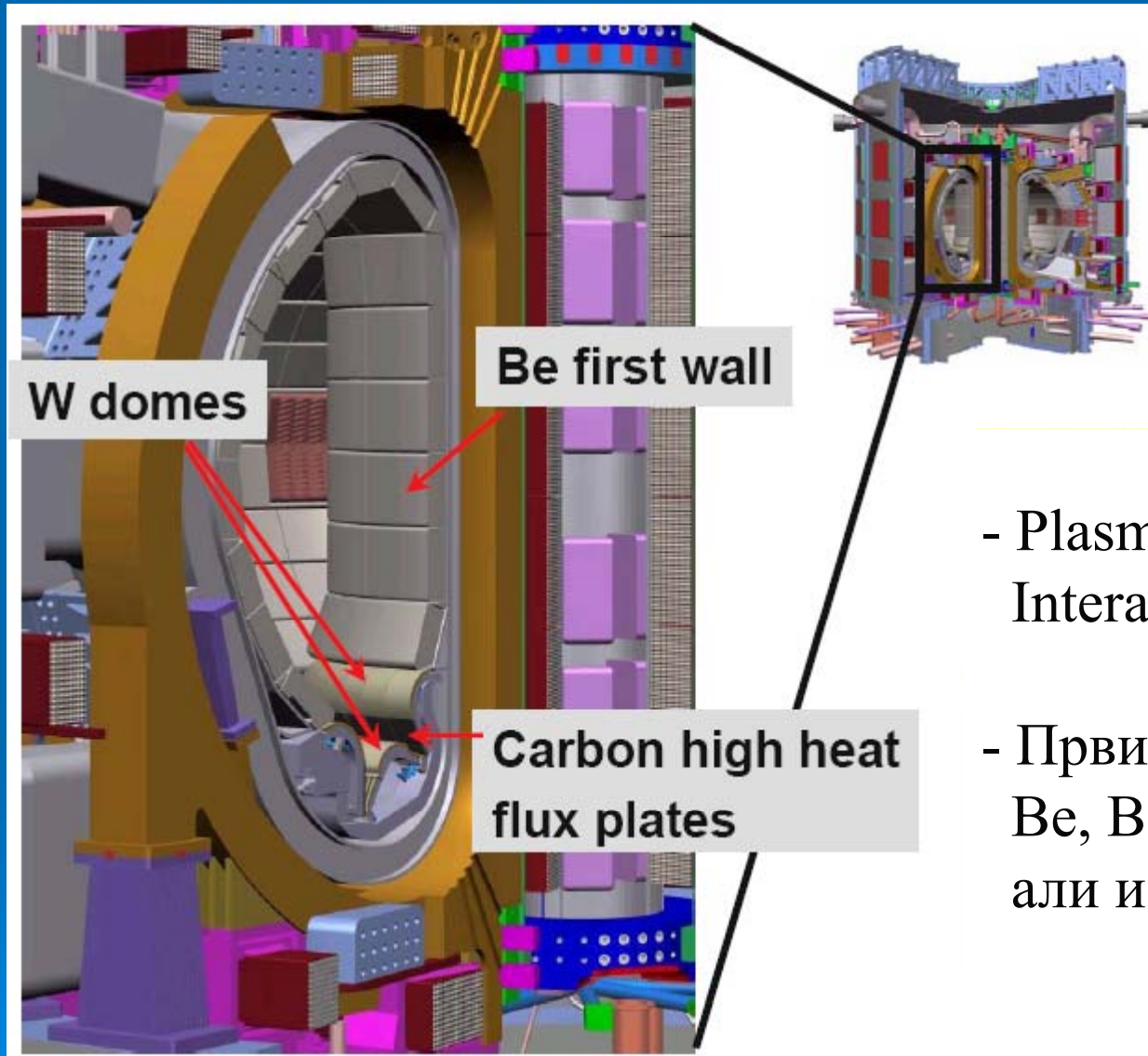
- Belgian State (Ecole Royale Militaire/ Koninklijke Militaire School) and on behalf of Universitu Libre de Bruxelles and Centre d'Etude de l'Energie Nuclaire/ Studiecentrum voor Kernergie (Mol)
- Centro de Investigaciones Energeticas Medioambientales y Tecnologicas (CIEMAT) (Spain)
- Commissariat l'Energie Atomique (CEA) (France)
- Dublin City University (DCU) (Ireland)
- Ente per le Nuove Tecnologie, L'Energia e l'Ambiente (ENEA) (Italy)
- Forschungszentrum Juelich (Germany)
- Grand Duche of Luxembourg represented by its Minister for Energy
- Hellenic Republic represented by the National Center for Scientific Research "Demokritos" (NSCR)
- Hungarian Academy of Sciences (Hungary)
- Institute of Plasma Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic (IPP/AS) (Czech Republic)
- Instituto Superior Tecnico (IST) (Portugal)
- Forschungszentrum Karlsruhe (Germany)
- Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP, Garching) (Germany)
- National Agency for Science, Technology and Innovation (Romania)
- Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW) (Austria)
- Risø National Laboratory (RISØ) (Denmark)
- Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) (The Netherlands)
- Swedish Natural Science Research Council (NRF) (Sweden)
- Swiss Confederation on behalf of The Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP-EPF Lausanne) and of other Swiss organisations repr. by the Head of the Swiss Mission to the EU
- Technology Development Centre Finland (TEKES) (Finland)
- United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) (UK)
- The Slovenian Association – Ministry of High Education, Science and Sport (MHST)



Магнети (суперпроводници)
- 400 t Nb_3Sn ; 4 K: 12 T

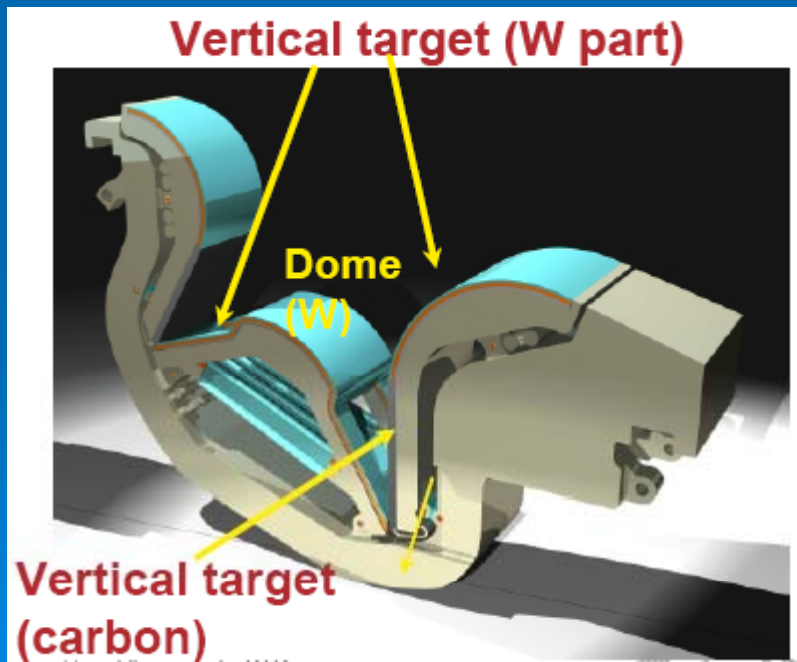
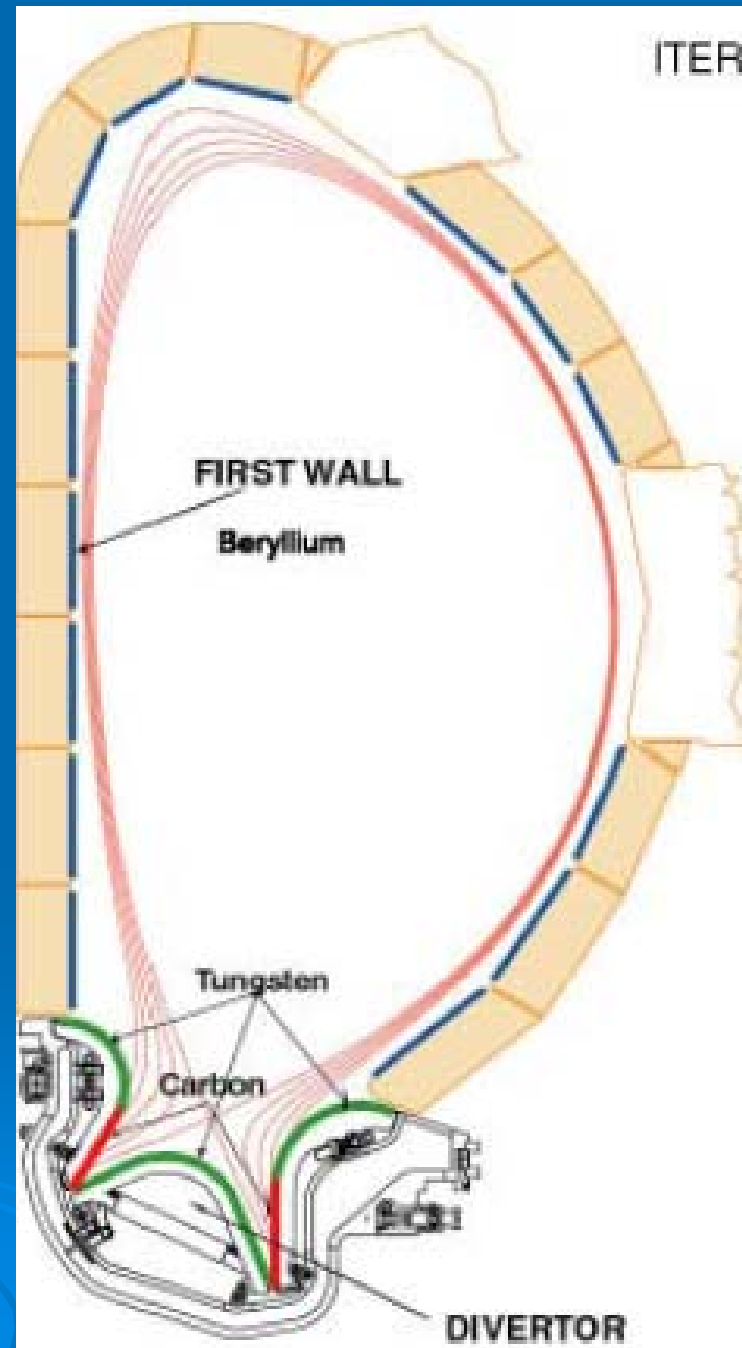
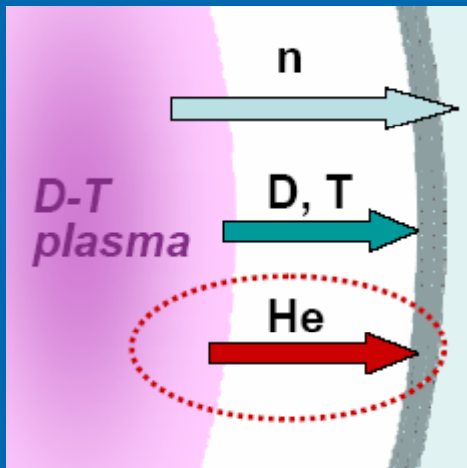
EVEDA



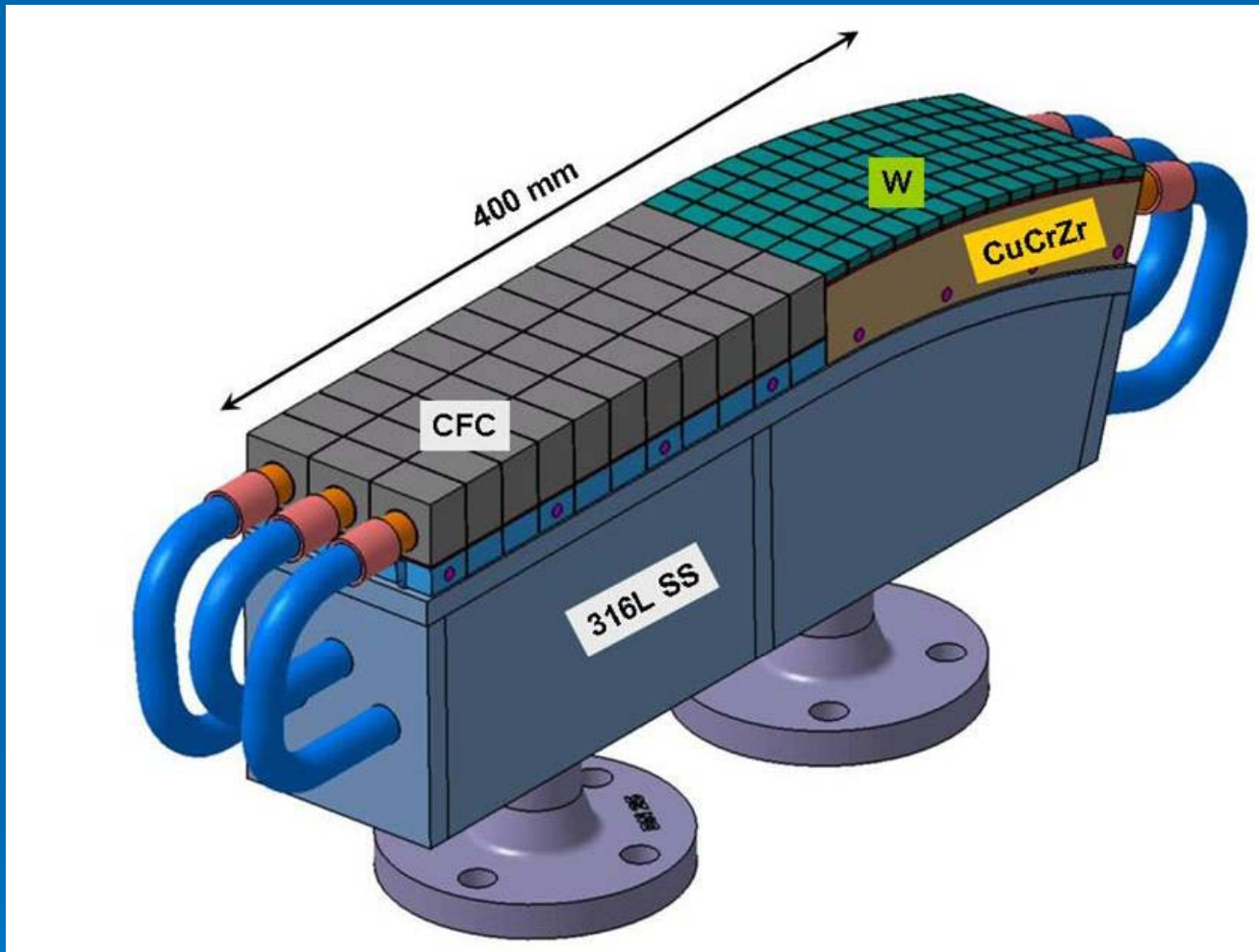


- Plasma Surface Interaction (PSI)

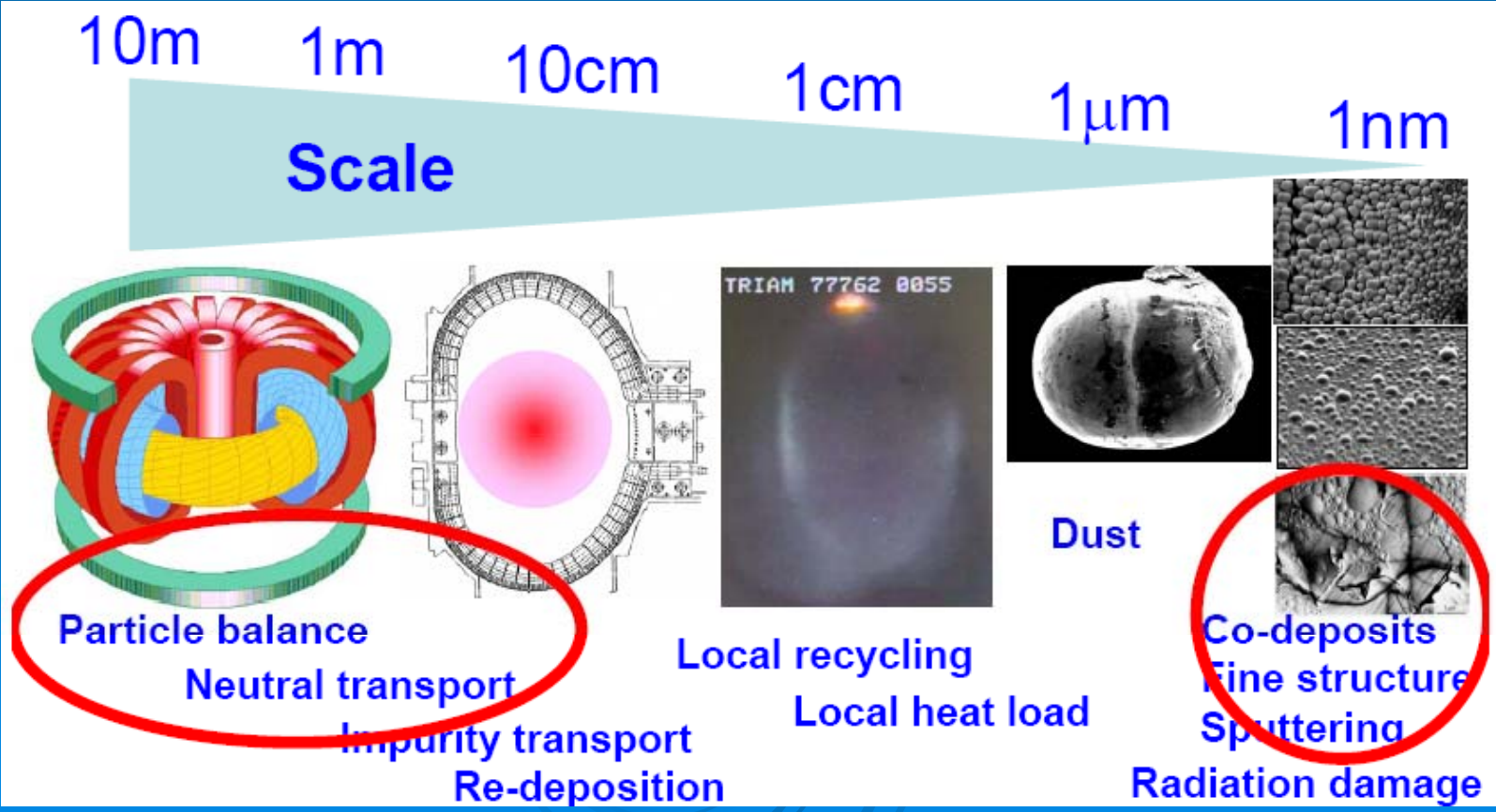
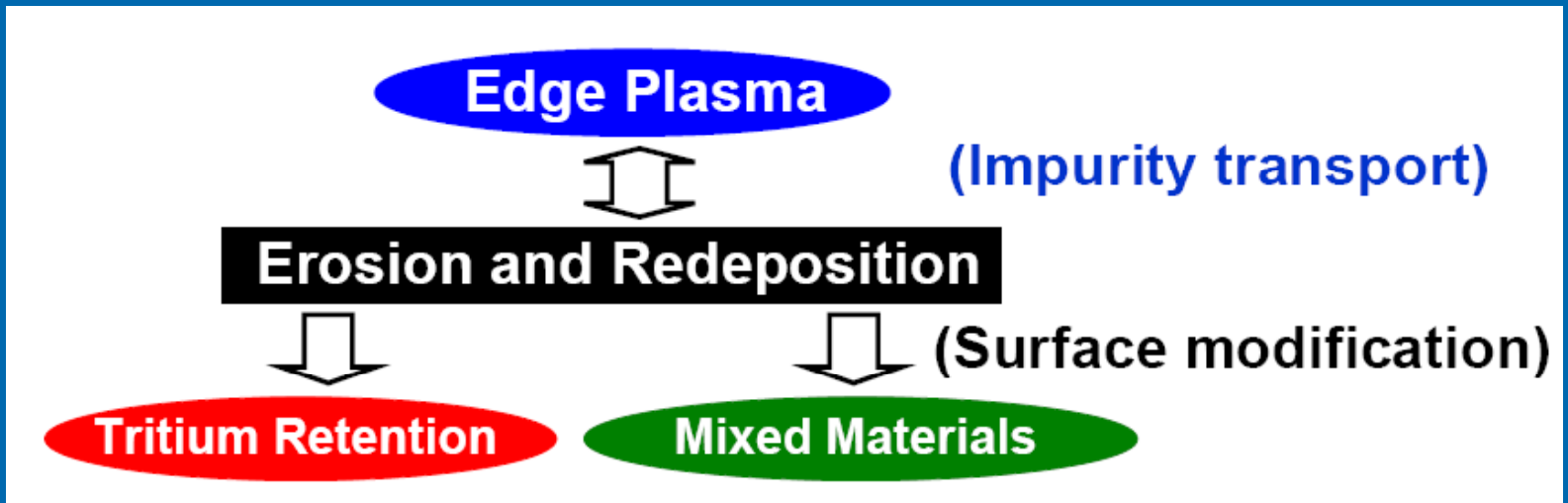
- Први зид:
Be, В, CFC композити,
али и Li, Si, Мо, W



Дивертор



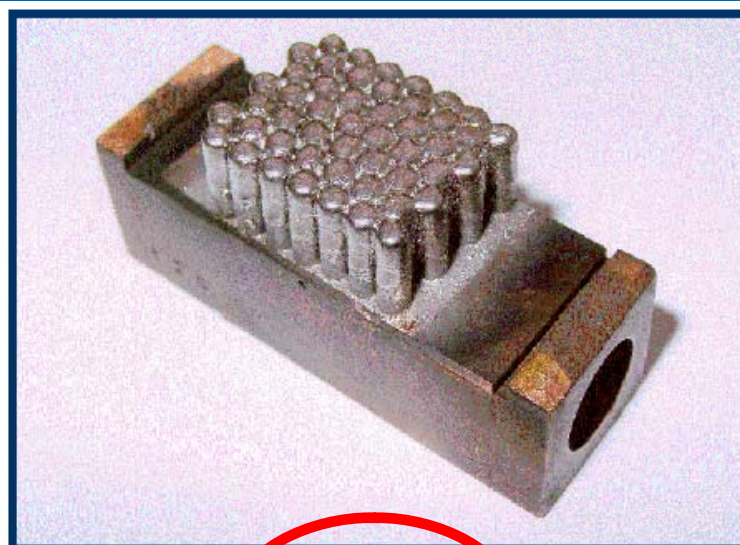
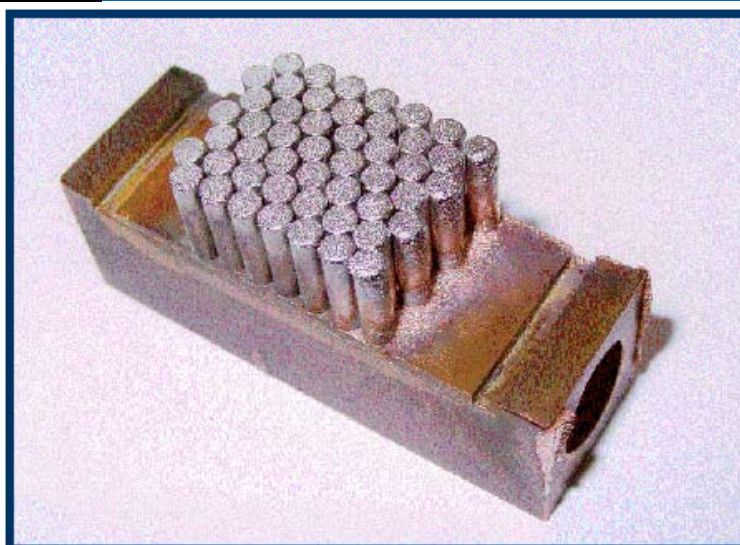
Дивертор



Проучавање особина материјала под екстремним условима (плазме велике температуре, концентрације)

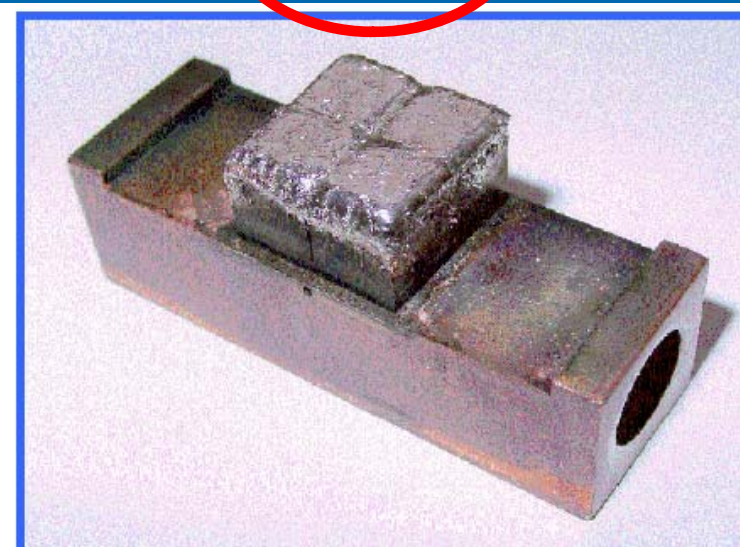
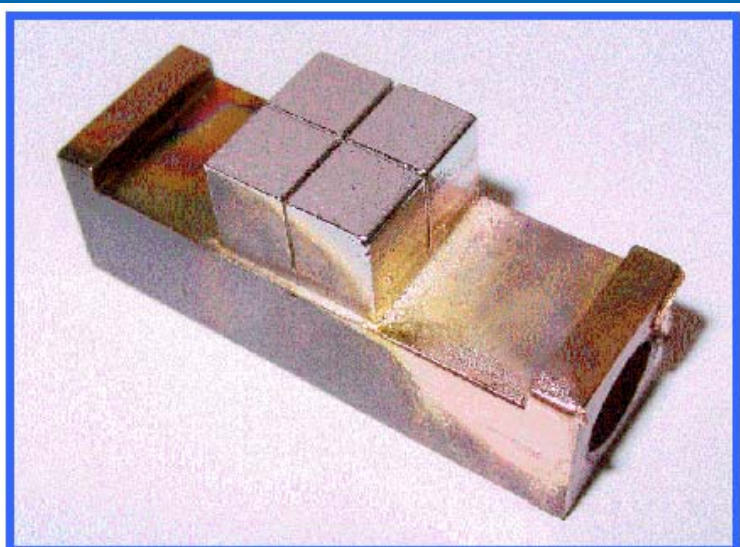
- Интеракција плазме са материјалима

- Флуks јона $10^{19} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Енергија јона 10-300 eV
- Температура 1-100 eV
- Густине енергије, снаге
- Време трајања



MK-200UG - TRINITI -

QSPA



Радови су почели с пролећа 2007...



Кадараш,
април 2007.



Кадараш,
мај 2008.



**Кадараш,
ноябрь 2008.**



**Кадараш,
февруар 2006.**



**Кадараш,
февруар 2008.**



Tore Supra

Tore Supra, Cadarache, France



Plasma pulse record of **6.5 min**
with 500 kA plasma current (2003.)



juh 2009.



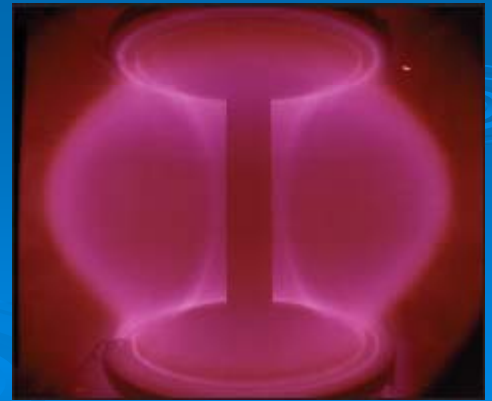


Са проф. Канама Икедом, директором ИТЕР-а

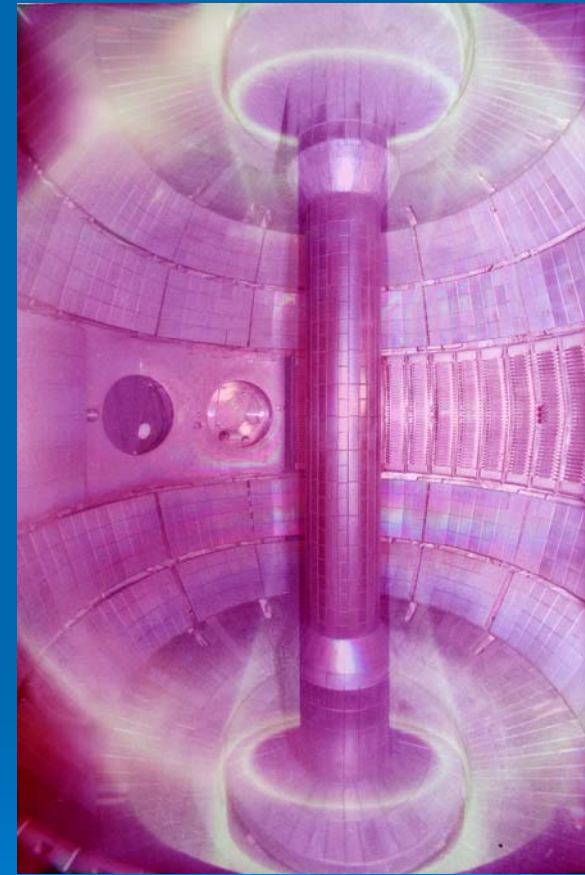
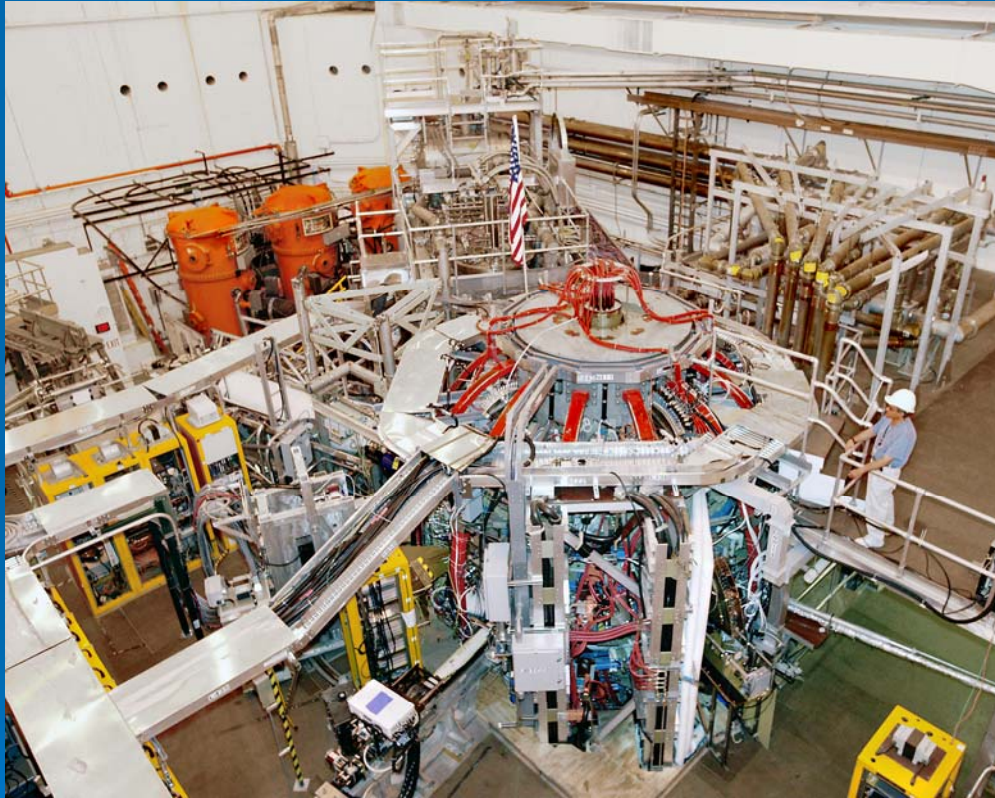


јесен 2011.

Друге конфигурације



Сферични токамаци



NSTX
(National Spherical Torus Experiment)
PPPL, Princeton, USA



NSTX (US)



Globus-M (RF)



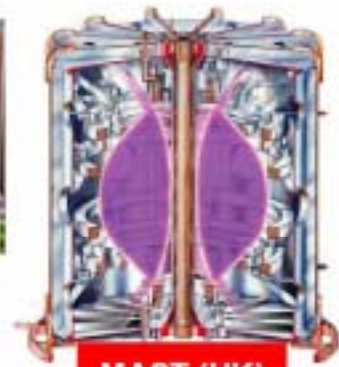
Multi-Pinch (Italy)



HIST (J)



LATE (J)



MAST (UK)



- HIT-II
- TCS
- FRC-ST
- Pegasus
- CDX-U/LTX
- NSTX
- ETE

- MAST
- Globus-M
- GUTTA
- Multi-Pinch
- STPC-EX
- KIM

- HIST
- LATE
- NUCTE-ST
- TS-3,4
- TST-2
- UTST
- TTST, QUEST
- SUNIST



HIT-II (US)



Pegasus (US)



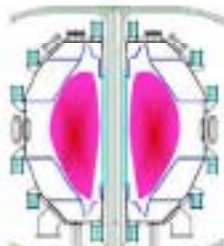
CDX-U (US)



ETE (B)



SUNIST (PRC)



QUEST (J)



UTST (J)

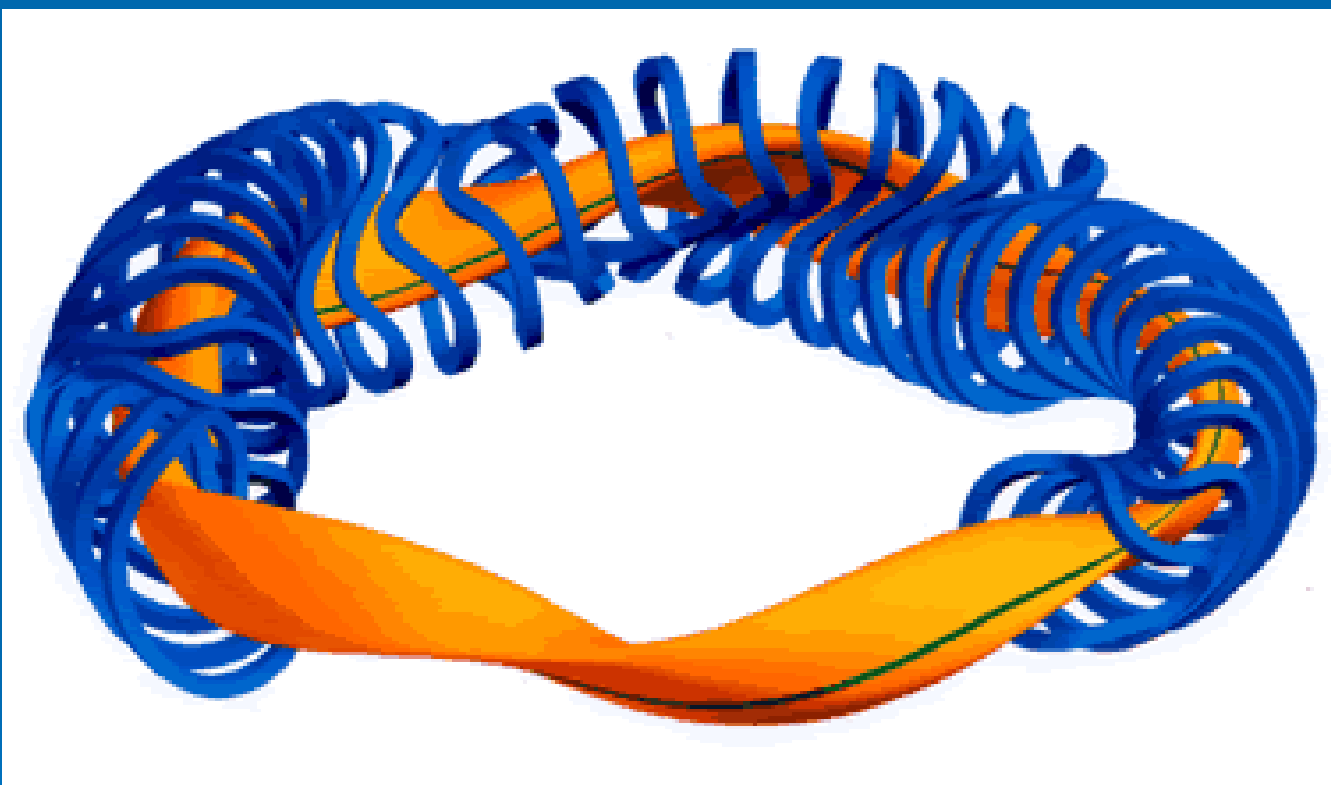


TS-4 (J)



TST-2 (J)

Стеларатори



W7-X
Greifswald, Germany

LHD (Large Helical Device)
NIFS, Toki, Japan



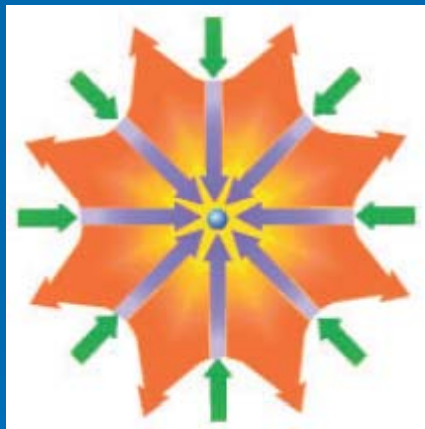
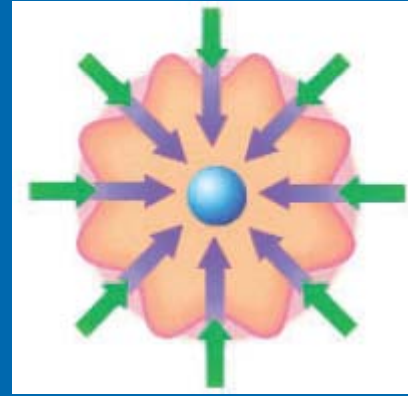
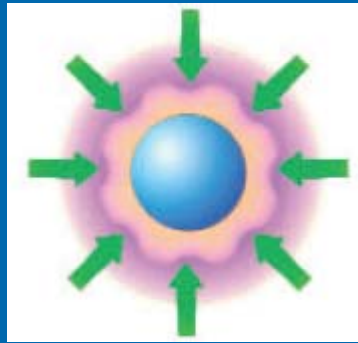
NIFS, январь 2010.



NIFS, контролна соба

Инерцијално конфинирање





- Позитивни енергетски биланс ТН реакције
 - Лавсонов критеријум: $n\tau \geq 10^{20} m^{-3}s$
 - Енергетски праг за D-D реакције $100 keV$ (праг на $\sim 10 keV$; $35 keV$ да се премаши закочно зрачење, а остало још на зрачење примеса)

ИНЕРЦИЈАЛНО КОНФИНИРАЊЕ

- концентрације $\sim 10^{29} m^{-3}$: неопходно време $\sim 1 ns$
- остварене температуре мале
- потребно: трајање ласера ns , енергија MJ , одређени облик импулса

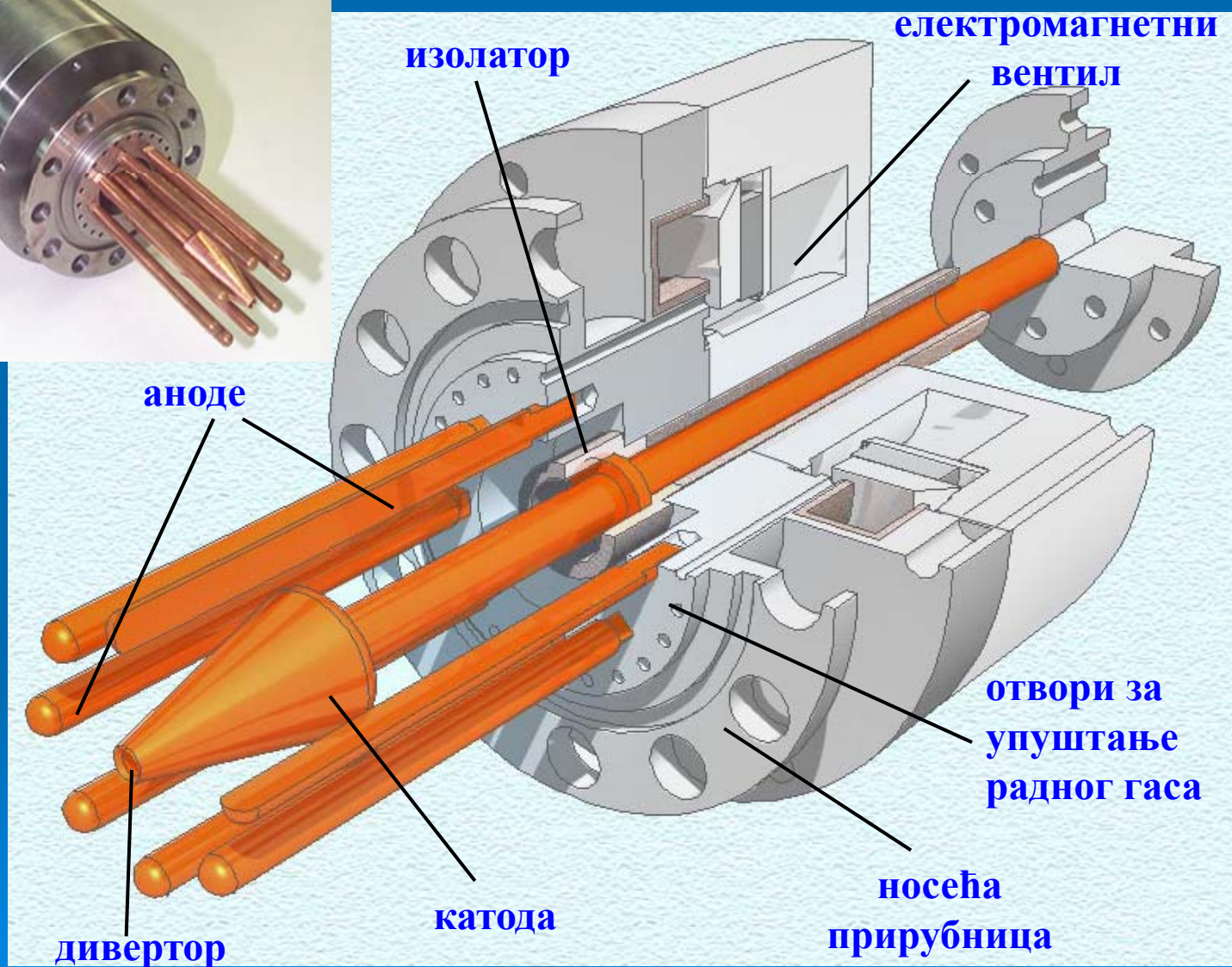
*Истраживања везана за
ИТЕР у Србији*

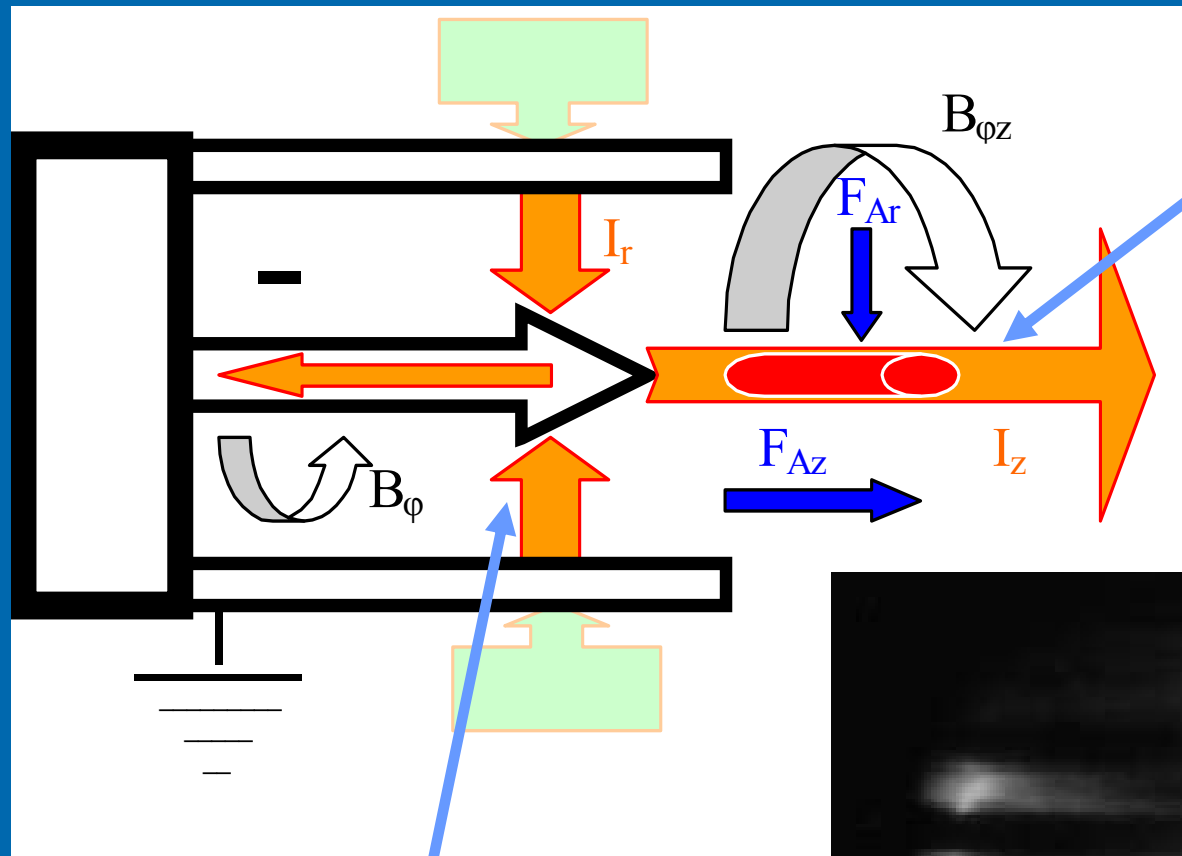




Лабораторија за фузиону плазму, Физички факултет Београд

МАГНЕТОПЛАЗМЕНИ КОМПРЕСОР (МПК)



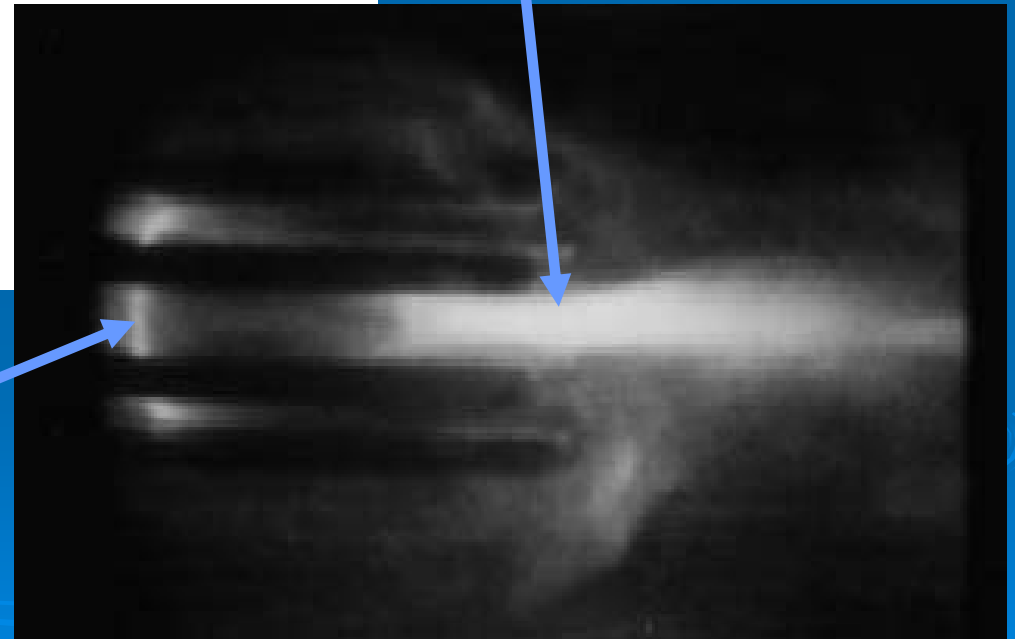


Компресиони
плазма млаз

$800 \mu\text{F}, 4 \text{ kV}$

$I_{max} \sim 100 \text{ kA}$

Зона јонизације

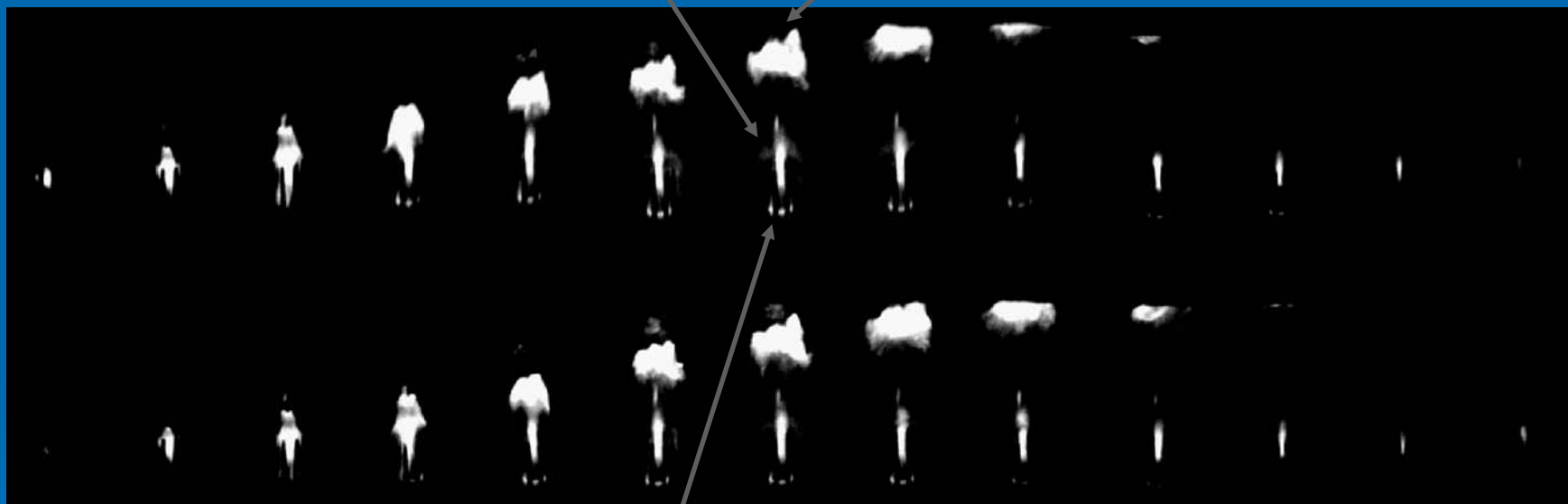


J. Purić, I.P. Dojčinović V.M. Astashynski, M.M. Kuraica and B.M. Obradović,
Electric and Thermodynamic Properties of Plasma Flows Created by Magnetoplasma Compressor,
Plasma Sources Sci. Tech., 13 (2004) 74-84.

Временски развој компресионог плазма млаза

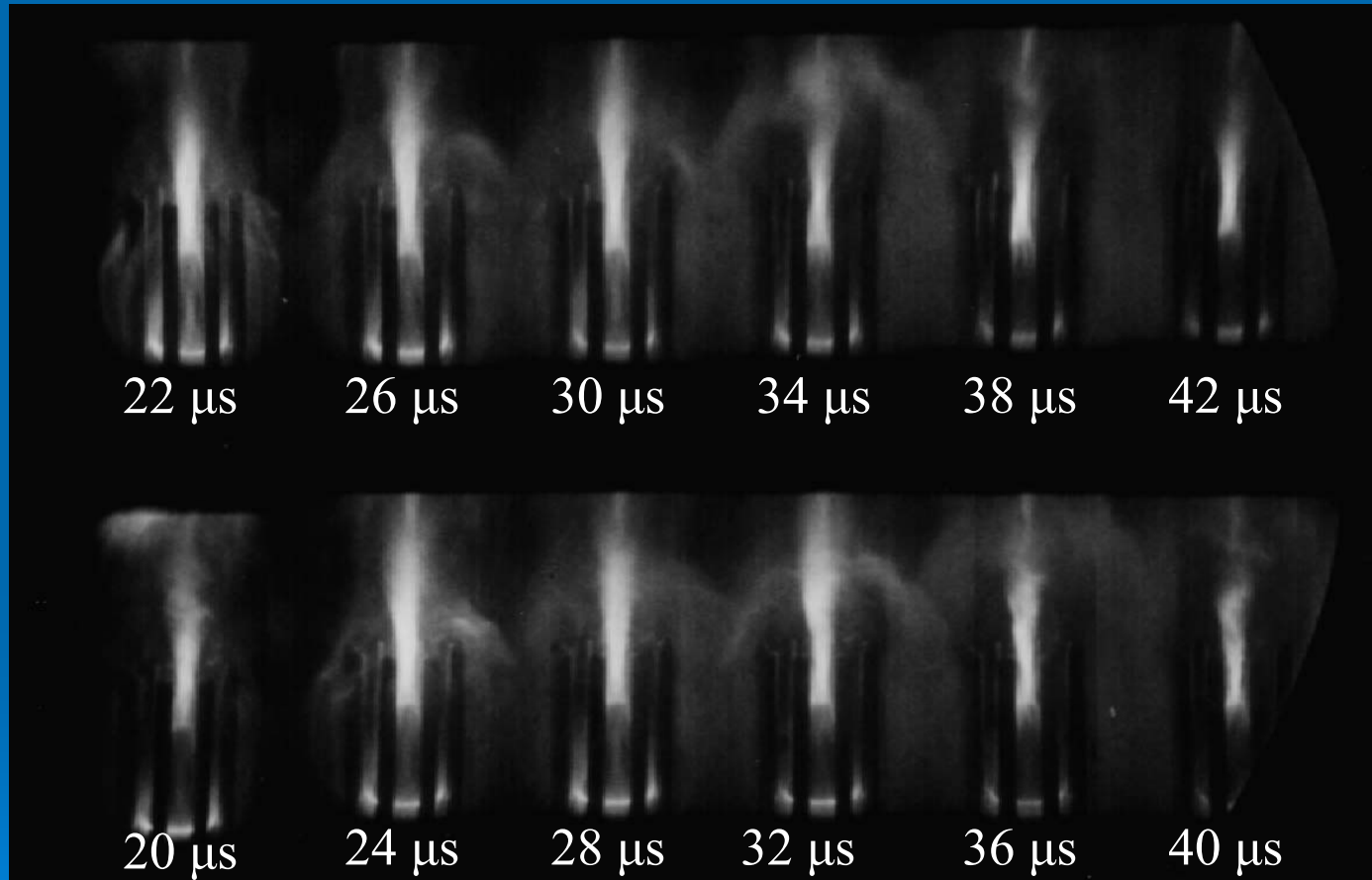
Компресиони
плазма млаз

Предњи
фронт

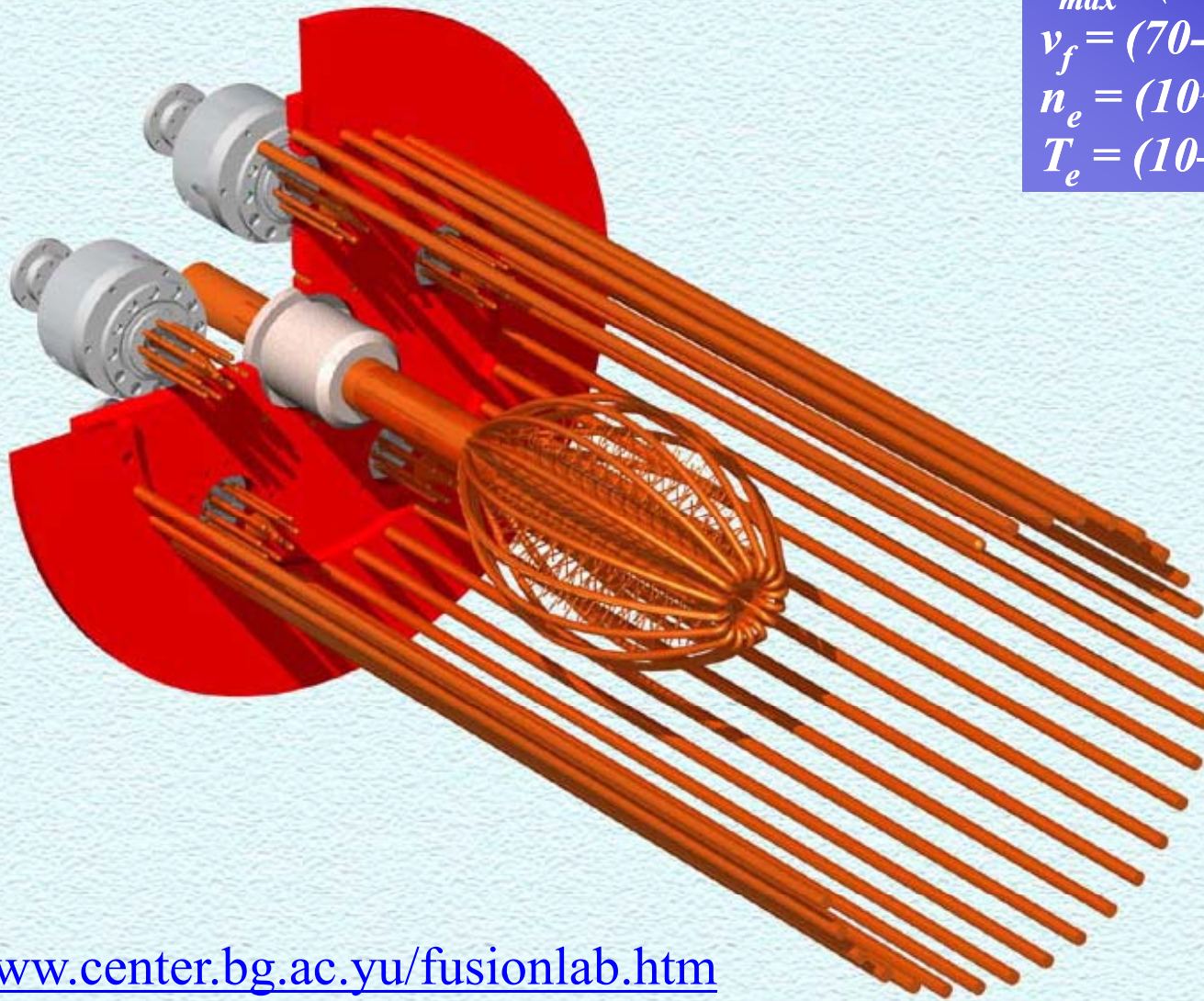


Зона
јонизације

Квазистационарна фаза развоја плазма млаза



KSPU-P50
presek



$$\begin{aligned}\tau &= (500-2000) \mu\text{s} \\ I_{max} &= (200-450) \text{ kA} \\ v_f &= (70-200) \text{ km/s} \\ n_e &= (10^{16}-10^{18}) \text{ cm}^{-3} \\ T_e &= (10-15) \text{ eV}\end{aligned}$$

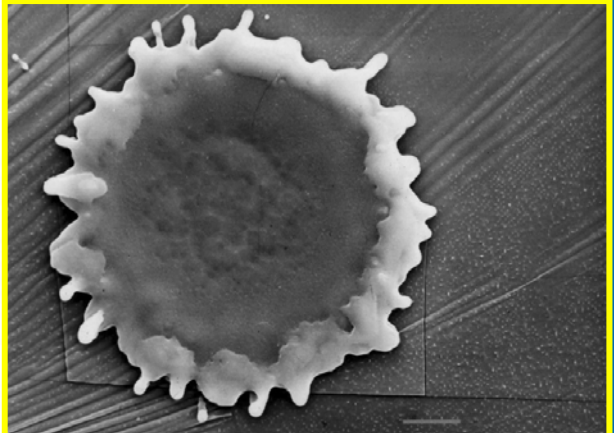
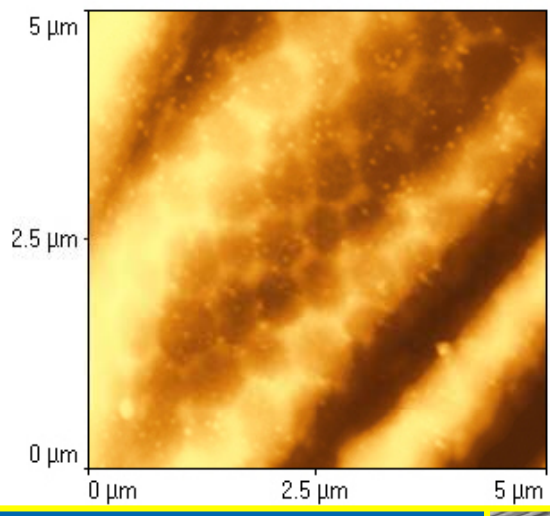
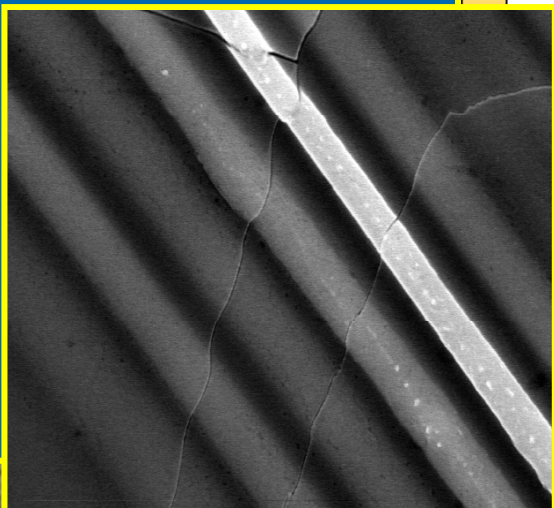
www.center.bg.ac.yu/fusionlab.htm



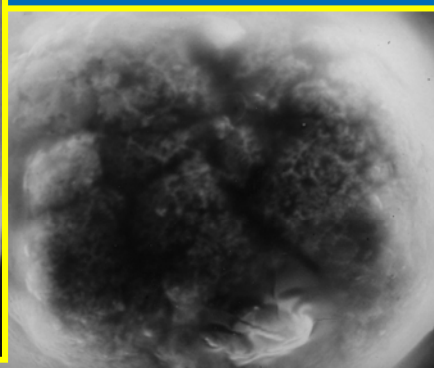
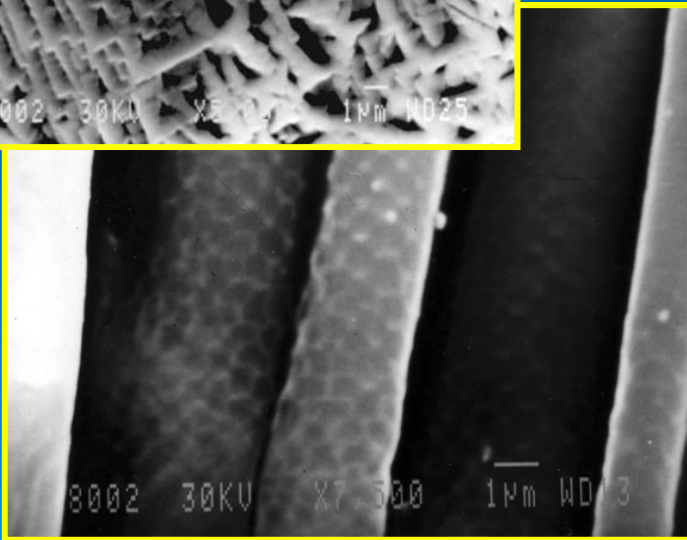
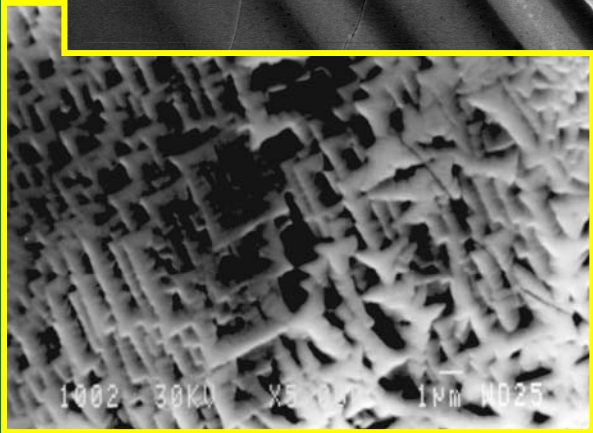




297.46 nm



Интеракција плазме са површинама



Хвала на пажњи!

