

Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión

Informe Científico – Técnico

Julio 2009

Autores y Contribuciones

Este documento no podría haberse preparado sin la contribución entusiasta de un grupo numeroso de investigadores de hasta siete Universidades y Centros de investigación diferentes a quienes estamos enormemente agradecidos por su ayuda y soporte durante estos dos últimos años:

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de Madrid (CIEMAT): J. M. Arroyo, F. Carbajo, N. Casal, P. Fernández, J. Ferreira, A. García, I. García-Cortés, M. González, M. Hernández, M. T. Hernández, A. Ibarra, D. Jiménez, A. Moroño, F. Mota, C. Ortiz, V. M. Queral, L. Ríos, R. Román, F. Tabarés, V. Tribaldos, J. P. de Vicente, R. Vila. *Universidad Politécnica de Madrid (UPM):* A. Abánades, R. Aracil, C. Arévalo, O. Cabellos, D. Díaz, S. Domingo, M. Ferré, L. Gámez, R. González, N. García, Y. Herreras, A. Lafuente, P. Martel, E. Martínez, J. M. Martínez-Val, E. Mínguez, J. Y. Pastor, M. Perlado, E. Río, J. Sanz, F. Sordo, M. Velarde, M. Victoria. *Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED):* M. García, D. López, A. Mayoral, F. Ogando, J. Sanz, P. Sauvan. *Universidad Carlos III de Madrid (UC3M):* D. Blanco, L. Moreno, M. A. Monge, R. Pareja. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC):* P. González, J. de No. *Universidad Autónoma de Madrid (UAM):* A. Climent, A. Muñoz. *Universidad de Alicante (UA):* M. J. Caturla

Coordinación General: A. Ibarra (CIEMAT), M. Perlado (UPM)
Coordinación Grupo de Producción y Procesado de Materiales: R. Pareja (UC3M)
Coordinación Grupo de Irradiación de Materiales: R. Vila (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Interacción Plasma-Pared: F. Tabarés (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Tecnología de Metales Líquidos: A. Abánades (UPM)
Coordinación Grupo de Técnicas de Caracterización: M. González (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Tecnologías de Manipulación Remota: R. Aracil (UPM)
Coordinación Grupo de Simulación Computacional: J. Sanz (UNED, UPM)
Gestión de proyecto y Edición: D. Jiménez, R. Román, I. García-Cortés (CIEMAT)

Resumen Ejecutivo

El desarrollo de la fusión como una fuente de energía se está convirtiendo en una necesidad vital debido al continuo aumento del consumo energético mundial. La fusión es una de las pocas opciones energéticas inagotables, respetuosas con el medio ambiente y capaces de cubrir la demanda previsible de energía.

El desarrollo de la fusión es uno de los grandes retos tecnológicos de la humanidad. Para la Unión Europea (UE) este campo es uno de sus principales programas de investigación, como demuestra el que en junio de 2005 acordara junto a EE.UU., Rusia, China, Corea del Sur, Japón y la India, la construcción del proyecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). ITER, que significa camino en latín, es un reactor experimental cuyo propósito será demostrar la viabilidad científica de la fusión.

Con el diseño de ITER ya finalizado, en los próximos 20-30 años se producirá un gran aumento, **no tanto en la investigación básica en física de plasmas como en el desarrollo tecnológico de los componentes de los futuros reactores comerciales de fusión**. La selección, desarrollo y ensayo de los materiales y elementos de los diversos sistemas del reactor son el desafío más importante de la investigación en fusión, junto al diseño de los sistemas de extracción de energía y reproducción de tritio.

España tiene una oportunidad única de estar a la cabeza de la participación europea en este novedoso campo tecnológico y para ello requiere nuevas instalaciones en las que poder simular las condiciones extremas a las que se verán sometidos los materiales y/o componentes en el interior de un reactor de fusión.

El proyecto que se describe en este informe pretende la construcción, en la Comunidad de Madrid, de una Instalación Científico-Técnica Singular (Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión – *TechnoFusión*) en la que se concentren infraestructuras apropiadas para el desarrollo de las tecnologías necesarias para los futuros reactores comerciales de fusión y garantizar una destacada participación española tanto de grupos de investigación como de empresas.

TechnoFusión no supondrá un salto en el vacío. La comunidad científica española ya cuenta con la masa crítica de expertos en la ciencia y las tecnologías necesarias para el desarrollo de este ambicioso proyecto, como sobradamente demuestra la experiencia de décadas que España posee en el campo de la fusión. *TechnoFusión* persigue precisamente aprovechar las capacidades existentes en grupos de investigación de universidades, OPIs y empresas y enfocarlos en las áreas que se consideran prioritarias como la creación, ensayo y análisis de los materiales que se precisan para el desarrollo de un reactor comercial de fusión termonuclear, o su compleja manipulación remota.

Las condiciones que deberán soportar los componentes del reactor y las propiedades que de ellos se esperan los sitúan en un terreno desconocido que

precisamente *TechnoFusión* pretende explorar. Por ello se propone la construcción de aquellas instalaciones necesarias para la fabricación, prueba y análisis de los materiales más críticos, así como para impulsar el desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del comportamiento de dichos materiales bajo condiciones tan exigentes.

Más concretamente los esfuerzos en *TechnoFusión* se concentrarán en la creación de infraestructuras para abordar las siguientes áreas de investigación: 1) *producción y procesamiento de materiales*, 2) *irradiación de materiales*, 3) *interacción plasma-pared (cargas térmicas sobre materiales y mecanismos atómicos de daño)*, 4) *tecnología de metales líquidos*, 5) *técnicas de caracterización*, 6) *tecnologías de manipulación remota* y 7) *simulación computacional*. Para ello se propone la construcción de un gran Centro científico-técnico de investigación, *TechnoFusión*, constituido como una única instalación singular con capacidades para desarrollar estas siete grandes áreas de investigación que a continuación se describen:

1) *Producción y Procesado de Materiales*. Los materiales con los que se fabricarán los futuros reactores de fusión aún no se han decidido, en parte debido a que todavía no se han reproducido las condiciones extremas que tendrán que soportar. Por lo tanto, es de la mayor importancia contar con instalaciones que permitan la fabricación de nuevos materiales a escala semiindustrial y a nivel de prototipo. Entre los de mayor prioridad identificados se encuentran los materiales metálicos tales como los aceros de baja activación reforzados del tipo ODS (*Oxide Dispersion Strengthened steels*) y las aleaciones de tungsteno. Para su fabricación se dispondrá de equipos que actualmente son escasos o no existen en España como por ejemplo un Horno de Inducción a Vacío (VIM), un Horno de Prensado Isostático en Caliente (HIP), un Horno de Sinterización Asistida por Corriente de Plasma Pulsada (SPS) o un Sistema de Proyección por Plasma en Vacío (VPS).

2) *Irradiación de Materiales*. Reproducir exactamente las condiciones del interior de un reactor sólo será posible en un verdadero reactor. Aún así es factible simular los efectos que los neutrones y la radiación *gamma* producirán sobre los materiales irradiando éstos con iones y electrones. La simulación de la radiación neutrónica se realizará mediante el uso simultáneo de tres aceleradores de iones: un acelerador de iones ligeros tipo tándem de 6 MV para la irradiación con He, un acelerador de iones ligeros tipo tándem de 5-6 MV para la irradiación con H (ó D) y un acelerador de iones pesados de tipo ciclotrón de $k = 110$ para la implantación de iones pesados (Fe, W, Si, C) o de protones de alta energía. Adicionalmente, se contará con un imán de alto campo (5-10 T) para el estudio del efecto simultáneo de la irradiación y el campo magnético sobre los materiales. La simulación del efecto de la radiación ionizante, *gamma*, se realizará mediante un acelerador de electrones de energía fija de tipo Rhodotron de 10 MeV, cuyo uso será compartido con otras áreas de la Instalación.

3) *Interacción Plasma-Pared*. En un futuro reactor de fusión, además de la radiación, algunos materiales estarán expuestos a enormes cargas térmicas por su interacción con el plasma. Debido a ello, será imprescindible no sólo reproducir las condiciones estacionarias de alta densidad, baja temperatura y alta potencia sino también probar los materiales ante eventos transitorios violentos (conocidos como ELM's en la literatura de física de plasmas). Se prevé contar con dos dispositivos de generación de plasma: una máquina lineal de plasma, encargada de reproducir las condiciones estacionarias, y un acelerador lineal de plasma cuasiestacionario QSPA

(*Quasi-Stationary Plasma Accelerator*) que simulará los transitorios. Ambos serán capaces de generar plasmas de H, D, He y Ar.

4) Tecnología de Metales Líquidos. La utilización de metales líquidos como el litio en distintos componentes de ITER e IFMIF¹, y a más largo plazo, en los futuros reactores de fusión, hace que las tecnologías asociadas tengan un interés creciente. Su uso como refrigerante, productor de tritio, reproductor neutrónico o como moderador en condiciones extremas no está suficientemente estudiado. Esta área de experimentación contará con varios circuitos de litio líquido acoplados al acelerador de electrones con los objetivos principales de estudiar la superficie libre de metales líquidos con deposición interna de calor y la compatibilidad de los materiales estructurales con el metal líquido en presencia de radiación. Además se podrá investigar la influencia de la presencia de campos magnéticos en dichos fenómenos y desarrollar las tecnologías asociadas a los métodos de purificación del metal líquido, técnicas de enriquecimiento del litio, sistemas de extracción de tritio y aspectos de seguridad del metal líquido.

5) Técnicas de Caracterización. Se propone para el Centro un conjunto amplio de técnicas para la caracterización exhaustiva de materiales comerciales o desarrollados en la propia instalación antes, durante y después de su exposición a la radiación o a las cargas térmicas. Se contará para ello con una gran variedad de métodos de caracterización mecánica (máquinas electromecánicas, minimáquinas de ensayos mecánicos, máquinas de fluencia térmica, técnicas de nanoindentación, etc.), composicional (Espectrometría de Masas de Iones Secundarios (SIMS) y Sonda Atómica Topográfica (APT)), estructural y microestructural (Microscopía Electrónica de Alta Resolución (HRTEM) y Difracción de Rayos X (DRX)) o de procesamiento de materiales (Sistemas de Haces de Iones Focalizados acoplado a un Microscopio Electrónico de Barrido (FIB/SEM)). Se dispondrá también de diversos sistemas para la caracterización de las propiedades físicas (eléctricas, dieléctricas, ópticas, etc.). *TechnoFusión* aspira a convertirse en el laboratorio nacional de referencia en la caracterización de materiales, ya que algunas de las técnicas anteriormente mencionadas, como el SIMS o la APT, no se encuentran fácilmente disponibles en España.

6) Tecnologías de Manipulación Remota. Las condiciones en el interior de un reactor de fusión serán incompatibles con la reparación o sustitución de sus componentes manualmente, siendo imprescindible su manejo por manipulación remota. Así, es de la máxima importancia no sólo el desarrollo de nuevas técnicas robóticas, compatibles con estas condiciones hostiles, sino también la acreditación de las existentes para su uso en instalaciones como ITER o IFMIF. El tamaño de los componentes que se van a usar y las dificultades de su disposición en el espacio del que se dispone provoca la necesidad de desarrollos hasta ahora no considerados en las técnicas de manipulación. Se contará con una instalación, acoplada al acelerador de electrones, donde los prototipos experimentarán condiciones de trabajo con radiación *gamma* similares a las esperadas durante las tareas de mantenimiento de un reactor. Por otra parte, algunos de los prototipos considerados para la demostración de la manipulación remota son: los *Port Plugs* (PP) de diagnóstico y los *Test Blanket Modules* (TBM) de ITER, o los módulos de irradiación de IFMIF.

¹ IFMIF es una fuente de neutrones de alta intensidad y espectro equivalente al de un reactor de fusión. En el diseño final consta de dos aceleradores de deuterones que inciden sobre un blanco de Li líquido donde por reacciones nucleares de *stripping* se genera un espectro neutrónico de características similares a las del reactor)

7) Simulación Computacional. Estos estudios teóricos son imprescindibles para llegar allí donde las condiciones experimentales no alcanzan y para acelerar el ciclo de desarrollo de los nuevos sistemas completos de una futura planta comercial de fusión. *TechnoFusión* se propone impulsar un ambicioso plan de simulación computacional aunando la experiencia existente en el ámbito de la fusión con los recursos de la Red Nacional de Supercomputación. Sus objetivos abarcan desde la integración de un entorno de simulación global de un reactor comercial de fusión, la interpretación de resultados, pasando por la validación de herramientas numéricas, o el desarrollo de nuevas herramientas. Un objetivo también imprescindible es la creación de sistemas de adquisición de datos y visualización de resultados asociados.

Partiendo de la contrastada experiencia existente en grupos de investigación de Universidades, Organismos Públicos de Investigación y departamentos de investigación de empresas, *TechnoFusión* propone la construcción de una gran infraestructura científica que persigue contribuir significativamente al desarrollo de las tecnologías necesarias para la construcción de los reactores comerciales de fusión. El proyecto que aquí se describe permitirá la generación de conocimiento tecnológico de gran impacto para cualquier tipo de reactor de fusión, independientemente del concepto en el que esté basado (magnético o inercial). *TechnoFusión* pretende agrupar recursos humanos y materiales suficientes con el objetivo de contribuir al desarrollo de una fuente segura, limpia e inagotable de energía para las generaciones venideras. España no puede desaprovechar la oportunidad única que representa *TechnoFusión* y que sin lugar a dudas situaría a la Comunidad de Madrid como uno de los referentes internacionales en la ciencia y tecnología de materiales.

6. Área de experimentación de Interacción Plasma-Pared

6.1. Introducción

La operación de reactores de fusión experimentales en las próximas décadas y, posteriormente, de producción de energía eléctrica conllevará una extensión significativa de nuestro conocimiento sobre el comportamiento de los plasmas termonucleares en dispositivos de confinamiento magnético. Este conocimiento está directamente relacionado con los valores de los parámetros del plasma que se alcanzarán en estos futuros reactores respecto a los que se obtienen en los dispositivos actuales. Por ejemplo, en ITER el flujo de plasma integrado sobre las placas del divertor en una sola descarga corresponde típicamente al de un año de operación de dispositivos actuales como JET. De modo similar, los flujos de energía sobre los componentes internos de ITER durante eventos transitorios excederán los valores obtenidos actualmente por un orden de magnitud. Esto se debe a que la energía del plasma en ITER será más de un orden de magnitud (típicamente un factor 30) mayor que la de dispositivos como JET mientras que el área efectiva de los componentes internos sólo aumenta por un factor dos entre JET e ITER. En este sentido, los flujos sobre los componentes internos en DEMO, primer reactor de producción de energía eléctrica, serán típicamente un factor 5-10 mayores que los de ITER y, por tanto, aún más alejados de aquellos para los que se tiene un conocimiento satisfactorio del comportamiento de los materiales basado en los experimentos actuales.

Dentro de los importantes retos tecnológicos que plantea la operación de ITER, la evaluación de los fenómenos de interacción del plasma con los elementos materiales circundantes (primera pared, divertor, limitadores) se encuentran indudablemente entre los que más directamente pueden afectar al éxito del proyecto. Las repercusiones posteriores en el diseño de DEMO serán muy altas, por lo que hace unos años la Comunidad de fusión decidió aunar esfuerzos en el estudio de estos fenómenos. En Europa, esto se tradujo en la creación en 2002 del grupo de trabajo de EFDA (*EFDA Task Force*) en el tema de Interacción Plasma - Pared, la primera de este tipo en la UE. A través de esta *Task Force* se han ido canalizando los esfuerzos puntuales de las diversas Asociaciones EURATOM en el estudio de temas tales como la erosión de materiales expuestos al plasma, la retención del combustible (D+T) en los materiales, la respuesta a altas cargas térmicas, la generación de contaminantes y polvo, el efecto de mezcla de materiales de primera pared, etc. El grupo de Plasma-Pared del CIEMAT ha participado desde el inicio en varios de los estudios citados, con una contribución de especial relevancia en los temas de eliminación de tritio retenido en el reactor y en los mecanismos transporte de carbono y su redeposición en ITER.

Hasta la fecha se han realizado numerosos experimentos, tanto en laboratorio como en dispositivos de fusión, orientados a determinar el comportamiento de los materiales elegidos para el divertor (CFC y W) y de la primera pared (Be) cuando se someten a altas cargas térmicas o altos flujos de partículas, y cómo este comportamiento se ve afectado por la pre-irradiación con partículas energéticas (pero no con neutrones de 14 MeV como los que se producirán en el interior del reactor de fusión). En general, se ha constatado la tremenda dificultad de extrapolar los resultados de laboratorio a los dispositivos de fusión. Esto se debe básicamente a la complejidad de las condiciones presentes en estos dispositivos que incluyen, por

ejemplo, la formación de mezclas de los elementos iniciales con propiedades físico-químicas muy diferentes a las de partida. Por otra parte, se tiene evidencia de que la acción simultánea de estos factores (alta carga térmica, alto flujo y radiación) puede producir una sinergia con consecuencias desconocidas hasta el momento. A día de hoy no existen instalaciones capaces de abordar directamente el estudio de estas posibles sinergias por lo que la instalación que se propone para los estudios de interacción plasma-pared en *TechnoFusión* tiene como objetivo prioritario paliar esta deficiencia convirtiéndose así en la primera de su especie a nivel mundial.

La interacción del plasma (con la características esperables en ITER y en DEMO) con los materiales a utilizar en los dispositivos de fusión puede modificar sus propiedades significativamente debido a: i) en estado estacionario, la acumulación de isótopos de hidrógeno en su superficie y la formación de compuestos químicos por reacción entre materiales que se emplean en los componentes internos del reactor, ii) cambios en la estructura debido a las altas temperaturas de operación, iii) elevados flujos de neutrones que producen daño en los materiales circundantes, iv) bajo transitorios, a causa de la modificación de la estructura del material bajo los grandes flujos de potencia que producen daño en la superficie del material (fusión de metales, sublimación en cerámicas, eyección de agregados, etc.) y provocan la aparición de fracturas superficiales que afectan a las propiedades del material y su resistencia. Los daños producidos tienen como consecuencia la disminución de la conductividad térmica, reducción de su resistencia mecánica, permeabilidad y retención de isótopos de hidrógeno, etc.

Obviamente, el estudio de dichos procesos se lleva y se podrá llevar a cabo en los dispositivos de fusión nuclear existentes y futuros, pero en muchos casos la caracterización de los parámetros del plasma y del material en el grado necesario para estudiar con precisión esta interacción con los materiales y componentes no es posible en la práctica. A esto hay que añadir que la instalación necesaria de componentes de prueba para realizar los experimentos en estos dispositivos requiere operaciones muy complejas con un coste significativo en pérdida de tiempo para la realización de otros experimentos. Estos factores, y la práctica imposibilidad de realizar estas sustituciones de componentes de prueba en reactores de fusión, han llevado al desarrollo de instalaciones experimentales para el estudio de la interacción entre los materiales y los plasmas periféricos en dispositivos de fusión termonuclear, que emulan las propiedades de dichos plasmas tanto en estado estacionario como durante transitorios.

Actualmente existen laboratorios con instalaciones experimentales que reproducen con varios grados de aproximación las características del plasma y su interacción con los materiales, bien en estado estacionario o bien en transitorio, aunque no es posible estudiar ambos fenómenos de interacción de los materiales con plasmas termonucleares en una misma instalación. Esto se debe a que los dispositivos diseñados para el estudio de fenómenos estacionarios como PSI-2 (Universidad Humboldt de Berlín), PISCES-B (Universidad de California en San Diego) y Magnum-PSI (en construcción en la Asociación FOM-EURATOM) tienen intrínsecamente una capacidad limitada para generar los pulsos de energía que reproducen los transitorios en reactores de fusión (típicamente $\sim \text{MJm}^{-2}$ en escalas de tiempos menores de 1 ms). Por otro lado, los dispositivos capaces de generar estos pulso de energía, como los *Quasi-Stationary Plasma Accelerator* (QSPA) en el laboratorio TRINITI de la Federación Rusa (QSPA-T) o en el instituto de física del plasma en Ucrania (QSPA-

Kh50), carecen, por su diseño y principio físico en el que se basan, de la capacidad de generar un plasma con una duración superior 1 ms.

Dado que la frecuencia de los fenómenos transitorios, como es el caso de los modos localizados en el borde, ELM's, (*Edge Localized Modes*), puede ser del orden de Hz en reactores de fusión y pueden tener efectos significativos sobre el material, que afecten su posterior comportamiento en interacción con el plasma en estado estacionario, es importante el disponer de una instalación (que llamaremos "cañón de plasma") en que ambas interacciones entre plasmas y materiales en estado estacionario y durante transitorios se puedan estudiar simultáneamente y en condiciones relevantes para un reactor de fusión, permitiendo estudiar y conocer las modificaciones de las propiedades de los materiales presentes en los reactores de fusión. Éste será el objetivo del **Área de experimentación de Interacción Plasma-Pared (AIPP)** que albergará *TechnoFusión*. El citado cañón de plasma estará, por tanto, compuesto de dos elementos principales:

a) Un dispositivo de plasma lineal basado en un esquema similar al de los dispositivos existentes PSI-2 o PISCES-B capaz de generar plasmas en hidrógeno con densidades de flujo de hasta $10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (un décimo de la esperada en los elementos del divertor de ITER) y energía de impacto iónico en el rango de 20-150 eV en estado estacionario.

b) Un dispositivo del tipo QSPA con duración de pulso en el rango 0.1-1.0 ms y flujos de energía en el rango de $0.1 - 20 \text{ MJm}^{-2}$ en un campo magnético axial del orden de 1 T o mayor.

Ambos dispositivos deben estar conectados en vacío por una cámara común que permita el intercambio de materiales entre ambos y su exposición de modo simultáneo o consecutivo a flujos estacionarios o transitorios de plasma en condiciones controladas.

La elección de los materiales expuestos al plasma para ITER y DEMO está aún en discusión debido al conocimiento incompleto del comportamiento de los mismos en condiciones extremas respecto a flujos de partículas, flujos térmicos y radiación de neutrones. Los aspectos críticos a considerar son:

- Vida media de los materiales expuestos al plasma.
- Formación de polvo por erosión de los mismos.
- Inventario de tritio en la cámara de vacío.

A pesar de las incertidumbres existentes respecto a estos puntos, y dados los plazos temporales implicados, se ha llegado a un compromiso para la fase inicial de ITER. En este dispositivo, el divertor contendrá una parte de tungsteno (en las zonas de carga térmica moderada) y otra de carbono (en forma de CFC). Dado el problema de alta retención de tritio en escenarios de carbono, se planea la sustitución de la parte de CFC por tungsteno en la fase de reactor (operación D+T). La decisión final, sin embargo, depende de los resultados que se obtengan en el tokamak Asdex-UG, actualmente operado en escenario de tungsteno puro, y en JET con pared *Iter-like*. Dicha pared incluye un divertor de tungsteno puro y berilio como recubrimiento de la cámara de vacío, también previsto para la primera pared de ITER. Aún así, la gran diferencia en dosis de neutrones totales existente entre ITER (plasma pulsados) y DEMO (estado estacionario) hace cuestionable la extrapolación de la experiencia

adquirida en ITER a un reactor continuo. Por ello, se puede afirmar que la investigación de materiales bajo condiciones extremas como las mencionadas previamente constituye uno de los temas de más largo alcance en el campo de la fusión.

En los últimos años, la aparición de nuevos fenómenos de impacto potencial en el comportamiento de materiales de primera pared ha sido fruto de la investigación realizada en el laboratorio, con dispositivos similares a los integrantes del proyecto de plasma-pared de *TechnoFusión*. Ente estos hallazgos cabe mencionar:

Efectos de mezcla de materiales (plasmas lineales). Es el caso de la drástica reducción de la erosión química del carbono en presencia de berilio, la formación de eutécticos en sistemas Be/W con puntos de fusión mucho menores que el del W puro, el aumento de retención de tritio en berilio formando parte de carburos y óxidos, la formación de carburos de tungsteno y berilio a temperaturas previsible en las zonas de alta carga térmica del divertor, etc.

Efecto de cargas térmicas repetitivas (plasma accelerators). La simulación realista de la degradación del material en un divertor requiere la inclusión de ELM's que suponen pulsos de energía a menudo superiores al MJ/m^2 , duraciones inferiores al milisegundo y con frecuencias del orden del Hz. Aunque no existen dispositivos experimentales capaces de simular estas condiciones, sí que se ha demostrado en dispositivos tipo QSPA que la fatiga del material al cabo de un determinado número de pulsos tipo ELM limita la potencia máxima tolerable en estado estacionario. En el caso de C y W, el primero (en forma de CFC) sufre erosión del componente PAN (aglutinante de las fibras individuales de la matriz) a partir de cargas del orden de 0.5 MJ/m^2 . Para el segundo, el proceso de erosión origina la expulsión de metal líquido, cuyo comportamiento posterior depende de la presencia de campos magnéticos y la presión del plasma incidente. La formación de metal líquido también puede producir el *puenteado* de las ranuras incluidas en el diseño de los elementos del divertor para la eliminación de tensiones termomecánicas (*macrobrush structure*). Para pulsos repetitivos, a valores de carga térmica inferiores a los asociados a la fusión del material (nuevamente en el rango de 0.5 MJ/m^2) se ha observado el desarrollo de microfisuras que devienen en grietas macroscópicas pudiendo llegar fragmentar el material. Esto puede originar la formación de polvo metálico activado.

Efectos de sinergia entre las especies del plasma. La irradiación simultánea de los materiales con las especies principales emitidas por el plasma (deuterio, tritio, helio y neutrones) da lugar en ciertos casos a efectos sinérgicos. El caso más representativo es el que implica la formación de defectos en el material que provoca atrapamiento de tritio por el efecto combinado del daño neutrónico y la irradiación con un plasma tritiado. En el primer caso se sabe que aunque en ITER, con una tasa de año por radiación de 0.6 dpa/año , la cantidad de retención provocada por neutrones en tungsteno no sería diferente del caso no-irradiado, la situación para DEMO podría ser radicalmente distinta, pudiendo impedir el uso de este material y otros metales refractarios como elemento del diseño. El segundo caso viene representado por la co-implantación de las especies del plasma a altos flujos. Esta es la situación, por ejemplo, en la que una especie de baja solubilidad como el helio origina agregados (burbujas) que sirven como sitios de atrapamiento de la especie principal (D, T). Las presiones alcanzadas en estas burbujas pueden llegar a dañar el material y originar la expulsión del mismo hacia el plasma (*blistering*). Dado que las probabilidades de difusión, recombinación superficial y volumétrica son altamente dependientes de la

temperatura (que se auto-regula por efecto del impacto del plasma) siempre se pueden encontrar zonas del divertor en que se den las condiciones necesarias para estos fenómenos. Recientemente, por ejemplo, se ha encontrado que la irradiación por helio en tungsteno da lugar al desarrollo de estructuras nanométricas con alta capacidad de retención de tritio. Nuevamente estos estudios se realizaron en un plasma lineal del tipo propuesto en la presente memoria.

Otro caso de sinergia es el originado por la combinación de temperatura e implantación en metales. En este caso, la implantación de isótopos de hidrógeno a temperaturas relativamente bajas (por debajo de la de *embrittlement* o fragilización del material) conlleva una degradación mecánica importante del mismo. La exposición periódica de este material debilitado a pulsos térmicos tipo ELM podría rebajar significativamente la capacidad de manejo de potencia de los mismos.

Cabe indicar que no existe actualmente ningún dispositivo experimental capaz de abordar de forma simultánea los fenómenos aquí expuestos. Sólo, mediante la reproducción de condiciones agresivas similares a las esperadas en ITER y DEMO, se podría llevar a cabo una selección adecuada de los materiales expuestos al plasma y desarrollar las estrategias necesarias para su supervivencia a largo plazo. Por ello se hace necesaria la construcción del Área AIPP de *TechnoFusión*, cubriendo la falta de medidas experimentales de gran importancia para el desarrollo del programa de fusión.

Finalmente, la caracterización de los plasmas de alta densidad y baja temperatura presentes en el divertor de un futuro reactor tiene un valor intrínseco, debido a su compleja física atómica y molecular. Por tanto, un valor añadido de la instalación de plasma lineal propuesta es el del desarrollo de diagnósticos basados en física atómica y molecular (espectroscopia, espectrometría de masas, sondas, etc.) adecuados para ITER y dispositivos posteriores. Esto requiere, sin embargo, el uso de plasmas continuos con alto campo magnético y alto flujo de gas, implicando el uso de bobinas superconductoras y fuentes de plasma tipo “arco en cascada” compatibles con los altos flujos que se necesitarían.

6.2. Objetivos

Las técnicas experimentales y métodos de modificación de los materiales permitirían desarrollar en el Área AIPP de *TechnoFusión* trabajos significativos en un amplio rango de los problemas de materiales actualmente identificados en el Programa de Fusión Europeo. Algunos de ellos, sin ser demasiado exhaustivos, son:

- Estudio del comportamiento de materiales relevantes para ITER y DEMO sometidos a altos flujos de partículas para diferentes especies H, D y He.
- Estudio del comportamiento de materiales relevantes para ITER y DEMO sometidos a altos flujos de energía y a diversas temperaturas.
- Estudio del comportamiento de materiales relevantes para ITER y DEMO sometidos simultáneamente a altos flujos de partículas del plasma y cargas térmicas.

- Efectos del campo magnético local y presión del plasma sobre el movimiento de los materiales fundidos o nubes de gas formadas por la acción del plasma.
- Efectos de la orientación de las muestras respecto al plasma de los fenómenos anteriores.
- Estudios de mezcla de materiales y su impacto en el comportamiento frente al plasma.
- Caracterización y modelización del efecto de la irradiación con plasmas en materiales estructurales, recubrimientos, uniones, soldaduras, etc.
- Caracterización y modelización de la interacción plasma-pared con distintos tipos de materiales.
- Caracterización y modelización del efecto de la irradiación con plasmas en materiales aislantes y diagnósticos.

Los puntos primero y segundo requieren la acción de un plasma con una duración suficiente para alcanzar condiciones de saturación en el material expuesto. Asimismo, es deseable que el flujo de partículas incidiendo sobre la muestra sea lo suficientemente alto como para facilitar la extrapolación de los experimentos a las condiciones experimentales de ITER (ver Tabla 6.1).

Del mismo modo, el estudio de altas cargas térmicas no estacionarias precisa de un plasma de elevada potencia en pulsos cortos de tiempo; de forma que se pueda simular el efecto de ELM's³⁴.

Para la realización de los objetivos relacionados con el empleo de un plasma estacionario se propone el uso de una fuente de arco en cascada que permita alcanzar unas condiciones similares a las de ITER de manera estacionaria. El inconveniente principal de este tipo de equipos es la necesidad de la utilización de altos campos magnéticos. Una alternativa es el empleo de una fuente de LaB₆ que ofrece flujos un orden de magnitud inferior, pero requiere campos menores y ofrece plasmas de mayor diámetro. Para simular la misma fluencia que la que se espera en ITER sería necesario aumentar el tiempo de exposición. Como se mencionó anteriormente, los plasmas de alto flujo con bobinas superconductoras abrirían la posibilidad extra de estudios del plasmas tipo divertor.

Por otro lado la mejor forma para conseguir plasmas de corta duración y alta potencia es el empleo de aceleradores QSPA.

³⁴ Edge Localized Mode: evento transitorio de relajación del borde del plasma que tiene como consecuencia un elevado flujo de energía hacia la pared.

Tabla 6.1. Cargas térmica y de partículas en ITER (diseño 1998).

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	100-500	<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

El dispositivo estacionario (o continuo) de plasma lineal aquí propuesto tendría como objetivo la producción de un plasma de propiedades homogéneas de un radio de al menos 4 cm con un flujo de partículas de hasta 10²⁴ m⁻²s⁻¹ y energía de impacto iónico entre 1 y 10 eV, pudiendo ser mayor mediante polarización, y una longitud total de 1-2 m. Este plasma interactúa con un elemento material en condiciones de temperatura controlada en el rango de 200 -1500 °C lo que requiere que este elemento

material se encuentre soportado por una estructura capaz de proveer el calentamiento o la refrigeración necesaria para las condiciones del plasma que serán exploradas.

Así, a modo de resumen, las condiciones de funcionamiento para el plasma lineal serán:

- Flujo de partículas $>10^{24} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Densidad electrónica: $> 10^{20} \text{ m}^{-3}$
- Temperatura electrónica: $< 10 \text{ eV}$
- Presión de neutros: $< 10 \text{ Pa}$
- Gases de trabajo: H_2 , D_2 , He, Ar

Y para el QSPA:

- Densidad de Energía por pulso $< 40 \text{ MJm}^{-2}$
- Duración del pulso $< 0,5 \text{ ms}$
- Densidad de Potencia pico $< 100 \text{ GWm}^{-2}$

6.3. Situación internacional de las tecnologías propuestas

6.3.1. Estado actual de las tecnologías de interacción plasma-pared

Los grupos de investigación internacionales que actualmente se dedican a estudios de interacción plasma-pared son:

- TRINITI, Troitsk, Rusia
- *Institute of Plasma Physics*, NSC KIPT, Kharkov, Ucrania
- Universidad de Nuevo México, Albuquerque, EEUU
- *Efremov Institute*, San Petersburgo, Rusia
- *Japan Atomic Energy Research Institute*, Naka, Japón
- *Forschungszentrum*, Jülich, Alemania
- *Budker Institute*, Novosibirsk, Rusia

6.3.2. Instalaciones de referencia internacionales en interacción plasma-pared

A continuación se muestran los esquemas de diseño de los principales dispositivos de plasmas lineales y pulsados existentes en los principales laboratorios internacionales.

a) Dispositivos de plasmas lineales en estado estacionario (continuo)

En todo el mundo existen numerosas instalaciones de generadores de plasma lineal. Por sus especificaciones, son especialmente importantes para los estudios de plasma pared:

- a) ⁱNagoya University, Japón
- b) ⁱⁱHumboldt-Universität zu, Berlin. Departamento de Física Experimental de plasma, Alemania.
- c) ⁱⁱⁱUniversity of California San Diego, EE.UU.
- d) ^{iv}Kurchatov Institute, Moscú, Rusia.
- e) ^vFOM-Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Nieuwegein, Holanda.
- f) ^{vi}Idaho National Laboratory, Idaho, EE.UU.

En la Tabla 6.2 se recogen las principales características de las instalaciones anteriormente mencionadas.

Tabla 6.2. Relación de Instalaciones de Plasma Lineal / Divertor Simulator.

	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	10 ¹⁹
Flujo iónico en el target [m ⁻² s ⁻¹]	10 ²²	10 ²²	10 ²¹ -10 ²²	10 ²¹ -10 ²³	5·10 ²¹	2·10 ²⁵	10 ²⁴	10 ²³
Flujo de Energía al target [MW/m ²]	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								

A continuación se muestran los esquemas junto con un breve resumen de máquinas lineales de plasmas ya existentes y resumidas en la Tabla 6.2.

- **TPE (Tritium Plasma Experiment)**. Se trata de una máquina de pequeño tamaño cuya principal ventaja es la capacidad para trabajar empleando Be y T. Su configuración es similar a la de PISCES-B³⁵. Una imagen del dispositivo se muestra en la Figura 6.1.

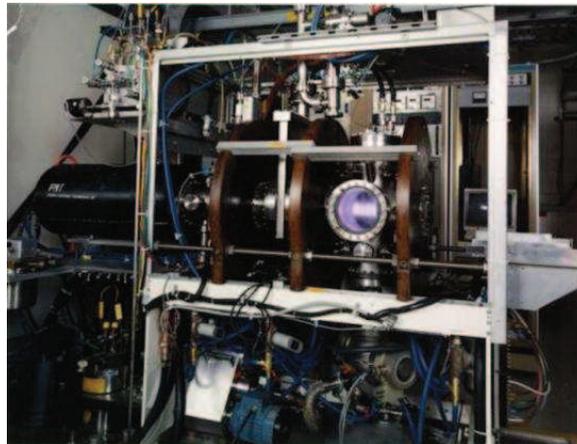


Figura 6.1. Fotografía del dispositivo de plasma lineal TPE instalado en *Idaho National Laboratory*, Idaho, EE.UU.

- **PSI-2**. En la Figura 6.2 se puede observar un esquema y una fotografía del dispositivo³⁶.

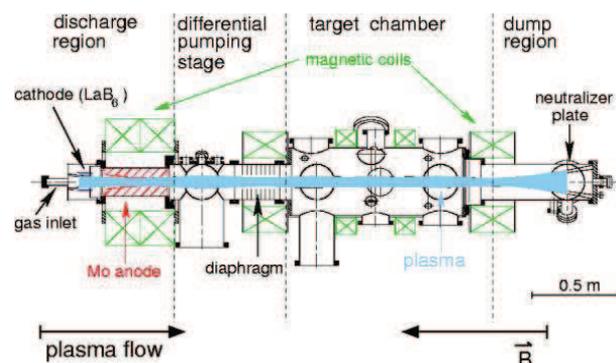
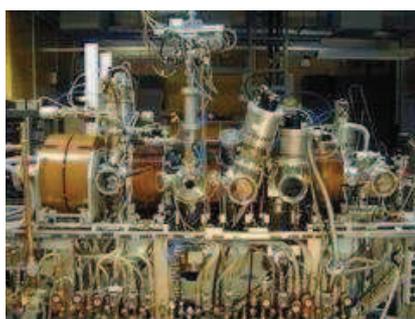


Figura 6.2. Fotografía y esquema del dispositivo del plasma lineal PSI-2 en la Universidad Humboldt de Berlín.

³⁵ <http://nuclear.inl.gov/fusionsafety/experiments/star.shtml>

³⁶ <http://plasma.physik.hu-berlin.de>

- **PISCES-B.** Se trata de una máquina con cátodo de LaB_6 como TPE, PISCES-A y PSI-2, permite trabajar con Be^{37} . Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 6.3.

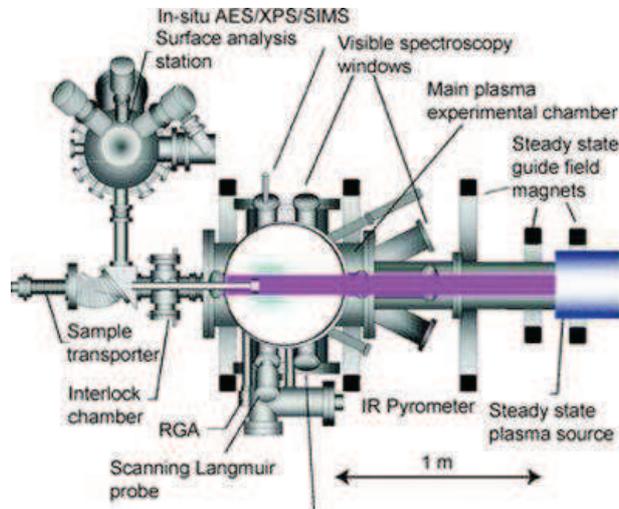


Figura 6.3. Esquema del dispositivo de plasma lineal PISCES-B en la Universidad de California en San Diego.

- **LENTA.** Esta máquina³⁸ emplea un haz de electrones para arrancar la descarga. Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 6.4.

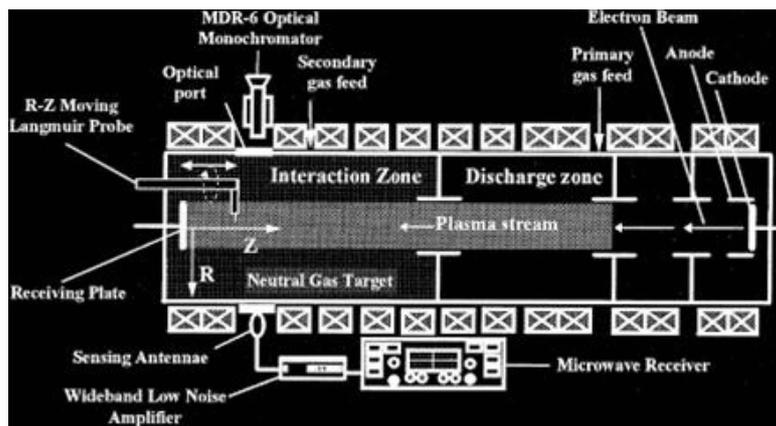


Figura 6.4. Esquema del dispositivo de plasma lineal LENTA en *Kurchatov Institute*, Moscú, Rusia.

³⁷ www.pisc.es.ucsd.edu/pisc.es/Research/DivertorPlasmaSimulators/tabid/66/Default.aspx.

³⁸ <http://www.kiae.ru/nsi/usnsi.htm#lenta>

- NAGDIS-II.** Su principal característica es que, aunque presenta un cátodo de LaB_6 , también posee un electrodo intermedio y un campo magnético adecuado (para un mejor confinamiento del plasma), lo que permite un mejor aislamiento entre la presión en la cámara en la que se genera la descarga, y la cámara experimental³⁹. Esquemas del dispositivo se muestran en la Figura 6.5⁴⁰.

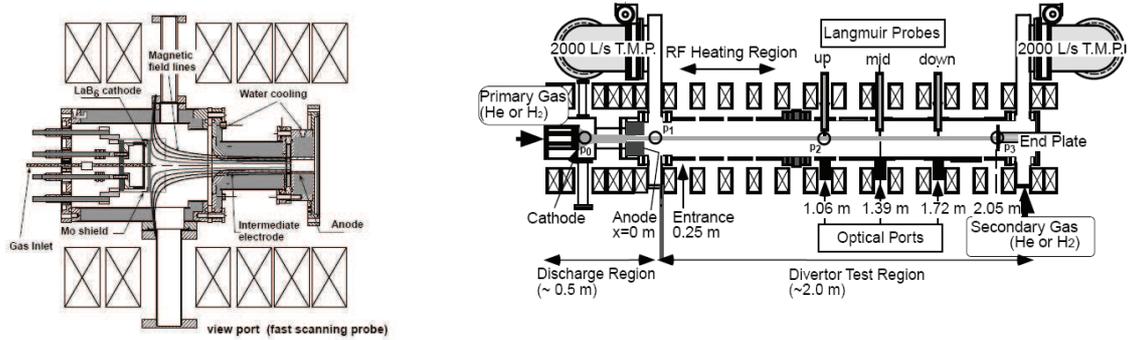


Figura 6.5. Esquemas del dispositivo de plasma lineal NAGDIS-II en la Universidad de Nagoya, Japón.

- Pilot-PSI.** La principal característica de esta máquina junto a MAGNUM-PSI (actualmente en construcción), es la generación del plasma mediante un sistema de cascada. Este tipo de sistemas permiten la operación del generador del arco a mayores presiones y también obtener flujos de partículas considerablemente mayores a los dispositivos basados en descargas de tipo *penning*. En la Figura 6.6 se muestra una imagen y un esquema de la instalación.

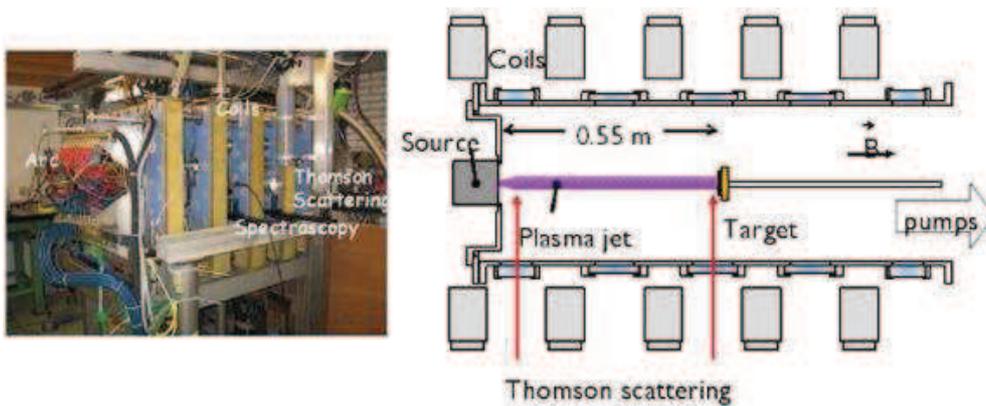


Figura 6.6. Esquemas del dispositivo de plasma lineal Pilot-PSI en FROM-Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Nieuwegein, Holanda.

³⁹ www.rijnh.nl/research/fusion_physics/psi_experimental/pilot_psi/

⁴⁰ www.ees.nagoya-u.ac.jp/~web_dai5/english/NAGDIS_II.html

b) Dispositivos aceleradores de plasma cuasi-estacionarios QSPA

Las instalaciones de dispositivos de alto flujo térmicos o QSPA más destacadas que están actualmente en operación en todo el mundo son:

- a) ⁱTRINITI, Troistk, Rusia.
- b) ⁱⁱInstitute of Plasma Physics, NSC KIPT, Kharkov, Ucrania.
- c) ⁱⁱⁱUniversidad de Nuevo México, Albuquerque, EEUU.
- d) ^{iv}Efremov Institute, San Petersburg, Rusia.
- e) ^vJapan Atomic Energy Research Institute, Naka, Japón.
- f) ^{vi}Forschungszentrum, Jülich, Alemania.
- g) ^{vii}Budker Institute, Novosibirsk, Rusia.

En la Tabla 6.4 se resumen las principales características de las citadas instalaciones.

Tabla 6.4. Relación de dispositivos actuales de alto flujo térmico.

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-Kh50ⁱⁱ 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^v 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^{iv} 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 ³ (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

A continuación se muestran los esquemas junto con un breve resumen de los dispositivos QSPA ya existentes y resumidos en la Tabla 6.4:

- **QHPA tipo P-50M.** *Laboratory of Plasma Accelerators Physics.* IMAPh NAS Bielorrusia⁴¹. En la Figura 6.7 se muestra el diseño del cañón de plasma del tipo QHPA. Sus principales características son:
 - Duración de la descarga 500 μ s
 - Corriente pico 200 – 450 kA
 - Velocidad del plasma $(7 - 20) \cdot 10^6$ cm/s
 - Densidad electrónica $10^{16} - 10^{18}$ cm⁻³
 - Temperatura del plasma 10 – 15 eV
 - Energía total 215 kJ
 - Dimensiones cámara de vacío 0.8 x 0.8 x 4 m

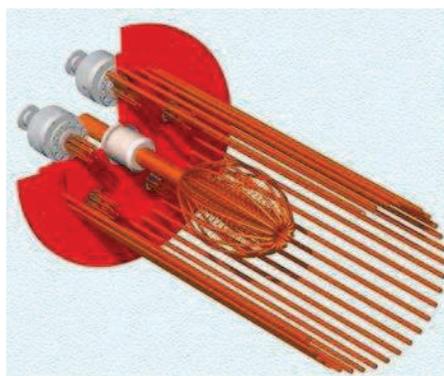


Figura 6.7. Esquema del dispositivo de alto flujo térmico QHPA del tipo P-50M, instalado en *Laboratory of Plasma Accelerators Physics.* IMAPh NAS Bielorrusia.

- **QSPA Kh-50.** *Institute of Plasma Physics. National Science Center. Kharkov Institute of Physics and Technology.* Ucrania⁴². En la Figura 6.8 se puede observar el diseño del cañón de plasma del tipo QSPA. En la Tabla 6.5 se puede observar una comparativa entre dos de los dispositivos actuales cuasi-estacionarios:

⁴¹ <http://imaph.bas-net.by/imaph/lpap/QHPA1.htm>

⁴² www.kipt.kharkov.ua/en/ipp.html.

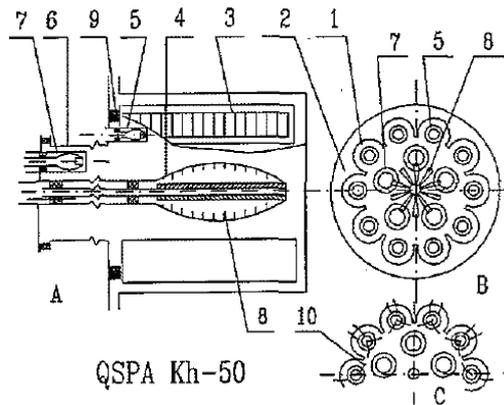


Figura 6.8. Esquemas del dispositivo cuasi-estacionario QSPA Kh-50, localizado en *Institute of Plasma Physics. National Science Center. Kharkov Institute of Physics and Technology. Ucrania.*

Tabla 6.5. Comparativa entre QSPA Kh-50 y QHPA P-50M.

Dispositivo		P-50	Kh-50
Primera etapa	Número de etapas de ionización	4	5
	Longitud del canal de aceleración (cm)	~20	80
Ánodo		Pasivo	Activo
	Diámetro (cm)	50	50
	Longitud (cm)	80	80
	Número de barras (polos)	36	(10)
	Número de cámaras de ionización en el ánodo	-	10
Cátodo		Pasivo	Semiactivo
	Diámetro (cm)	32	36
	Longitud (cm)	60	60
	Número de barras	16	20
Fuente de alimentación	Banco de condensadores C(μF)xU(kV);Wc (kJ)	5600x10 (22400x5); 280	7200x25; 2250
	Voltaje alcanzado, U _c (kV)	8.5 (4.5)	15
	Corriente de la descarga, I _d (kA)	≤600	≤800
	Longitud del pulso, τ, ms	0.26 (0.55)	0.3
	Tamaño cámara de vacío. Longitud (m) x Diámetro (m)	4.0x1.0	10.0x1.5

- **MK-200 (UG y CUSP).** *Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research. Rusia*⁴³. En las Figuras 6.9. y 6.10 se puede observar una imagen y los esquemas de diseño del dispositivo, respectivamente.

⁴³ www.triniti.ru/Triniti_eng/Base2.html#3



Figura 6.9. Fotografía del dispositivo cuasi-estacionario MK-200 (UG y CUSP), en *Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research*. Rusia.

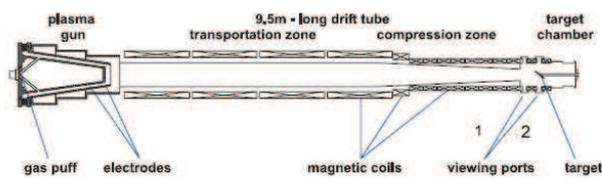


Fig. 1. Basic scheme of the MK-200 UG facility.

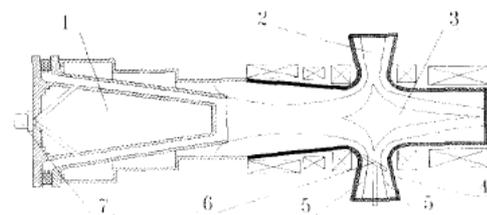


Fig. 1. Experimental facility MK-200 CUSP. (1) Plasma gun, (2) plasma escaping CUSP, (3) CUSP's plasma, (4) CUSP, (5) magnetic field lines, (6) target, (7) gas valve

Figura 6.10. Esquemas del dispositivo MK-200 (UG y CUSP), en *Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research*. Rusia.

- **QSPA-T (TIN-1).** *Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research*. Rusia⁴⁴. En la Figura 6.11 se puede observar una fotografía del dispositivo.

⁴⁴ www.triniti.ru/Triniti_eng/Base2.html#3



Figura 6.11. Fotografía del dispositivo cuasi-estacionario QSPA-T (TIN-1), en *Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research*. Rusia.

6.4. Equipamiento previsto

6.4.1. Máquina lineal de plasma en estado estacionario (continuo)

Actualmente existen dos tipos de sistemas para la generación de plasmas de manera continua. En primer lugar se encuentran los dispositivos que emplean descargas tipo *penning*, y en segundo lugar, los que emplean descargas de arco en cascada.

En los dispositivos que emplean descargas tipo *penning* se crea un plasma mediante un arco que utiliza un cátodo caliente de LaB_6 ⁴⁵ y un ánodo hueco (molibdeno u otro metal refractario) que crea un plasma cilíndrico casi-neutro que se confina por un campo magnético axial (del orden de $\sim 0.1 - 0.2$ T) y finalmente interacciona con un elemento material situado a una distancia de 1 a 2 metros de la fuente del plasma (ver Figura 6.12). Las propiedades de este plasma dependen de la corriente que se establece entre el ánodo y el cátodo (típicamente en el rango 50-500 A), el campo magnético aplicado y la presión del gas, que se controla mediante el bombeo diferencial de las diferentes regiones del dispositivo por bombas turbomoleculares (típicamente es de 0.1 a 1 Pa en la zona de la descarga, y 0.1 Pa en la zona de interacción entre el plasma y el material). La energía de impacto de los iones se puede variar aplicando una diferencia de potencial sobre la muestra que está siendo irradiada (polarización).

El flujo máximo alcanzado en este tipo de dispositivos es de $10^{23} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para temperaturas electrónicas menores de 10 eV (sin polarización). Asimismo, el flujo de energía en el blanco es menor de 1 MW/m^2 .

⁴⁵ D.M. Goebel, Y. Hirooka, y T.A. Sketchley, "Large-area lanthanum hexaboride electron emitter," *Review of Scientific Instruments*, vol. 56, 1985, págs. 1717-1722

Los dispositivos que emplean descargas de arco en cascada ^{46,47} consisten en una cámara con cátodos de tungsteno en forma de aguja, una serie de elementos de cobre, aislados mediante discos de nitruro de boro, y un último elemento que actúa como ánodo y presenta un canal algo mayor que los anteriores (ver Figura 6.13). Todos los elementos de la fuente se encuentran refrigerados con agua. El flujo de hidrógeno empleado es de 0.5 a 3.5 slm (litros por minuto en condiciones estándar) manteniendo una presión de 104 Pa. El arco opera entre 60 y 300 A y el voltaje aplicado hasta 200 V. Cada elemento del arco recibe una potencia entre 2.5 a 3 kW (puede alcanzarse 45 kW en una fuente con un único canal y hasta 135 kW en una de tres), lo que implica una potencia en la fuente de hasta $\sim 40 \text{ MW/m}^2$.

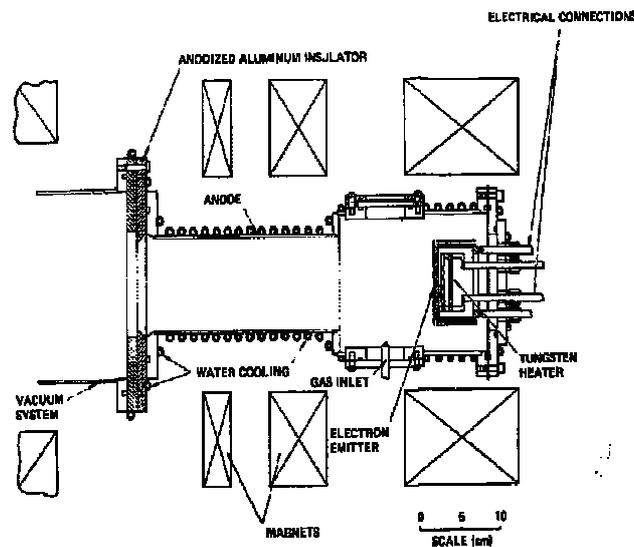


Figura 6.12. Esquema de una fuente de plasma de LaB₆.

El plasma generado por este tipo de dispositivos tiene un diámetro de unos 5 mm y se propaga en una cámara con una presión base de 1 a 5 Pa. Es posible alcanzar un flujo de $10^{24} \text{ H}^+ \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y una temperatura electrónica del orden de 1 eV. Para mantener las elevadas densidades (10^{21} m^{-3}) que corresponden a estos flujos es necesaria la utilización de elevados campos magnéticos ($\sim 1 \text{ T}$) ⁸.

El dispositivo aquí propuesto tendría como objetivo la producción de un plasma con unas características relevantes de cara a ITER. Este plasma interactúa con un elemento material en condiciones de temperatura controlada en el rango de 200 a 1.500 °C lo que requiere que este elemento material se encuentre soportado por una estructura capaz de proveer el calentamiento o la refrigeración necesaria para las condiciones del plasma que serán exploradas.

⁴⁶ G. Van Rooij, "Laboratory experiments and devices to study plasma surface interaction," Fusion Science and Technology, vol. 53, 2008, págs. 298-304.

⁴⁷ G.M.W. Kroesen, D.C. Schram, y J.C.M. de Haas, "Description of a flowing cascade arc plasma," Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 10, Dic. 1990, págs. 531-551.

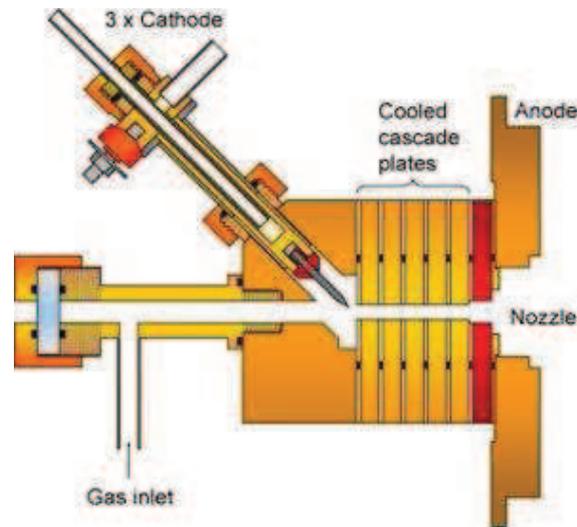


Figura 6.13. Esquema de una fuente de arco en cascada.

Además de los sistemas anteriores, necesarios para la correcta realización de experimentos, el dispositivo de plasma lineal contará con una serie de sistemas de diagnóstico que permitirán caracterizar los procesos de interacción plasma-material durante la exposición del material al plasma tales como:

- Varias sondas de *Langmuir* móviles para determinar la temperatura y densidad del plasma.
- Equipos de termografía de la superficie del material y calorimetría para determinar la temperatura de la superficie a que se da dicha interacción.
- Equipos de espectroscopía visible, infrarroja y ultravioleta para determinar las especies que se producen en la interacción y el material.
- Equipos de diagnósticos de análisis de gases residuales para determinar las especies volátiles producidas, etc.

Dentro del desarrollo del proyecto se contempla la implementación de un sistema de bobinas superconductoras para permitir el funcionamiento en estado estacionario y dispuestas para el transporte de una haz de plasma de 5 cm hasta la muestra. En primer momento se plantea la instalación de una fuente de arco similar a la instalada en PILOT-PSI (con un diámetro de haz de 1.5 cm); con la posibilidad de expandirlo para irradiar muestras mayores empleando una configuración magnética adecuada, a costa de reducir los parámetros de flujo de partículas y potencia. En paralelo y en la actualidad dentro del marco de EURATOM se desarrolla una colaboración entre CIEMAT y FOM (Holanda) para el desarrollo de fuentes de arco para diámetros mayores, fruto de las necesidades de plasmas mayores tanto para la instalación descrita en el presente informe como para dar un nuevo empuje en el desarrollo de

nuevas fuentes para MAGNUM-PSI (máquina actualmente en construcción en FOM) y que tiene como objetivo manejar plasmas de 10 cm de diámetro.

6.4.2. Acelerador de Plasma Cuasi-estacionario (QSPA)

El dispositivo de plasma pulsado se basa en un acelerador QSPA. En este dispositivo una corriente se establece entre electrodos co-axiales que ionizan el gas que se introduce entre ellos, creando un plasma que se acelera por la fuerza de ampere entre la corriente que circula entre los electrodos y el campo magnético acimutal. El proceso se puede realizar en una sola etapa (generación de plasma y aceleración) o en dos etapas (generación de plasma en un sistema de electrodos y aceleración en el siguiente). El QSPA es el análogo magnetohidrodinámico a una de tobera de Laval. Con este dispositivo se pueden alcanzar plasmas con flujos de energía en el rango de 0.1-20 MJm⁻² y duraciones de 0.1-1.0 ms. Estos parámetros cubren los flujos de energía y duración de los transitorios sobre los componentes internos de los reactores de fusión durante ELM's y disrupciones.

En la Figura 6.14 se muestra el esquema detallado de los electrodos coaxiales de un sistema de una etapa. Las dimensiones de la cámara de vacío que contiene el sistema se encuentran entre 1.5 y 2 m de longitud por 40 cm de diámetro. El diseño para la fuente de plasma será sensiblemente más sencillo que el del QSPA Kh-50, aunque algo más complicado que el QSPA-T (ver Tabla 6.3). Por otro lado, las dimensiones geométricas del generador de plasma serán de 23 – 25 cm de diámetro para el ánodo externo (de varillas con una pantalla externa) y para el cátodo (elipsoidal y semitransparente) de 15 – 16 cm de diámetro para la parte de diámetro máximo. La longitud total para la fuente de plasma será de unos 60 cm.

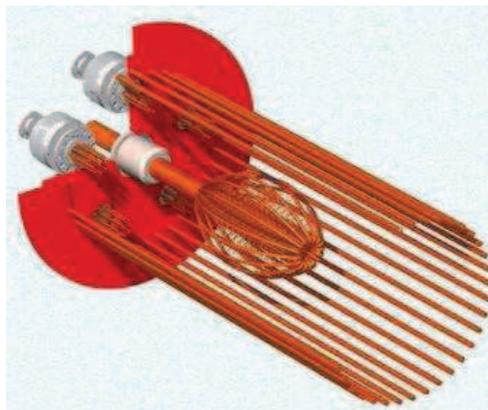


Figura 6.14. Esquema de electrodos coaxiales en una etapa en QSPA-P50M.

Las bobinas dispuestas alrededor de la cámara de vacío permiten generar un campo magnético axial del orden de 1 T. El campo debe aumentar su valor de manera paulatina desde su punto de generación hasta la muestra para evitar pérdidas de

plasma a la entrada del campo magnético. El campo óptimo para situar la fuente de plasma está en torno a 0.1 T.

Para la introducción de gas será necesario el uso de varias válvulas compactas que operarán de forma simultánea para alcanzar una flexibilidad suficiente en los parámetros del plasma y reducir la erosión de los electrodos durante la operación en el modo de disparo largo. Esta flexibilidad es de especial importancia para permitir el uso de deuterio, helio u otros gases además de hidrógeno.

Además de los sistemas necesarios para todo dispositivo generador de plasmas como son bombas turbo-moleculares (con capacidad de evacuar hasta 1 litro de H₂ por pulso del QSPA), etc., la operación de un dispositivo QSPA requiere una fuente de alimentación adaptada a la producción de pulsos de alta potencia y corta duración, típicamente basadas en un banco de condensadores distribuidos en varios segmentos que permitan realizar pulsos de duraciones distintas (0.25 – 0.5 ms) cuya capacidad ha de ser mayor de 10 mF para poder alcanzar pulsos de 0.5 ms. La corriente que debe alcanzar dicha fuente es de 0.5 – 0.7 MA en diferentes regímenes. Asimismo, el voltaje deseado es de unos 25 kV para elevar la temperatura iónica del plasma generado y como una forma de aumentar la temperatura electrónica durante la termalización producida al transmitirse el plasma a través de un campo magnético creciente. Todo esto implica una energía acumulada en torno al intervalo de 2.5 a 3 MJ.

Igualmente, el elemento material expuesto al plasma se deberá disponer sobre una estructura de soporte que permita variar el ángulo de impacto entre el plasma y el elemento material en un rango de 5 - 90° y permitir el control de la temperatura del elemento material entre 200 – 1.500 °C antes de sufrir el impacto del plasma.

Otros sistemas que son necesarios para la correcta operación del QSPA son:

- Unidad de sincronización (existen soluciones comerciales).
- Sistema de control.
- Bobinas tipo *Helmholtz* para producir un campo magnético en la zona de descargar del QSPA (estas no se consideran en la descripción de las bobinas en el apartado de integración de las dos máquinas).
- Conmutadores para la descarga (por ejemplo un ignitrón).

De modo similar al dispositivo lineal, el QSPA requiere un sistema de diagnóstico adecuado a los experimentos a realizar y a las características del plasma producido y su duración temporal tales como termografía del elemento material con alta resolución temporal, espectroscopia de alta resolución temporal, calorimetría para la calibración de los flujos de energía, sondas para la medida de la presión del plasma, etc.

En el Anexo III de este documento se adjunta un informe del Instituto de Física de Plasma de Kharkov, Ucrania (KIPP), grupo de excelencia en el diseño de máquinas QSPA que está involucrado en el diseño del dispositivo que se integrará en *TechnoFusión*.

6.4.3. Integración de la máquina de plasma lineal y el QSPA

Uno de los mayores retos en el diseño del sistema de plasma lineal para *TechnoFusión* es la integración de dos sistemas en una única máquina para la irradiación simultánea de las muestras. Como primera aproximación se busca un funcionamiento continuo para la máquina lineal de plasma y uno pulsado para la incidencia del QSPA. Ambos plasmas se generan en sus respectivas cámaras, y deben transportarse mediante un campo magnético hacia la muestra a irradiar. Para realizar la irradiación de la muestra en el mismo punto se debe diseñar un sistema de bobinas que permitan cambiar de manera sencilla y rápida de la irradiación de una máquina a otra.

La configuración magnética propuesta se muestra en la Figura 6.15. En ella se puede observar cómo ambas máquinas forman un ángulo de 90 grados lo que facilita el acceso, confluyendo en una misma cámara. Las líneas negras muestran las líneas de campo magnético que guían el plasma hacia el *target* (muestra o blanco). La parte novedosa de esta propuesta es el disponer de ambos sistemas en una misma instalación para así poder realizar estudios de interacción plasma pared en condiciones similares a las de un reactor incluyendo fases estacionarias y transitorias con la integración de ambos sistemas.

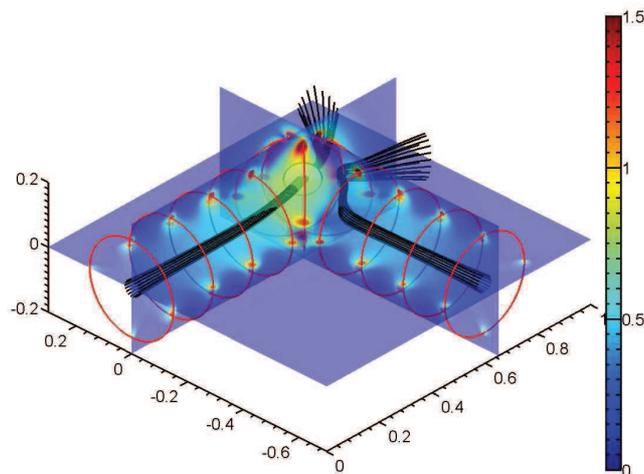


Figura 6.15. Configuración magnética propuesta para la operación de la máquina lineal y el QSPA.

La zona de muestra está compuesta de tres bobinas situadas de manera simétrica. Dos de ellas se encuentran ligeramente descentradas de los ejes de las máquinas, y su función es la de atraer el plasma hacia la muestra, manteniendo la intensidad de campo magnético necesaria. La tercera bobina se encuentra centrada en la confluencia de los ejes de ambas máquinas, formando un ángulo de 45° con respecto a ambos ejes (diagonal). Invertiendo la corriente en esta bobina es posible cambiar la incidencia de un plasma por el otro, manteniendo el resto de corrientes

constantes. Esta configuración permite alternar la exposición de la muestra de forma rápida.

A lo largo de la máquina lineal que se encuentra incidiendo sobre la muestra el módulo de campo magnético se va incrementando de manera progresiva (cuasi-lineal), lo que permite una buena penetración y compresión del plasma en el campo magnético. La variación del módulo de campo magnético a través de la línea de campo que pasa por el eje de la máquina que se encuentra incidiendo la muestra se muestra en la Figura 6.16.

La muestra de color blanco en la Figura 6.15 se encuentra situada en un punto en la bisectriz que definen los ejes de cada una de las máquinas. La configuración magnética escogida asegura una curvatura progresiva del plasma a medida que se acerca a la muestra, para evitar perturbar el plasma al dirigirlo hacia el *target*.

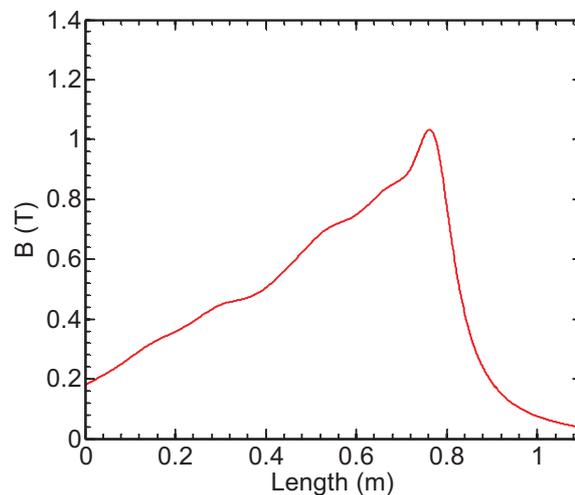


Figura 6.16. Evolución del módulo del campo magnético a lo largo de la línea de campo que recorre el eje de la máquina que se encuentra incidiendo sobre la muestra.

En esta configuración magnética se alcanza una compresión de las líneas de campo en un factor ~ 4 . El ángulo de ataque medio sobre la muestra es de $\sim 60^\circ$, y (suponiendo que el plasma es en origen circular) la huella sobre la muestra tiene forma elíptica. El campo medio en la muestra está en torno a 1 T. En la Figura 6.17 se puede observar la incidencia de las líneas de campo sobre la muestra.

El uso de un plasma de alta densidad y alto flujo ($10^{24} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) relevante de cara a ITER impone el uso de elevados campos magnéticos⁴¹. Esto implica severas restricciones en el diseño posterior de la máquina. Las corrientes necesarias en las bobinas oscilan desde los 20 kA hasta los 80 kA en la bobina empleada para la selección de máquina. Estas elevadas corrientes implican, en caso de la utilización de cobre, el uso de bobinas de gran tamaño y diámetro interior reducido (con un gran impacto en el diseño detallado de la cámara de vacío y el acceso al plasma). Además,

la potencia necesaria para mantener esta corriente se encuentra entre 1 y 3 MW. Existen opciones alternativas comerciales, no descartables a priori, como el empleo de imanes superconductores similares a los empleados en medicina (por ejemplo, resonancia magnética nuclear). Este tipo de bobinas pueden emplearse para aquellas que tengan que aportar un mayor campo durante tiempos largos, utilizando cobre en el resto. El uso de bobinas superconductoras puede resultar competitivo si se tiene en cuenta el ahorro en fuentes de potencia y en operación de la máquina.

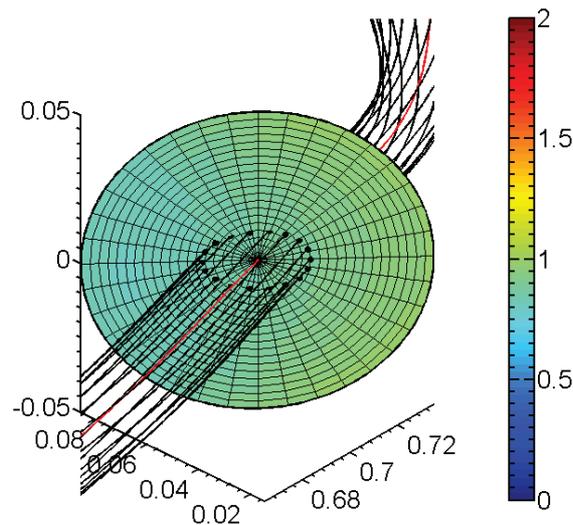


Figura 6.17. Incidencia de las líneas de campo (en negro) que corresponden en origen a una circunferencia de 2.5 cm de radio. En rojo la línea de campo que atraviesa el centro.

El uso de bobinas de cobre implica el empleo de refrigeración de agua, aunque en sistemas pulsados (pulsos largos) también es posible el uso de nitrógeno líquido, que tiene como principal ventaja la reducción de la potencia necesaria para la operación.

Las cámaras de vacío se diseñarán empleando simulaciones Monte Carlo utilizando el programa DS2V 4.5 desarrollado por G.A. Bird (Figura 6.18). Teniendo en cuenta las restricciones de espacio que impongan las bobinas, la cámara de vacío debe compartimentarse de forma que se permita mantener una presión del orden de décimas de Pa en la cámara de muestra. Para ello considerando que la inyección de gas (en el caso más desfavorable de la máquina lineal) será del orden de decenas de slm (*standard liter per minute*) se necesitarán al menos tres zonas de bombeo cuyo orden de magnitud será de miles de litros por segundo. En función de la presión alcanzada en cada una de las partes de la máquina se buscará el tipo de bomba adecuada (*roots*, bombas turbomoleculares, etc.) para obtener los caudales necesarios. Los sistemas de vacío se encontrarán en la parte inferior de la máquina, por lo que será necesario dos alturas.

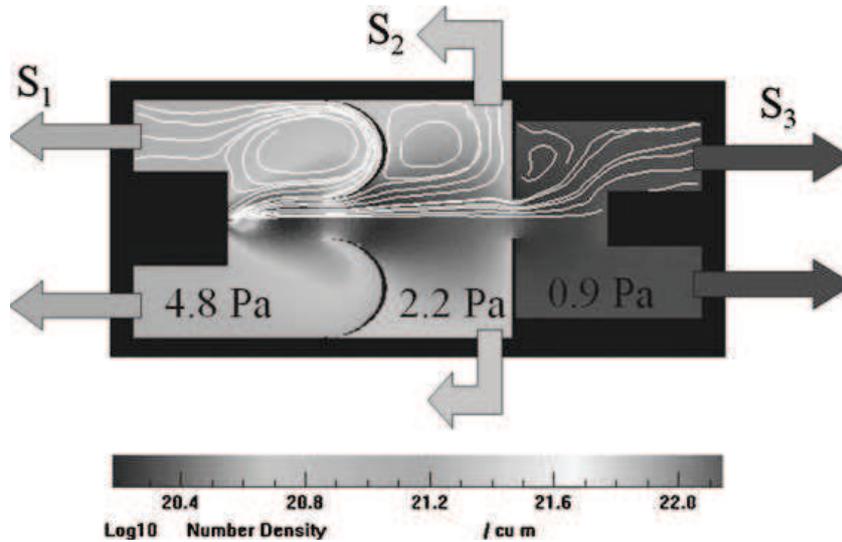


Figura 6.18. Ejemplo de cálculo de la instalación de vacío empleando el software DS2V aplicado a la instalación MAGNUM-PSI⁴⁸

En principio los dispositivos descritos en esta propuesta son realizables y se basan en sistemas existentes. Si esta propuesta se acepta, el diseño detallado de estos nuevos dispositivos se optimizaría para eliminar alguno de los problemas/diferencias respecto a las condiciones en un reactor de los sistemas existentes tales como mejorar la uniformidad del plasma lineal en su sección transversal, aumentar la energía de impacto de los iones y electrones en el QSPA y reducir la densidad del plasma, etc. Por otro lado, la parte novedosa de esta propuesta, el disponer de ambos sistemas en una misma instalación y poder realizar estudios de interacción plasma-material en condiciones similares a las de un reactor incluyendo fases estacionarias y transitorios requiere la integración de ambos sistemas. El modo preciso de llevar a cabo dicha integración requiere estudios detallados pero en principio, en el presente informe se aportan soluciones para la irradiación de muestras mediante un plasma estacionario y un plasma de alta carga térmica. Es factible la construcción de una única cámara de vacío que permita el uso de ambos plasmas para la irradiación de una única muestra. Para esto solamente es necesario el uso de una configuración de bobinas adecuada en el entorno del *target*. La desventaja de esta disposición que dificulta el funcionamiento independiente del dispositivo de plasma lineal y el QSPA, que puede ser ventajosa para ciertos experimentos.

En lo que respecta al cañón de plasma QSPA el diseño básico se encuentra cerrado. Por el contrario para la máquina de plasma lineal es necesario, como siguiente paso especificar qué tipo de bobinas se emplearán. Del mismo modo la fuente de arco será preferiblemente en cascada, aunque es posible la adaptación de una fuente de LaB₆ en función de la disponibilidad económica.

⁴⁸ Van Eck H, Koppers W, et al, Fus. Eng. Design 2007;82 1878

6.5. Capacidad experimental

La instalación que se describe en el presente informe tiene amplias capacidades para la realización de actividades diversas, incluso actividades no relacionadas directamente con las tecnologías de fusión nuclear. En la Tabla 6.5 se recogen los experimentos claves en este tipo de instalación. Dependiendo del distinto enfoque se pueden diferenciar distintas aplicaciones.

6.5.1. Desarrollo de diagnósticos del plasma y formación en las tecnologías asociadas

Las máquinas lineales son dispositivos generadores de plasma que proporcionan un muy buen acceso al plasma (sin condicionantes importantes geométricos como en el caso de *Stellarator's* y *Tokamak's*) y plasmas de larga duración. Todo esto simplifica el desarrollo de diagnósticos y técnicas que puede desarrollarse en este entorno para luego portarse a máquinas de mayor tamaño. Esto presenta una oportunidad tanto para la formación de personal en estas técnicas como para su optimización. Las técnicas más susceptibles de implementarse son técnicas de espectroscopía (tanto activa como pasiva), sondas eléctricas (*Langmuir*, *Mach*), *retarding field analyzers*, diagnósticos de haces moleculares, etc.

Tabla 6.5. Relación de principales áreas de interés de la instalación.

Máquina lineal de plasma	QSPA	Combinación de ambas	Material Irradiado mediante haces
<ul style="list-style-type: none"> √ Experimentos de deposición de potencia √ Erosión Química √ Retención de T √ Mezcla de Materiales √ Metales Líquidos en presencia de campos magnéticos + exposición a plasma 	<ul style="list-style-type: none"> √ 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 	<ul style="list-style-type: none"> √ Experimentos de fatiga √ Retención de T bajo cargas estacionarias y no estacionarias √ Degradación de propiedades físicas 	<ul style="list-style-type: none"> √ Degradación de propiedades físicas tras irradiación √ Retención de T tras irradiación

6.5.2. Estudios de materiales de primera pared

Los dispositivos que se han descrito están especialmente diseñados para los estudios centrados en los materiales de primera pared aplicados a reactores de fusión. Dentro de estos estudios se pueden diferenciar diferentes aspectos.

1. El estudio de los efectos de la irradiación con un plasma de alta potencia durante tiempos prolongados sobre el material de prueba. Estudios de erosión, fatiga, etc.
2. Efecto de elevadas cargas pulsadas de potencia (por encima de las cargas de diseño del material). El estudio de este efecto mediante la irradiación de un plasma pulsado QSPA y magnetizado permite la observación de ciertos efectos conocidos, pero apenas estudiados, como es el apantallamiento de la potencia recibida debido a vaporización de la superficie material⁴⁹, dinámica de material fundido, etc.
3. Específicamente en los estudios de manejo de potencia se podrán realizar estudios sobre materiales líquidos (por ejemplo Li) debido a su alto potencial como material de primera pared en un hipotético reactor. Como complicación añadida a estos materiales es necesario tener en cuenta que están sometidos a fuerzas magnetohidrodinámicas.
4. Estudios de erosión de materiales. Esta erosión se puede producir debido al impacto de los iones sobre la superficie del material, o bien a reacciones químicas entre el hidrógeno y el material (erosión química). Esto es de especial importancia en materiales de carbono.
5. Estudios de retención de tritio (empleando isótopos no radioactivos). La cantidad de T que puede acumularse en un reactor de fusión debe permanecer controlada en todo momento bajo unos parámetros de seguridad (en el caso de ITER son 700 g de T movilizable). Empleando dispositivos lineales se pueden realizar estudios de la retención de isótopos de hidrógeno debido a difusión, acumulación en defectos, codeposición con material previamente erosionado, etc.
6. Estudios de los efectos de combinación de materiales. El entorno de un dispositivo de fusión presenta una elevada complejidad, por lo que los materiales que se empleen en la primera pared se verán contaminados por otros materiales presentes, cambiando sus propiedades físicas (comportamiento ante cargas térmicas, retención de T, etc.)
7. Estudios de muestras irradiadas en el Área de experimentación de Irradiación de Materiales ante altos flujos de potencia y partículas en estado estacionario así como la respuesta a pulsos de alta potencia y partículas. Este tipo de estudios sitúan a esta Área como la única capaz de abordar simultáneamente los tres problemas más relevantes en lo que respecta al manejo de la potencia en escenarios relevantes en reactores de fusión (daño por irradiación, manejo de potencia y partículas en estado estacionario y manejo de altas cargas térmicas en eventos transitorios).

6.5.3. Estudios de interacción plasma-pared

Existen una amplia variedad de fenómenos que se producen cuando un plasma interacciona con la pared. Así, por ejemplo, los procesos de física atómica que se producen en la primera pared en contacto con el plasma determinan la forma del perfil

⁴⁹ Belan VG, Levashov VF, Maynashev VS, Muzichenko AD, Podkovirov VL. J. Nucl. Mater. 1996;233-237 763

en el borde. Entre estos procesos se encuentran los mecanismos que dan lugar al reciclado de gas en la superficie, transporte de impurezas a lo largo del plasma, etc.

6.5.4. Estudios de física de plasma

En los plasmas de baja temperatura se pueden realizar estudios básicos de física de plasma estudiando fenómenos de magneto-hidrodinámica, turbulencia, etc. que pueden compararse con los resultados obtenidos en simulaciones, aprovechando la sencilla geometría del dispositivo.

6.5.5. Estudio de materiales en condiciones extremas

La disponibilidad de altas potencias de calentamiento en un ambiente agresivo (pudiendo realizar inyección de gases también agresivos, por ejemplo oxígeno) permite la realización de estudios de materiales en condiciones extremas que son de interés en diversos campos (tecnología aeroespacial, electrónica de potencia, etc.⁵⁰).

6.6. *Requerimientos de espacios físicos, instalaciones y seguridad*

Uno de los principales valores añadidos de la instalación propuesta consiste en la disponibilidad de un conjunto significativo de técnicas de medida y métodos de simulación de las condiciones presentes en un reactor de fusión (altos flujos de calor, irradiación, etc.) únicos en Europa y el mundo. Sin embargo, esto significa que el Área AIPP de *TechnoFusión* debe de estar organizada de forma muy flexible y permitiendo la realización de diferentes tipos de experimentos en diferentes zonas experimentales con pequeños cambios y procesos de adaptación lo mas sencillos posibles. A este aspecto será necesario dedicarle una especial atención durante la fase de diseño detallado de la instalación.

(I) Espacios físicos e instalaciones requeridos

Las necesidades de espacios para las actividades a realizar del Área AIPP dentro de las instalaciones de *TechnoFusión* se detallan a continuación:

- 1 nave de 100 m² y 7 m altura para albergar la máquina lineal y el QSPA así como sus sistemas de vacío, etc.

⁵⁰ ExtreMat <http://www.extremat.org/>

- 1 nave anexa para albergar las fuentes de potencia necesarias para la operación de las bobinas así como los sistemas para generar el plasma en cada uno de los dispositivos (100 m²).
- 1 sala de 40 m² para albergar los equipamientos de análisis y control de los materiales irradiados con el plasma así como para el montaje de diagnósticos que sean después instalados en las máquinas.
- 1 sala de 80 m² para la instalación de los instrumentos sistemas de control, así como la sala desde la que se controlará el funcionamiento de la máquina.
- 1 sala de 30 m² para taller y herramientas.
- 1 almacén de 40 m².

En cuanto a las instalaciones requeridas:

(a) *Instalación eléctrica:*

Será necesaria la instalación de una línea de potencia para alimentar las fuentes que operan los distintos dispositivos. Asimismo, existirá una línea independiente para la alimentación de los distintos sistemas de vacío, incluyendo *cryocooler's* si se emplean bobinas superconductoras.

En las instalaciones se aportarán las líneas bifásicas para la conexión de distintos equipos periféricos a la instalación (por ejemplo: equipos de diagnósticos, ordenadores, etc.)

(b) *Instalación de agua:*

Será necesaria un acometida de agua para refrigeración de diferentes equipos (bobinas de cobre, sistemas de vacío, etc.). Además, en función de los requerimientos de refrigeración se contemplará la posibilidad de emplear un circuito cerrado de refrigeración de los equipos.

(c) *Instalación de aire comprimido y suministro de gases:*

Para la operación de la instalación se necesita la instalación de diferentes líneas de gases a presión (hidrógeno, metano, nitrógeno, amoníaco, oxígeno, etc.). Esta instalación implica la necesidad de la instalación de detectores de gases así como de alarmas en la nave dónde se aloje el dispositivo, que deberá estar correctamente ventilada.

También se dispondrá de una línea de aire a presión que se empleará para la actuación de dispositivos neumáticos. Esta misma línea se empleará para disponer aire comprimido para uso rutinario en el espacio empleado para el montaje de diagnósticos.

(II) Requerimientos de seguridad

Los peligros presentes principalmente en la instalación son riesgo eléctrico, riesgo químico (gases inflamables, comburentes y/o tóxicos) y otros riesgos derivados de la explotación de la instalación (empleo de láseres, etc.).

La instalación requiere para su operación fuentes de alta tensión y el uso de elevados campos magnéticos. Las fuentes de alta tensión deberán encontrarse aisladas eléctricamente en jaulas de Faraday con todos los sistemas de protección adecuados para la correcta operación de las mismas (seccionadores, bloqueadores, etc.) impidiendo el acceso cuando se encuentren activas; debiendo estar todos los equipos a tierra para permitir el acceso (tanto a las fuentes como al dispositivo experimental). Además, debido a la presencia de fuertes campos magnéticos <1 T, el acceso a la zona experimental durante la operación estará restringido cuando el campo magnético esté activado. Tal como se indicó en capítulos anteriores, es posible realizar trabajos a exposiciones de hasta 2 T, aunque por recomendación de la OMS, la exposición durante la jornada laboral no debe superar los 200 mT con un valor máximo de 2 T. Es necesario disponer de indicaciones de la presencia de fuertes campos magnéticos, la prohibición del acceso a la instalación de personas portadoras de marcapasos cardíacos, implantes ferromagnéticos y dispositivos electrónicos. Además, quedará terminantemente prohibida la introducción en las zonas donde el campo pueda superar 3 mT de cualquier herramienta y/o elemento ferromagnético que pueda ser proyectado dañando equipos y/o personas.

La instalación necesita el empleo de gases de diferentes tipos (inflamables, comburentes, tóxicos, etc.). Los gases se encontrarán en zonas separadas en función de su peligrosidad y correctamente ventilados y protegidos de fuentes de calor y luz solar directa. En el interior de la instalación debe haber detectores de gases (hidrógeno, metano, acetileno, nivel de oxígeno) e incendio así como las medidas antiincendios adecuadas. En la zona donde se almacenen gases inflamables la instalación eléctrica se realizará de acuerdo a la normativa. Se separarán las botellas vacías de las llenas. Los gases se transportarán desde la zona de almacenamiento hasta las instalaciones mediante canalizaciones herméticas cuyo montaje permita amplia versatilidad en el empleo de estos gases manteniendo un nivel de seguridad aceptable.

Otro de los riesgos presentes es la posibilidad de manejo de líquidos criogénicos en la instalación. Los riesgos asociados más importantes son el frío extremo y la asfixia.

Un riesgo adicional que deberá controlarse es la utilización de muestras irradiadas en el Área de Irradiación de Materiales del Centro. Estas muestras deberán almacenarse en zona controlada hasta que decaigan a valores por debajo de los valores de exención⁵¹. Las muestras más interesantes para su estudio en el Área de Interacción Plasma-Pared son aquellos candidatos como materiales de interacción con el plasma (materiales de carbono y tungsteno principalmente). Para los primeros el tiempo necesario de almacenamiento será de unos días, puesto que el isótopo radioactivo mayoritario que se produce durante la irradiación (de acuerdo a la Tabla I.11 del Anexo I) es el N^{13} que tiene un tiempo de semidesintegración ~ 9.9 minutos,

⁵¹ Instrucción de 26 de febrero de 2003, del Consejo de Seguridad Nuclear, número IS-05, por la que se definen los valores de exención para nucleidos según se establece en las tablas A y B del anexo I del Real Decreto 1836/1999 Publicada en el BOE nº 86 de 10 de abril de 2003

por lo que en unos días se alcanzas valores 3 órdenes de magnitud por debajo de los valores de exención. Para el caso de W los isótopos de renio (Re) se producen de forma mayoritaria, y en el caso de Re^{183} el tiempo de semidesintegración es de ~ 70 días por lo que las muestras deberán permanecer almacenadas durante meses hasta que los valores a los que decaigan estén, al menos, un orden de magnitud por debajo de los límites de exención del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)⁵¹. Asimismo, se tratará de modificar los parámetros de irradiación para minimizar el tiempo necesario. La finalidad de estos tiempos de almacenamiento es que las muestras irradiadas presenten actividades al menos 2 órdenes de magnitud inferiores a los valores necesarios para la exención cuando éstas se vayan a introducir en la máquina. De este modo, aunque las muestras se pierdan en la máquina, los valores correspondientes no excederán en ningún caso los valores fijados para una zona vigilada de acuerdo a la normativa vigente.

Como medidas contempladas para el control de la actividad de las muestras empleadas en esta Área de experimentación se proponen: a) medición de las muestras irradiadas después del tiempo calculado como necesario de almacenamiento, para garantizar que, efectivamente, se han alcanzado los valores requeridos, b) uso por parte del personal que manipule dichas muestras de dosímetros y, en caso de realizarse un trabajo en el interior de la máquina, uso obligatorio de máscaras y EPI's (este personal se someterá además a controles médicos rutinarios), c) comprobación periódica mediante frotis en las paredes interiores de la máquina para garantizar que en todo momento los valores son sensiblemente inferiores a los determinados para zona vigilada (0.04 Bq/cm^2 para emisión α y 0.4 Bq/cm^2 para β y γ), d) los residuos producidos, como aceites de bombas de vacío o muestras ya estudiadas, se clasificarán como residuos de baja actividad y procesados como tal y d) como medida adicional se podrá aislar la zona experimental con una mampara para limitar la zona que debe ser controlada y en la que se requerirá del uso de medidas adicionales de seguridad.

Por último, al tratarse de una instalación experimental, los riesgos asociados pueden variar durante la explotación de la misma. Por ello se deberán contemplar las medidas de protección de equipos y personas adicionales que puntualmente se requieran en actividades relacionadas con el empleo de la máquina.

Anexo III: I+D del Acelerador de Plasma QSPA para TechnoFusión



NATIONAL SCIENCE CENTER "KHARKOV INSTITUTE OF PHYSICS AND TECHNOLOGY"

INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS

R&D on the Quasi-stationary plasma accelerator (QSPA) for the TechnoFusión Facility

Part 1: Basic specifications of the QSPA device

I.E. Garkusha¹, V.V. Chebotarev¹, N.V. Kulik¹,
V.V. Staltsov¹,

D.G. Solyakov¹, V.A. Makhraj¹, A.V.
Medvedev¹, P.B. Shevchuk¹,

B.A. Shevchuk¹, V.I. Tereshin¹, F. Tabares²

¹ *INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS OF THE NSC KIPT, 61108,
Kharkov, Ukraine*

² *CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGETICAS,
MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLOGICAS (CIEMAT), Madrid,
Spain*

May 2009

Abstract

This report analyzes the definition of the basic design specifications of the Quasi-stationary plasma accelerator (QSPA) for the TechnoFusion Facility in Madrid. The final goal of this effort is the deployment of a new combined plasma device for studying the material damage caused by a fusion-grade plasma and the role played by ELMs. In this facility, such situation is simulated by means of a pulsed linear plasma. The facility will provide a better understanding of material behaviour under irradiation by a fusion-grade plasma, and allow quantifying the effects. The proposed new device is an appropriate combination of a QSPA and a steady-state linear PSI device. Below, we will refer to this newly designed QSPA plasma source as QSPA-SLIDE – where the latter stands for Spanish LInear DEvice.

A general design is made of the Tecnofusion QSPA-SLIDE plasma source. The electrodes are assumed to be of the profiled rod type. The main dimensions of the plasma source elements are established.

Plasma flow is calculated for the chosen accelerator geometry on the basis of an MHD model, using 2 different approximations.

Various gas feed schemes are considered for the plasma accelerator. A combination of gas supply at the end and gas injection from the cathode region is chosen.

The effects of applying a small external magnetic field in the discharge region (by means of Helmholtz coils surrounding the plasma accelerator) are analyzed. It is concluded that a longitudinal magnetic field of $0.1 \cdot B_{int}$ enhances the streaming stability of the plasma and facilitates the entry of the plasma into the external B-field of the L-shaped vacuum chamber of the Tecnofusion facility.

The basic specifications of QSPA-SLIDE device are established. Key parameters of the various QSPA systems are determined.

The electronic characteristics of the power supply systems for the various elements of the QSPA-SLIDE device are calculated.

CONTENT

1. Introduction.....4

2. Main principles of QSPA4

3. Plasma flow modelling in the acceleration channel of the TechnoFusion QSPA.....6

4. Basic Specifications for the QSPA device.....9

4.1 General remarks regarding the QSPA 9

4.2 Design of the main QPSA parts..... 11

 Entrance section..... 11

 Anode section..... 12

 Cathode section..... 12

4.3. General specification of the QSPA-SLIDE device..... 14

4.4. Description of QSPA-SLIDE components..... 15

 Coaxial plasma accelerator..... 15

 QSPA vacuum chamber with pumping system..... 19

 Gas supply system 20

 Helmholtz coils 20

 QSPA Plasma Transportation in External B-field..... 20

 Power supply system of the QSPA discharge..... 22

 Power supply systems for the coils of electronic valves..... 25

 Power supply of the Helmholtz coils..... 25

 Synchronisation unit..... 25

 Control panel..... 26

5. Conclusions.....26

References.....27

Annex 128-31

1. Introduction

The goal of this report is to establish the basic design specifications of the Quasi-stationary plasma accelerator (QSPA) for TecnoFusión. The global objective of this effort is the deployment of a new combined plasma device for studying material damage caused by a fusion-grade plasma and the role played by ELMs [1,2]. These effects are simulated by means of plasma streams, in order to obtain a better understanding of material behaviour under irradiation by a fusion-grade plasma, and allow quantifying the effects. The proposed new device is an appropriate combination of a QSPA and a steady-state linear device (we will refer to this newly designed QSPA plasma source as QSPA-SLIDE – where the latter stands for Spanish LLinear DEvice).

The first stage of this activity involves a computational and experimental study, as well as a general analysis, oriented towards the design of the advanced quasi-stationary plasma accelerator (QSPA-SLIDE), including the configuration of the electrodes, the geometry of the nozzle, insulators, gas valves and various basic components, necessary for the adequate operation of the QSPA-SLIDE device. Also, studies are made of MHD plasma flows in the QSPA channel, for different geometries of the nozzle, subject to their compatibility with the external magnetic field.

The next stage of this activity will be executed after approval of the present report in the framework of part 2 below, focused on establishing the detailed specifications of the design of the QSPA facility and executing the corresponding studies, drawings and calculations, documented in the QSPA-SLIDE technical reports.

This report consists of two main parts. The first part describes the general considerations and the physical ideas and principles that underlie various design features and dimensions of the proposed QSPA-SLIDE device. We focus on the most relevant issues in order to provide clarity for physicists who were not involved in any preliminary QSPA studies, and will avoid unnecessary complications, omitting some details that are less important at this stage and that can be taken into account during the posterior detailed design of the components.

The second part of the report concerns key elements of QSPA-SLIDE, general design features of the plasma source, and component descriptions. Some cost estimations and characteristics of various components are also presented.

2. Main principles of QSPA

The general scheme of a typical QSPA acceleration channel is presented in Fig. III.1. A quasi-steady-state plasma flow is obtained in a profiled acceleration channel between two electrodes. Neutral gas is injected through the entrance of accelerator by means of electronically operated gas valves. The resulting discharge current in the acceleration channel produces an azimuthal magnetic field (Fig. III.1). The interaction between the discharge current and the azimuthal magnetic field results in an Ampere

force $F = \frac{1}{c} j \times H$ that accelerates plasma.

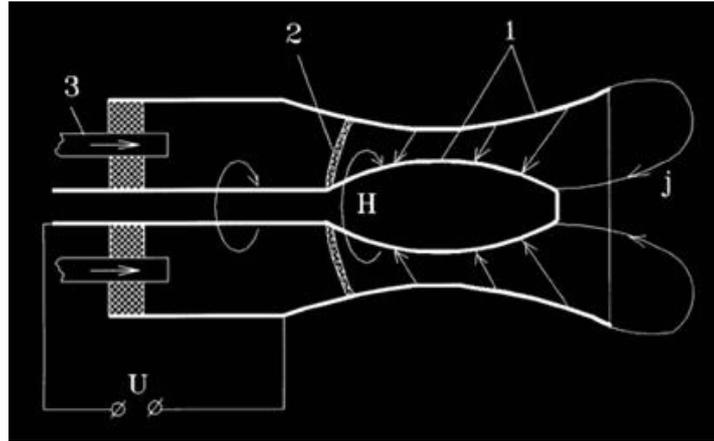


Figure III.1. Sketch of a QSPA acceleration channel: 1 – electrodes; 2 – ionization front; 3 – gas injection.

The acceleration by the Ampere force can also be considered as being due to the difference of magnetic pressure $P_m = \frac{H^2}{8\pi}$ along the acceleration channel. From this point of view, all the equations describing the plasma flow in the acceleration channel under the influence of the Ampere force look like the equations for gas flow in the magneto-hydro-dynamic analogue of the Laval nozzle, where magnetic pressure is applied instead of hydrodynamic pressure. Thus, one may estimate the maximum value of the plasma stream velocity achieved at the exit of the acceleration channel by:

$$v \propto \sqrt{\frac{P_{m,0}}{\rho_0}} \propto \frac{H_0}{\sqrt{4\pi\rho_0}} \propto C_{A0} \text{ where } P_{m,0} \text{ is the magnetic pressure in the}$$

entrance cross-section of the acceleration channel, ρ_0 is the plasma density and C_{A0} is the Alfvén velocity at the entrance cross-section of the acceleration channel.

However, this simple consideration is not capable of handling both stationary and pulsed operation. In this respect, both types of accelerators have to operate similarly. Pulsed plasma accelerators (plasma guns) have been designed and studied for many years in many different laboratories, and their efficiency limit has been established [3,4]. For maximum efficiency, it is necessary to establish the energy transfer time from the capacitor bank to the gun and the time needed for plasma motion along the acceleration channel. Increasing the energy content of the power supply systems, usually capacitor banks, is not a problem, but with increasing energy the energy transfer time also grows. Therefore, it is desirable to increase the time needed for plasma motion along the acceleration channel, and thus to increase the length of the plasma gun. An increased length of the plasma gun and of the time needed for plasma motion along the channel also increases the duration of the interaction of the plasma stream with the gun electrodes and, as a consequence, impurities are emitted from the electrodes into the plasma stream, so that the plasma stream parameters degrade. So, on the one hand, one would like to increase value of L/r to achieve maximum efficiency, where L is the length of the acceleration channel and r is the radial dimension of the acceleration channel, in order to provide an increased time for plasma motion along the channel. But on another hand, one needs a small value of

L/r to decrease the level of impurities emitted from the gun electrodes into the plasma stream. Thus, the requirements for L/r are conflicting.

The most promising device, from the point of view of achieving the required highly energetic plasma stream and a maximum efficiency of the plasma source, is a steady-state or quasi-steady-state plasma accelerator. In such a device, the requirements regarding the energy transfer from the power supply system to the acceleration channel are not very strict.

The first quasi-steady-state plasma accelerators, or magneto-plasma compressors, based on this simple theory, were designed and manufactured at the Kurchatov Institute, Moscow, Russia. However, the first experiments carried out with such a device were not successful. In particular, the plasma stream velocity was much less than what was predicted from elementary theory. Very large potential jumps were observed in regions close to the electrodes. The electrical current flowing from anode to cathode slid along the electrode surface, and as a consequence plasma flow was halted and impurities were emitted from the electrodes into the plasma stream [3, 4]. All these phenomena resulted in the annulment of the gradient of the magnetic

pressure $P_m = \frac{H^2}{8\pi}$ along the acceleration channel in steady state mode.

Some key theoretical ideas for resolving these problems of steady-state (or quasi-steady-state) plasma acceleration were proposed by Prof. A.I. Morozov (Kurchatov Institute, Moscow, Russia). He suggested a two-stage acceleration scheme; the formation of a discharge in which the current is mainly carried by ions; the protection of the electrodes by magnetic screening; etc. [5]. A theory for steady-state flows in profiled channels was developed (which we have used in the next chapter to model plasma flow in the proposed QSPA-SLIDE device).

Experimentally, an ion current in the discharge channel was obtained for the first time at Kharkov, and steady-state acceleration was achieved at the Kharkov and Minsk QSPA devices, where experiment showed ways to influence the potential jumps near the electrode and to keep the discharge current radial for a sufficiently long time to maintain the required gradient of the magnetic pressure [6-12].

3. Plasma flow modelling in the acceleration channel of the TecnoFusion QSPA

Calculations of plasma flow and the main plasma parameters were performed in acceleration channels with various different geometries, in order to find an adequate solution for the design of the QSPA-SLIDE plasma source (size, geometry, conceptual components, output plasma characteristics etc.). In doing so, several models for plasma motion in the discharge nozzle were used.

A system of two-fluid magneto-hydrodynamic equations can be written down for a steady-state plasma flow under the reasonable assumption that the electron mass is much smaller than the ion mass:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{div}(nv_i) &= 0 & Mn(v_i \operatorname{grad})v_i &= \operatorname{grad}(p_i) + en(-\operatorname{grad}\Phi + \frac{1}{c}[v_i, H]) \\
 \operatorname{div}(nv_e) &= 0 & 0 &= \operatorname{grad}(p_e) + en(-\operatorname{grad}\Phi + \frac{1}{c}[v_e, H])
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$p_i = p_i(n) \quad p_e = p_e(n) \quad \text{rot}H = \frac{4\pi e}{c} n(v_i - v_e)$$

If the plasma flow has axial symmetry (and here we shall only consider this case), the magnetic field has only one component – namely, azimuthal: $H = H_\theta$. In this case, one can obtain the ion and electron flux functions from

$$rnv_r^{i,e} = -\frac{\partial \Psi_{i,e}}{\partial z}, \quad rn v_z^{i,e} = -\frac{\partial \Psi_{i,e}}{\partial r} \quad (2)$$

Thus, the system of two-fluid magneto-hydrodynamic equations can be written in the following form:

$$\begin{aligned} \frac{Mv_i^2}{2} + w_i(n) + e\Phi = U_i(\Psi_i) \\ \frac{1}{nr} \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{nr} \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + \frac{1}{nr} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{nr} \frac{\partial \Psi_i}{\partial z} = \frac{1}{M} \left[\frac{\partial U_i}{\partial \Psi_i} - \frac{eH}{c rn} \right] \\ w_e - e\Phi = U_e(\Psi_e), \quad \frac{H}{nr} = -\frac{c}{e} \frac{dU_e}{d\Psi_e}, \quad rH = \frac{4\pi e}{c} (\Psi_i - \Psi_e), \quad w = \int \frac{dp(n)}{n} \end{aligned} \quad (3)$$

where $U_{i,e}(\Psi_{i,e})$ is the full energy (kinetic + thermal + potential) of a small “drop” of ions or electrons. In general, $U_{i,e}$ depends on the flux function and can be represented by an arbitrary function $\Psi_{i,e}$ that remains unchanged along the ion or electron trajectory. In reality, the value of $U_{i,e}(\Psi_{i,e})$ is determined by the boundary conditions at the input cross section of the acceleration channel. Provided the electron and ion pressures ($nkT_{e,i}$) may be neglected with respect to the other terms, the energy equations can be written as follows:

$$\frac{Mv_i^2}{2} + e\Phi = U_i(\Psi_i) \quad -e\Phi = U_e(\Psi_e) \quad \dots\dots(4)$$

These equations are similar to the equations for particle motion. The second equation shows that the electrons are moving along equipotential lines. Another important consequence of this equation is that with metal (equipotential) electrodes, the electrons will not cross these surfaces. Which implies that it is impossible to achieve a regular plasma flow without potential jumps near the electrodes in the acceleration channel. In the case of metal electrodes (equipotential surfaces), the electrical current should be carried by the ions in plasma. The electron drop energy depends on the flux function $U_e(\Psi_e)$ in the following way:

$$U_e(\Psi_e) = U_0 - \kappa(e/c)\Psi_e, \quad \kappa = \text{const} \quad \dots\dots(5)$$

In this case, the following holds in the whole flowing plasma volume:

$$\frac{H}{rn} = \kappa = \text{const} \quad \dots\dots(6)$$

This type of plasma flow is known as isomagnetic flow.

The same energy equation can also be written for the ion component

$$U_i(\Psi_i) = U_0 - \kappa(e/c)\Psi_i \quad \dots\dots(7)$$

This type of plasma flow is known as isobernoully flow. From equation (3) we can retrieve the Bernoulli integral, i.e., the energy conservation law for ion (or electron) drops:

$$\frac{v^2}{2} + i(\rho) + \frac{H^2}{4\pi\rho} = U = const, \text{ where } i(\rho) = \frac{1}{M}(w_i + w_e), \rho = nM \quad \dots\dots(8)$$

The system of equations (3) can be solved analytically for two different models corresponding to two different approximations. The first model assumes thin flux tubes, in which the plasma parameters do not change across a flow tube. The second model assumes the channel changes only slowly, so that the acceleration channel is strongly stretched along the axis, and one neglects the proportional part of the equation

$$\left(\frac{v_r}{v_z}\right)^2 \ll 1.$$

In the thin flux tube model, and taking into account that plasma flow is isomagnetic, the system of equations (3) can be transformed to a system of three algebraic equations for five independent variables (9):

$$rf\rho v \equiv \frac{\dot{m}}{2\pi} = const,$$

$$\frac{H}{r\rho} \equiv \kappa = const, \quad \dots\dots(9)$$

$$\frac{v^2}{2} + i(\rho) + \frac{H^2}{4\pi\rho} \equiv U = const$$

In this system of equations, $f(z)$ is the flux tube width, $r(z)$ the average radius of the flux tube and \dot{m} the mass flow rate. Taking $\frac{v_0^2}{(2C_{A0}^2)} \ll 1$ and $\frac{i(\rho)}{C_{A0}^2} \ll 1$

at the entrance of the flux tube, the constant in the third equation of (9) will be equal to the Alfvén velocity at the entrance of the flux tube, $U = C_{A0}^2$. With this assumption, one can obtain two asymptotic solutions, corresponding to two different modes of QSPA operation. The first asymptote corresponds to the pure accelerating mode of operation

in which all stored energy is converted into kinetic energy, $\frac{H^2}{4\pi\rho} \rightarrow v^2/2$, and the plasma enthalpy at the QSPA exit converges to zero. The second asymptote corresponds to the ideal compression mode of operation, in which all magnetic energy

is converted to thermal energy, $\frac{H^2}{4\pi\rho} \rightarrow i(\rho)$, and the plasma stream velocity tends to zero.

If one assumes, for the pure accelerating mode of QSPA operation, that the average radius of the flux tube is constant along the axis ($r = r_0 = const$), one can eliminate the magnetic field from (9) and obtain the following system of equations:

$$f\rho v = \text{const} \quad \left(\frac{v^2}{2}\right) + i(\rho) = \text{const} \quad \text{and} \quad i(\rho) = i(\rho) + \left(\frac{k^2}{4\pi}\right) r_0^2 \rho$$

This system of equations is fully analogous to the system of equations that describes gas flow in a Laval nozzle, except for of the appearance of the signal velocity (in hydrodynamics: sonic velocity). In the dynamic plasma equations, the signal velocity is defined as $c_s^2 = c_T^2 + c_A^2$ where c_T is the thermal velocity and c_A the Alfvén velocity. Thus, the accelerating channel should be profiled. The channel width should decrease from the entry to the critical cross section, where channel width has its minimum, and after the critical cross section the channel width should increase again. At the critical cross section, the local plasma stream velocity will be equal to the local magnetosonic velocity $v_c = c_{sc}$.

The second model deals with a slowly changing plasma flow (the slowly changing acceleration channel model). In this model, terms in the equations like $\frac{\partial^2}{\partial r^2}$ and $\left(\frac{\partial}{\partial r}\right)^2$ can be neglected. Thus, with the assumption $(v_r/v_z)^2 \ll 1$, one can transform the system of equations (3) into a set of equations including only the derivative along r . For isobernoulli plasma flow, the ion flux function can be written as:

$$\Psi_i = \frac{r_0^2 v(z)}{2} n_0 \left(1 - \frac{v^2(z)}{v_m^2}\right) \ln \frac{r}{b(z)} \quad \dots(10)$$

$$n = n_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \left(1 - \frac{v^2(z)}{v_m^2}\right), \quad \frac{H}{nr} = \frac{H_0}{n_0 r_0}$$

where r_0 is the radius at the entrance of the acceleration channel and $b(z)$ is the radius of central electrode (cathode).

One of the important properties of isobernoulli plasma flow is that the plasma stream velocity does not depend on the radius

$$v_z = \frac{1}{nr} \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} = v(z) \quad \dots(11)$$

If the mass flow rate \dot{m} and the discharge current I_d are known, it is possible to calculate the plasma flow velocity in terms of the discharge current:

$$v_m = \Theta \left(\frac{I_d}{c}\right) \frac{1}{\dot{m}}, \quad \Theta = \frac{4}{3\sqrt{3}} \ln \frac{a_*}{b_*} \quad \dots(12)$$

Where a_* and b_* are radius of cathode and anode at the critical cross section, respectively.

Thus, this model allows computing the geometry and the profiles of the electrodes that form the discharge channel. Also, the main plasma parameters, such as the plasma density and the ion and electron velocities can be calculated locally in any region of the acceleration channel. These calculations lead to the proposed geometry and key dimensions of the QSPA-SLIDE source, as will be described below.

4. Basic Specifications of the QSPA device

4.1. General Remarks regarding the QSPA design.

In many previous experiments, carried out using small quasi-stationary plasma accelerators and magnetic plasma compressors having discharge currents of up to 200 kA, it was shown that with solid (monolithic) electrodes it is impossible to achieve plasma flow in the acceleration channel without large electric field jumps near the electrodes. The measured plasma stream velocity was much less than predicted by theory.

As can be deduced from the theory of plasma flow in the framework of two-fluid magneto-hydrodynamic models, in profiled acceleration channels the electron component moves along equipotential lines, while the ions cross the equipotential lines. In this case, there are two different ways to organize the plasma flow in the discharge gap.

First – if the discharge current is carried by the electrons, these will need to cross the electrode surface, and to close the electric circuit of the power supply system, so that one has to design non-equipotential electrodes (for example, sectioned electrodes). However, such a design is very complicated technically.

Second – if the discharge current in the plasma flow is carried mainly by the ions (the accelerator operation mode), one can use equipotential electrodes, but in this mode of operation one needs to convert the current from electron-carried in the power supply system to ion-carried in the plasma flow. In the discharge gap, the ions will move from the anode surface into the plasma flow and thus one must inject ions into the anode region during the discharge in order to maintain the discharge current and so one must protect the cathode surface from this high energy ion bombardment.

Fig. III.2 shows a sketch of the acceleration channel in the operational mode in which the discharge current is carried by ions in the discharge gap.

As can be seen in Fig.2, there are three different fluxes in the acceleration channel. The near-anode flux is the ion flux from the anode surface to the acceleration channel, needed to support the discharge current. The core plasma stream is accelerated in the central region. The near-cathode flux is the ion flux from the accelerated plasma stream boundary to the cathode surface, needed to close the electrical current circuit.

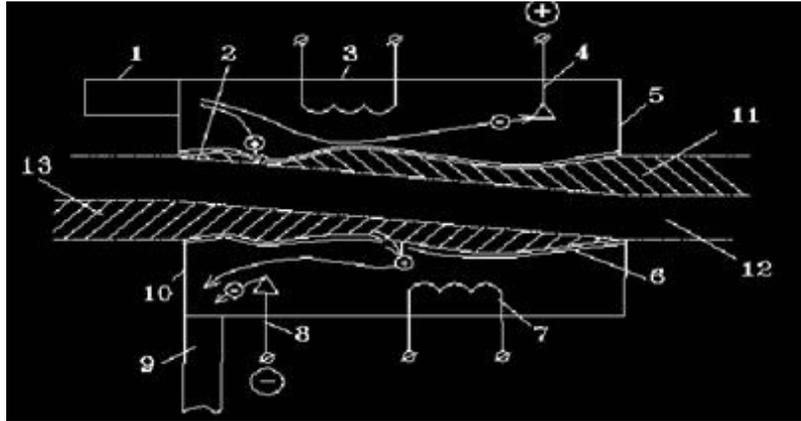


Figure III.2. Scheme of acceleration channel.

1 – ion source in anode volume; 2 – ion emitting surface; 3 – anode magnetic field system; 4 – electron collectors; 5 – anode cover; 6 – cathode collecting surface; 7 – cathode magnetic field system; 8 – electron source in cathode volume; 9 – plasma pump; 10 – cathode cover, it shapes the channel; 11 – near anode flow; 12 – main plasma stream; 13 – near cathode flow.

Thus there are three key areas involved in achieving long-pulse QSPA operation, avoiding electrode erosion and plasma contamination, and achieving the required plasma parameters (velocity and density). These areas are also important for the transport of plasma in an external B field:

- The input zone, which is the ionization zone;
- The anode zone, that supports the electrical current between electrodes, carried by ions;
- The cathode zone, to protect cathode elements from bombardment by high energy ions;

The conceptual design of the QSPA-SLIDE plasma source, including these 3 zones, is presented in Fig III.3.

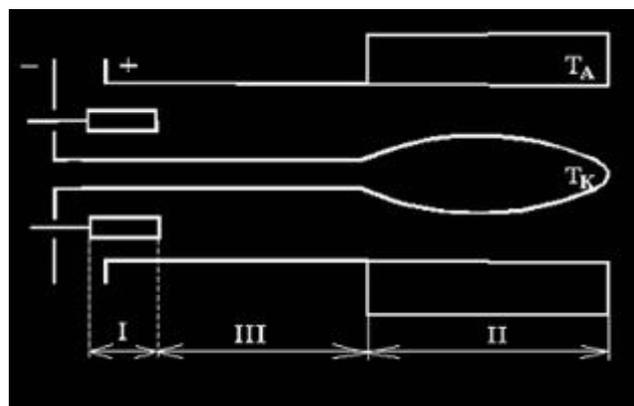


Figure III.3. Conceptual design of the QSPA-SLIDE plasma source: I – input part, II – drift channel, III – main acceleration channel, T_A – anode transformer (anode), T_K – cathode transformer (cathode).

4.2. Design of the main QSPA parts

(a) Entrance section

As mentioned above, the working gas is injected and/or ionized in the entrance section. In previous experiments with MPC and QSPA it was found that the ionization region of the working gas is strongly unstable.

An initial solution to this problem, associated with the ionization zone, is to separate the injection of the working gas, its ionization and its acceleration spatially. In this case, what enters the acceleration channel is not a neutral gas, but a plasma that has been produced previously in several small ionization chambers, operating with a small discharge current.

Another problem that should be taken into account in view of the long-pulse operation of the QSPA device is that the plasma produced by the ionization of gas during later stages of the discharge should move across the magnetic field produced by the discharge current in the main acceleration channel. It is difficult to transport this new plasma across the magnetic field without an additional external force. A theoretical study of isomagnetic plasma flow in the acceleration channel shows that the radial distribution of the plasma density in the entrance section of the QSPA should be proportional to $\frac{1}{r^2}$. As confirmed by many experiments, the necessary $\frac{1}{r^2}$ distribution in the drift channel can be obtained in several ways.

The ionization zone can also be stabilized by, e.g., supersonic gas flows. In this case, the design of the gas tubes should be similar to Laval nozzles. In any case, we still need to solve the problem of transporting the plasma from the ionization zone to the acceleration channel, and of creating a radial distribution of plasma density proportional to $\frac{1}{r^2}$.

The simplest way to solve this problem in the QSPA-SLIDE device is to create an additional electromagnetic force in the drift channel, to drive plasma transport towards the main acceleration channel and to shape the radial distribution of the plasma density proportional to $\frac{1}{r^2}$. The proposed scheme is shown in Fig.III.4.

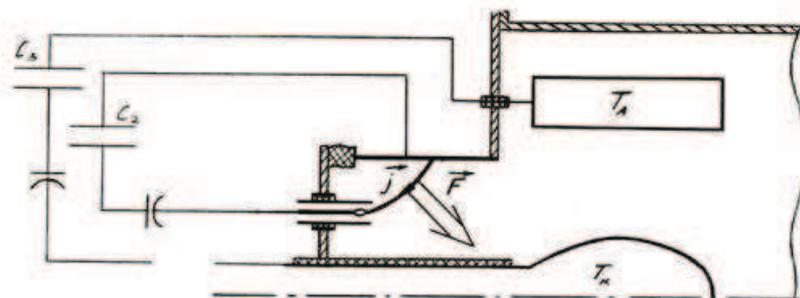


Figure III.4. Scheme of creation of an additional force to drive plasma transport towards the acceleration channel for long-pulse operation of the QSPA-SLIDE device

In this case, an additional current \vec{j} is supplied by an independent power supply system (a capacitor bank), which, together with the existing azimuthal magnetic field, produced by the main discharge current, create an electromagnetic force \vec{F} that transports the plasma towards the acceleration channel and simultaneously focuses the plasma towards the axis.

All three methods described above can be applied to the design of the input section of QSPA-SLIDE. It is possible to apply these methods separately or in combination. For this reason, the design of QSPA-SLIDE contemplates 4 gas tubes (see below) and an additional gas valve in the cathode area. Details of the design are described below in the corresponding chapters.

(b) Anode section

As mentioned above, in the anode the particles carrying the electrical current must be switched from electrons (in the power supply system and cables) to ions (in the plasma), since ions emitted from the anode will carry the discharge current in the acceleration channel.

The simplest design for such an anode transformer is a multi-rod electrode – a anode consisting of rods with an additional outer screen. The volume between the rods and the outer screen is filled by a neutral gas, injected via the entrance section. Our previous experiments show that part of discharge current is distributed in the area exterior to the acceleration channel, by forming a short current path on the outer side of the anode rods. This part of the discharge current sustains the ionization of the neutral gas in the region between the anode rods and outer screen. Thus, a continuous influx of ions to the acceleration channel is provided, the discharge current can be sustained, and electrons will flow to the anode rod surfaces to close the electrical current circuit.

(c) Cathode section

In the operation mode in which the discharge current in the acceleration channel is carried by ions, the plasma ions cross the equipotential lines and move (shift) from the anode surface to the cathode surface. Thus, part of the ions of the accelerated plasma stream should reach the cathode surface and close the current circuit. This implies that energetic ions will reach the cathode surface. Therefore, the electrons in the cathode section of QSPA should neutralize the ion charge and the metal cathode surface should be protected from ion bombardment. As shown in previous experiments with MPC and QSPA in which a monolithic solid cathode was used, the discharge current between the electrodes slides along the surface of the solid cathode, and a high level of cathode erosion accompanied by a significant jump of the electric potential in front of the cathode surface was observed.

Here again the simplest (and effective) design for the cathode section is a multi-rod structure for the profiled area of the cathode. In this way, the neutral gas or cold plasma that is stored inside the cathode volume (under the cathode rods or lamellas) will flow to the discharge area and will produce electrons to close the current circuit. A small part of discharge current, about 20-30 %, will flow to the cathode rods (lamellas), and this part of the discharge current will produce a magnetic field that protects the solid cathode elements from excessive bombardment by high energy ions (by magnetic screening).

The cathode shape, which defines the profile of the acceleration channel, can be computed on the basis of the ideal one-fluid magnetohydrodynamic model, under the assumption that the particle velocity at the entrance of the acceleration channel is close to zero. This assumption is quite reasonable since the neutral gas will arrive at the entrance of the acceleration channel with the thermal velocity, which is much less than the drift velocity or the Alfvén velocity. The profile of the channel width can be

written as follows: $h(z) = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{h^*}{\sqrt{\frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right)}}$, where h^* is the minimum channel width at

the critical cross section, and L is the channel length. In this ideal model, the channel width goes to infinity at the entrance and exit sections. But it allows computing the profile of the middle part of the acceleration channel. Assuming the anode diameter is 25 cm (based on: the required plasma parameters, the plasma entrance to the external B-field structure, and the plasma stream diameter due to plasma transport in a strong magnetic field of up to 1 T), the cathode profile was calculated. The results of the 2 types of calculation are presented in Fig. III.5.

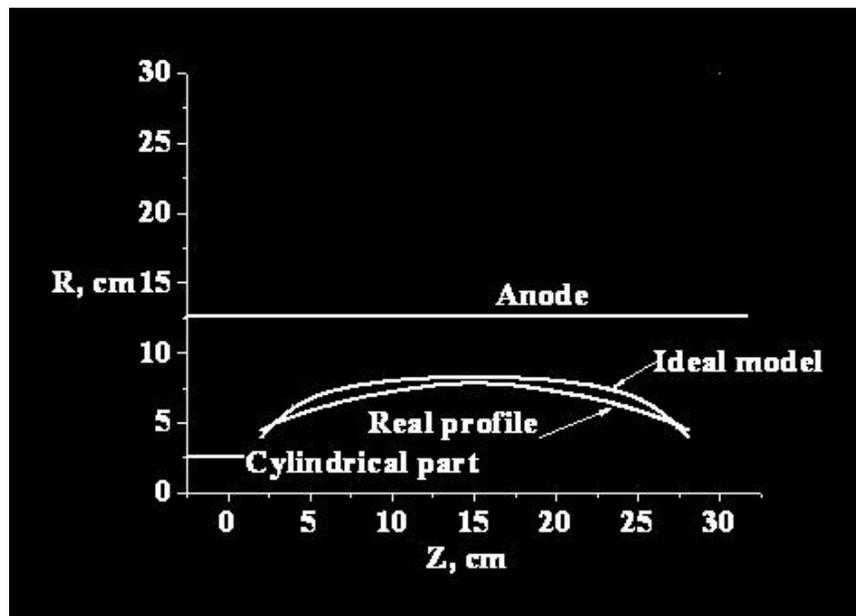


Figure III.5. Results of calculations and the proposed profile of the QSPA-SLIDE acceleration channel

From this, we conclude that the agreement between the calculated cathode profiles on the basis of the ideal model and the real cathode profile proposed for the QSPA-SLIDE device is rather good.

Next, we will estimate some quantities using realistic plasma parameters for the QSPA-SLIDE device, with the proposed profile of the acceleration channel. For example: taking a discharge current of 600-650 kA and an average channel radius of 10 cm; a plasma density at the entrance of the acceleration channel of 10^{15} cm^{-3} , and hydrogen as the working gas, the maximum velocity of the plasma stream at the accelerator output is $v_{\max} = \sqrt{2}C_{A0}$, i.e., approximately $(1.1 - 1.3) \times 10^8 \text{ cm/s}$.

More detailed estimations and results from calculations concerning the dynamics of the plasma stream in the QSPA SLIDE device are provided in Annex 1 of this report.

4.3. General specification of the QSPA device

Fig. III.6 shows a block diagram of the QSPA-SLIDE plasma source.

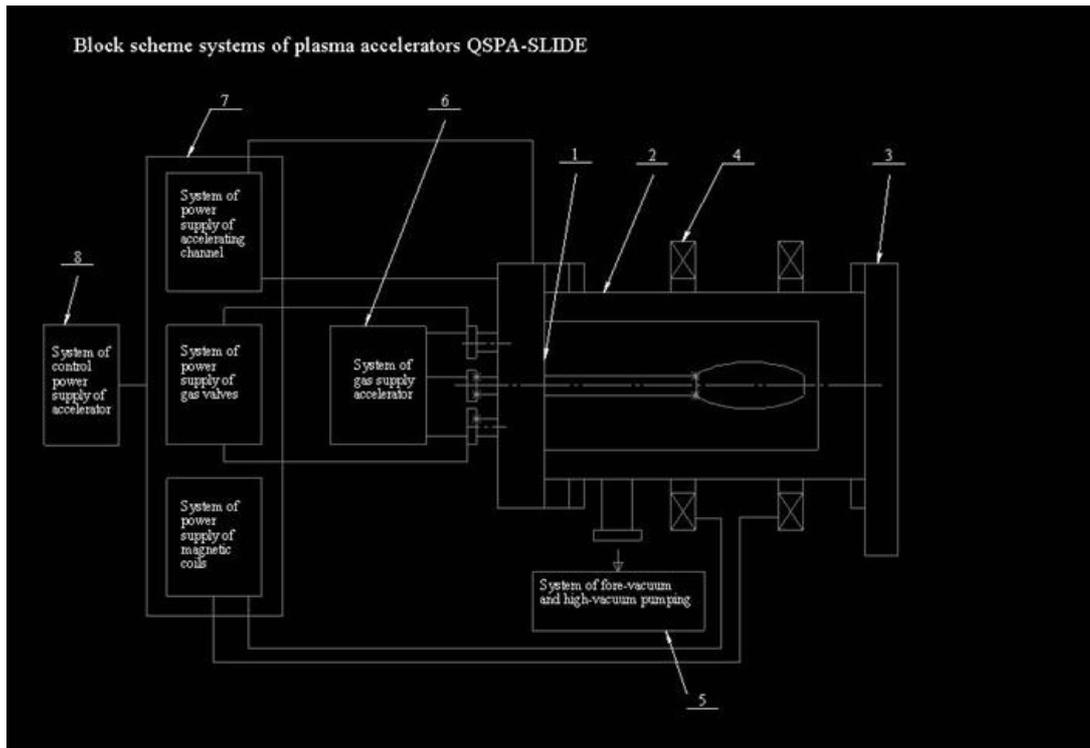


Figure III.6. Block diagram of the QSPA-SLIDE plasma source.

1- plasma accelerator, 2-QSPA vacuum chamber, 3-vacuum gate between QSPA plasma source and L-type vacuum chamber of the combined device, 4- Helmholtz coils for an external magnetic field in the acceleration channel, 5- vacuum pump system of the QSPA chamber, 6- gas supply to electronic valves, 7- power supply of the plasma source and gas valves, coils for the external magnetic field and the main discharge in the accelerator, 8- control system of the power supply.

4.4. Description of QSPA components

The planned experiments to simulate the effect of transient events like ELMs or disruptions on the divertor surfaces of ITER require the generation of plasma streams with parameters similar to that of the SOL plasma flows produced by instabilities [1, 2].

To meet this objective, the recently designed QSPA-SLIDE plasma source will generate plasma streams having the following parameters at the exit of the acceleration channel: electron density 10^{15} - 10^{16} cm⁻³, electron temperature ~ 3 +5 eV, ion impact energy up to 1 keV, plasma stream energy density >2 MJ/m², and pulse length ~ 0.5 ms. After injection of the plasma into the longitudinal magnetic field with

axial symmetry and increasing along the path of the plasma stream, the plasma will be magnetized, and transverse compression may elevate the electron temperature to $60 \div 100\text{eV}$, as has already been achieved in pulsed devices. The energy density of the plasma stream can be varied in a wide range.

The proposed QSPA-SLIDE complex includes the following systems:

- A coaxial plasma accelerator with four electronic valves on the end flange and one valve inside the cathode, and some integrated diagnostics embedded into the structure;
- The QSPA vacuum chamber, with its own pumping system;
- The gas system, gas balloons, pipes etc.
- Two Helmholtz coils for field correction, producing a relatively small external magnetic field of up to 0.1T in the discharge area;
- The power supply system for the QSPA discharge;
- Power supply systems for the electronic valve coils - 5 units in total;
- The power supply of the Helmholtz coil system;
- A synchronization unit;
- A control panel;

(a) Coaxial plasma accelerator

A diagram of the QSPA-SLIDE plasma source is shown in Fig. III.7. Detailed drawings for different parts of the source are still being made. However, the general conceptual design is completed.

A front view of the proposed QSPA-SLIDE plasma source is shown in Fig. III.8.

The proposed plasma accelerator consists of two coaxially arranged electrodes: the proposed outer cylindrical rod electrode (anode) (number 2 in Fig. III.8.) consists of a set of rods, forming a “squirrel cage” with an inner diameter of 260 mm and a length of ~700mm. One side of the rod electrode structure is attached to the ring (4), while the other side is fixed to the end flange (3).

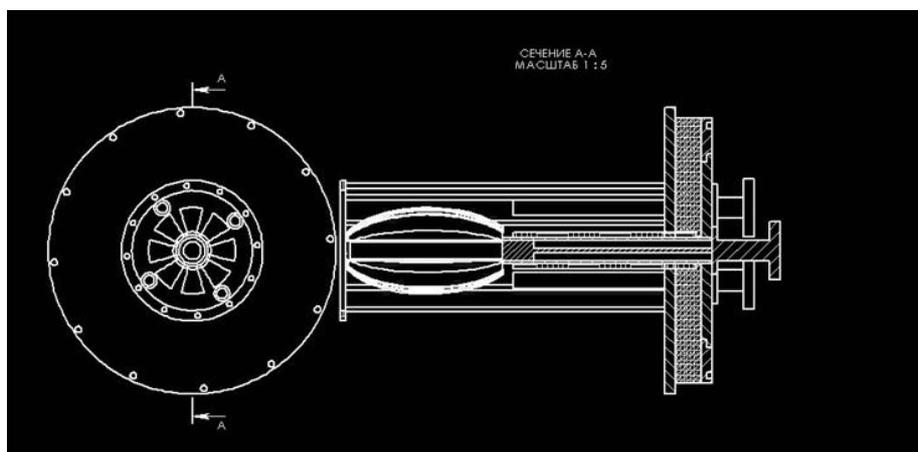


Figure III.7. Drawing of the QSPA-SLIDE plasma source (front and lateral sections)

The inner electrode (cathode number 1 in Fig. III.8.) consists of a cylindrical tube with a diameter of 50mm and a length of 300mm, and has a lamellar rod structure at the end. This lamellar structure forms the ellipsoid having a maximum diameter of 160 mm at the critical cross-section. The length of the ellipsoid is 300 mm. The other end of the cylindrical tube is welded to the electrode-cathode disk. 5 electro-dynamic valves are mounted on this disk. The anode and cathode flanges are meant function as cable collectors. All electrode components of the plasma accelerator are produced from oxygen-free copper. The total weight of electrode system is about 100 kg.

The anode and cathode electrodes are separated by a plastic isolator disk, to which 5 vacuum-sealed ceramic tubes are attached. One ceramic tube (5), having an inner diameter of 55 mm and a length of 270 mm, is placed in the centre of the isolator disk to maintain the discharge only in the profiled part of the acceleration channel, and to provide a separation of the cathode and anode compatible with the high voltage. Four other tubes (6) with a diameter of 20 mm each and having the same length of 270 mm are situated at 100 mm from the system axis. These tubular isolators protect the cathode and the electronic valves of the gas supply from secondary electrical breakdown during the discharge. This is especially important for the long-pulse operation of the proposed plasma source.

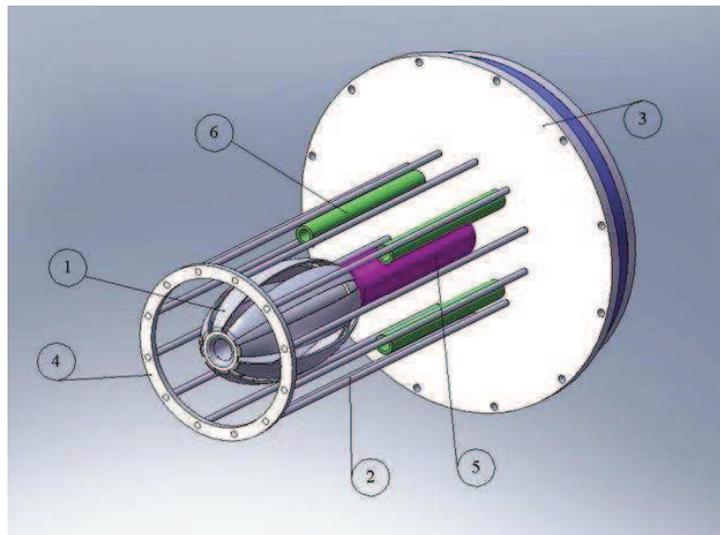


Figure III.8. Front view of the QSPA –SLIDE plasma source. 1-Profiled part of the cathode, 2-anode rods, 3-anode flange, 4-cathode ring, 5-ceramic tube of the cathode, 6- insulator tubes of the gas supply system (the gas valves are inside the tubes).

The electronic valves can inject up to 500 cm³ of working gas into the discharge gap. Four valves for axial gas supply are located inside the tubes (6). A fifth valve is located inside the cathode tube to provide additional radial injection of gas, directly from the cathode into the discharge zone. The simultaneous operation of several compact gas valves can be useful to achieve more flexibility with regard to the plasma parameters and to decrease electrode erosion with long pulse operation. This flexibility can also be important if it is decided to use other gases than H₂, such as D₂, He or others (or mixtures).

A rear view of the proposed plasma source is shown in Fig. III.9. The gas valves are triggered by pulsed coils (number 8 in Fig. III.9.), mounted on the end flange of the internal electrode (9).

The power supply connections are fed through the flange (3) of the external electrode and flange (9). To prevent high-voltage breakdown between flanges (3) and (9), a face plate isolator (10) will be installed.

A rear view of the QSPA –SLIDE plasma source with an axial cut is presented in Fig. III.10., showing the additional gas valve in the cathode region.

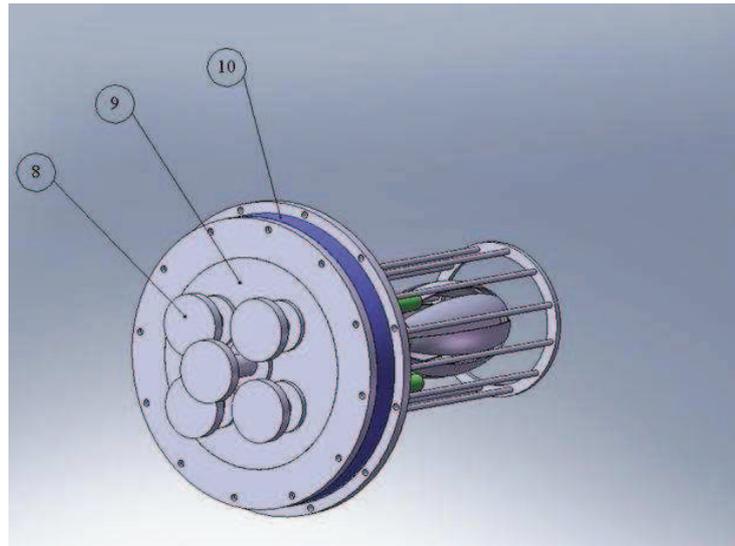


Figure III.9. Rear view drawing of the QSPA –SLIDE plasma source. 8- electro-magnetic coils of the gas valves, 9- the cathode flange, 10- the face plate insulator.

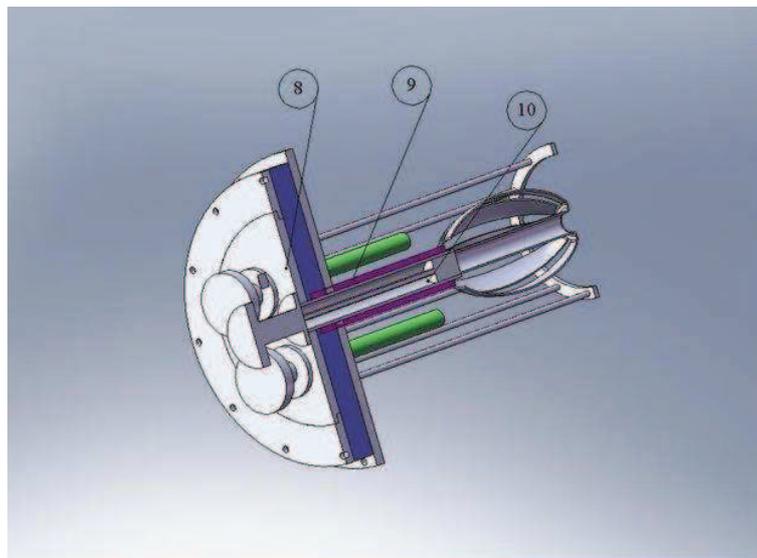


Figure III.10. Rear view with an axial cut of the QSPA –SLIDE plasma source, showing the cathode gas valve. 8- the cathode flange, 9- ceramic tube of the cathode, 10- gas valve plate.

(b) QSPA vacuum chamber with pumping system

The cylindrical QSPA vacuum chamber has a length of 800 mm and a diameter of 350 mm. It is made of non-magnetic steel. The plasma accelerator is mounted on one end of the vacuum chamber. The other end is connected to the vacuum vessel of the combined device by means of a sliding shutter with an opening diameter of 350÷360 mm. Four branch tubes with a diameter of 50÷60mm are placed in diametrical opposition on the lateral surface of the vacuum chamber, and provide windows for diagnostic purposes.

The QSPA chamber is pumped through the 180÷200mm diameter branch tube, installed on the lateral surface of the vacuum chamber, with an attached sliding shutter (gate valve). A turbo-molecular pump with an effective pumping speed of up to 600 l/s and a fore-vacuum pump with an effective pumping speed > 5 l/s will create a background pressure in the QSPA chamber of 10^{-6} torr. The crude pumping of the vacuum chamber is performed by a rotary pump with a pumping speed > 5 l/s via the bypass line and the gate valve with an opening diameter of 50÷60 mm, connected to the system pumping branch tube. The estimated cost of the elements of the pumping system is as follows:

Vacuum installation consisting of a turbo- pump and a fore-pump	- up to 20 TE
Rotary pump for preliminary pumping	- 4 TE
Sliding shutter with an opening diameter of 350÷360mm	- up to 1 TE
Gate valve for rotary pump	- up to 0.5 TE

The QSPA vacuum chamber must be attached to one of the ends of the L-type main chamber of the combined Techofusion device. The size and openings of its end flange should be compatible with a sliding shutter, separating the QSPA from the L-type main chamber of the combined Techofusion device

Diagnostics of the QSPA plasma stream, such as calorimeters, electric and magnetic probes, piezo-detectors, spectroscopy, interferometry, etc., should also be provided in order to monitor the operation of the device and the plasma parameters.

(c) Gas supply system

The gas supply system of the QSPA will consist of five bottles with a volume of 5 liters and an operating pressure of up to 15 atmospheres each. Each bottle is connected to one of the five electronic valves by means of a T connector and metal tubes. A high-pressure bottle fitted with a pressure regulator valve allows filling up each of the 5 liter bottles periodically to operational pressure. The gas supply system corresponding to each electronic valve is galvanically isolated from the other gas systems and the ground circuit, so that it will be at high voltage during operation.

(d) Helmholtz coils

The proposed design contemplates Helmholtz coils inside the vacuum chamber to stabilize the discharge in the acceleration channel. Additionally, these Helmholtz coils allow correcting the geometry of the axial magnetic field at the exit of the plasma accelerator. Each magnetic coil has a diameter of 600 mm and a width of 60 mm, and has a low inductance. The magnitude of the magnetic field created by the Helmholtz coils must be about 0.1 of the internal (proper) magnetic field produced by the accelerator discharge current. The pulse shape should match the waveform of the discharge current and have the same duration.

The plasma flow in the presence of both a weak longitudinal B-field, below 0.1 T, and the proper azimuthal B-field of about 1 T is calculated using a simplified model. Any rotation of the plasma column will add stability at the point where the plasma stream enters the transportation chamber.

(e) QSPA Plasma Transportation in an External B-field

The QSPA will be placed in a region with a field of 0.1T (Helmholtz coils), so it is convenient that the B-field increases slowly from 0.1 T to 1T along the plasma path for further transportation of the plasma stream.

The B-field should only reach 1 T at the last 2 coils. At the first coils (close to the QSPA) the field should be lower, i.e. (0.1-0.5) T, to avoid large plasma losses at the entrance to the magnetic system. The QSPA discharge will be perturbed by external fields of 1T in the discharge area.

Even a calculation of a single iteration yields a strong B-field ripple in the combined Tecnofusion device. Thus, near the QSPA output the coils should be close to each other (either using wider coils or adding additional coils) to provide a more favorable scenario for plasma compression and to decrease the diameter of the plasma stream.

The entry of the QSPA plasma into the magnetic field system of the combined Tecnofusion device can be controlled by varying the electric current in both the Helmholtz coils and the entrance coils of the L-shaped chamber. Also, modifications to the coil positions, their size, and the distance between the Helmholtz coils and the entrance coils of the L-shaped chamber are considered. Corresponding numerical simulations have been performed. As an example of such calculations, the result of varying currents and coil displacements is shown in Fig. III.11 for a maximal field of 2 T and a diameter of the chamber coils of 25 cm. Final calculations will be performed after the detailed design of the L-shaped chamber has been established.

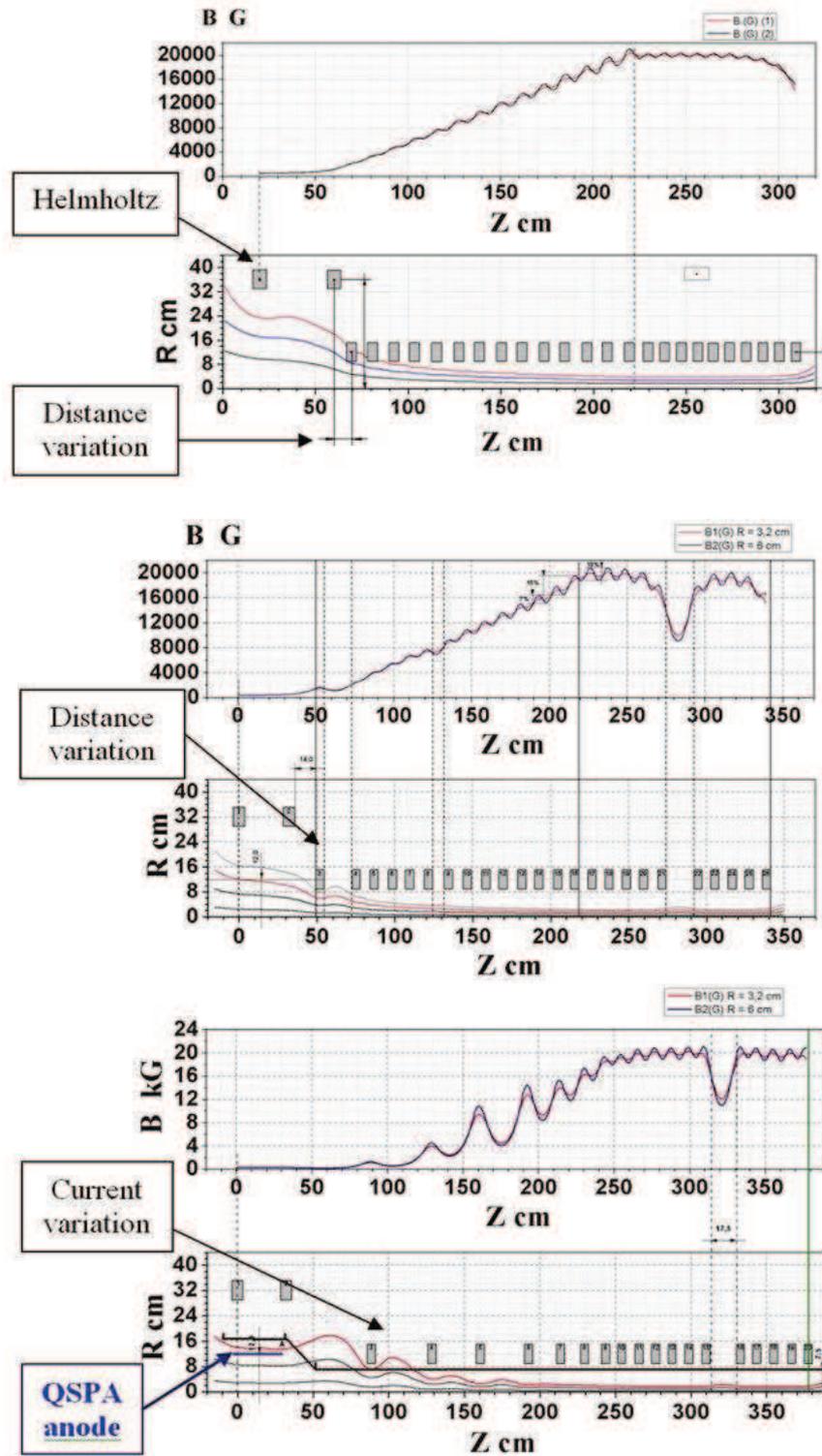


Figure III.11. Example showing the effect of varying currents and coil displacements.

(f) Power supply system of the QSPA discharge

The power supply system of the accelerator consists of a high-voltage device to charge the capacitor banks to the operating voltage, a capacitor bank for energy storage with a total capacity of 0.01F, and a set of switch tubes (switchers) to connect the energy storage capacitor bank to the plasma accelerator. A block diagram of the power supply for the QSPA-SLIDE plasma accelerator is shown in Fig III.12.

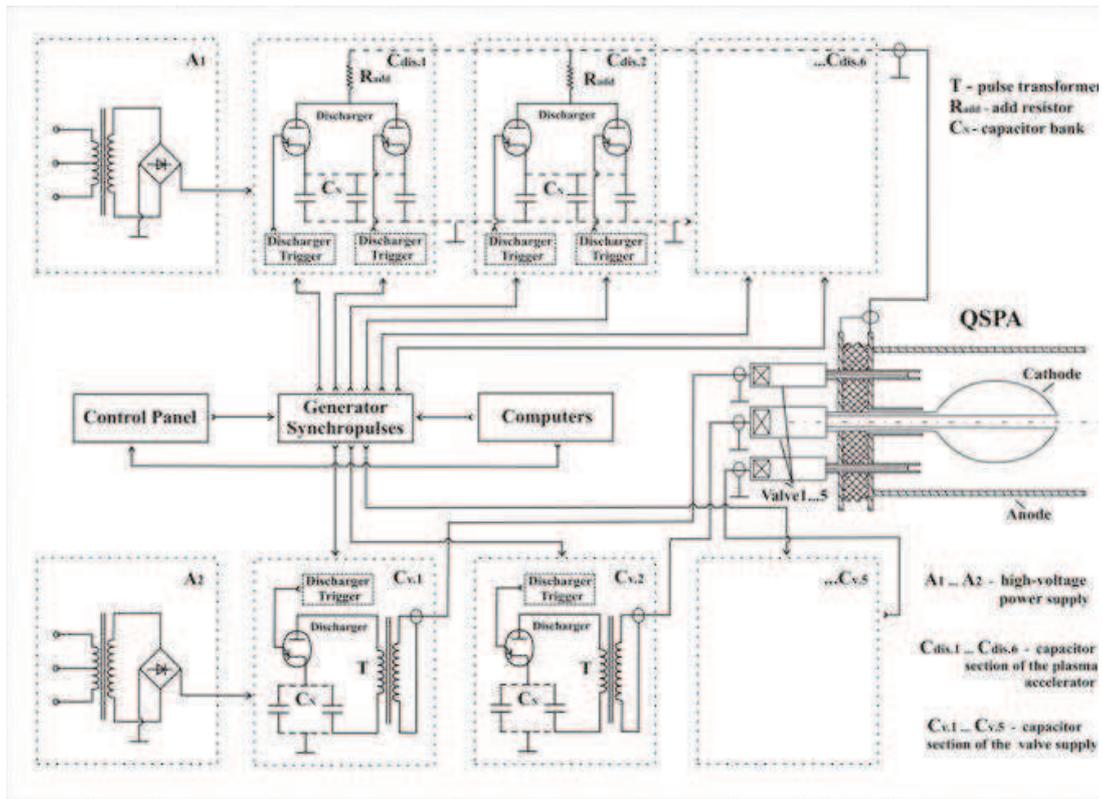


Fig.III.12. Block diagram of the QSPA-SLIDE power supply

The high voltage power supply for charging the capacitors must be capable of regulating the operating voltage up to 20 kV and provide a charging rate of 10 kJ/s, with either positive or negative output polarity, for 3÷3.5 min. **“General Atomics Energy Products”** designs and manufactures Standard and Custom high voltage, high power AC/DC switching power supplies; for example: the **CCS10025P1C** module with the following parameters:

- output voltage: 0-25 kV;
- output current: 0.8A;
- power rating: 10 kJ/s;
- size: 222 mm height x 482 mm width x 508mm depth;
- weight: 29 kg.

Such a power supply satisfies our requirements and can be used for the QSPA-SLIDE device.

Custom designed or home-made power supply systems can also be considered.

The capacitor battery should consist of six sections, each with a different capacity.

The calculations that have been performed suggest the following solution for the QSPA-SLIDE power supply system: the first section of the capacitor battery must have a capacity of 0.0034 F, the second 0.0022 F, the third and fourth 0.00167 F each, the fifth and sixth 0.00042 F. Each section is composed of e.g. **Maxwell energy storage high voltage capacitors** with a capacity of 206 μ F, and an operating voltage of 22kV (for instance, **series C part number 32349**). The casing of each capacitor has a size of 305×407×696 mm and a weight of 145.2 kg. The total area occupied by the capacitor battery will then amount to 6.5 m². The cost of a capacitor is about 2,200\$. The overall cost of the capacitor bank is estimated to be below 103.5 thousand \$.

The operation of the capacitor bank will be non-periodic. The sections should be switched on in series with a preset time delay, allowing the shaping of the current waveform in the plasma accelerator, with a maximum current of 700kA at the capacitor bank voltage of 20kV and a pulse duration of 0.5ms.

Based on the electro-technical characteristics and the parameters of the discharge circuit, numerical calculations were performed to study different scenarios for the discharge of capacitor sections, with the aim of controlling the pulse shape of the discharge current and the voltage. An example of such calculations for the current waveform and voltage is shown in Fig. III.13. The effect of switching the various sections on the discharge current can be observed. After selecting an appropriate scenario, the discharge current can be kept rather constant during 0.5 ms.

Alternative solutions exist for the parameters of the capacitor battery, depending on the available capacitors.

Note also that the capacitor battery can be designed with several segments, which allows varying the discharge duration (for example, either 0.5 ms or 0.25 ms by switching on or off a segment).

The planned setup contemplates switch tubes (switchers) in the discharge circuit of the plasma accelerator in order to control the connection of the capacitor bank energy to the plasma accelerator. Each capacitor section has one or a few switch tubes, allowing it to be switched on independently from the other sections. The choice of switch tube depends on the voltage, the commutated current, the charge and the pulse duration. The T-150 Spark Gap Switch and TG-1292 Trigger Generator produced by "**L-3 Communications Pulse Sciences**" are suitable for this purpose. Nevertheless, other solutions can be considered.

The T-150 Spark Gap Switch has the following parameters: operating voltage: 20-40 kV; peak current: 300 kA; charge transfer: 120 coulomb per pulse; gas flow rate > 30 scf/hr. In view of the technical characteristics of the T-150 Spark Gap Switch, it is convenient to use twelve T-150 Spark Gap Switches to commutate the capacitor bank. They will be mounted between the sections in following sequence: in threes for the first and second sections, in twos for the third and fourth sections, and in ones for the fifth and sixth sections. The cost of a T-150 unit is approximately 14.5 thousand USD.

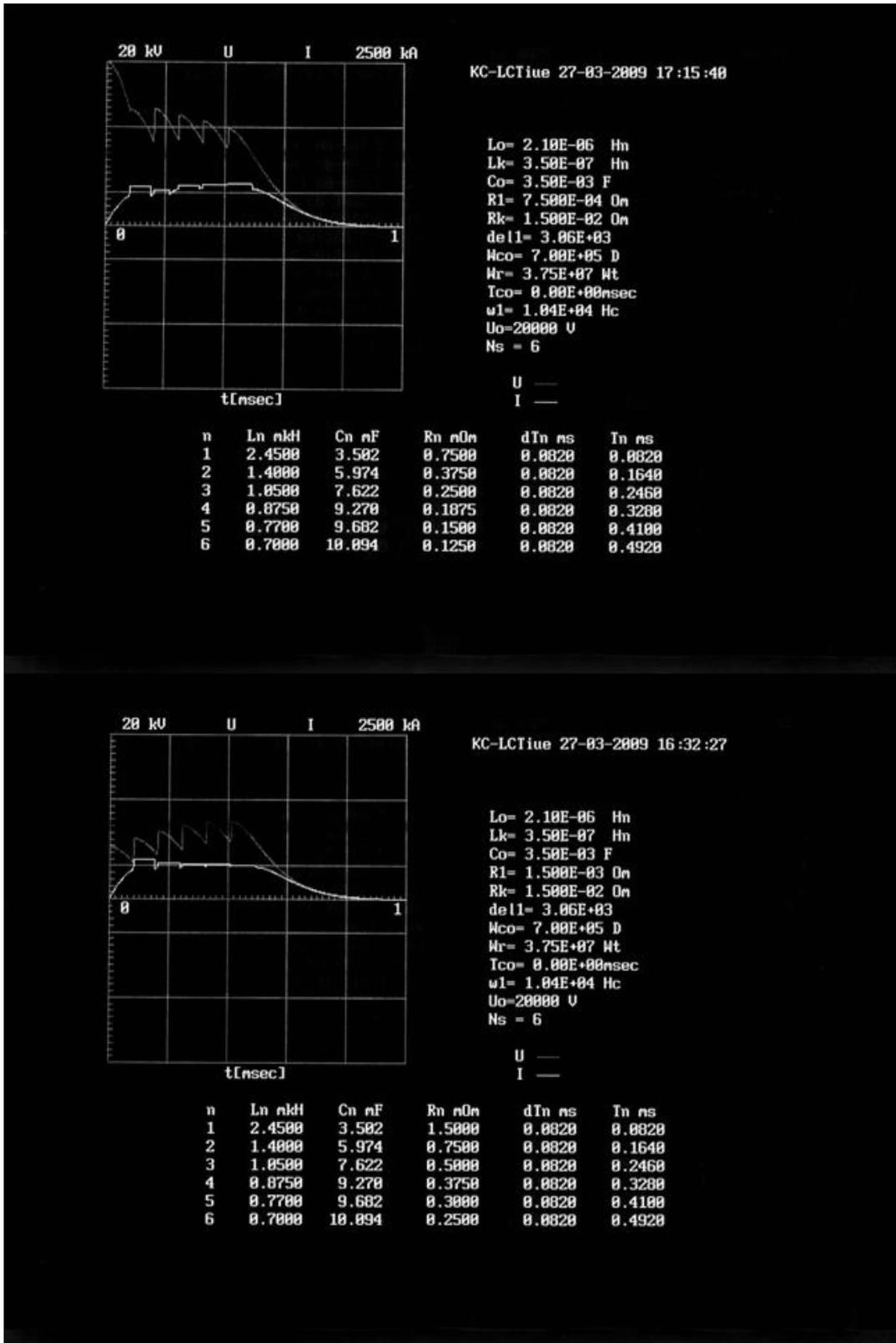


Figure III.13. Example of calculation results using different pulse shapes for the discharge current and the discharge voltage in QSPA-SLIDE.

(g) Power supply systems for the coils of the electronic valves

The design of the QSPA contemplates five electronic valves to control the injection of working gas (e.g. Hydrogen, Helium, Deuterium, or various mixtures, including Xenon) into the discharge region of the plasma accelerator. Due to the interaction between the magnetic fields produced by an inductive current in the valve disk and the magnetic coil of the valve, the **electronic** valve opens and injects gas. The power for the magnetic coil of the valve is supplied by a capacitor bank with a capacity of 500 μF and an operating voltage of up to 5 kV each. The capacitor bank consists of 5 capacitors with a capacity of 100 μF and a nominal voltage of 5 kV (for example type IK41-I7).

An ignitron switcher (IRT-6) is used to commutate the discharge current in the valve circuit. The discharge is periodic. All electrical circuits of the electronic valves are galvanically isolated from each other and from the accelerator electrodes. A high voltage capacitor power supply is used to charge each capacitor bank and must be able to regulate the voltage from 0.5 kV to 5 kV and provide a charge time of about 3 min at a voltage of 5kV (the nominal power is about 35J/s).

(h) Power supply of the Helmholtz coils

The power of the Helmholtz coils is also supplied by a capacitor bank. The required magnetic field in the Helmholtz coils is produced by 67 kiloampere-turns. For coils with 32 turns, the capacity of the battery is 1600 μF at a voltage of 3 kV. The proposed high voltage power supply for the capacitor must be able to regulate the voltage from 0.1 kV to 3 kV and have a nominal power rating of 40 J/s.

(i) Synchronization unit

A synchronization unit (pulse generator) is needed to provide synchronised triggers to switch the capacitor banks of the Helmholtz coils, the gas valves and the main discharge of the plasma accelerator with appropriate time delays. Each channel of the synchronization unit triggers one discharge with an adjustable time delay. In addition, a few triggering channels are needed for the oscilloscopes and the computer ADCs. The pulse height and duration will be determined in the detailed design phase.

It should be noted that industrial solutions are available for the synchronization unit.

(j) Control panel

The control panel includes the following control blocks:

- A control block for the activation and deactivation of the elements of the vacuum system;
- A control block for the power supply for charging the discharge capacitor bank. It controls the activation and deactivation of the power supply, it regulates the charge level of the capacitor bank, and it generates a signal indicating the readiness of the capacitor bank for operation.
- A control block for the coil valves, and the power supply for charging its capacitor banks. It fulfils similar functions;

- An interface board for connection to a computer;
- Voltmeters for visual inspection of the charge (voltage) of the capacitor banks;
- A start signal that is sent to the input of the synchronization block after receiving acknowledgement of readiness from the capacitor banks;
- An interlock system controlling the electromagnetic contactor, short-circuiting the capacitor banks and the high-speed electric protection;
- In addition to conventional tasks, the control system should be able to monitor and disconnect any part of the power supply while keeping the rest of the device operational. The control panel should offer both a manual and a programmed mode of operation. The elements of the control panel are not very costly and will be defined in detail as the engineering design of the circuits progresses.

5. Conclusions

A general design has been made for the QSPA-SLIDE plasma source for the Tecnofusion facility in Madrid. Profiled electrode rods were chosen for its basic design. The external electrode of the plasma source will have a diameter of 260 mm and a length of ~700 mm. The profiled part of the internal electrode will have an ellipsoidal shape with a maximum diameter of 160 mm at the critical cross-section. The length of the ellipsoid is 300 mm.

The plasma flow was calculated for the chosen accelerator geometry on the basis of an MHD model in 2 different approximations.

Several methods were considered for the gas feed. A combination of gas supply at the end and gas injection in the cathode region was chosen. Electronic valves are able to feed up to 500cm^3 of working gas into the discharge gap. The design contemplates four valves for axial gas supply. A fifth valve is located inside the cathode tube to provide additional radial gas injection from the cathode directly into the discharge zone.

The application of small external magnetic fields in the discharge area (Helmholtz coils) was considered. It was concluded that a longitudinal magnetic field of $0.1 \cdot B_{\text{int}}$ improves the stability of the plasma stream and the transport of plasma into the external B-field of the L-shaped vacuum chamber of the Tecnofusion facility.

A basic specification of the QSPA-SLIDE device was made. The key parameters of various QSPA systems were determined.

Estimates were made of the electro-technical specifications of the power supply systems for the different elements of the QSPA-SLIDE device

Globally, the QSPA-SLIDE device designed here is smaller and simpler (but more effective and powerful) than the existing QSPA Kh-50 device. Compared to QSPA-T, the designed facility is somewhat more complicated, but qualitatively enhanced in several respects, which will provide some important advantages: the possibility to transport plasma into a strong B-field, a much lower level of impurities, higher particle energies, etc.

References

- [1] A. Loarte et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **45**, 1549 (2003).
- [2] G. Federici et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **45**, 1523 (2003).
- [3] A.I. Morozov. Plasma dynamics, in Encyclopedia of Low Temperature Plasma, V3. ed. V.Fortov (in Russian);
- [4] A.I. Morozov. Introduction to Plasmadynamics. Moscow. FIZMATLIT. 2006, 576 p (in Russian).
- [5]. A.I. Morozov. Sov. J. Plas. Phys 1990, v.16, N2.
- [6] Tereshin V.I. Quasi-stationary Plasma Accelerators (QSPA) and their Applications // Plasma Physics and Controlled Fusion.-1995.- Vol. 37.- P. A177-A190.,
- [7] V. I.Tereshin et al., *Brazilian Journal of Physics* 32, № 1, 165-171 (2002).
- [8] Ya. F. Volkov et al, Sov. J. Plas. Phys. 1992, V.18, N. 9, p. 1138.
- [9] Ya. F. Volkov, A.Yu Voloshko, I.E. Garkusha et al. Sov. J. Plas. Phys. 1992, V. 18, N. 4, p.456
- [10] Ya. F. Volkov, I.E. Garkusha et al. Sov. J. Plas. Phys. 1994. V.20, N.1, P.77
- [11] A.I. Morozov, O. A. Shchurov, O.S. Pavlichenko et. al. QSPA Kh-50 full-scale high-power quasi-stationary plasma accelerator // Plasma devices and operations. - 1992. - Vol.2, № 2. - P. 155-165.;
- [12] V. I. Tereshin et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* 49 (2007) A231

ANNEX 1

Analysis of plasma flow in the SCC model for the QSPA-SLIDE geometry

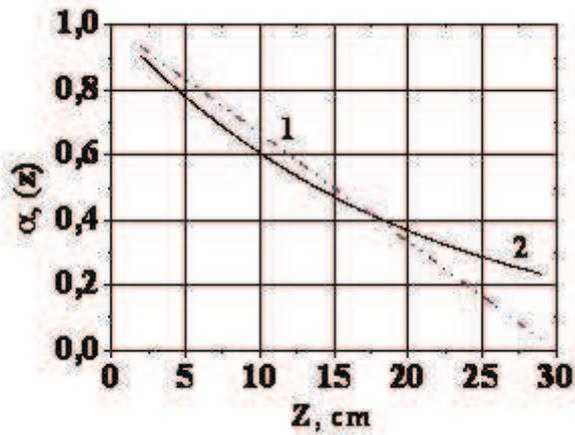
Some properties of plasma flow in the acceleration channel were analyzed with the Slowly Changing Channel (SCC) model. The main assumption in this model is that the acceleration channel varies slowly along the axis, so that $\left(\frac{v_r}{v_z}\right)^2 \ll 1$. This model is appropriate for the description of the main central part of the acceleration channel, but not for the entry section, where large gradients in plasma stream velocity exist, or the exit section, where dissipative processes play a large role. Here, we assume that the thermal energy of the particles is much less than the kinetic energy, $W \ll E_i$, and that the exchange parameter $\xi = \frac{I_d}{I_m} \ll 1$, where I_d is the discharge current and I_m the mass flow rate in electric current units. The latter assumption means that the electron and ion trajectories are rather similar to one another. We stress that in this model, the discharge current between the electrodes flows in the radial direction only, and the plasma stream velocity does not depend on the radius.

Considering the above, the ion flux function can be written:

$$\Psi_i(r, z) = \sqrt{2} a_*^2 n_{0*} C_{A0} \alpha(z) \sqrt{(1 - \alpha(z))} \ln\left(\frac{r}{b(z)}\right)$$

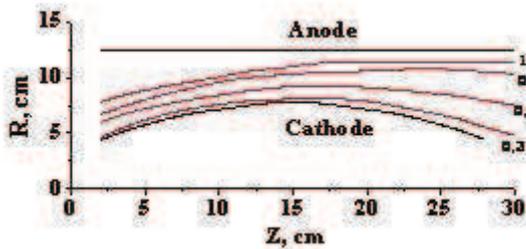
Where $\Psi_i(r, z)$ is the ion flux function; a_* the average radius at the entry section of the acceleration channel; n_{0*} the plasma density at this point; C_{A0} the Alfvén velocity at this point; $\alpha(z)$ the dependence of the discharge current on the channel axis; $b(z)$ the cathode radius (assuming that the anode is a cylinder) and r the radius.

Thus, the ion flux function (i.e., a function such that $\Psi_i = const$ corresponds to ion trajectories) depends on the distribution of the discharge current along the channel axis $\alpha(z)$ and on the channel profile, namely the cathode profile $b(z)$, since the anode is cylindrical. Two different types of dependency of the discharge current on z were considered in these calculations. The first is linear dependence. This case is simple, but produces a value of the discharge current at the accelerator exit that is close to zero. In actual experiments, a part of the discharge current, typically about 25-30%, flows in the plasma stream outside the acceleration channel. Thus, another dependence was used to estimate the ion flux function, taking into account that about 25% of the total discharge current flows outside the acceleration channel.

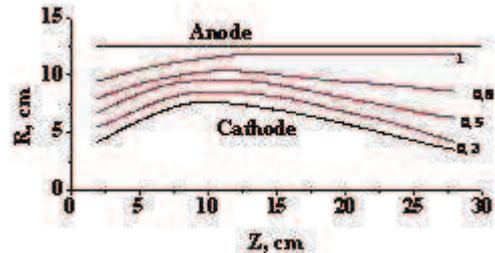


Two dependencies of $\alpha(z)$.

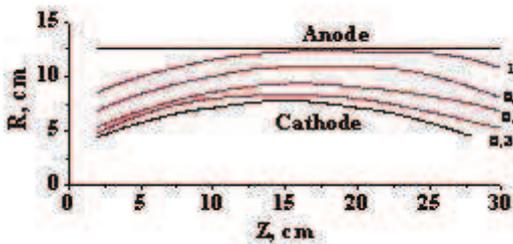
Ion flux functions were calculated for two different discharge current distributions along the axis and for two acceleration channel profiles. The results of these calculations are presented in the figure below.



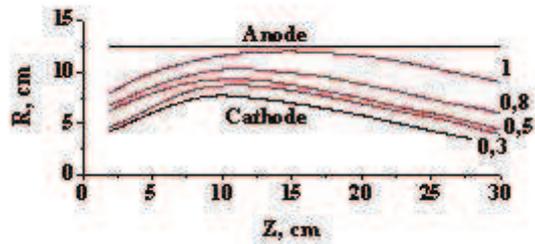
Ion flux function for dependence $\alpha(z)$ - 1.



Ion flux function for dependence $\alpha(z)$ - 1.



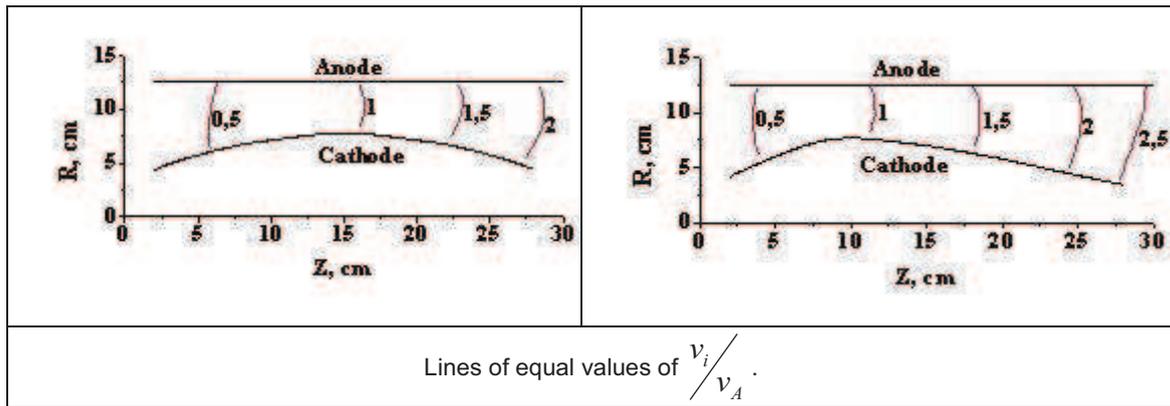
Ion flux function for dependence $\alpha(z)$ - 2.



Ion flux function for dependence $\alpha(z)$ - 2.

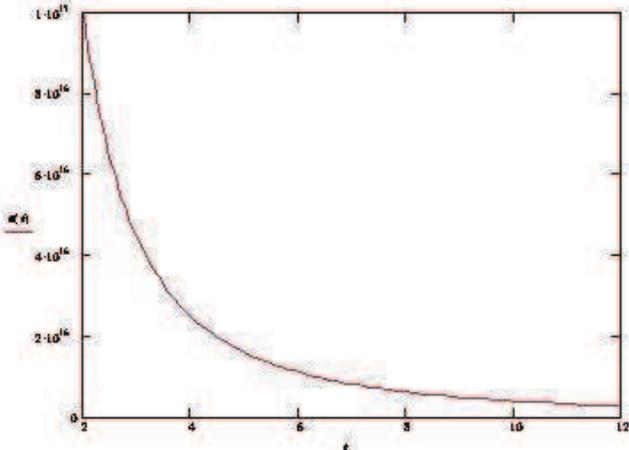
These figures show that about (70-80)% of total plasma stream flows outside the acceleration channel, inside a cylinder with diameter 16-17 cm.

Based on the ideal SCC model, the ratios of the ion velocity v_i to the local signal velocity $v_s = \sqrt{v_A^2 + v_{Ti}^2}$ were calculated. Taking into account that the thermal energy of the particles is much less than their kinetic energy, the local signal velocity is equal to the local Alfvén velocity: $v_s \approx v_A$. Calculated ratios, i.e., lines of equal levels of $\frac{v_i}{v_A}$, are shown in the figure below for two different channel profiles and a linear dependence of the discharge current along the axis.



These figures show that the plasma stream is accelerated along the channel, while the achieved velocity is about (2-2.5) times the local Alfvén velocity at the channel exit.

Based on the SCC model, the value of the plasma density at the entrance of the acceleration channel and its radial distribution was estimated. It is seen that the total mass flow rate equals $\dot{N} = 2\pi\Psi_i^{\max}$. We expect to reach a maximum discharge current in the acceleration channel of about 600 kA, and an exchange rate of $\xi = 0.1$. In this case, the total mass flow rate should be $I_m \approx 3.6 \times 10^{25} s^{-1}$ and $\Psi_i^{\max} = 6 \times 10^{24} s^{-1}$. The average radius at the entrance of the acceleration channel is $r = 10 cm$. Thus, the plasma density at $r = 10 cm$ should be $n \approx 5 \times 10^{15} cm^{-3}$, and its radial distribution should look like what is shown in the figure.

		
	<p>Radial distribution of the plasma stream density et the entrance of the acceleration channel of QSPA SLIDE.</p>	

Two different methods exist to obtain such a radial distribution of plasma density. The first is to inject some neutral gas from the cathode into the acceleration channel at the entrance of the channel. The second is to create an electromagnetic force at the entrance of acceleration channel that pushes the plasma towards the cathode. Both methods can be applied in the QSPA facility.

The maximum exit velocity can be calculated based on the calculations above. For a discharge current of $I_d = 600kA$ and plasma stream densities at the entrance cross-section of $n = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, the maximum velocity should be $v_{\text{max}} = 1.1 \times 10^8 \text{ cm/s}$. We emphasize that this value of the plasma stream velocity requires that the discharge current between the electrodes flows only in the radial direction.