



Sesión del Foro Diletantes de Bilbao

Desmontando mitos sobre la energía nuclear

26 enero 2023

María Teresa Domínguez Bautista

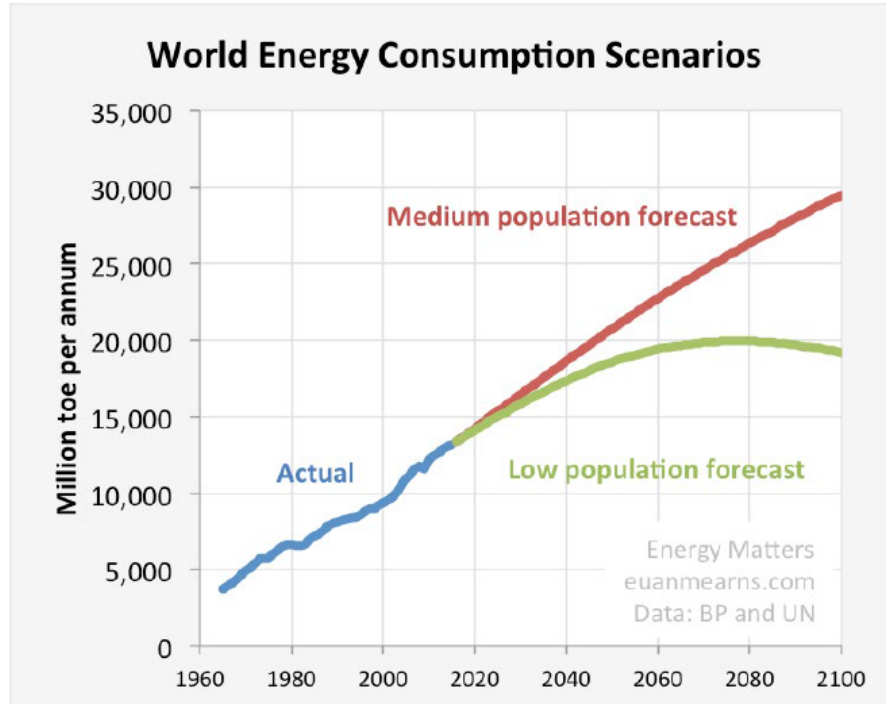


Desmontando mitos sobre la energía nuclear

- Panorama energético
- Historia de la energía nuclear
- Sobre la fisión nuclear
- Sobre la fusión nuclear
- Reflexiones finales



Panorama energético



Energy consumption in the world can multiply by 3 around 2100

ENERGY MIX

	1980	2020
Oil	47%	34%
Coal	23%	26%
Gas	21%	25%
Nuclear	3%	4%
Hydro	5%	7%
Others	<1%	4%

We must produce much more energy using procedures very different to the present ones!!!



Sobre la fisión nuclear – expectativa de crecimiento

	2010	2021	STEPS		APS		NZE	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Buildings	9 637	12 594	15 383	21 940	14 889	19 623	13 293	15 850
Industry	7 450	10 166	12 036	15 073	12 471	18 332	13 776	21 697
Transport	295	441	1 169	3 607	1 570	7 845	2 236	10 243
Hydrogen production	-	2	159	663	879	5 714	2 464	11 433
Global electricity demand	18 548	24 700	30 621	43 672	31 752	53 810	33 733	62 159
Unabated coal	8 670	10 201	9 044	5 892	8 076	1 580	4 666	0
Unabated natural gas	4 855	6 552	6 848	6 658	6 100	3 577	4 977	82
Unabated oil	969	682	432	312	363	175	180	3
Fossil fuels with CCUS	-	1	5	133	75	1 338	282	1 317
Nuclear	2 756	2 776	3 351	4 260	3 547	5 103	3 896	5 810
Hydropower	3 449	4 327	5 078	6 809	5 213	7 543	5 725	8 251
Wind	342	1 870	4 604	10 691	5 816	17 416	7 840	23 486
Solar PV	32	1 003	4 011	12 118	4 838	18 761	7 551	27 006
Other renewables	411	859	1 380	2 833	1 707	5 153	1 948	5 762
Hydrogen and ammonia	-	-	9	44	79	567	603	1 467
Global electricity supply	21 539	28 334	34 834	49 845	35 878	61 268	37 723	73 232

Notes: TWh = terawatt-hours; CCUS = carbon capture, utilisation and storage; PV = photovoltaics



Historia de la Energía Nuclear

- ❑ Durante los siglos XVIII y XIX, los avances de la sociedad se basaban en la teoría molecular. La molécula era indivisible y reaccionaban entre sí en los procesos físico-químicos, incluidos los procesos de generación.
- ❑ El descubrimiento del átomo en el siglo XX revolucionó la sociedad abriéndose nuevas perspectivas de aplicaciones industriales y en generación eléctrica no imaginadas.



Historia de la Energía Nuclear

El núcleo del átomo fue descubierto en 1911 por Rutherford a partir del análisis de partículas α emitidas por los átomos. Es a partir de 1932, con el descubrimiento del neutrón por Chadwick y con las reacciones llevadas a cabo por los esposos Joliot-Curie, cuando el núcleo empieza a tener verdadera importancia.

El núcleo ocupa la parte central del átomo; en él reside toda la carga positiva y casi la totalidad de la masa atómica. Está formado fundamentalmente por protones y neutrones. Los protones tienen una carga positiva cuantitativamente igual a la del electrón ($1,602 \times 10^{-19}$ culombios). Los neutrones son eléctricamente neutros.



Algunos de los grandes científicos a quienes debemos la física actual



Historia de la Energía Nuclear - Fisión



1938 Hann and Strassman Split uranium atoms with neutrons, Meitner and Frisch explain what's happening, and name it "fission"

1942 Fermi achieves first nuclear chain reactor in a squash court at U. of Chicago. Manhattan project in full swing. Secret cities are built in Oak Ridge TN (to enrich uranium), Hanford WA (to produce plutonium) and Los Alamos NM (to design and assemble bomb)



1953 Eisenhower gives Atoms for Peace speech, launching civilian program

2013 Voyager I enters interstellar space after traveling the solar system for 36 years. It is powered by a Plutonium-238 radioisotopic thermal generator



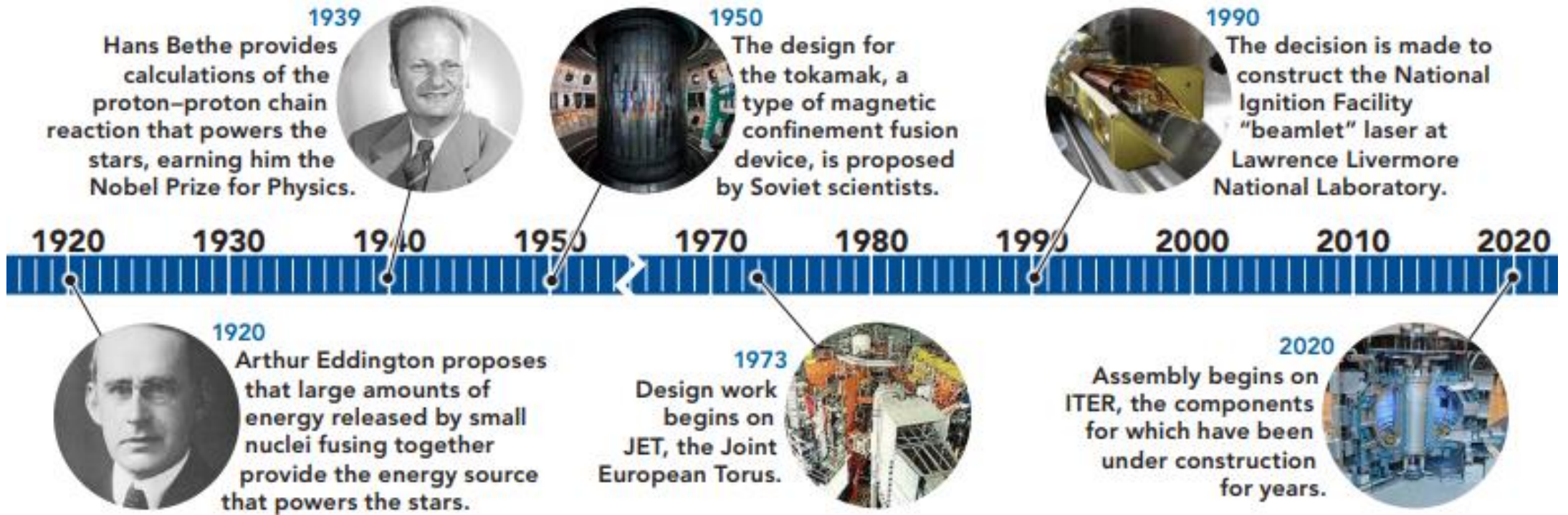
1939 Fermi and Szilard measure neutron multiplication, conclude that a nuclear chain reaction is possible

1951 EBR-1 reactor is the first to generate electricity in Arco, ID



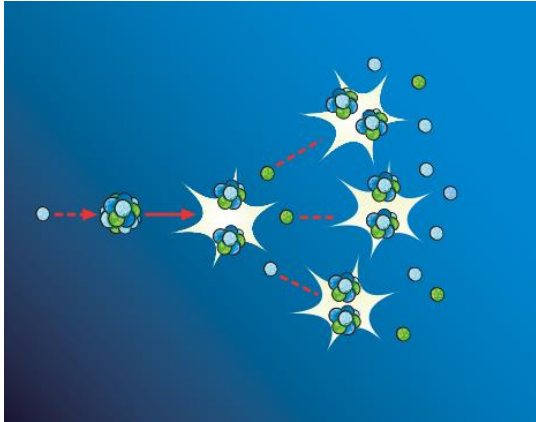


Historia de la energía nuclear – Fusión





Historia de la Energía Nuclear – Fundamentos

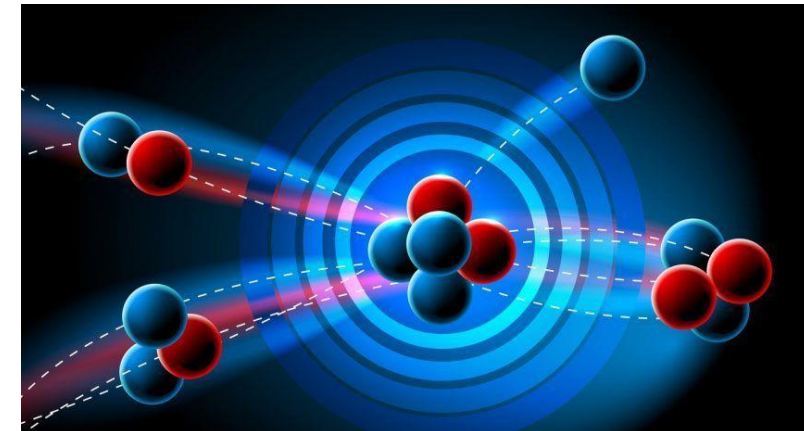


Fisión

- ❑ Es un proceso natural.
- ❑ Los productos de fisión son inestables y pueden originar reacciones en cadena.
- ❑ La fisión nuclear está consolidada como fuente de generación de energía con una gran eficiencia.

- ❑ La fusión nuclear no es un proceso natural.
- ❑ En la fusión nuclear se generan núcleos estables de He, no siendo posibles reacciones en cadena autocontroladas.

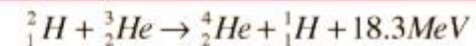
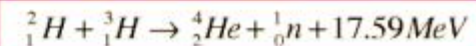
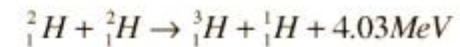
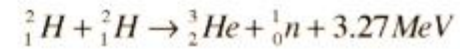
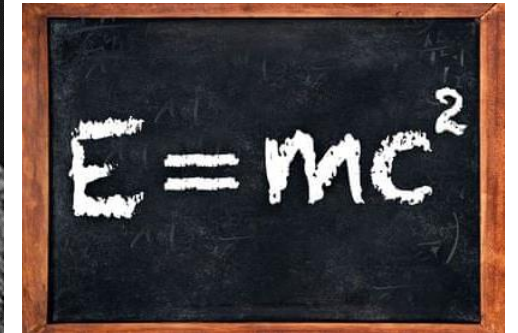
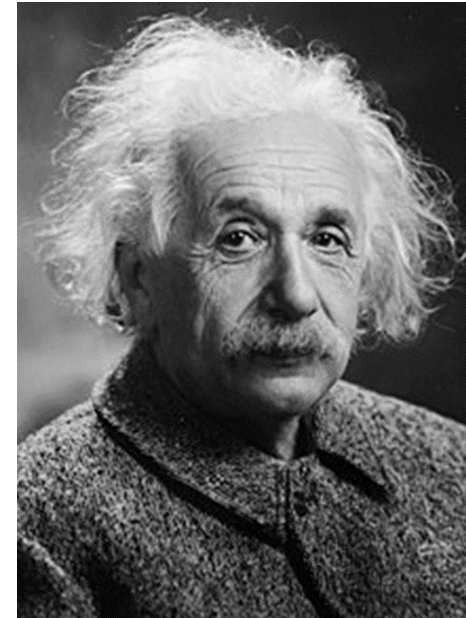
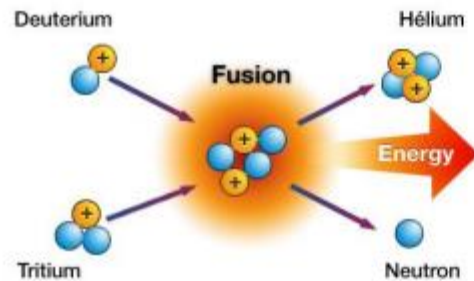
Fusión





Historia de la Energía Nuclear – Fusión y Fisión

Nuclear fusion is the process by which two light nuclei (HYDROGEN) join together to form a heavier nucleus... and release ENERGY!





Decisión sobre el uso pacífico de la energía nuclear

1950s

July 29, 1957: The International Atomic Energy Agency (IAEA) comes into existence with the mission of promoting and overseeing the peaceful use of nuclear technology. U.S. President Dwight Eisenhower had called for the creation of such an agency in his December 1953 “Atoms for Peace” proposal.

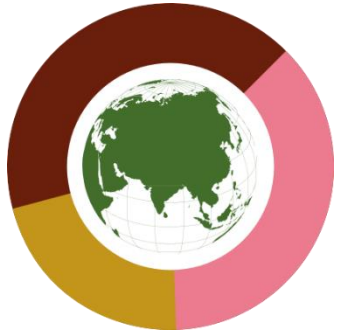
October 17, 1958: Ireland proposes the first resolution at the United Nations to prohibit the “further dissemination of nuclear weapons.”



Franz Matsch, Austria’s permanent representative to the UN and Paul Robert Jolles, executive secretary of the 18-nation Preparatory Commission for the International Atomic Energy Agency (IAEA), sign a conference agreement to secure facilities for the first General Conference of the IAEA on July 24, 1957 in Vienna. (UN Photo/MB)



Sobre la Fisión Nuclear



Nuclear energy in the world in figures

422

REACTORS IN OPERATION IN 33 COUNTRIES

57

REACTORS UNDER CONSTRUCTION IN 18 COUNTRIES



EUROPE

173

REACTORS IN OPERATION

AND

12 UNDER CONSTRUCTION



ASIA/AFRICA

134

REACTORS IN OPERATION

AND

41 UNDER CONSTRUCTION



AMERICA

115

REACTORS IN OPERATION

AND

4 UNDER CONSTRUCTION

Source: PRIS database. Last update on 2023-01-16

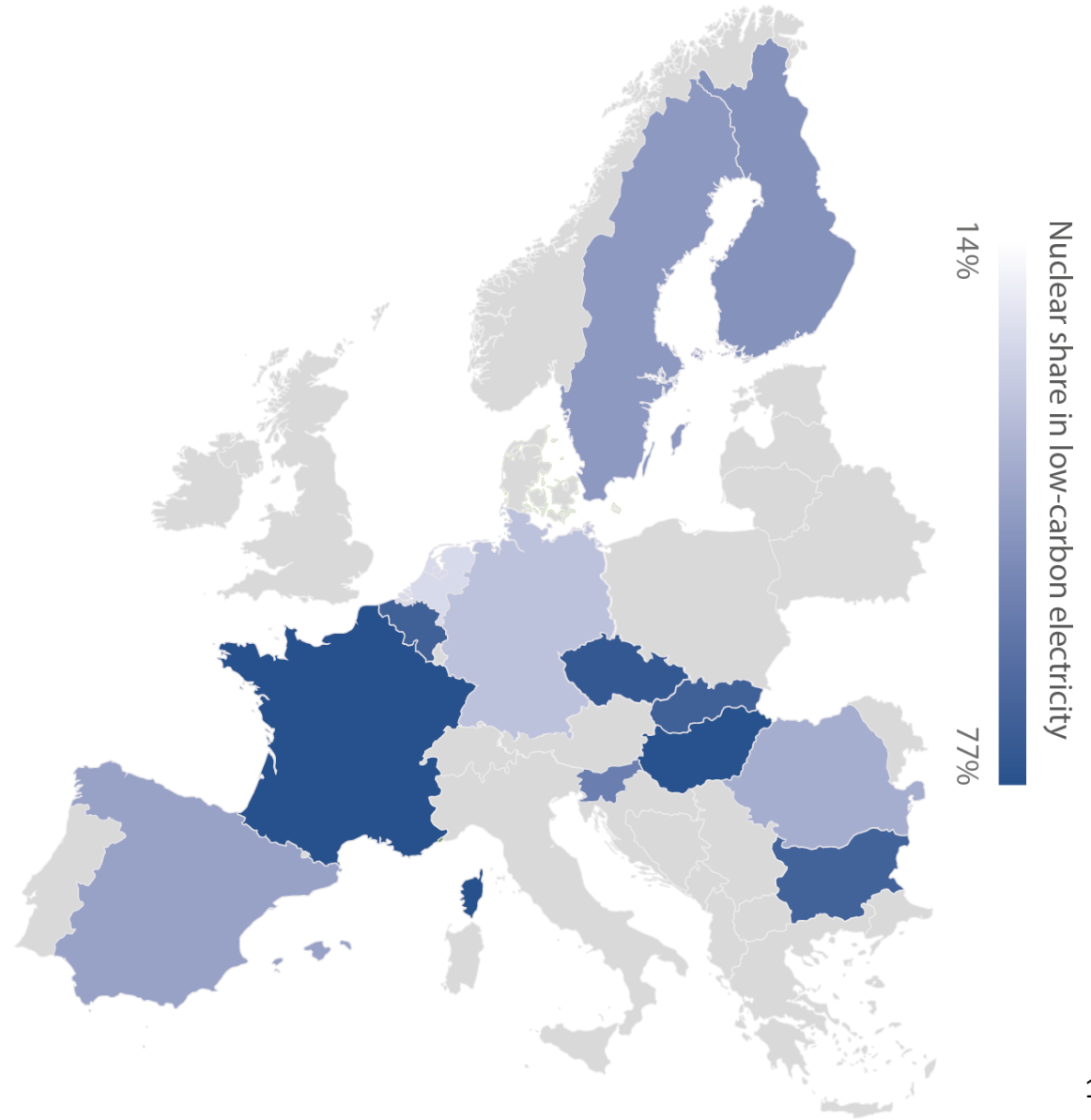
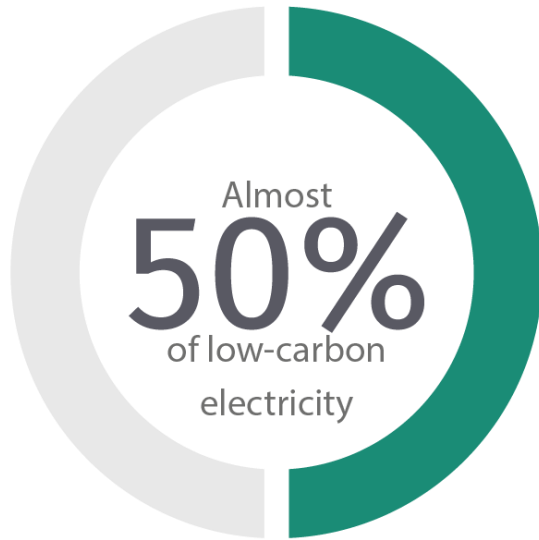
To meet projections for 2050, we need to replace some of the reactors of the exiting feet and build around 380 new ones in the next decades

(1) 31st de December 2021

(2) Source: PRIS-OIEA, World Nuclear Association y Foro Nuclear



Sobre la fisión nuclear – generación en EU





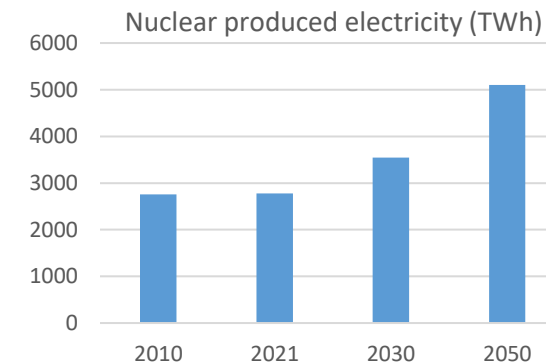
Sobre la fisión nuclear – expectativa de crecimiento

	2010	2021	STEPS		APS		NZE	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Buildings	9 637	12 594	15 383	21 940	14 889	19 623	13 293	15 850
Industry	7 450	10 166	12 036	15 073	12 471	18 332	13 776	21 697
Transport	295	441	1 169	3 607	1 570	7 845	2 236	10 243
Hydrogen production	-	2	159	663	879	5 714	2 464	11 433
Global electricity demand	18 548	24 700	30 621	43 672	31 752	53 810	33 733	62 159
Unabated coal	8 670	10 201	9 044	5 892	8 076	1 580	4 666	0
Unabated natural gas	4 855	6 552	6 848	6 658	6 100	3 577	4 977	82
Unabated oil	969	682	432	312	363	175	180	3
Fossil fuels with CCUS	-	1	5	133	75	1 338	282	1 317
Nuclear	2 756	2 776	3 351	4 260	3 547	5 103	3 896	5 810
Hydropower	3 449	4 327	5 078	6 809	5 213	7 543	5 725	8 251
Wind	342	1 870	4 604	10 691	5 816	17 416	7 840	23 486
Solar PV	32	1 003	4 011	12 118	4 838	18 761	7 551	27 006
Other renewables	411	859	1 380	2 833	1 707	5 153	1 948	5 762
Hydrogen and ammonia	-	-	9	44	79	567	603	1 467
Global electricity supply	21 539	28 334	34 834	49 845	35 878	61 268	37 723	73 232

STEPS = Stated Policies Scenario,
 APS = Announced Pledges Scenario;
 NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario.

The International Energy Agency (IEA) through the World Energy Outlook 2022 forecast that for all energy scenarios nuclear maintains its share of about 8- 10% of total electricity generation.

This means going from 2 780 TWh in 2021 to around 5 100 TWh in 2050.

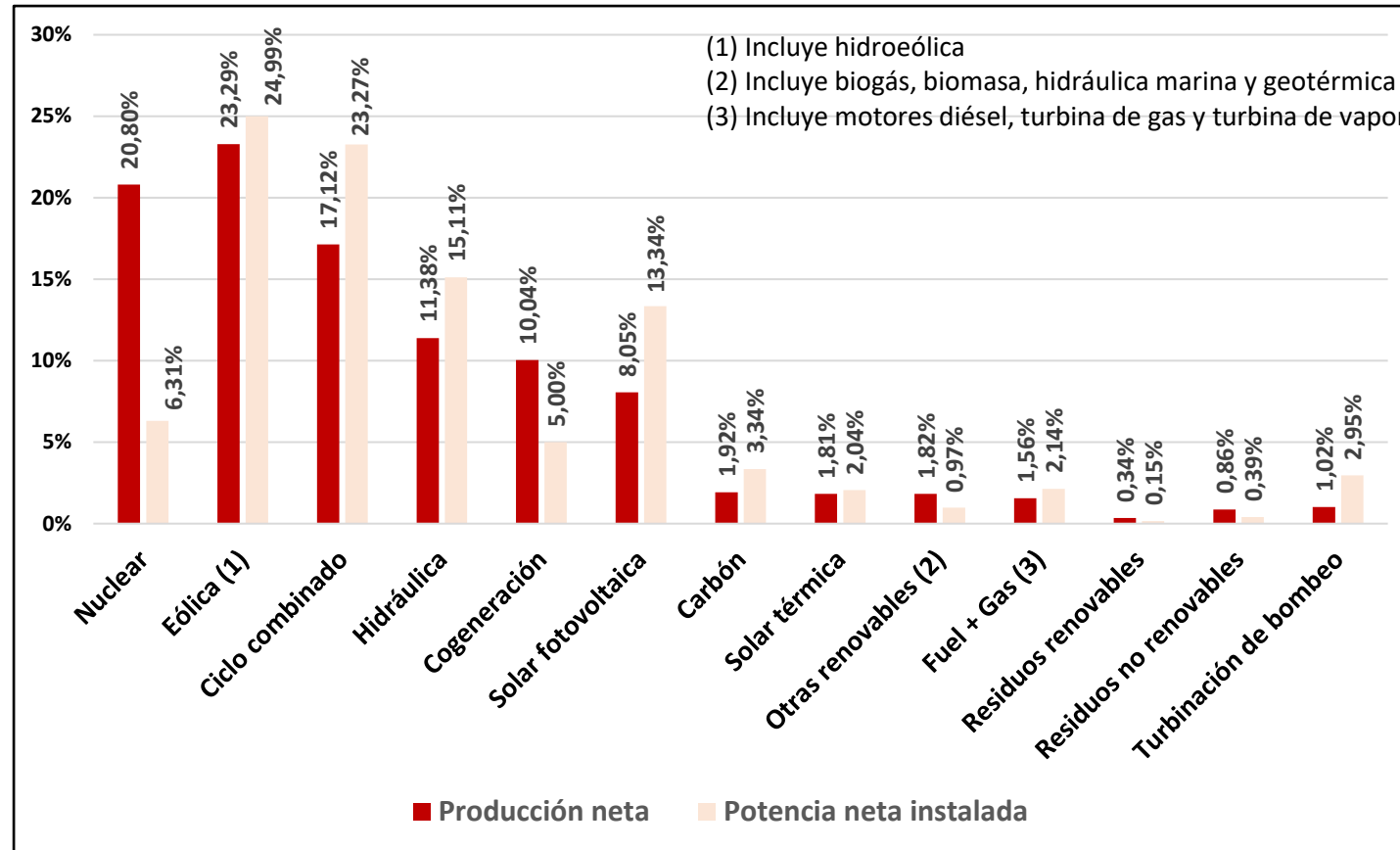


Source: World Energy Outlook 2022 (International Energy Agency)

Notes: TWh = terawatt-hours; CCUS = carbon capture, utilisation and storage; PV = photovoltaics



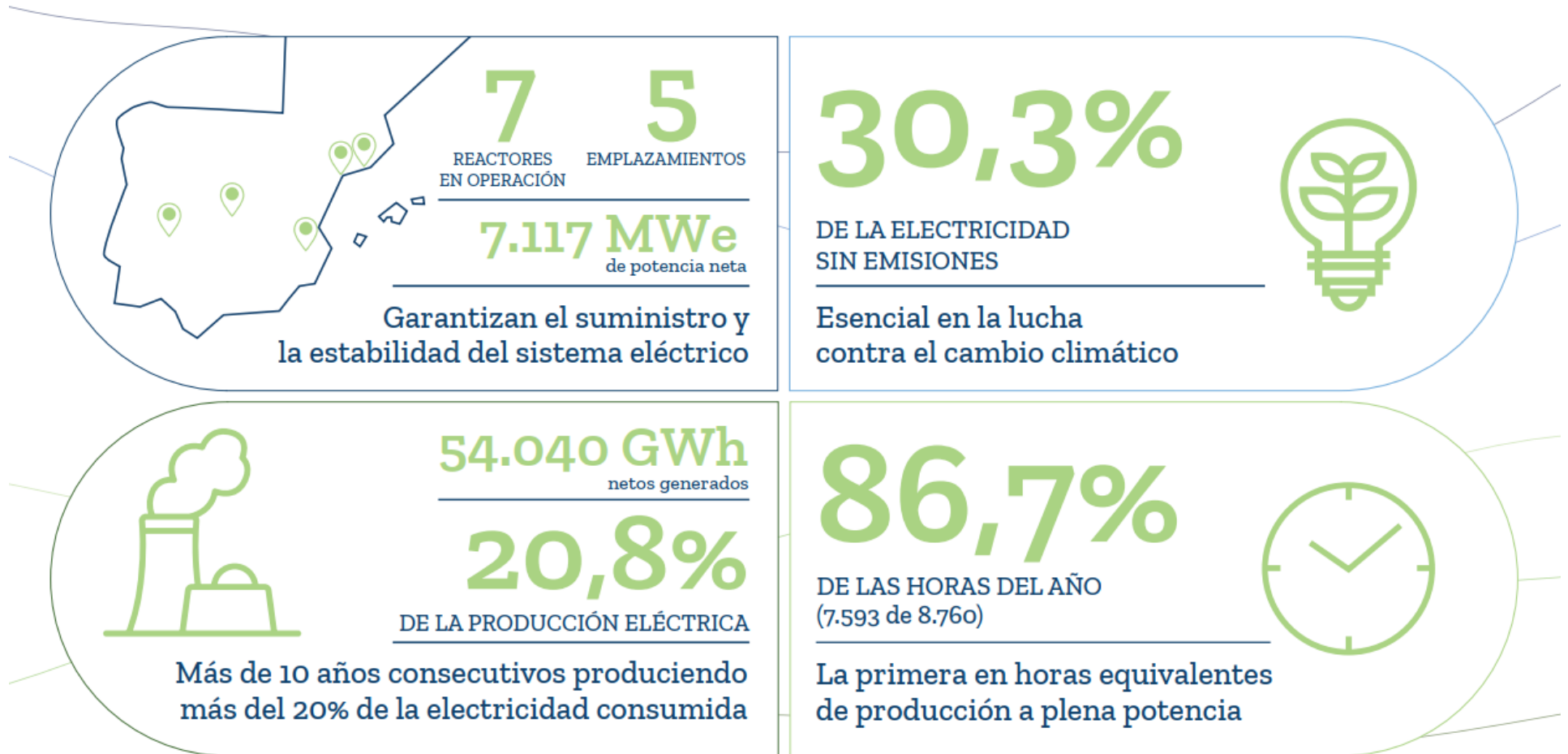
Sobre la Fisión Nuclear – contribución en España



□ Producción sin emisiones de CO₂ (68,5% del total), de la que el **30,3% es nuclear**



Sobre la Fisión Nuclear – producción de electricidad en España



Nota: 6 reactores realizaron parada de recarga de combustible en 2021



Sobre la Fisión Nuclear – Proyección

TRANSICIÓN ENERGÉTICA – PNIEC 2021-2030

Evolución de la potencia renovable instalada ⁽¹⁾

2015	2020 ⁽²⁾	2025 ⁽²⁾	2030 ⁽²⁾	Δ 2030/2020	
50.884	59.690	90.800	120.253	60.563	> 6.000 MW/año

Evolución de la potencia nuclear instalada

2015	2020 ⁽²⁾	2025 ⁽²⁾	2030 ⁽²⁾
7.399	7.399	7.399	3.181

Datos en MW brutos

⁽¹⁾ Incluye eólica, solar FV, solar TE, hidráulica, bombeo y biomasa

⁽²⁾ Estimaciones del Escenario Objetivo del PNIEC 2021-2030



Sobre la Fisión Nuclear – Actuaciones recientes

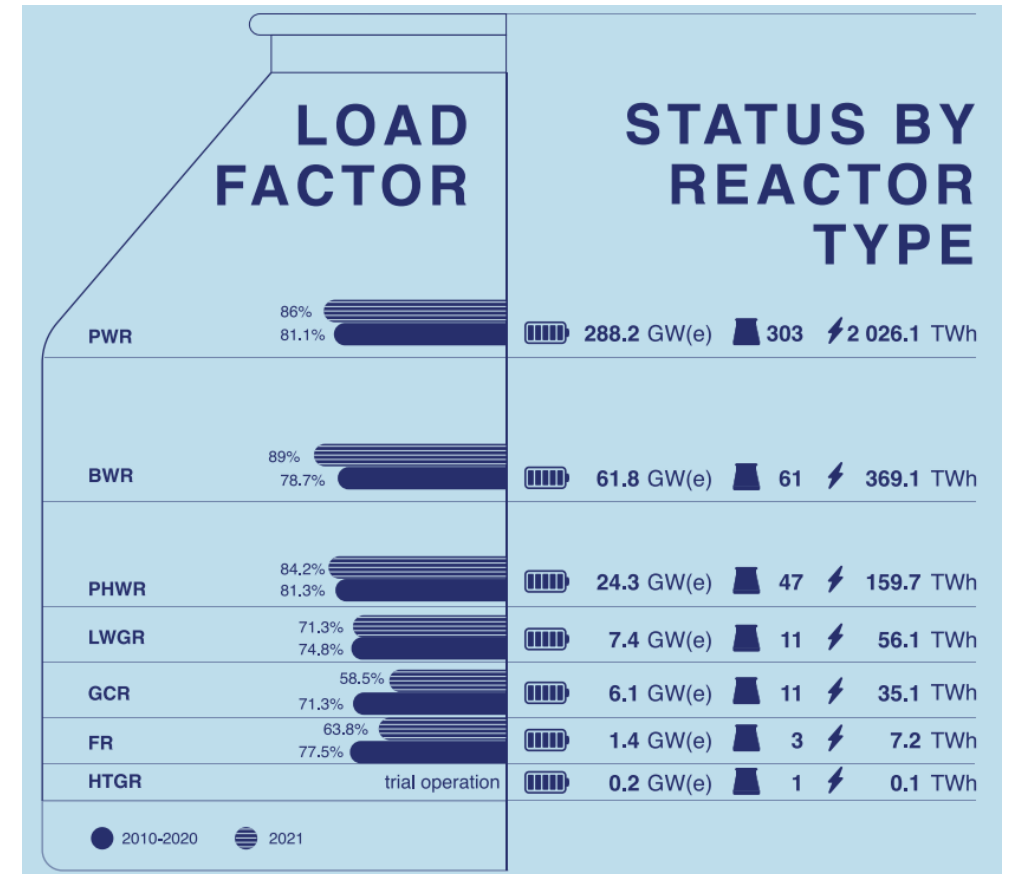
- ❑ Acuerdo Canadá-EEUU para construir y licenciar reactores SMR
- ❑ Primera construcción en Canadá – reactor seleccionado BWRX-300
- ❑ Resolución EU sobre la consideración de la energía nuclear como energía de transición limpia para reactores licenciados antes de 2045 publicado en el Boletín Oficial de la UE el 15 de julio de 2022
- ❑ Compromiso de los estados miembros de avanzar en el almacenamiento de residuos
- ❑ Poderes de la Comisión Europea para aplicar el reglamento de taxonomía sobre inversiones en proyectos nucleares
- ❑ Programas intensivos y construcción de nuevos reactores en China



Sobre la Fisión Nuclear – tecnologías PWR, BWR y otros reactores en el mundo

Actualmente, existen las siguientes tecnologías de reactores:

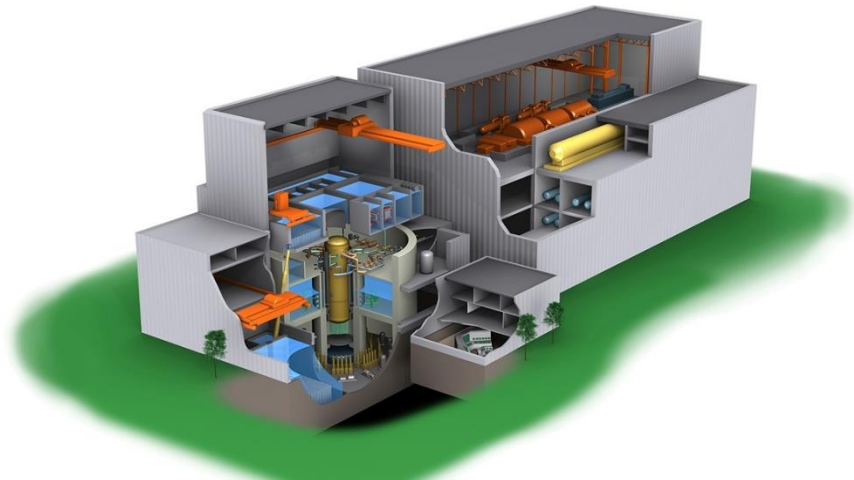
- Reactor de agua a presión (PWR)
- Reactor de agua en ebullición (BWR)
- Reactor de uranio natural, gas y grafito (GCR)
- Reactor avanzado de gas (AGR)
- Reactor refrigerado por gas a temperatura elevada (HTGCR)
- Reactor nuclear de agua pesada (HWR)
- Reactor reproductor rápido (FBR)





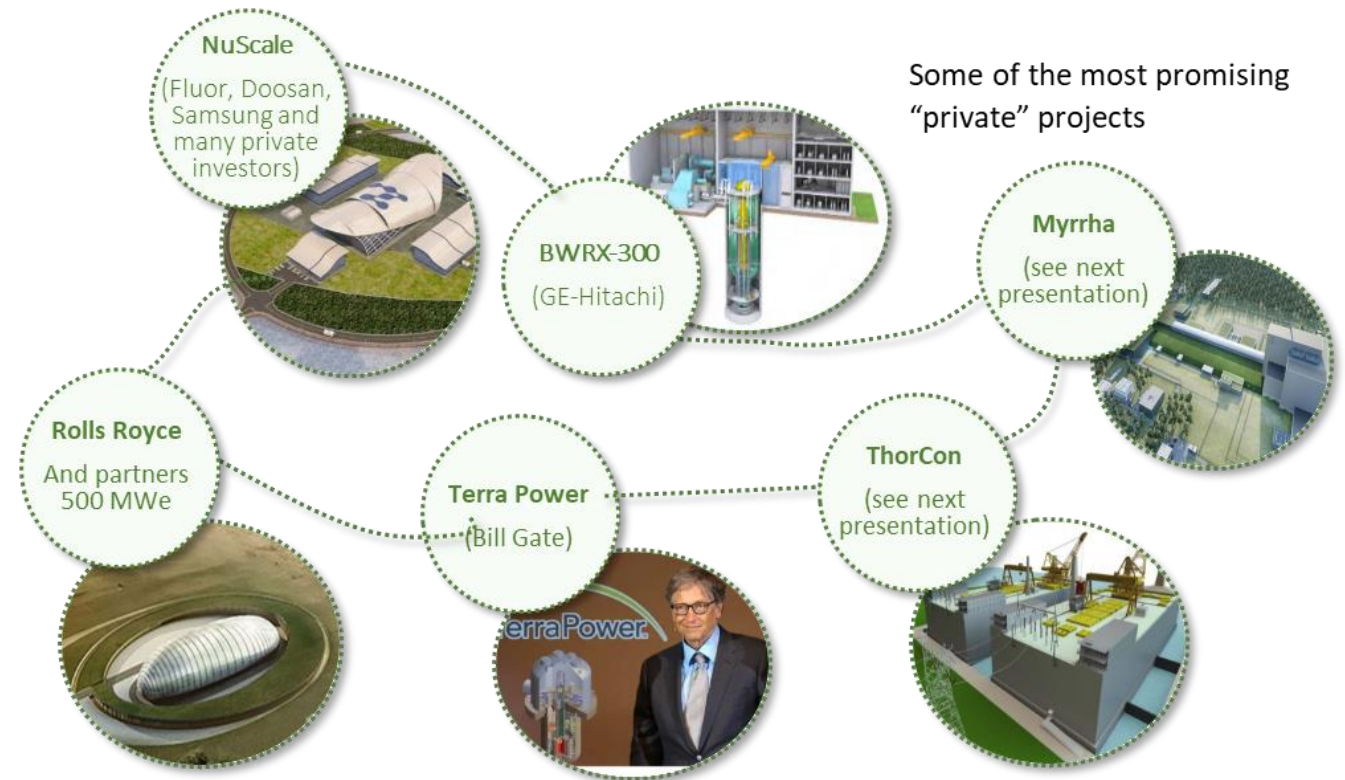
Tipos de reactores para el mercado

Evolucionados y pasivos de gran potencia de agua ligera



Reactores de pequeña potencia de agua ligera (SMR)

Reactores de generación IV de pequeña potencia (SMR)

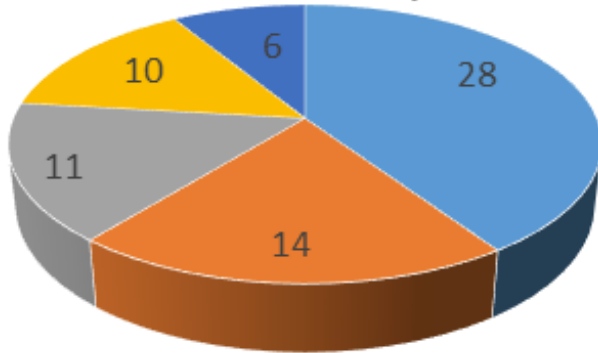




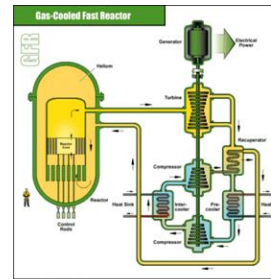
Sobre la Fisión – inversiones

Some private or semi public SMR projects with project timescale shorter that the large power reactors

69 new concepts of SMR

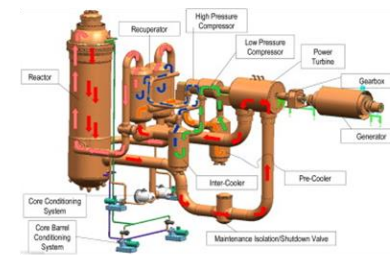


- Water cooled (PWR/BWR)
- High temperature gas cooled
- Fast breeder
- Molten salt



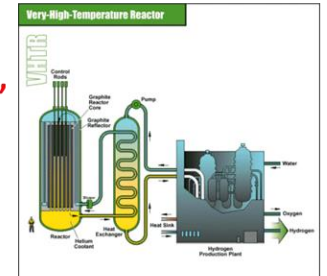
LEAD

- “LEADER”
- “ELSY”
- “SILER”



GAS

- “HYCYCLES”
- “HYTECH”
- “ADEL”
- “RAPHAEL”
- “ARCHER”

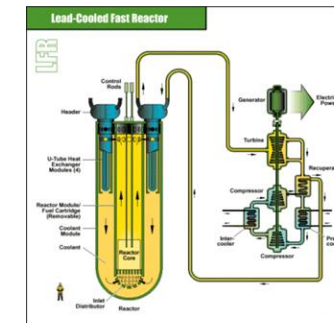
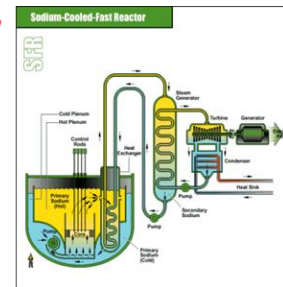


ACCELERATOR



sck cen

- “Eurotrans”
- “ADS”
- “MAX”
- “CDT”



SODIUM

- “EISO FAR”
- “ESFR”



Sobre la Fusión nuclear – Lanzamiento

“For the benefit of mankind”

The idea for ITER originated from the Geneva Superpower Summit in 1985 where Presidents Gorbachev and Reagan proposed international effort to develop fusion energy...

“... as an inexhaustible source of energy for the benefit of mankind.”



November 21,
2006, in Paris:

China, Europe,
India, Japan,
Russian Federation
and the United
States of America
signed the ITER
Agreement.



Sobre la Fusión nuclear – sueño de la Fusión



- ❑ Potencia actual generada por el hombre global: $3,65 \times 10^{20}$ J
- ❑ Comparando con la energía de fusión que podría generarse con los recursos existentes supondría abastecer de energía durante unos

32.000 millones de años



Sobre la Fusión nuclear – sueño de la Fusión

- ❑ Población mundial: 8.000 millones
- ❑ Consumo de petróleo: 90 millones barriles al día
- ❑ Ciudad de 1 millón de personas:
 - ❑ 250.000 T de petróleo
 - ❑ 400.000 T de carbón
 - ❑ 60 g de D



El papel de la fusión



Las necesidades energéticas de una ciudad desarrollada de 1 millón de personas durante una semana se pueden cubrir mediante

1X  (250,000 TONNES OF OIL)

O bien...

20X  (400,000 TONNES OF COAL)

O bien...

60 kg de deuterio (D) y tritio (T)!

**Densidad de energía!
(en Megajoules por kg)**



Coal	33
Crude oil	46
Natural gas	55
Ethanol	30
Biodiesel	38
Wood	16
U-235...	
D-T...	



Sobre la Fusión nuclear – sueño de la Fusión

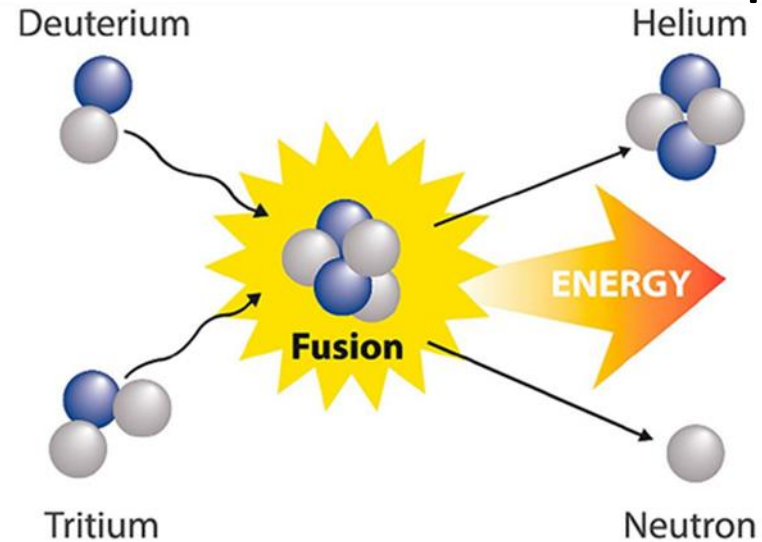


- Deuterio (D): el agua del mar contiene un átomo de D por cada 6.500 de H₂
- 1 Deuterion = 5 MeV
- 1 m³ de agua = 8 x 10¹² J = 200 T de petróleo
- Contenido equivalente del agua del mar:

$$1,2 \times 10^{31} \text{ J}$$

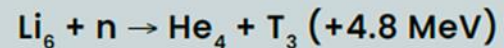


Sobre la fusión – conceptos básicos



Deuterium: 0.33 mg/liter

(Tritium) : obtained on-site from Lithium



- **Lithium:** from mining or from sea-water
Quite widely distributed in the world



+



30 gr. Li

=

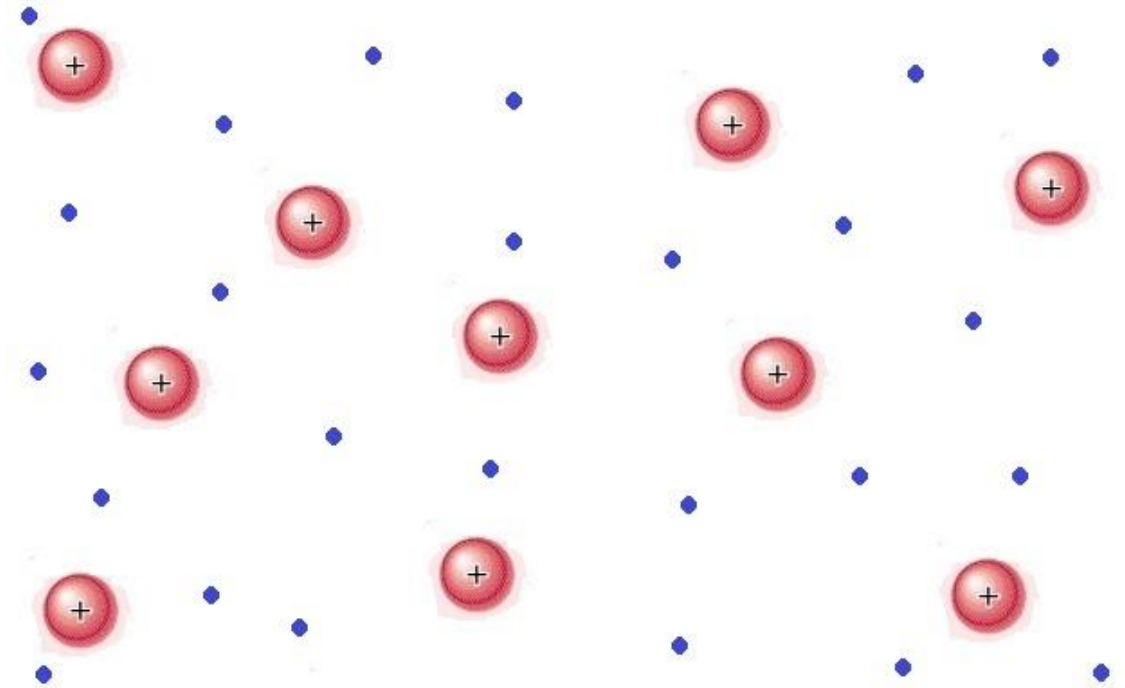
Energy consumption of an average european in 30 years



Sobre la fusión – conceptos básicos

Es el cuarto estado de la materia; es un gas ionizado, o sea que los núcleos están separados en dos tipos de partículas: iones (positivos) y electrones (negativos). De este modo el plasma es un estado parecido al gas, pero compuesto por electrones, cationes (iones de carga positiva) y neutrones, todos separados entre sí y libres. Por esta razón es un excelente conductor.

Plasma





Sobre la fusión – conceptos básicos

A principios del siglo XX, el físico holandés H. Kamerlingh Onnes y su equipo de investigadores se dedicaron a estudiar **las propiedades de la materia a temperaturas muy bajas**, entre $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$. En 1911 observaron que la resistencia eléctrica del mercurio tiende a cero (desparece) por debajo de $4,2\text{ K}$ ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$). **Acababan de descubrir la superconductividad**. Sus aportaciones en este campo les hicieron merecedores del **Premio Nobel de Física en 1913**.

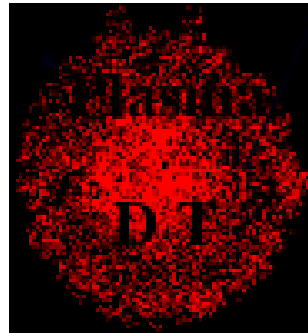




Sobre la fusión – conceptos básicos

Condiciones de fusión

Núcleos D-T han de colisionar a alta velocidad



$E = 15-20\text{keV}$

No es rentable mediante aceleradores.

Plasma con partículas a 15 keV:

Temperatura del plasma:
 $170.000.000^{\circ}\text{C}$



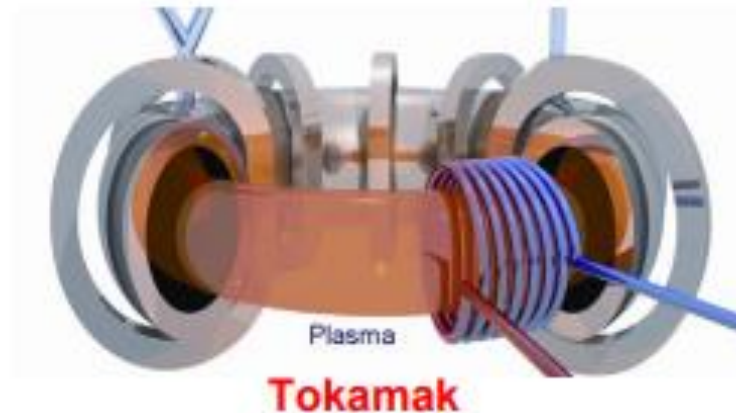
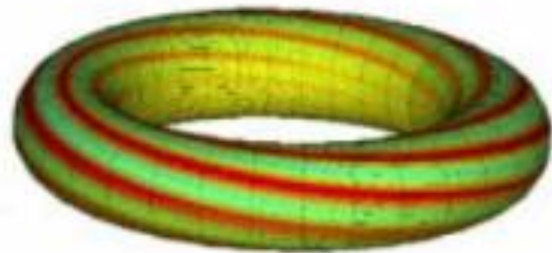
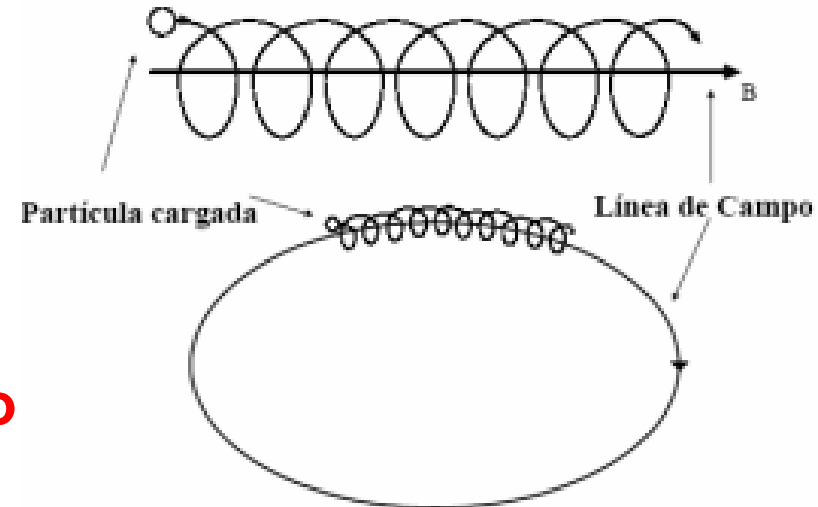
Sobre la fusión – conceptos básicos

Condiciones de fusión

Temperatura del plasma:
200.000.000 °C

“Recipiente inmaterial”

Confinamiento magnético





Sobre la fusión – formas de generación

Gravedad	Campos magnéticos	Inercia
 <p>Plasmas de formación de las estrellas</p>	 <p>Tokamak</p>	 <p>Fusión por haces de láseres</p>
<----- Dimensiones: 10^{19} m ----->	<----- Dimensiones: 10 m ----->	<----- Dimensiones: 10^{-1} m ----->
Tiempos de vida del plasma: 10^{15} - 10^{18} s	Tiempos de vida del plasma: 10^{-2} - 10^6 s	Tiempos de vida del plasma: 10^{-9} - 10^{-7} s
<ul style="list-style-type: none">• Compresión• Energía de los productos de fusión	<ul style="list-style-type: none">• Ondas electromagnéticas• Calentamiento óhmico (electricidad)• Inyección de neutros (haces de átomos de hidrógeno)• Compresión• Energía de los productos de fusión	<ul style="list-style-type: none">• Compresión (Implosión producida por láseres o haces de iones, o por rayos X producidos por láseres o haces iónicos)• Energía de los productos de fusión

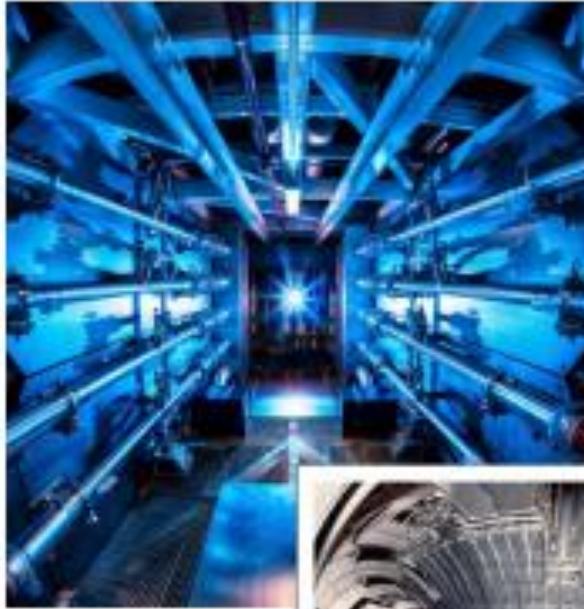


Sobre la fusión – formas de generación

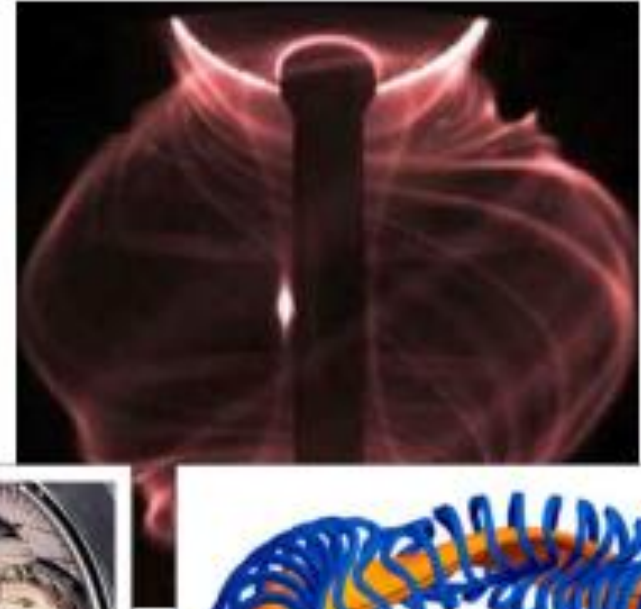
gravitational
fusion



inertial
fusion



magnetic
fusion



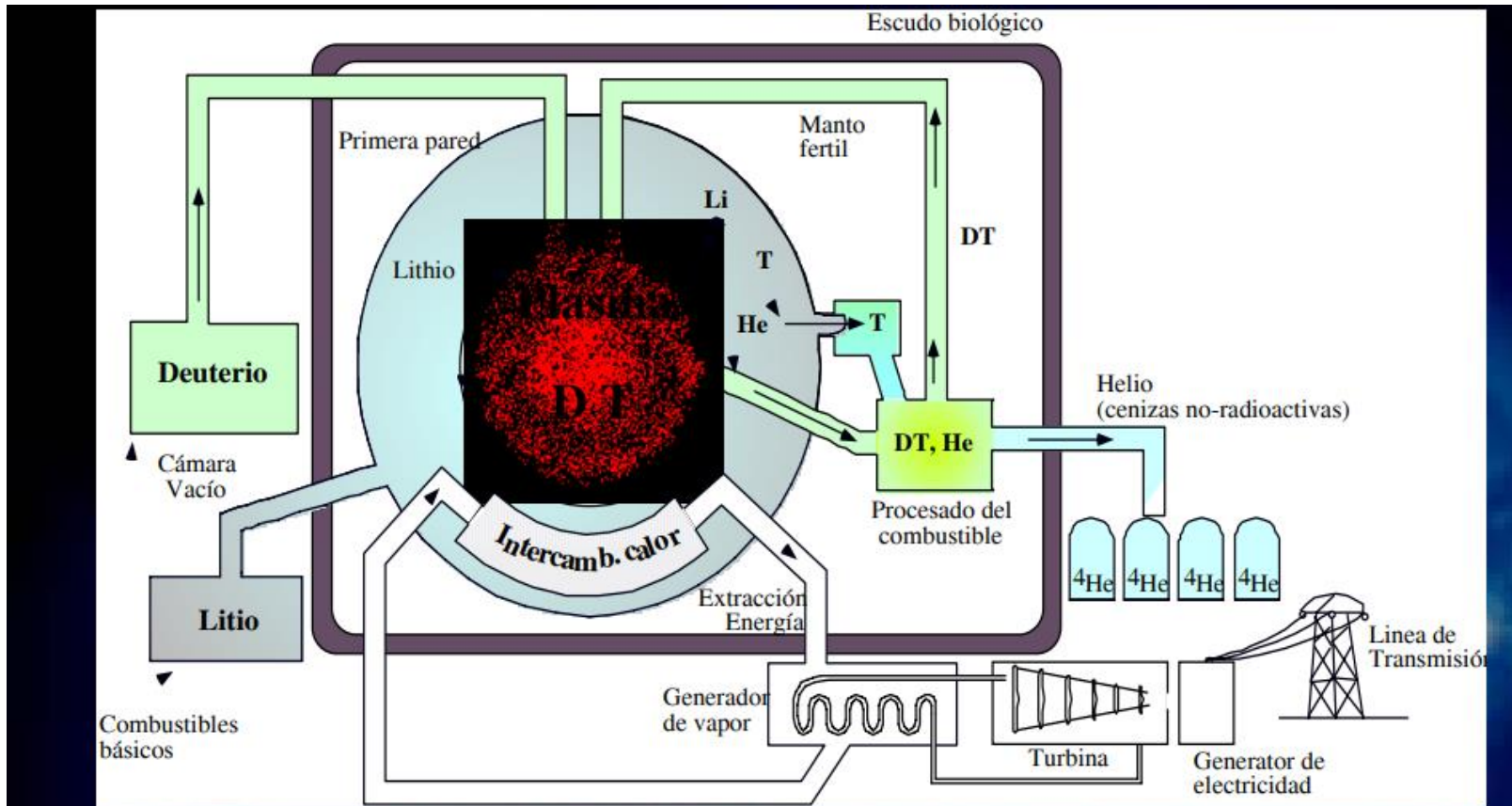
tokamaks



stellarators



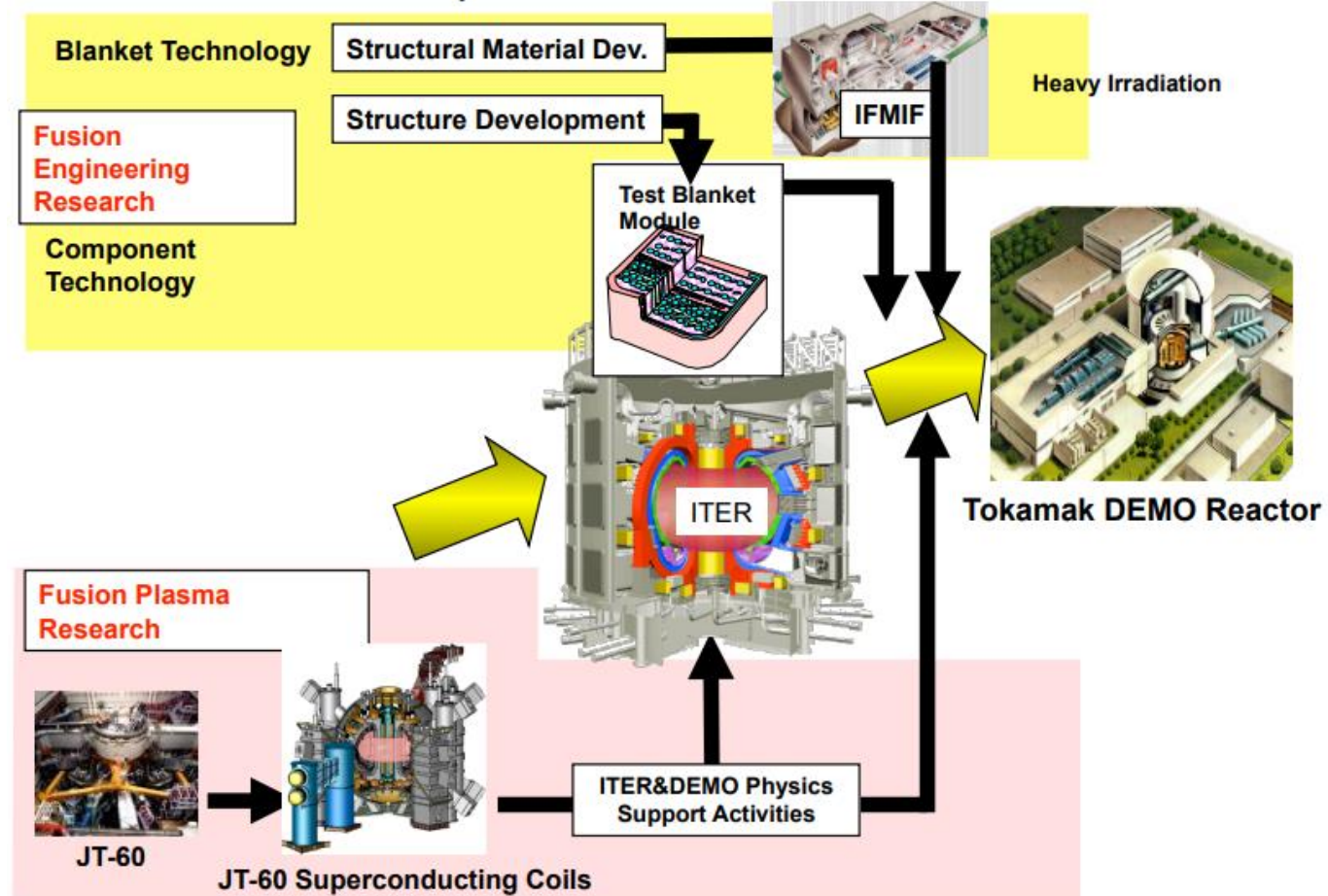
Sobre la fusión – formas de generación





Sobre la fusión – hoja de ruta como fuente de generación

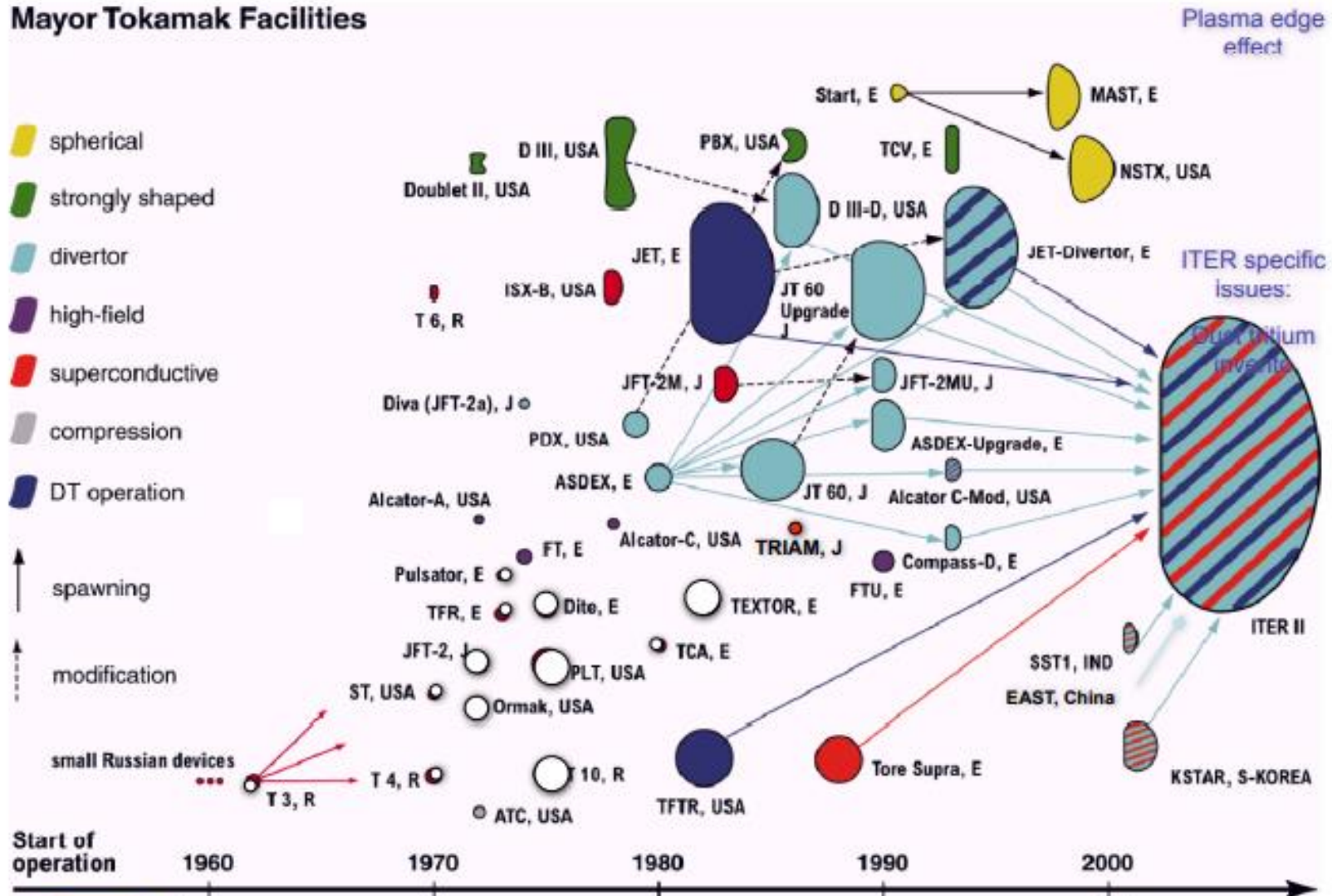
The Present and the Future
Road Map to Fusion: The DEMO Reactor





Sobre la fusión – experimentos de fusión

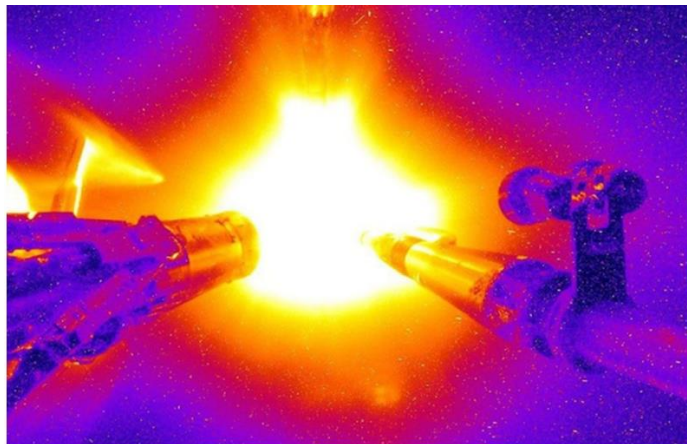
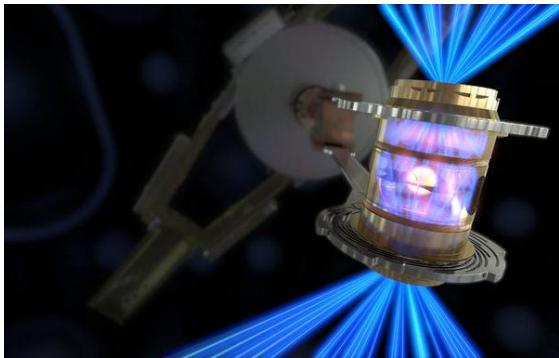
Mayor Tokamak Facilities



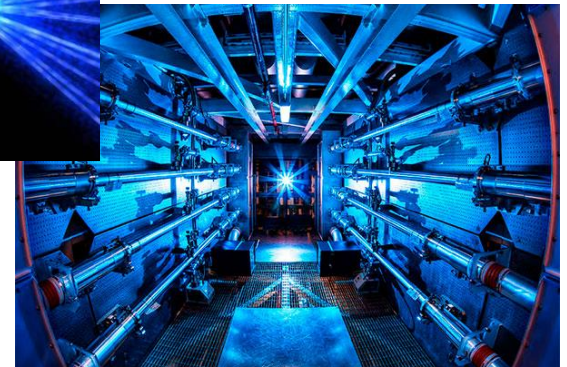
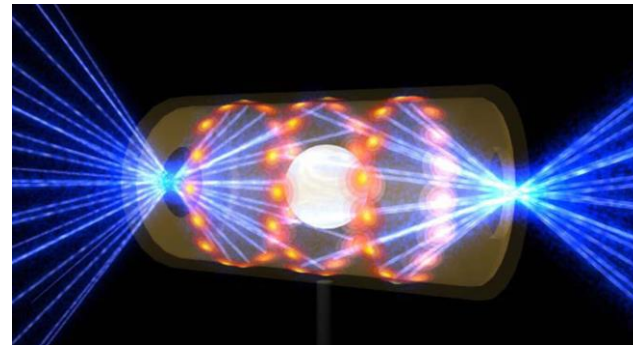


Sobre la fusión – fusión inercial

Experimento del Lawrence Livermore National Laboratory: 192 láseres con una energía de 2,05 MJ obteniendo 3,15 MJ de energía de fusión. 1500 m de tubería sobre un objetivo de 2 mm.



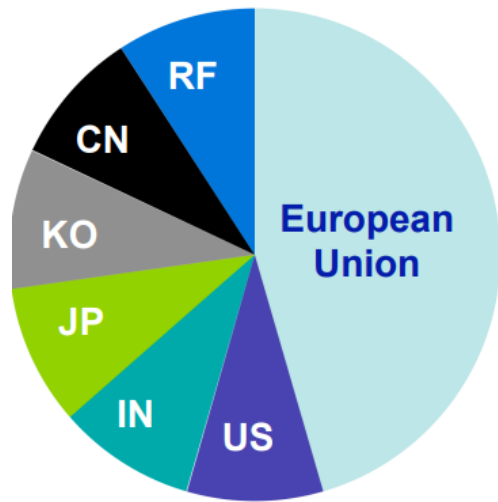
Lawrence Livermore National Laboratory



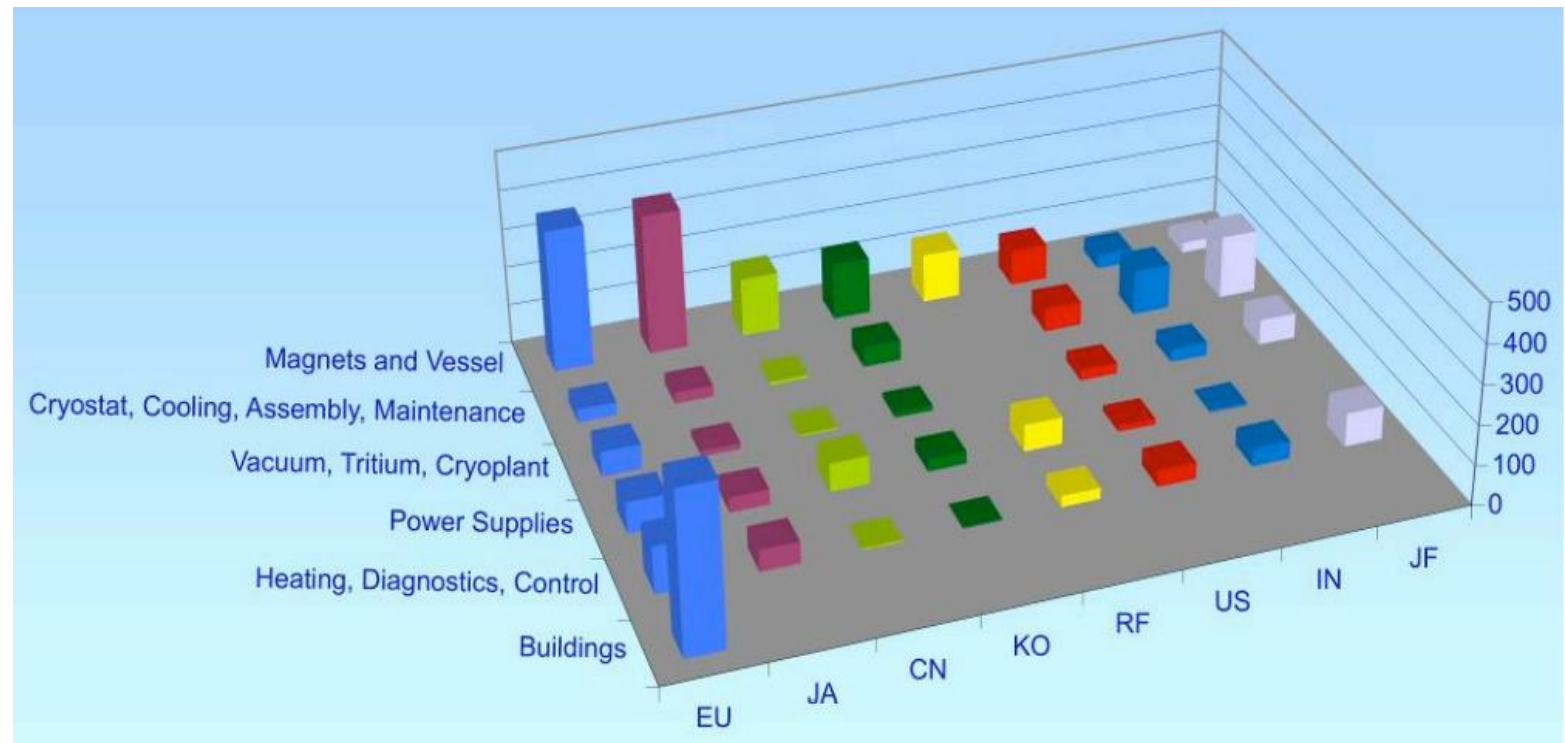


Sobre la fusión – ITER

Procurement Sharing

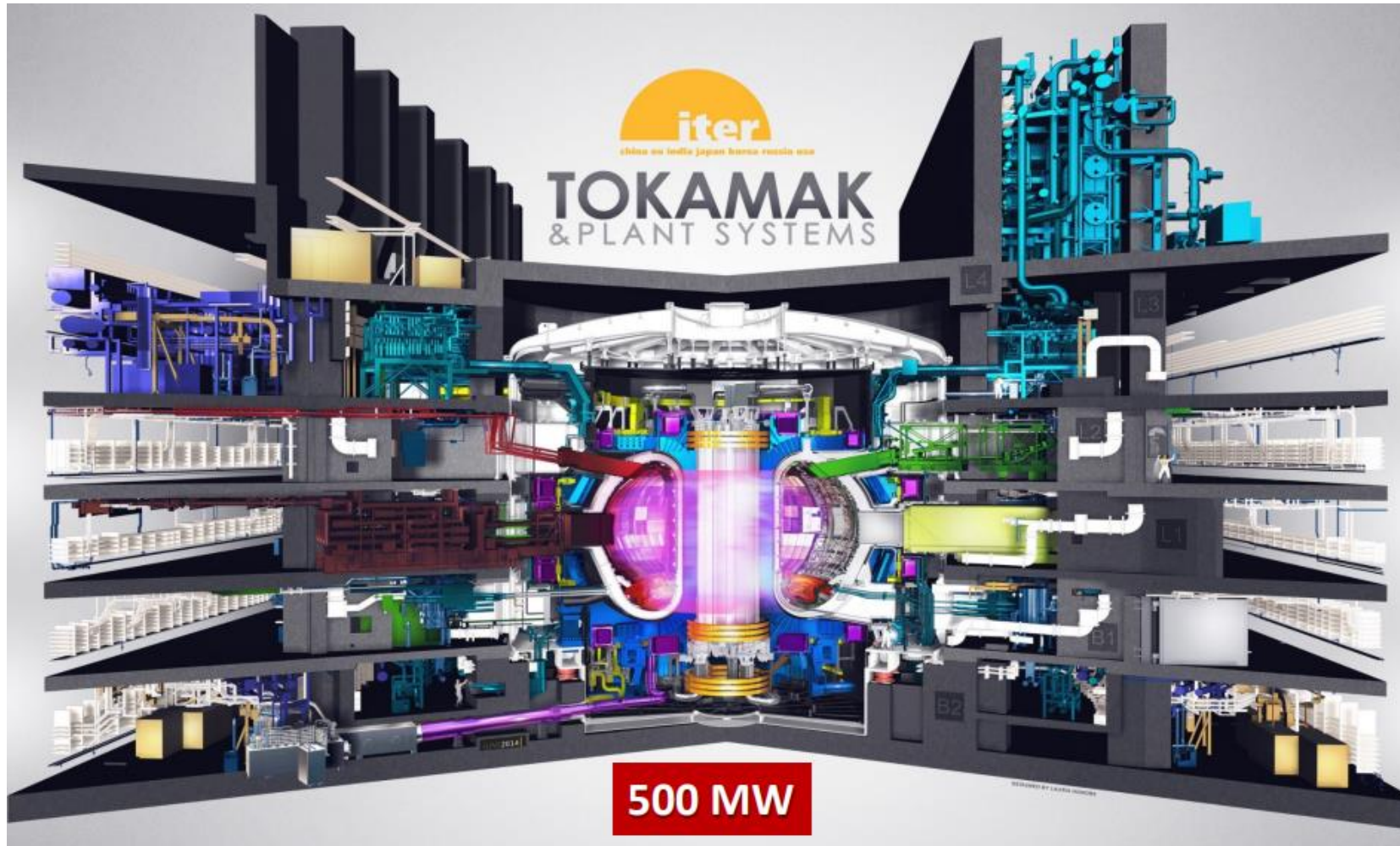


A unique feature of ITER is that almost all of the machine will be constructed through *in kind* procurement from the Parties





Sobre la fusión – ITER



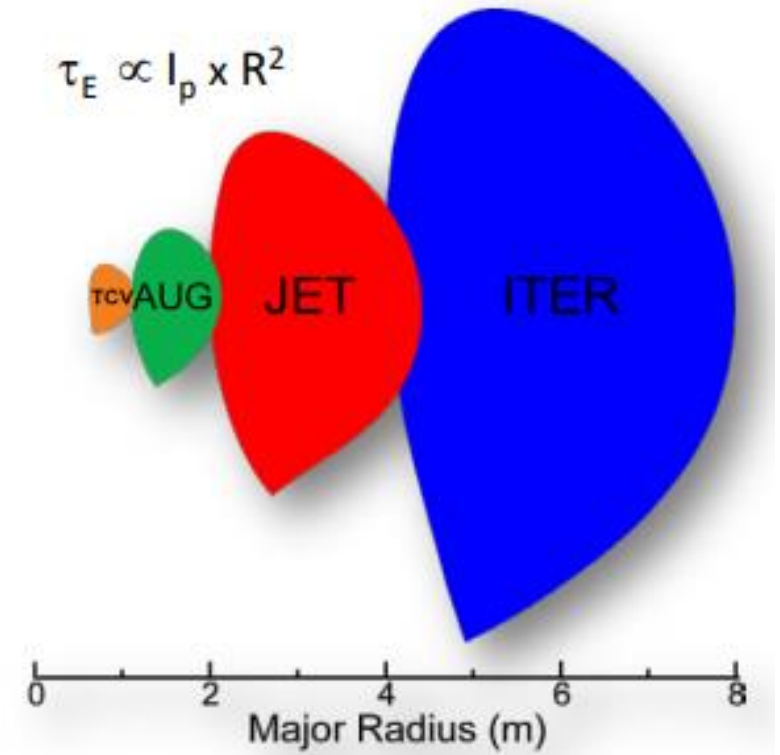


Sobre la fusión – ITER

To demonstrate the scientific and technological viability of controlled fusion for power production...

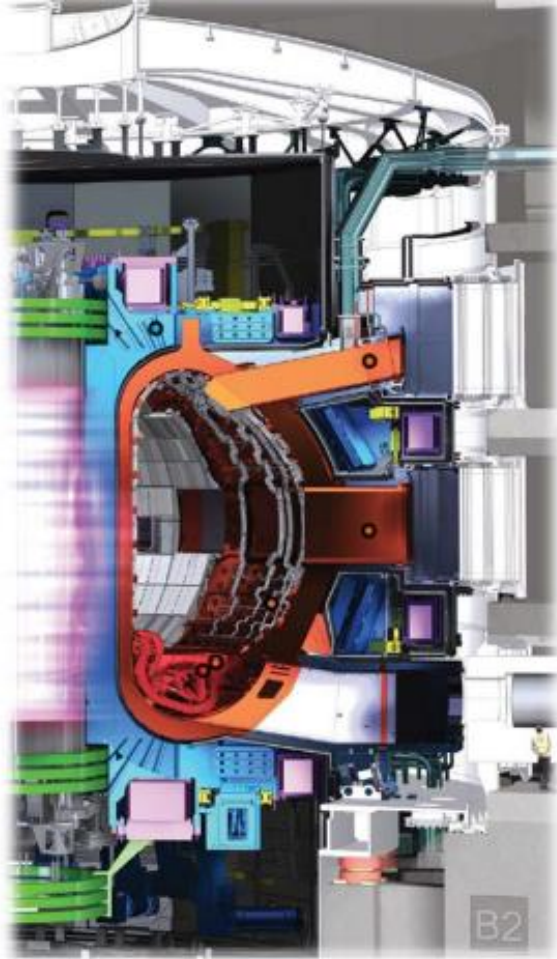
- ❑ ...by generating **500 MW** of fusion power (amplification factor in plasma $Q=10$)
- ❑ in **long-pulse** operation (up to 500s)
- ❑ aiming at **steady-state** operation
- ❑ **integrated operation** of technologies for a fusion power plant...

... under nuclear regulation (INB-174)





Sobre la fusión – ITER



R/a:	6.2 m / 2 m
Volume:	830 m ³
Plasma Current:	15 MA
Toroidal Field:	5.3 T
Density:	10 ²⁰ m ⁻³
Peak Temperature:	2x10 ⁸ K
Fusion Power:	500 MW
Plasma Burn	300-500 s
“Steady-state”	~3000 s



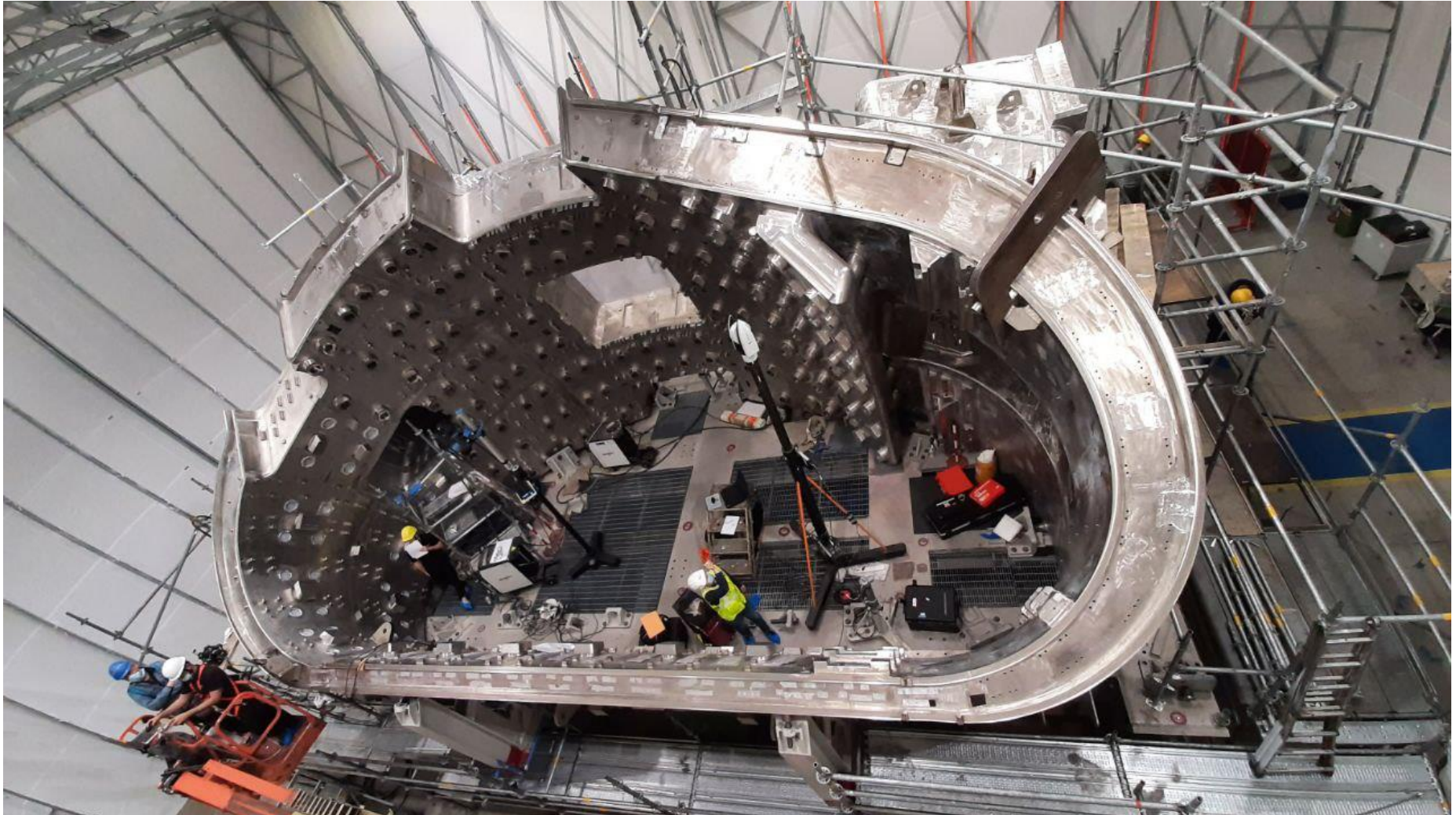
Sobre la fusión – ITER





Fusión por campos magnéticos – construcción de ITER

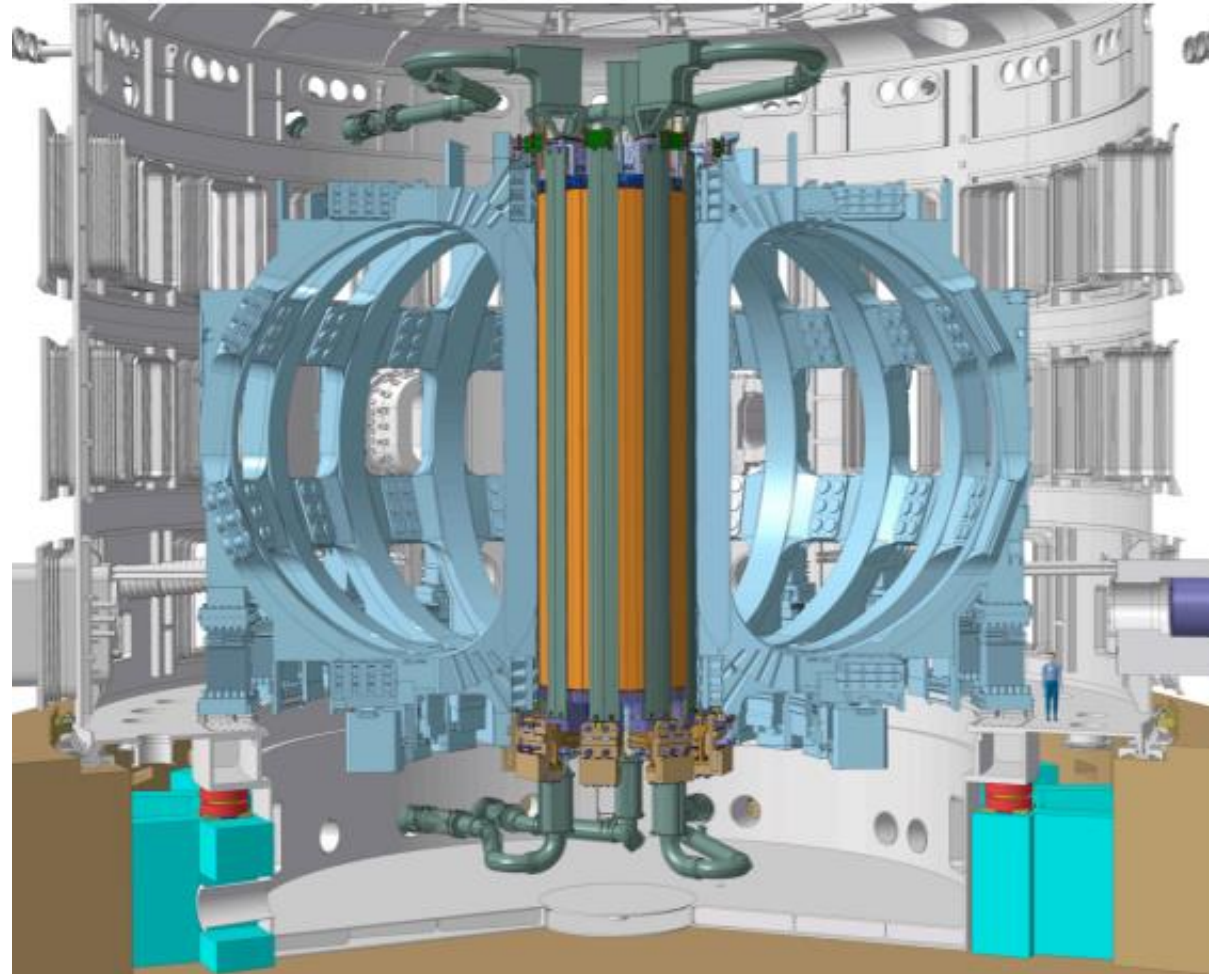
Vacuum
vessel





Sobre la fusión – ITER

Solenoides
Central y
Bobinas
Toroidales





Sobre la fusión – ITER

Central solenoid





Sobre la fusión – ITER

Ejemplo de impacto tecnológico: 450 toneladas de cable de Nb₃Sn

la compra de material superconductor más grande de la historia (la capacidad mundial de producción de material superconductor se ha multiplicado por 5)

~150,000 km de fibras





Sobre la fusión – ITER

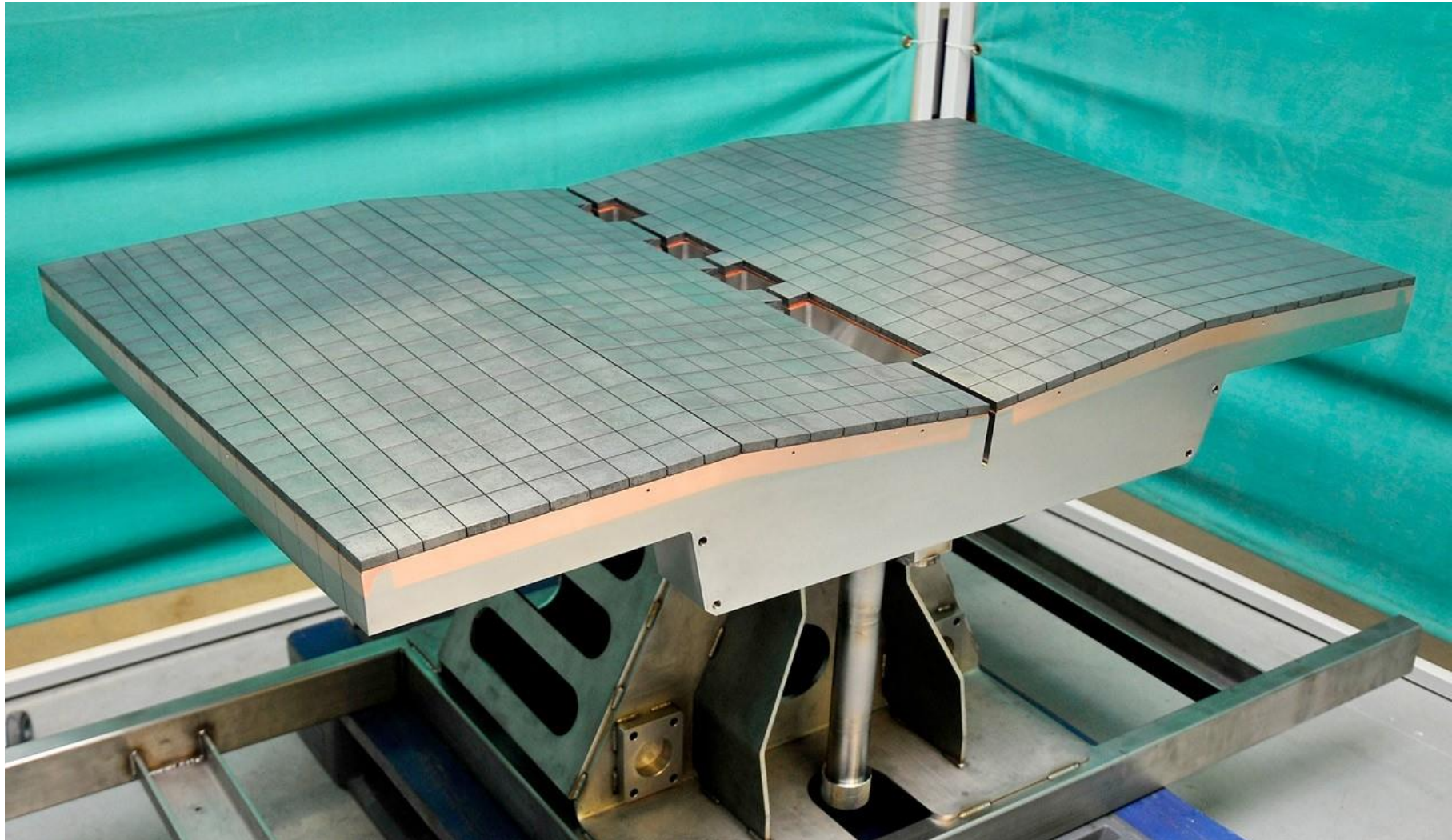
Divertor





Sobre la fusión – ITER

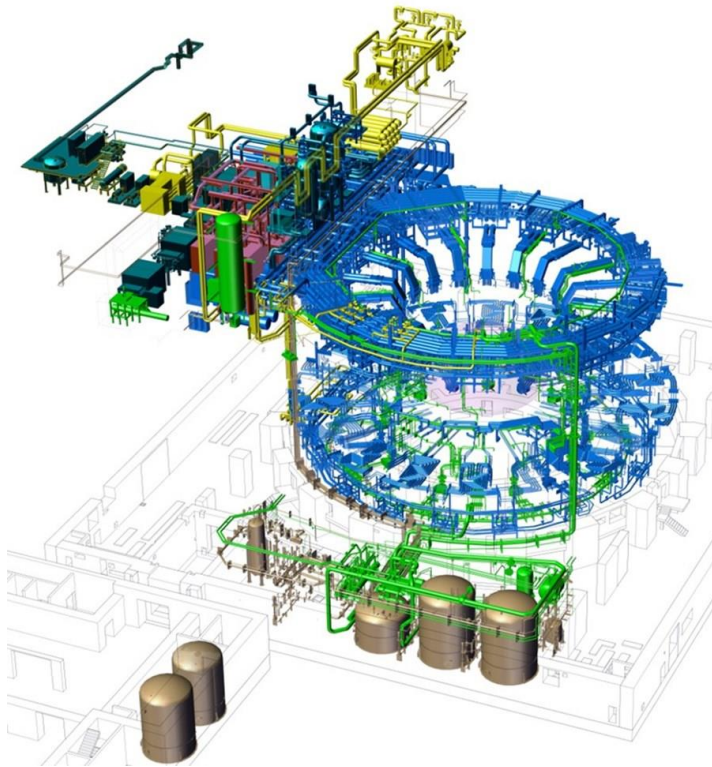
First Wall panels





Sobre la fusión – ITER

Tokamak
cooling water
system





Sobre la fusión – Perspectivas

Aspectos a considerar:

1. Demostración de pulsos largos para la conexión a la red
2. Viabilidad del ciclo de combustible Deuterio/Tritio
3. Incorporación de ciclos reproductores de Tritio al programa
4. Demostración de la ganancia energética y energía de producción neta
5. Optimización de costes y plazos
6. Desarrollo de códigos aplicables y bases de licenciamiento



Sobre la fusión – Perspectivas

Actuaciones iniciadas:

- Más de 4,5M€ de inversión privada
- Incorporación en el programa del DOE por Advanced Research Projects Agency (ARPA) la fusión como actividad estratégica para asignación de fondos
- Creación de grupos de trabajo para aplicar la normativa aplicable a licenciamiento de estas instalaciones
- Incorporación de reproductores de Tritio en ITER



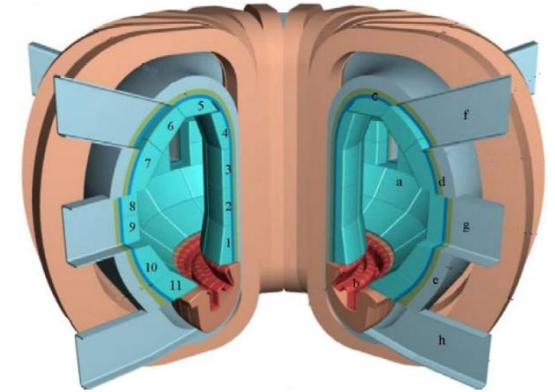
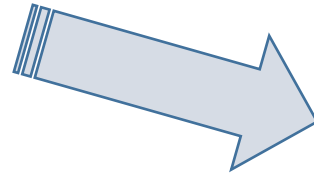


Sobre la fusión – Perspectivas



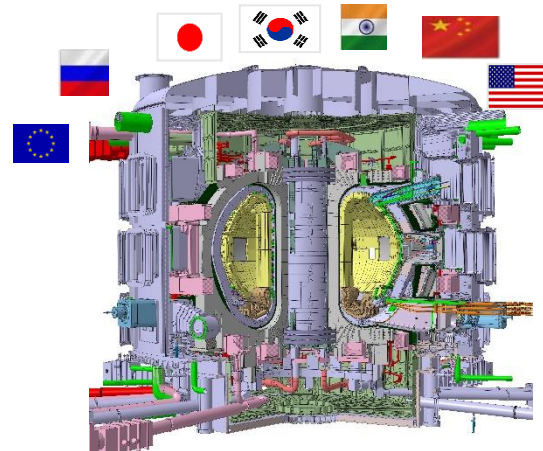
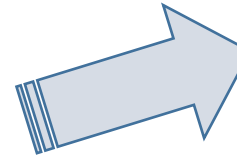
IFMIF-DONES

1 D+ beam, 40 MeV, 125 mA on a Li target



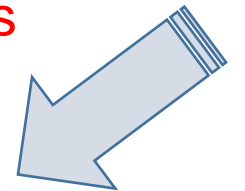
DEMO $\geq 500 \text{ MW}_e$

1 – 2 hours

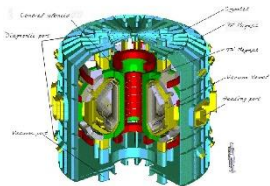


ITER – 500 MW_{th}

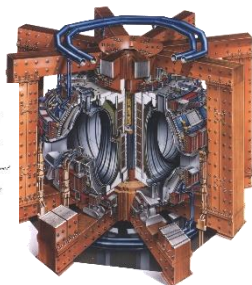
300– 500 secs



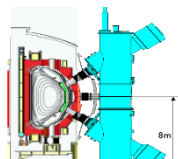
**Public-private initiates
for fusion power plants**



K-STAR



JET



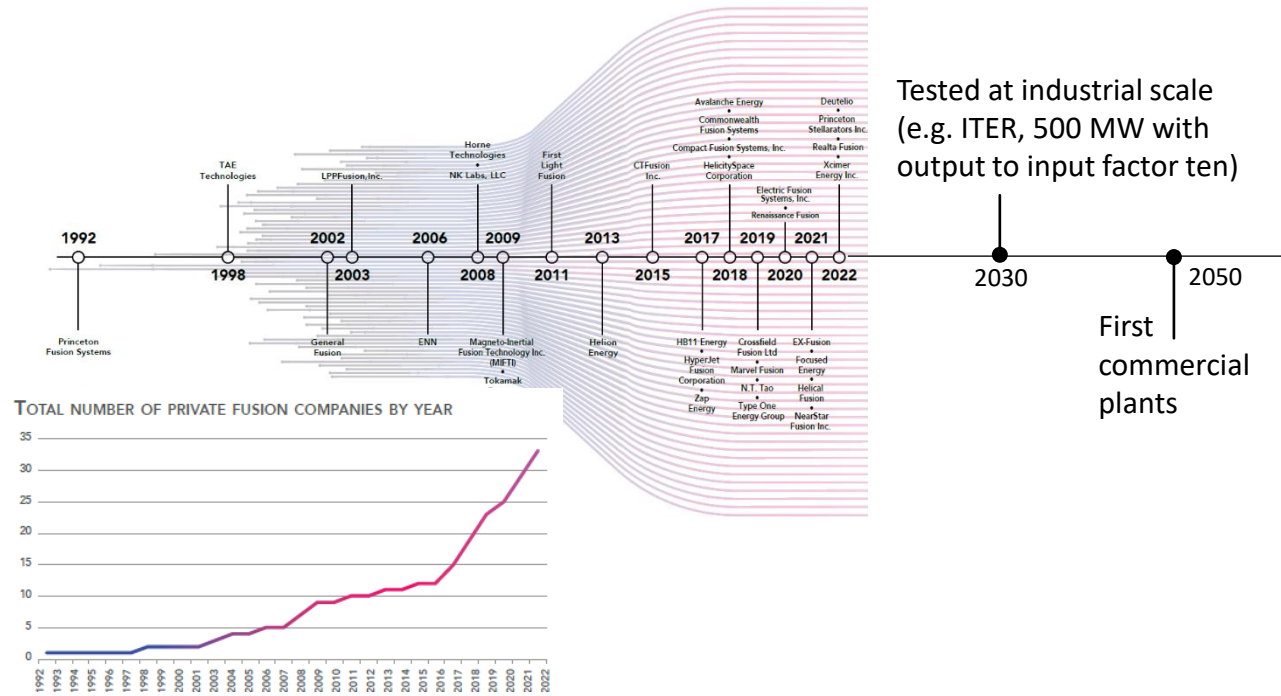
JT-SU





Sobre la fusión – Perspectivas

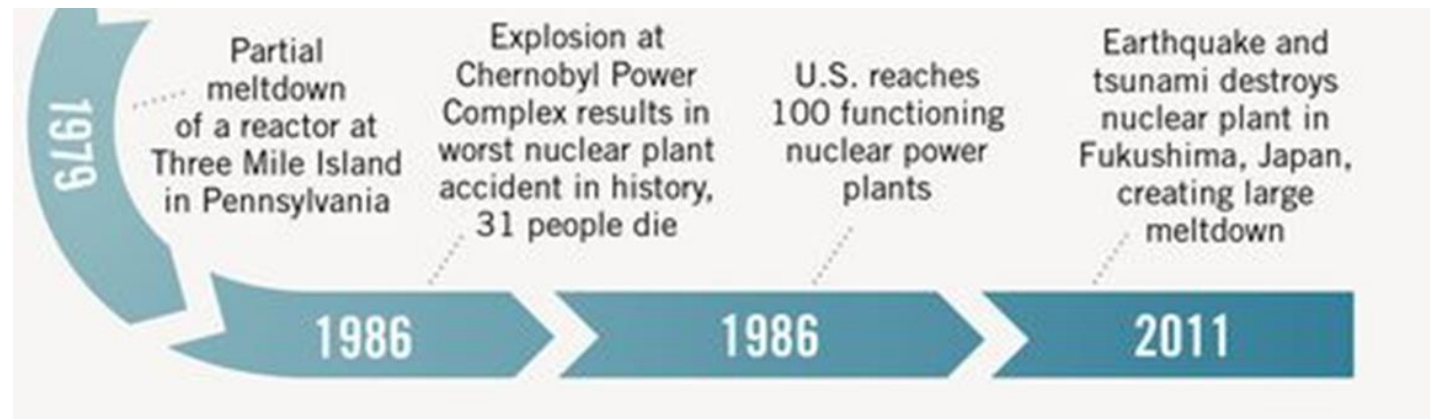
Some public-private investors for demonstration:





Reflexiones finales sobre la fisión

- ❑ La fisión nuclear ha sido el gran descubrimiento energético del s. XX
- ❑ La fisión nuclear está a medio camino, con grandes perspectivas para el s. XXI por los desarrollos recientes (SMR, Gen IV,
- ❑ La energía nuclear no impone riesgos no admisibles a la sociedad demostrado por el buen resultado de operación y comportamiento en caso de accidentes





Reflexiones finales sobre la fisión

- ❑ La energía nuclear es intensiva en capital, por lo que necesita apoyo institucional a la inversión requerida. El reconocimiento de la energía nuclear en la transición energética dentro de la taxonomía es un paso muy importante para la reactivación de programas nucleares en Europa.



- ❑ La fisión nuclear ha contribuido al desarrollo de la sociedad, no sólo en las instalaciones de generación, sino también en aplicaciones médicas, alimentación, exploración espacial (Voyager I - 36 años energizado con ^{238}U), etc.



Reflexiones finales sobre la fusión

❑ La energía de fusión se podría ya considerar como uno de los desarrollos energéticos más relevantes del siglo XXI.

• No CO₂

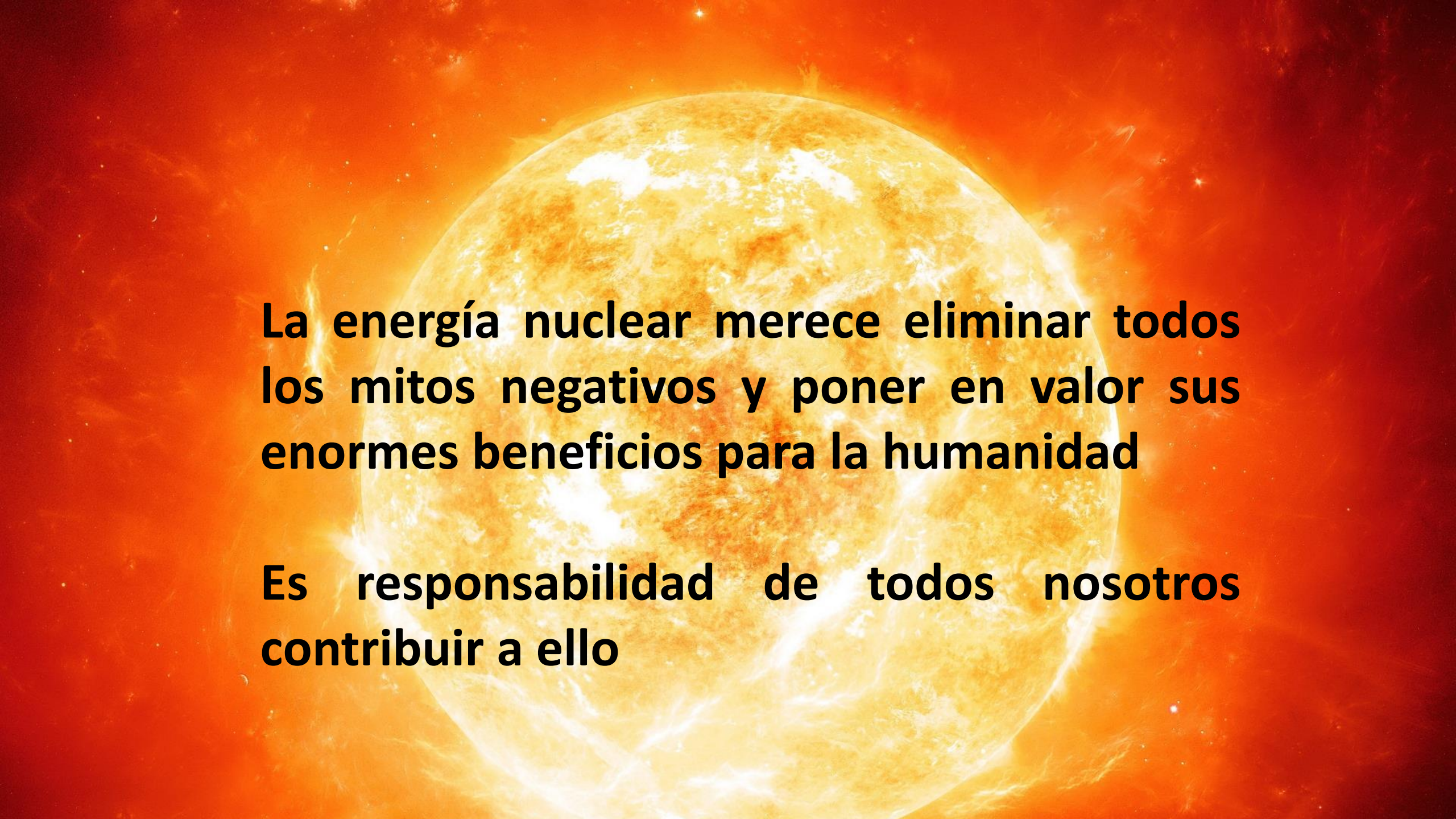
• Safe

• No long-life radioactive waste

• Very high energy density

❑ Condicionado a las inversiones necesarias, podrían ser una realidad los primeros prototipos en las próximas 2 décadas.

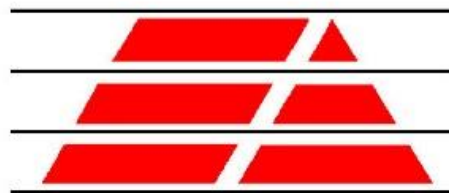
❑ En cualquier caso, los desarrollos ya realizados tendrán aplicaciones de gran interés como son el desarrollo de nuevos materiales, aplicaciones en medicina nuclear, transmutación y otras aplicaciones de plasma en el ámbito industrial.



La energía nuclear merece eliminar todos los mitos negativos y poner en valor sus enormes beneficios para la humanidad

Es responsabilidad de todos nosotros contribuir a ello

Muchas gracias por vuestra atención.



EMPRESARIOS AGRUPADOS

M^a Teresa Domínguez Bautista
EMPRESARIOS AGRUPADOS INTERNACIONAL, S.A.
Tlf.: 91 309 8022
E-mail: mtdominguez@empre.es