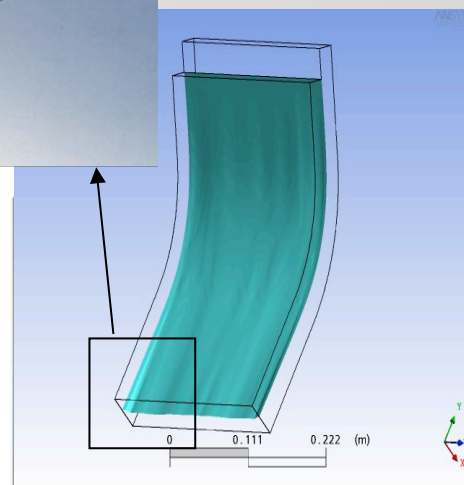
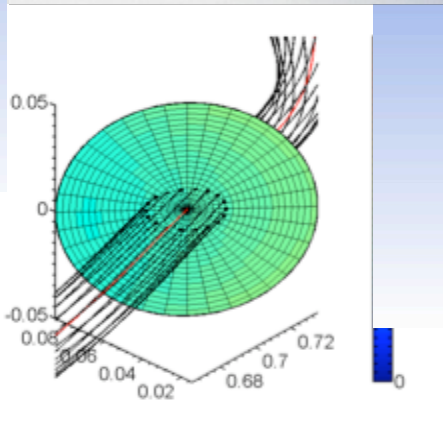
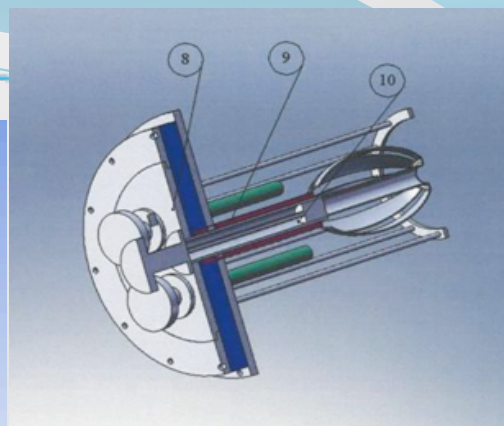
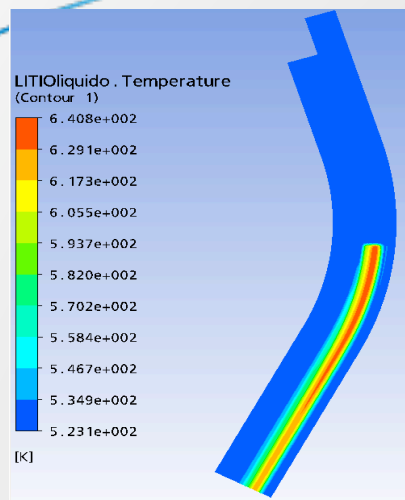




El Laboratorio de Interacción Plasma Pared de TechnoFusión: La Instalación PALOMA

F.L. Tabarés

TECHNOFUSION (P2009/ENE-1679): Programa de actividades I+D de Comunidad de Madrid



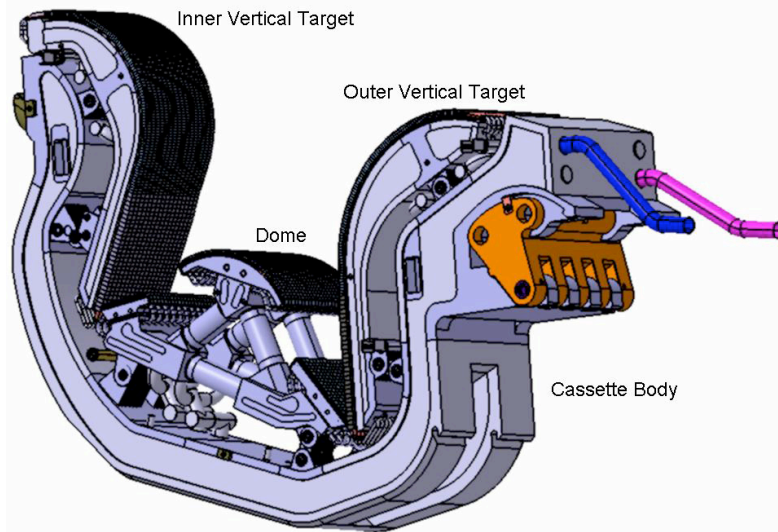
INDICE

- Introducción
- Necesidades para ITER y DEMO
- Sistemas experimentales tipo simulador PWI
- La Instalación PALOMA
 - Diseño
 - Parámetros
 - Programa Experimental
- Conclusiones

Techno
Fusión



Requerimientos de Materiales de Primera Pared para ITER



Componente/material/área	Flujo de potencia (MW·m ⁻²)	Flujo de partículas (DT·m ⁻² ·s ⁻¹)	Energía (eV)	Flujo de neutrones (n·m ⁻² ·s ⁻¹)
Primera-pared/Be/ ~1000 m ² – neutros de intercambio de carga (E _{media} < 100eV);	0,5	10 ¹⁹ -10 ²⁰	100-500	<2.3x10 ¹⁸
Limitador start-up/Be/ ~10 m ² – interacción directa con el plasma y alto flujo de potencia durante el arranque y apagado del plasma	~8	10 ²¹ -10 ²²	""	<2.3x10 ¹⁸
Divertor target (strike-points)/C/ 75 m ² – altos flujos de potencia y partículas; deposición de energía durante disrupciones, ELM's y cargas electromagnéticas durante disrupciones	<10-20 <40 (ELM's) <100(disrup)	<10 ²⁴	1-30 (temp. plasma)	4-6x10 ¹⁷
Lados del divertor (baffle)/W/ ~200 m ² – neutros de intercambio de carga (E _{media} < 100eV); – interacción directa con el SOL; – potencia radiada desde el punto X (p. ej. MARFE's); – posible deposición de potencia durante ELM's – cargas electromagnéticas durante disrupciones.	3	10 ²⁰ -10 ²²	> 3 (temp. plasma)	<2x10 ¹⁸
Dome del Divertor/W/ 85 m ² – neutros de intercambio de carga (E _{media} < 100eV); – potencia radiada desde el punto X (p. ej. MARFE's); – deposición de energía durante VDE – cargas electromagnéticas durante disrupciones.	3	10 ²¹ -10 ²²	>30 (temp. plasma)	<1.1x10 ¹⁸
Región privada de flujo del divertor (liner)/W/ 90 m ² – potencia radiada disipada en el divertor; – energía rerradiada durante disrupciones; – cargas electromagnéticas durante disrupciones.	<1	<10 ²³	<1	~4x10 ¹⁷

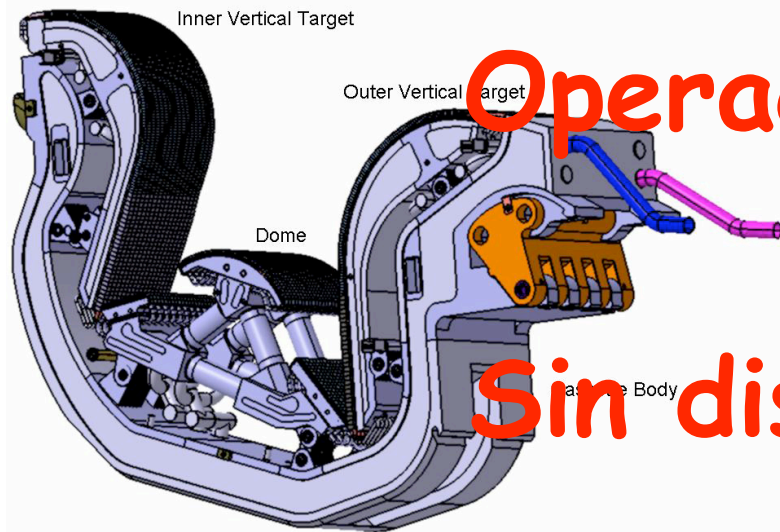


DEMO: Tasa de neutrones x100

Requerimientos de Materiales

de Primera Pared para ITER

Alta temperatura de la pared



Operación continua

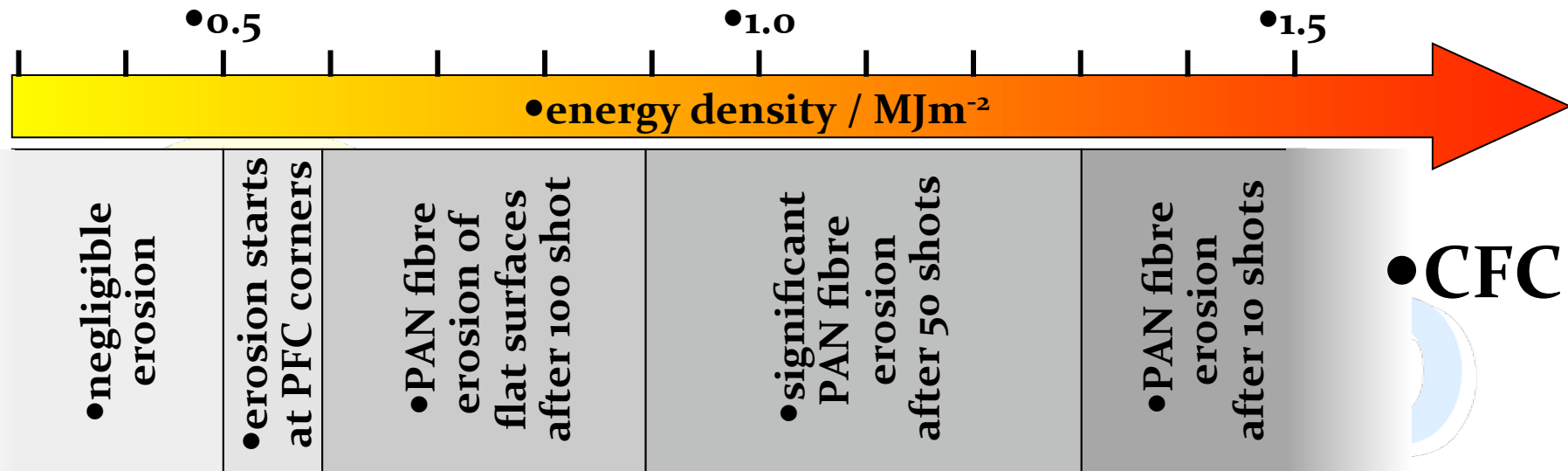
Sin disrupciones(?)

Componente/material/área	Flujo de potencia (MW·m ⁻²)	Flujo de partículas (DT·m ⁻² ·s ⁻¹)	Energía (eV)	Flujo de neutrones (n·m ⁻² ·s ⁻¹)
Primera-pared/Be/ ~1000 m ² – neutros de intercambio de carga (E _{media} < 100eV);	0,5	10 ¹⁹ -10 ²⁰	100-500	<2.3x10 ¹⁸
Limitador start-up/Be ~10 m ² – interacción directa con el plasma y alto flujo de potencia durante el arranque y apagado del plasma	<8	<10 ²²	100-500	<2.3x10 ¹⁸
Divertor target (strike-points)/Cf 75 m ² – altos flujos de potencia y partículas; – deposición de energía durante disrupciones, ELM's y cargas electromagnéticas durante disrupciones.	<10-20 <40 (ELM's) <100(disrup)	<10 ²⁴	1-30 (temp. plasma)	4-6x10 ¹⁷
Lados del divertor (baffle)/W ~200 m ² – neutros de intercambio de carga (E _{media} < 100eV); – interacción directa con el SOL; – potencia radiada desde el punto X (p. ej. MARFE's); – posible deposición de potencia durante ELM's – cargas electromagnéticas durante disrupciones.	3	10 ²⁰ -10 ²²	> 3 (temp. plasma)	<2x10 ¹⁸
Dome del Divertor/W 85 m ² – neutros de intercambio de carga (E _{media} < 100eV); – potencia radiada desde el punto X (p. ej. MARFE's); – deposición de energía durante VDE – cargas electromagnéticas durante disrupciones.	3	10 ²¹ -10 ²²	>30 (temp. plasma)	<1.1x10 ¹⁸
Segunda pared/W ~100 m ² – potencia radiada disipada en el divertor; – energía rerradiada durante disrupciones; – cargas electromagnéticas durante disrupciones.	<1	<10 ¹⁸	<1	~4x10 ¹⁷



CFC target erosion

1. Under ITER-like heat loads erosion of CFC was determined mainly by the erosion of PAN-fibers:

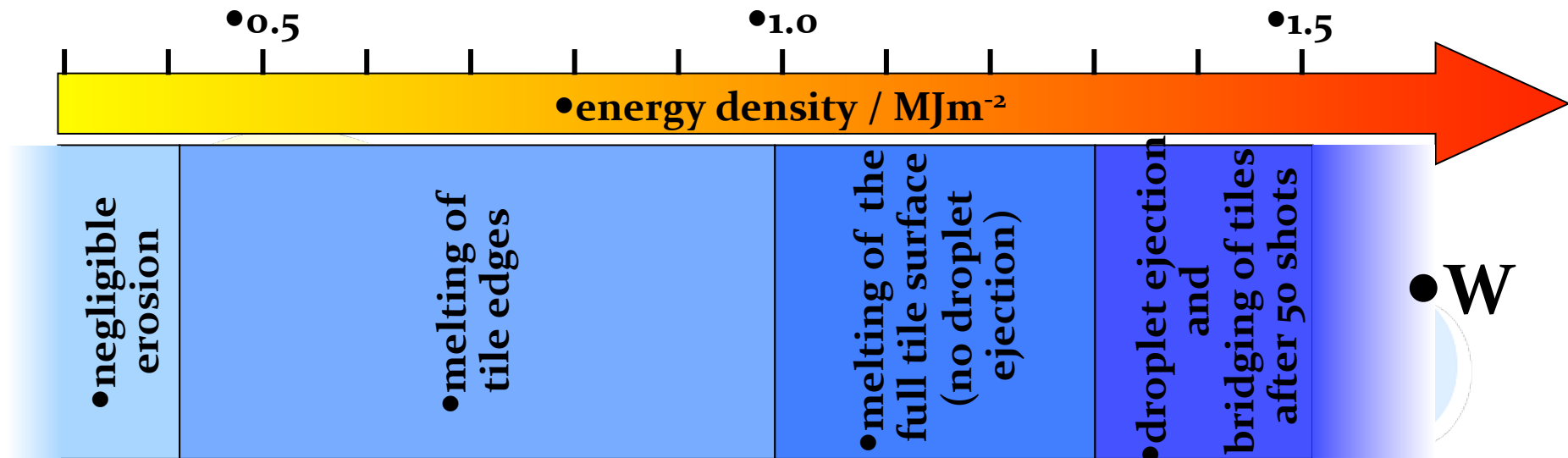


2. Noticeable mass losses of a sample took place at an energy density of 1.4 MJ/m^2
3. Severe crack formation was observed at energy densities $\geq 0.7 \text{ MJ/m}^2$ (cracking of pitch fibre bundles)



W target erosion

- 1. Under ITER-like heat loads erosion of tungsten macrobrush was determined mainly by melt layer movement and droplets ejection:



- 2. Noticeable W erosion mainly due to droplet formation took place at $w_{\text{max}} = 1.6 \text{ MJ/m}^2$. The average erosion was approx. $0.06 \text{ }\mu\text{m}/\text{shot}$ ($1 \text{ }\mu\text{m}/\text{shot}$ during the first shot, and then decreased to $0.03 \text{ }\mu\text{m}/\text{shot}$ after 40th pulse).
- 3. Cracks formation was observed at energy densities $\geq 0.7 \text{ MJ/m}^2$. Metallographic sections show crack depths ranging from 50 to $500 \text{ }\mu\text{m}$.



Vida media de componentes

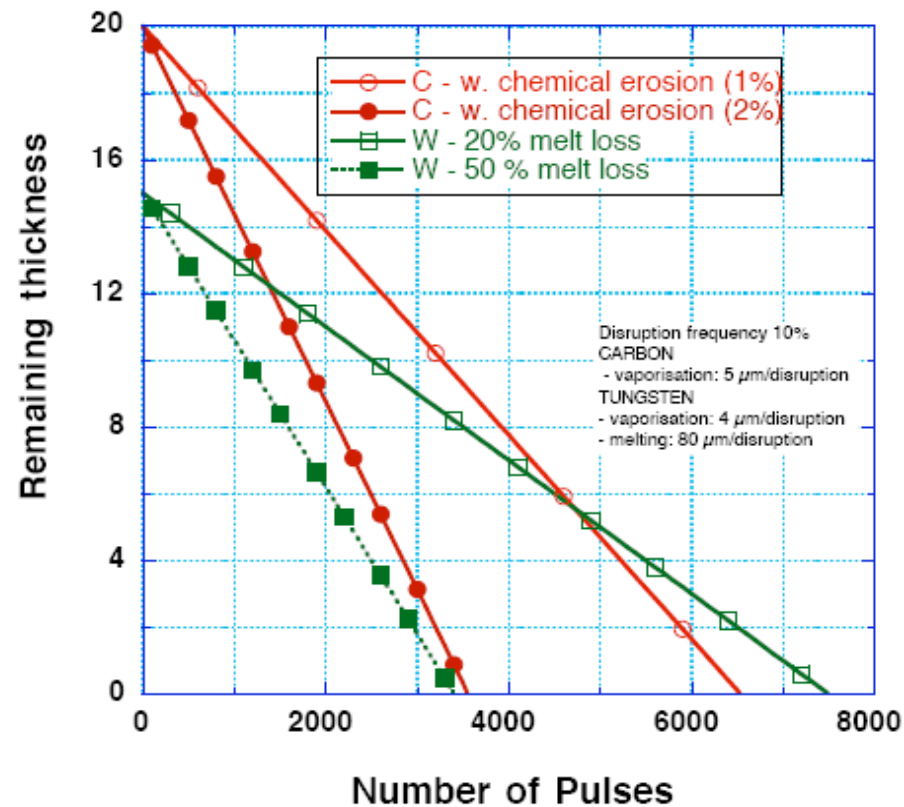


Fig. 1.1-2 Estimated erosion lifetime of CFC and tungsten for the lower vertical target

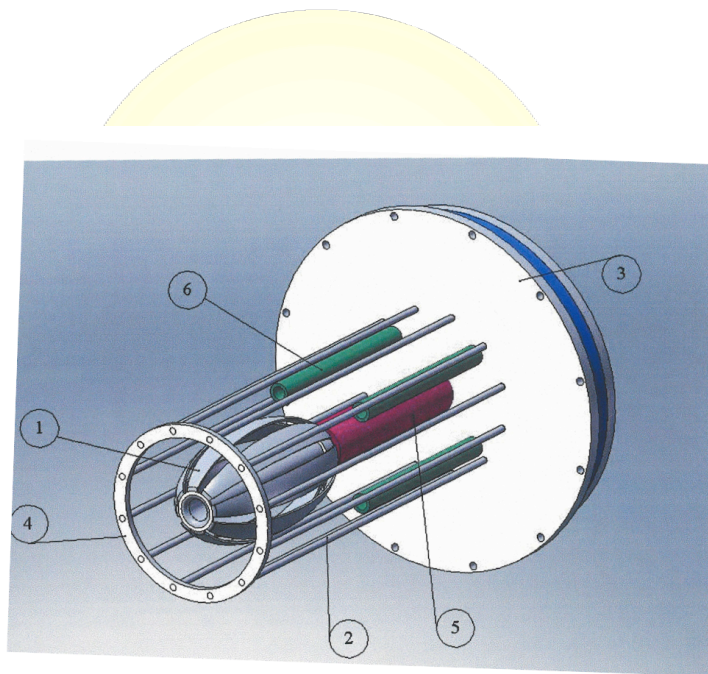


Instalaciones tipo Plasma Lineal

	NAGDIS-II ⁱ [6]	PSI-2 ⁱⁱ [7]	PISCES-A ⁱⁱⁱ [8]	PISCES-B ⁱⁱⁱ [9]	LENTA ^{iv} [10]	Pilot-PSI ^v [11]	Magnum-PSI ^{v*} [12]	TPE ^{vi} [13]
Tipo de fuente	TP-D	PIG	PIG	PIG	e-Beam	CA	CA	PIG
Potencia [kW]	10,5	6,5	<10	?	7,5	45	270	?
Presión en la fuente [Pa]	10	0,1-1	0,1-1	0,1-1		104	104	0,1-1
Presión en el target [Pa]	0,1	0,01-0,1	10-3-1	10-3-1	0,2-7	1-10	<10	0,01
Ti target [eV]	50	<15	10-500	10-500	5	0,1-5	0,1-10	10-130
Te target [eV]	10	<30	<20	3-50	0,5-20	0,1-5	0,1-10	10-15
ni target [m⁻³]	6·10 ¹⁹	10 ¹⁹	10 ¹⁹	10 ¹⁹	10 ¹⁹	10 ²¹	10 ²⁰	10¹⁹
Flujo iónico en el target [m⁻²s⁻¹]	10 ²²	10 ²²	10 ²¹ -10 ²²	10 ²¹ -10 ²³	5·10 ²¹	2·10 ²⁵	10 ²⁴	10²³
Flujo de Energía al target [MW/m²]	0,01	0,1	-	-	-	30	10	-
B [T]	0,25	0,1	-	0,04	0,2	1,6	3	0,2
Diámetro haz en el target [cm]	2	6-15	-	3-20	2,5	1,5	10	0,5
* actualmente en construcción. Parámetros esperados								



Instalaciones tipo Plasma Gun



D	DE (MJ/m ²)	Dp (ms)	DP (GW/m ²)	MJ·m ⁻² ·s ^{-1/2}	Ep (keV)	DPL (m ⁻³)	B (T)	Thaz (m)	EU
MK-200UGⁱ "Plasma gun" pulsado con tubo de deriva [14]	15	0,04-0,05	300-400	~70	1,5 (ion) ¹ 0,15 ³	2·10 ²¹ (5·10 ²¹) ²	2	0,065	a, b, c, d, e
MK-200CUSPⁱ Trampa CUSP [14]	2	0,015-0,020	150-200	~15	0,8 (ion) 0,15 ³	(1,5 - 2)·10 ²²	2-3	0,005	a, b, c
MKT-Uⁱ "Plasma gun" pulsado con tubo de deriva [15]	1-2	0,03	30-60	>6	1,2 (ion) ¹	6·10 ²⁰	2	~0,07	d, e
QSPAⁱ Acelerador de plasma cuasi-estacionario [16]	5-10	0,25-0,6	10-50	6-20	0,1	<1·10 ²²	0-1	0,05	d, e
QSPA-Kh50ⁱ Acelerador de plasma cuasi-estacionario [17]	10-40	0,2	37-80	22-90	0,3 (ion)	(2-8)·10 ²¹	0-2	~0,04	d, e
PLADISⁱⁱⁱ "Plasma gun" [18]	0,5-20	0,08-0,5	-	~15	0,1 (ion)	n/a	-	0,02	d, e
VIKA^{iv} Acelerador de plasma cuasi-estacionario [19]	2-30	0,09-0,36	20-84	<20	0,2	>1·10 ²²	0-3	0,06	c, d, e
ELDIS^v Haz de electrones [15]	<50	0,05-0,06	2	>100	120 ⁴	(2-4)·10 ²²	0-4	-	e
JEBIS^v Haz de electrones [20]	2,5	1,5-2	2	~2	70 ⁴	n/a	0	>0,005	e
JUDITH^{vi} Haz de electrones [21]	5-10	1-5	2-6	2-10	120 ⁴	-	0	~0,004	e
GOL-3^{vii} Espejo lineal [15]	8-10	0,01-0,02	1000-1300	>50	1-3 ^{3,5} (térmico) 20-10 ⁶ (rápidos)	10 ²¹	2-5	0,06	b, d, e

D = Dispositivo; DE = Densidad de Energía; Dp = Duración del pulso; DP = densidad de potencia; Ep = Energía de las partículas; DPL = Densidad del plasma; B = Campo magnético; Thaz = Tamaño del Haz; EU = Estudio de Utilidad

¹Disminuye hasta 300 eV al final del pulso; ²Aumenta al final de la descarga; ³Temperatura electrónica; ⁴Electrones; ⁵Distribución no Maxwelliana con una gran contribución de electrones de 800 keV

^aDinámica del vapor en fuertes campos magnéticos en blancos inclinados ("shielding")

^bProducción de radiación secundaria y su interacción con superficies próximas

^cRadiación neta sobre la superficie del blanco, ^dErosión (vaporización y/o ablación), ^eAblación



La Instalación PALOMA de TechnoFusión

Plasma Ablation and Loading of Materials



COMPONENTS

Linear Plasma Device:

- ✓ Cascade arc, superconducting field (1T)
- ✓ PILOT-PSI design. Upgrade to larger beam (FOM coll.)
- ✓ Steady-state, superconductor (commercial available)
- ✓ UHV pumped (impurity control)
- ✓ A+M Physics studies and diagnostic development for divertors

Plasma Gun

Compact QSPA type: STCU Partner Contract with Kharkov IPP

Interaction chamber

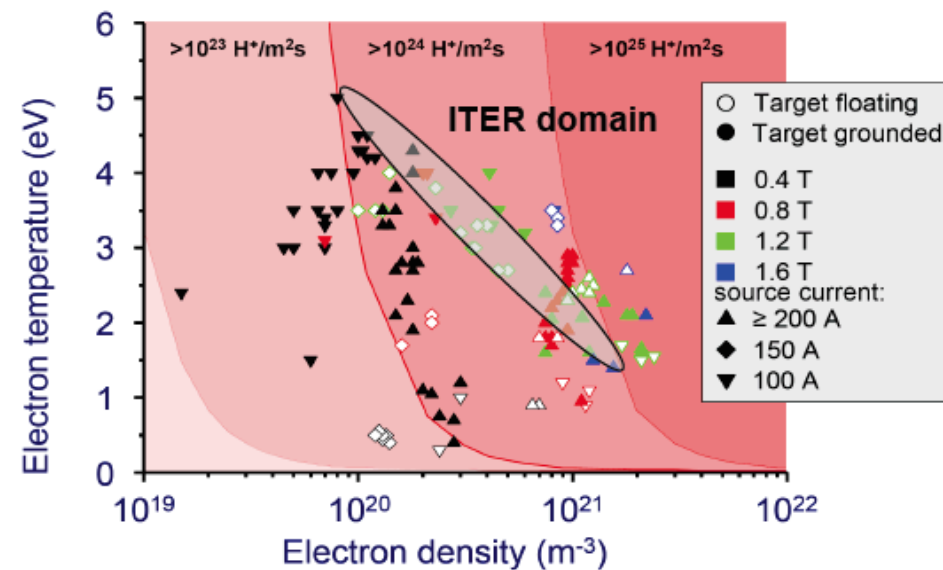
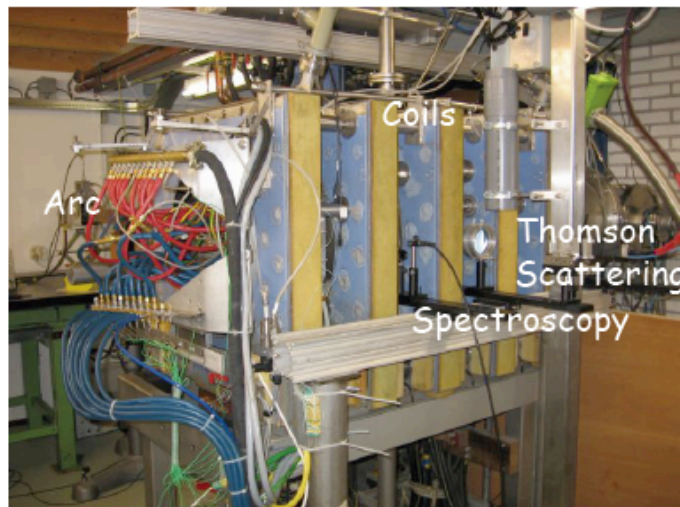
Change in impact angle
Cooling-Heating of samples
IR+ visible cameras.....
Transport of samples under vacuum?



PILOT PSI parameters

Trilateral Euregio Cluster

- Pulsed up to 1.6 T (0.4s)
- 0.2 T in steady-state
- 2 roots pumps with total Pumping speed 7200 m³/hr
- pressure 0.1-1 Pa during plasma operation



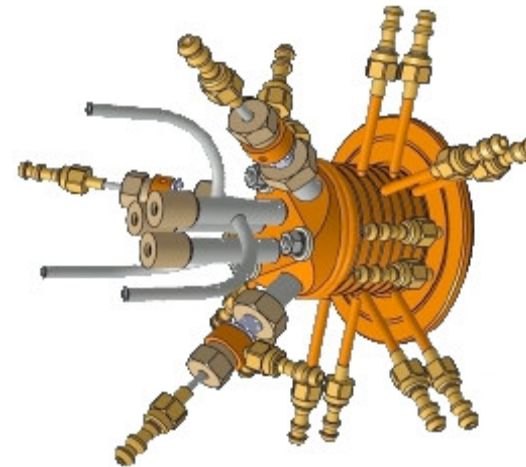
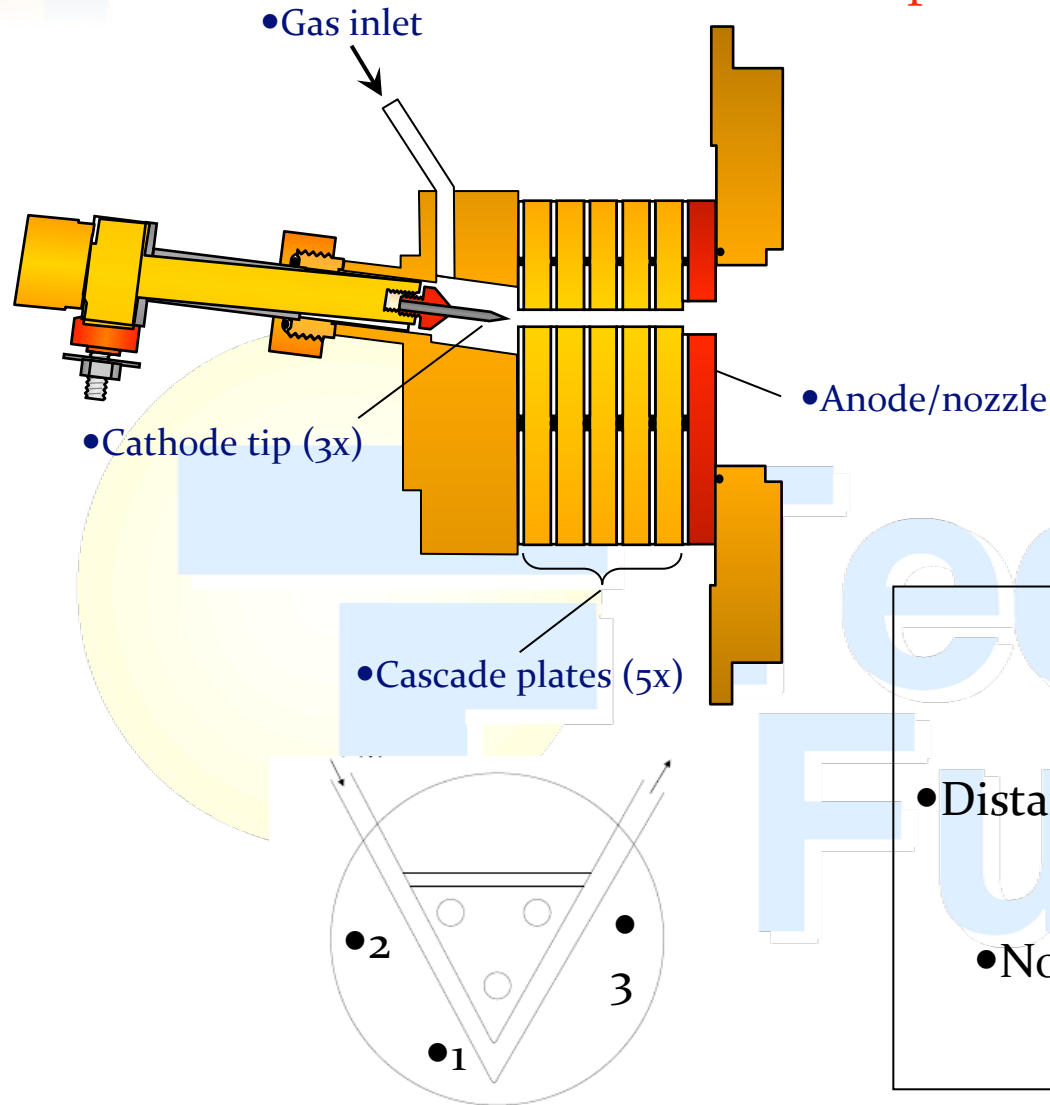
- power fluxes > 30 MW/m²
- already achieved ITER-like fluxes, first 5 cm of ITER target (5 mm SOL) can be simulated !

+ *Beam expansion by B field tailoring: Still high flux density and large beam*



Diseño fuente multi-haz

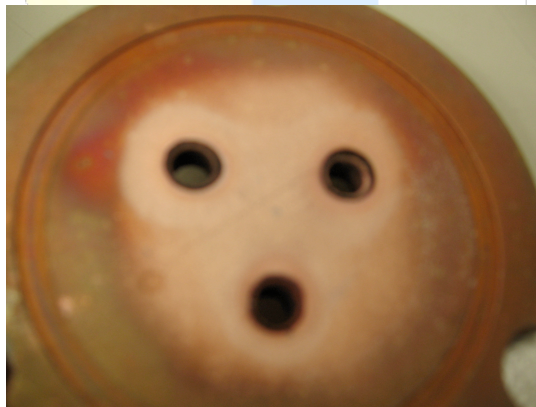
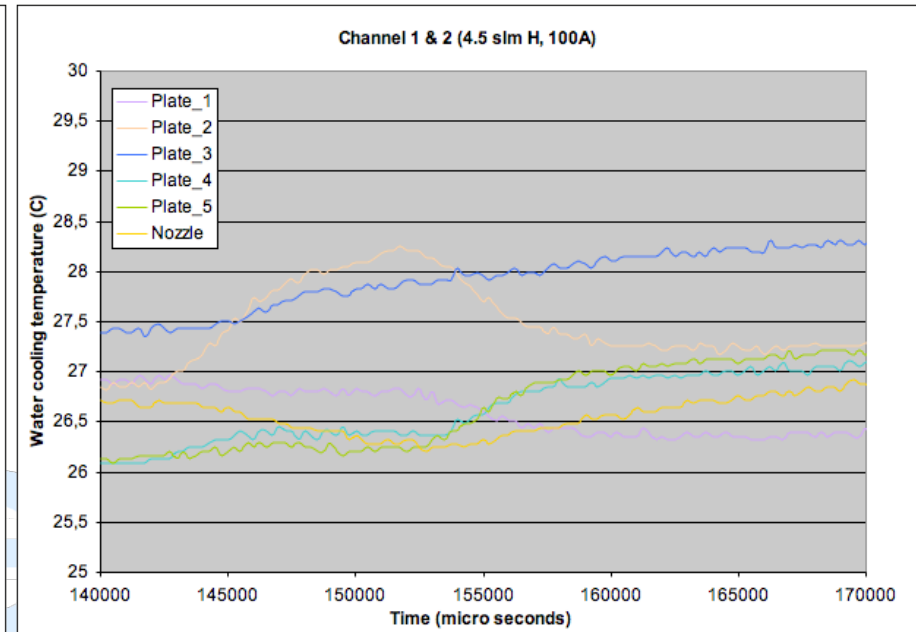
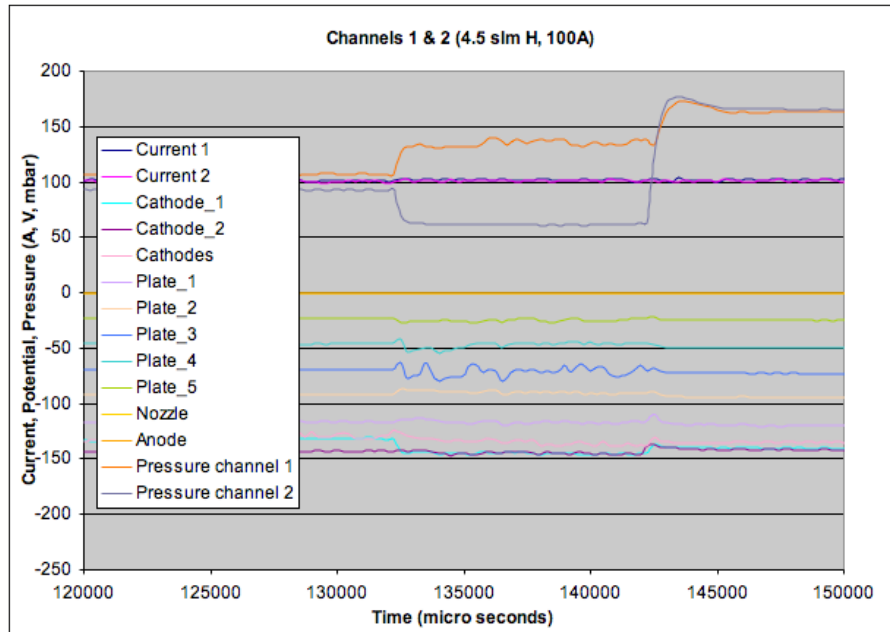
• Three channel cascade arc plasma source: Description



- Three separate cathodes.
- Three separate gas inlets.
- Distance between the channels: 20 mm.
- Channel diameter: 5mm.
- Nozzle diameter: 5, 5.5 and 6 mm.
- Shared water cooling.

Three channel cascaded arc plasma source: Issues

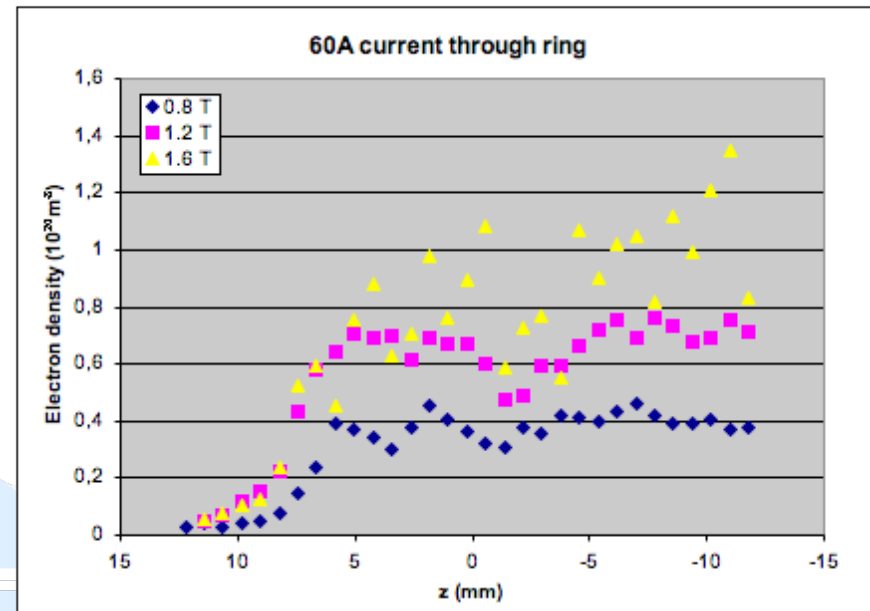
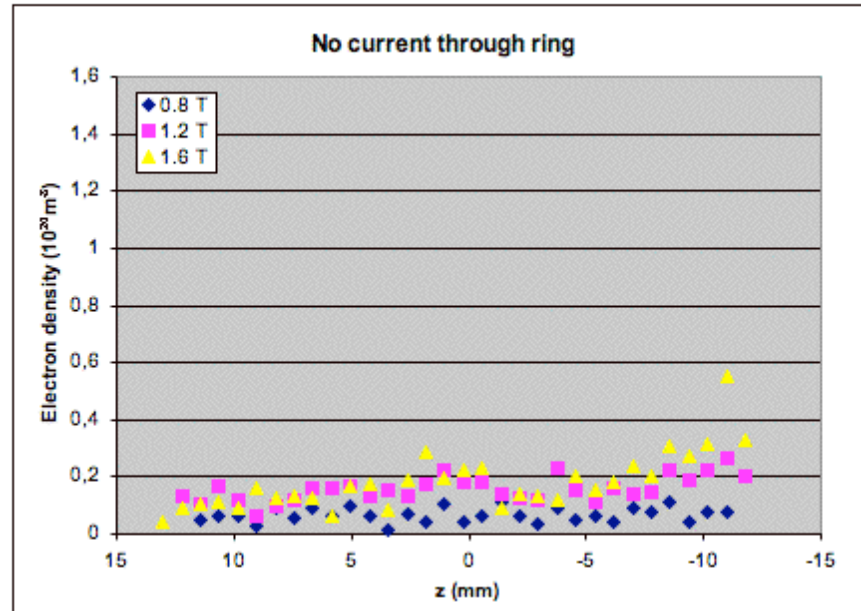
- Currents from channel to channel through the plates:



- ❑ Sudden change in inlet pressure: Increase of channel 1 pressure and decrease of channel 2 pressure.
- ❑ Change in cathode 1 voltage.
- ❑ Unstable voltage of the plates.
- ❑ Change in temperature of plate 2 water cooling.
- ❑ Erosion in plate 2.

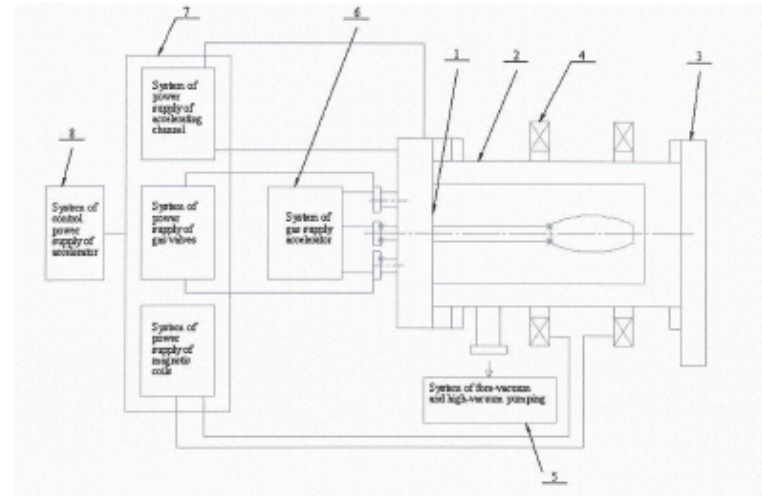
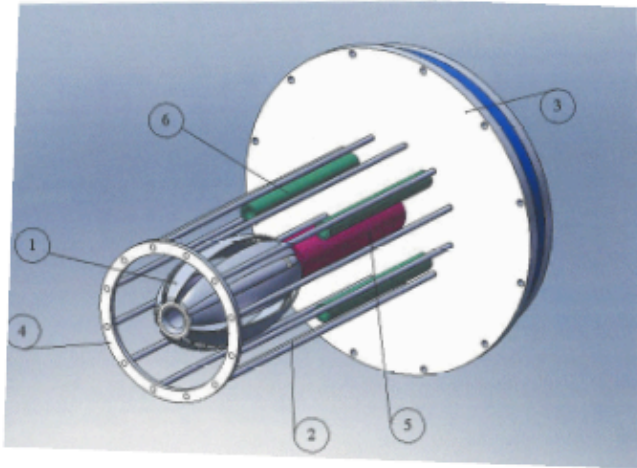


Ring electrode-mixing thompson scattering results: Three channels 1.75 slm H 0.25 slm Ar 155A (4 cm)



- Rotation and mixing of the two beams.
- Lower density than with two beams (measurement error?)
- Density of the mixed beam higher than density of separate beams. There could be some extra ionization in the vessel.

Plasma Gun (QSPA, MJ/m² range)



QSPA design parameters(SLIDE):

- | | |
|----------------------------|--|
| - Pulse duration | <500μs |
| - Plasma Current | <650 kA |
| - Ion energy | < 1keV |
| - Electron density | 10 ¹⁵ - 10 ¹⁶ cm ⁻³ |
| - Electron temperature | 3 - 5 eV (<100eV at sample) |
| - Energy Density | >2MJ/m ² |
| - Magnetic field at sample | 1T |
| - Repetition period | 1-3 min |



Diseño global

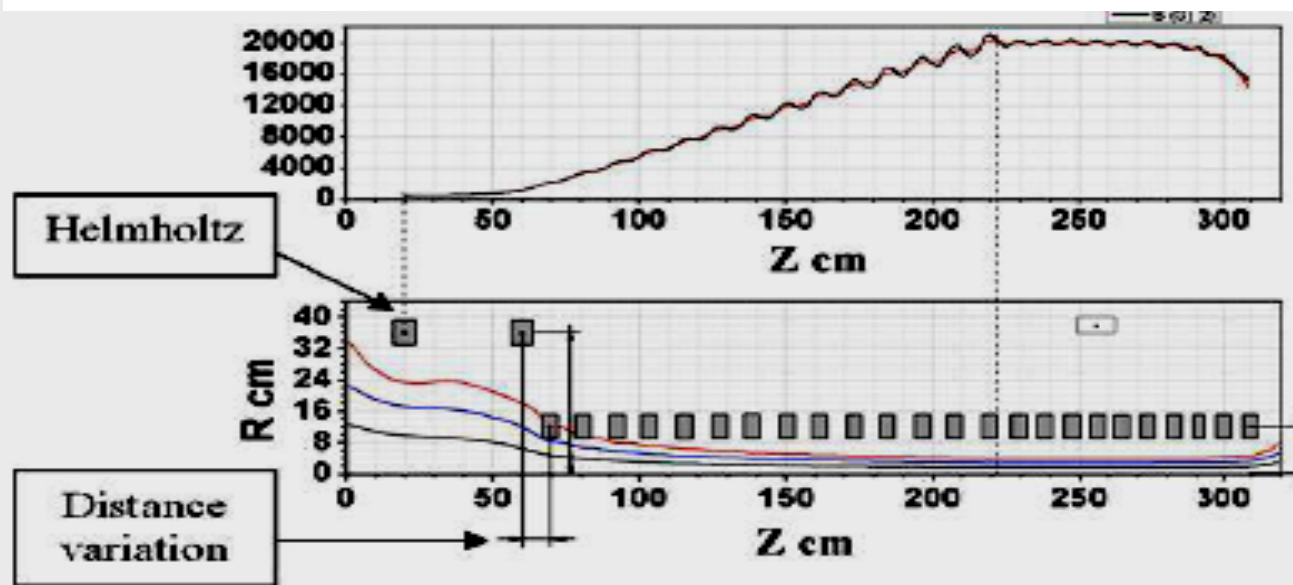
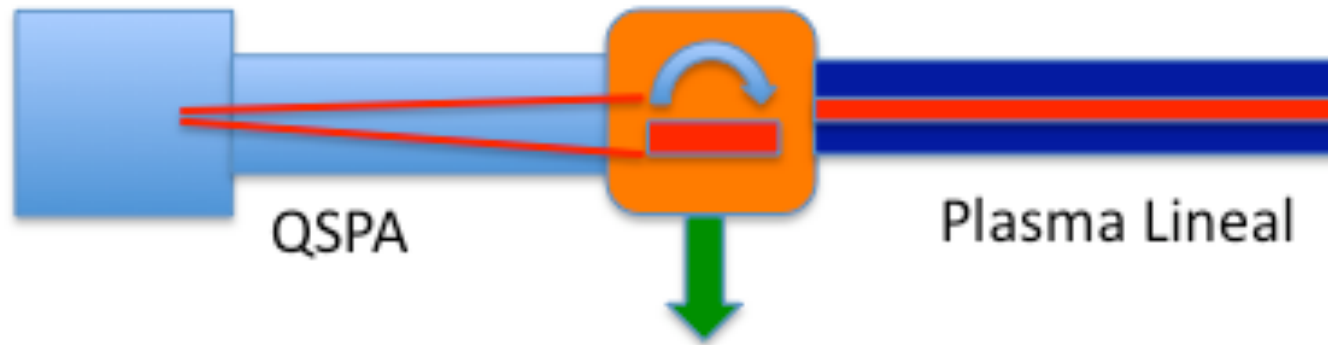


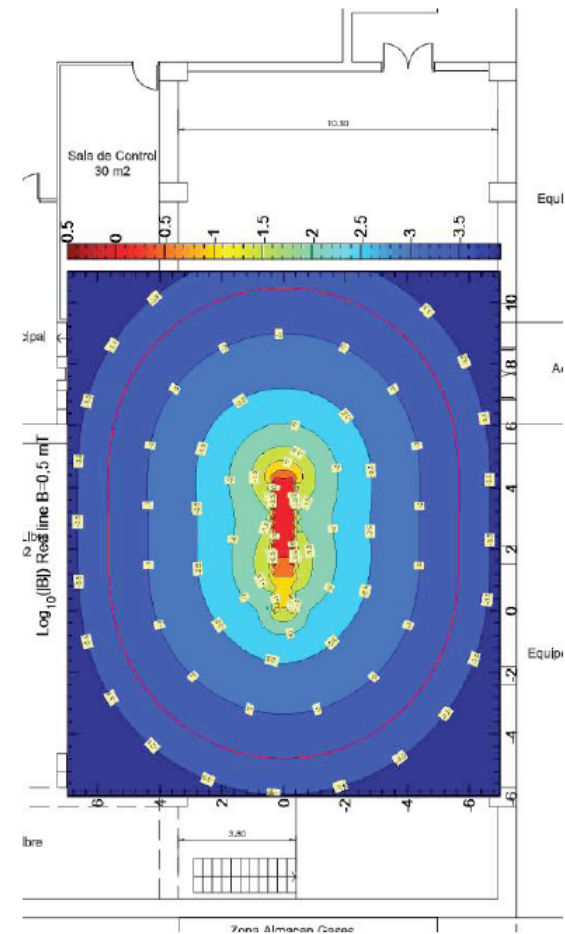
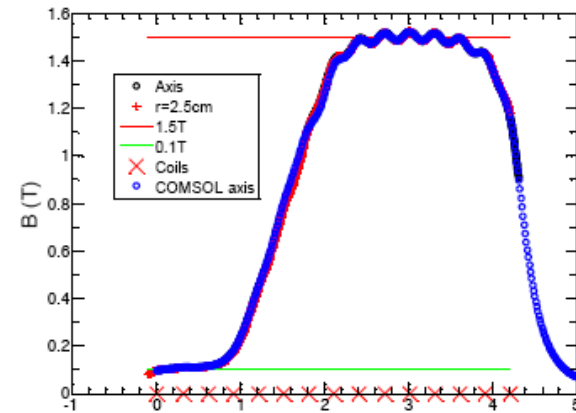
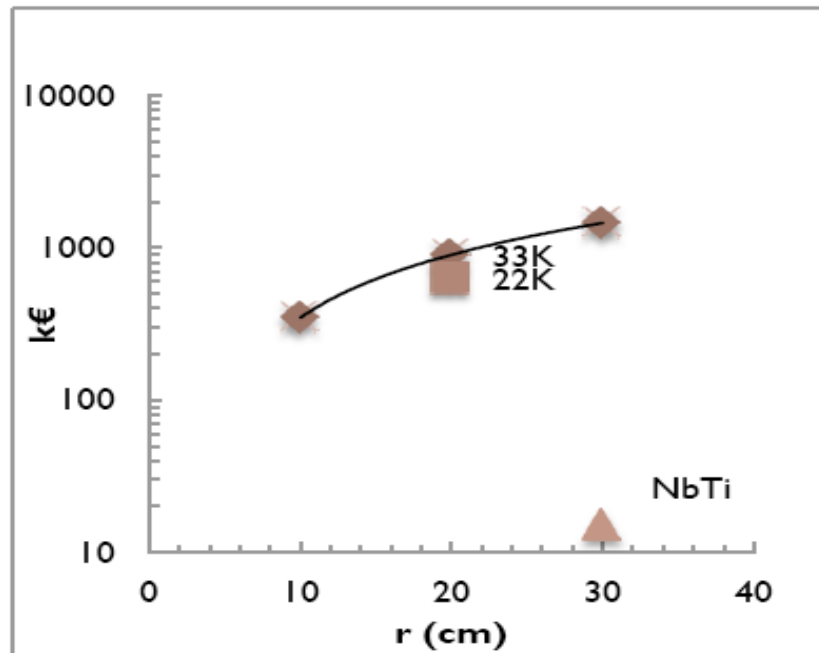
Figura 2. Variación de campo con la distancia para una configuración con un campo máximo de 2T



Sistema SC

Evaluación de costes para:

- Tres radios: 10, 20, 30 cm
- 2 tipos de SC: HT (YBaCuO) y LT NbTi
- 2 T de trabajo HT: 30, 22 K





Objetivos

Máquina lineal de plasma	QSPA	Combinación de ambas	Material Irradiado mediante haces
√ Experimentos de deposición de potencia √ Erosión Química √ Retención de T √ Mezcla de Materiales √ Metales Líquidos en presencia de campos magnéticos + exposición a plasma	√ Cargas térmicas no estacionarias √ Fatiga tras <i>shocks</i> térmicos repetitivos √ Comportamiento de capas líquidas en campos magnéticos tras <i>shock</i> térmico √ Apantallamiento por Vapor	√ Experimentos de fatiga √ Retención de T bajo cargas estacionarias y no estacionarias √ Degradación de propiedades físicas	√ Degradación de propiedades físicas tras irradiación √ Retención de T tras irradiación



Integración del Programa en la comunidad de PWI

Reuniones de revisión de la PWI Facilities :

- Julich (Enero 2009)
- Garching (Mayo 2009)
- San Diego (Mayo 2010)

Table 2: Comparison of linear plasma simulators including non-European facilities

	PISCES-B	NAGDIS-II	Pilot- PSI	Vision I	Magnum-PSI	Jule	Paloma(*)
Association	USA	Japan	FOM	SCK.CEN	FOM	FZJ	CIEMAT
Plasma Density (m^{-3})	10^{17} - 10^{19}	$<10^{20}$	10^{19} - 10^{21}	10^{16} - 10^{18}	10^{20} - 10^{21}	10^{17} - 10^{20}	$>10^{20}$
Ion Flux ($10^{24}/m^2/s$)	<1	<0.1	<10	0.001	1-10	<0.1	1-10
Fluence ($10^{26} m^{-2}$)	<10	1	<0.04	<1	<10	<10	steady state
Ion temp. Ti (eV) ¹	<20 (300)	<10	<5	<20 (500)	<10	<10	<5
Electron temp. Te (eV)	<40	<10	<5	10	<10	<20	<5
Power flux (MW/m ²)	1-10	<1	<30		10	0.1	<30
Magnetic Field (T)	0.05	0.25	1.6	0.2	3	0.1	1
Plasma pressure (Pa)	5×10^{-4} - 10^{-2}	<1	0.1-1	0.05-0.5	<1	0.01	0.1-1
Pulse length (s)	SS	SS	4	SS	SS	SS	SS (0.4)
Plasma composition	Li, Be, C, W, N, Ne, Ar	H, He	C,N,Ne,Ar, W, metals	C, W, Be, metals	C,N,Ne,Ar, W, metals	C, W, metals	H,D,He, C,Li,W..
Beam size (cm)		2-3	1.5	~ 20	10	5-10	2-5
Beryllium	Yes		No	Yes	No	Yes	No
Tritium/Irradiated mat.	No/No		No/ No	Yes/Yes	No /No	Yes/ Yes	No/Yes
Target temp. (°C)	<1000		1200	20-400	1200	1200	1000
Availability	available	available	available	2011	2010	2015	2016
Capital Cost range ²						A (10 M€) ³	B (6 M€)

¹ high T moderate n required for relevant first wall studies

² A = Capital Cost above 10 Meuro, B = Capital Cost between 5 and 10 Meuro, C = Capital Cost between 1 and 5 Meuro, D = Capital Cost below 1 Meuro,

³ Including JUDITH and Hot Cells



Recursos Humanos (a fecha actual)

Equipo LIPP

Francisco L Tabarés (CIEMAT, Coordinador)

Jose Antonio Ferreira (CIEMAT)

Angel Ramos (CIEMAT)

Eider Oyarzabal (CIEMAT)

Emilio Mínguez (UPM)

Pablo Martel (UPM/ULPGC)

Techno
Fusión



Conclusiones

- La Instalación PALOMA de TechnoFusion aporta innovaciones a los conceptos existentes en PWI
- Diseño basado en la combinación de dos sistemas de plasma ya operativos
- Reto en la integración de sistemas
- Muy buena acogida en la comunidad internacional
- Programa científico ambicioso y relevante
- Necesidad urgente de espacio para comenzar el montaje del sistema (Ed 20 E)



Gracias!!!



Universidad
Carlos III de Madrid

