ES9900123

Ciemat
Centro de
Investigaciones Energéticas,
Medioambientales
y Tecnológicas

Miner

Estudios de Sensibilidad en el Sistema de Inyección de Neutros del TJ-II

C. Fuentes
M. Liniers
J. Guasp

30 - 13

Informes Técnicos Ciemat

877
febrero, 1999

Informes Técnicos Ciemat

877
febrero, 1999

Estudios de Sensibilidad en el Sistema de Inyección de Neutros del TJ-II

C. Fuentes
M. Liniers
J. Guasp

Asociación EURATOM/CIEMAT para Fusión - 55

Departamento de Fusión y Partículas Elementales

Toda correspondenica en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesauro del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estdos Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M -14226-1995
ISSN: 1135 - 9430
NIPO: 238-99-003-5

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700380;700412
TOKAMAK DEVICES; NEUTRAL ATOM BEAM INJECTION; HELIAC STELLARATORS; HELICAL CONFIGURATION; ELECTRIC FIELDS; NUMERICAL ANALYSIS

"Estudios de Sensibilidad en el Sistema de Inyeccion de Neutros del TJ-II"

Fuentes, C.; Liniers, M.; Guasp; J.
76 pp. 70 figs.13 refs.

Resumen:

Se estudia la sensibilidad del sistema de inyección de neutros del TJ-II frente a cambios de alguno de sus parámetros con respecto a los valores de diseño.

El análisis realizado confirma como óptimos los valores adoptados para la distancia entre fuente iónica y TJ-II, la distancia focal y la divergencia del haz, sin que se observe una sensibilidad importante, excepto para la divergencia, a pequeñas variaciones de los mismos.

Se encuentran márgenes de operación relativamente estrechos, pero factibles, ante el desalineamiento del haz (ya sea por traslación o por cambio de inclinación) quedando también confirmada la dirección de referencia como la más indicada.

Se analizan también cuatro posibles variaciones en el diseño de algunas componentes del inyector con el fin de reducir las cargas a la entrada del TJ-II. Todas ellas han sido excluidas como solución al crear nuevas zonas de riesgo y mermar la potencia entrante en la máquina.

"Sensibility Studies for the Neutral Beam Injection System in TJ-II"

Fuentes, C.; Liniers, M.; Guasp; J.
76 pp. 70 figs.13 refs.

Abstract:

The sensibility of the Neutral Beam Injection system of TJ-II to the changes of several parameters is analysed. Transmission, absorption and power loads at the intercepting structures are evaluated.

The adopted values for the ion source distance, focal length and divergence are confirmed as optimal, showing a small sensibility to changes, except for the divergence.

The operational margins for beam misalignements has been found to be small but feasible, confirming also the reference direction as optimal.

Finally four possible alternatives, intended to reduce the power loads at the beam entering structures, are analysed. All of them have been discarded since lead to the appearance of new risk zones, with unaceptable load levels, and reduce the transmitted power.

INDICE

1- Introducción

2- Geometría de inyección

3- Sensibilidad del sistema

3.1- Distancia de la fuente iónica al TJ-II

3.2- Divergencia del haz

3.3- Distancia focal

4- Sensibilidad del sistema al desalineamiento del haz - Margen de operación

4.1- Desalineamiento angular del haz

4.2- Desplazamientos laterales del eje del haz

5- Sensibilidad del sistema a diversos componentes - Minimización de cargas

5.1- Distancia del *Shutter* a la ventana de inyección

5.2- Diámetro de apertura del *Shutter*

5.3- Adición de un segundo diafragma

5.4- Desplazamiento de placas en las *Defining plates*

6- Conclusiones

Referencias

Lista de Figuras

1. Introducción

En este informe se recogen los estudios referentes a la sensibilidad del sistema de inyección de neutros (NBI) del TJ-II [1] frente a cambios de alguno de sus parámetros con respecto a los valores de diseño (cf. Tabla I, §2) y es por tanto complementario a otros trabajos ya publicados [2] a [8]. Los programas numéricos que han debido ser utilizados para ello son los siguientes: el código DENSB [5],[9] para la evaluación de la potencia entrante en el toro y de la distribución de cargas en la cámara de vacío, el programa ATEN [5] para el cálculo de la atenuación de cargas debida a la ionización del haz de neutros a distintas densidades de plasma y, finalmente, el código de Montecarlo FAFNER-2 [10],[11] para los cálculos de *shine through* y de absorción en el plasma. En todos los casos nos hemos limitado a la configuración de referencia del TJ-II, cálculos complementarios [12],[13] muestran que, salvo para configuraciones extremas, los comportamientos cualitativos son semejantes para todas.

Tras una breve descripción de la geometría de inyección que facilite la comprensión de los resultados (§2), se comienza por evaluar el efecto que tiene la distancia entre fuente de iones y TJ-II sobre la potencia transmitida y absorbida, haciéndose lo mismo para la optimización de la divergencia del haz y el punto de focalización (§3). Posteriormente, y con el fin de tener una idea exacta de los márgenes de operación, se analiza el efecto de un posible desalineamiento del haz (ya sea por translación del eje ó por cambio de dirección angular) dando un especial énfasis a la distribución de cargas en la zona de entrada y el hard-core (§4).

Por último se entra en un tercer grupo de análisis (§5) enfocado principalmente a encontrar opciones con las que se suavizaran las cargas interceptadas por el ducto, la ventana de inyección y la protección de la bobina toroidal TF-1. Para ello se discuten cuatro posibilidades, todas ellas con un nexo común, consistente en realizar recortes adicionales del haz antes de que éste entre en la cámara de vacío. Dos de ellas (cambiar el diámetro del *shutter* ó cambiarlo de posición) realizan un recorte uniforme de la periferia del haz, y las otras dos (la adición de un segundo *shutter* y el desplazamiento de alguna de las placas de las *deffining plates*) proponen recortes parciales que hagan sombra sobre las zonas a proteger.

2. Geometría de inyección

El TJ-II, cuyo esquema se muestra en la Fig.2.1, es una máquina con un alto grado de helicidad que le confiere una estructura geométrica fuertemente tridimensional. A su vez, el plasma que genera (Fig.2.2) presenta una sección transversal en forma de judía que gira, también helicoidalmente, alrededor de la bobina central.

El TJ-II será el primer dispositivo de plasma con eje helicoidal que haga uso de inyección de neutros. Esa tarea es especialmente difícil en esta máquina tanto a causa de la enorme excursión del eje magnético (15% del radio mayor, 120% del radio medio del plasma) como de su tamaño relativamente pequeño. La complejidad consiguiente de la cámara de vacío hace que la intercepción del haz por las bobinas resulte inevitable. Por esta razón se realizaron estudios muy detallados encaminados a encontrar la mejor geometría de inyección que a la vez minimizara las cargas originadas por la intercepción del haz y, sin embargo, produjera la máxima transmisión y absorción del haz en el plasma.

Como resultado de esos estudios se adoptó una disposición tangencial para la inyección (Fig.2.3), con dos haces compensados con el fin reducir lo más posible las corrientes inducidas. El eje central del haz con dirección opuesta al campo magnético (haz COUNTER) forma 45° con la bobina TF-1 y está situado en un plano horizontal que pasa 20.1 cm por debajo del plano ecuatorial del TJ-II, con un radio de tangencia de 138 cm, e intercepta a la ventana de entrada a 8.3 cm de su borde izquierdo interno y 12.6 cm de su borde superior. La ventana es rectangular de dimensiones 27 x 34 cm, y verticalmente alargada (Tabla I). El otro haz (CO) está situado antisimétricamente al anterior.

La Fig.2.4 muestra cómo el haz de neutros, representado por un cilindro estrecho, entra en la cámara entre dos bobinas toroidales, se aproxima a la bobina central (hard-core) a mitad de su trayectoria y termina saliendo por la parte externa del toro entre las bobinas toroidales TF-5 y TF-6.

La longitud de la línea central del haz comprendida en el interior de la cámara de vacío es de 209 cm y, para la configuración de referencia, el contacto con el plasma se produce a 72 cm de la ventana, con un recorrido en su interior de 120 cm, a lo largo del cual el haz de neutros se va ionizando (Fig.2.5).

Por otra parte, la Fig.2.6 que muestra diversas secciones transversales de la cámara, del haz y del plasma, resulta muy ilustrativa para explicar las dos principales fuentes de pérdidas de potencia. Por un lado, puede verse como el haz va siendo recortado por las diversas estructuras de la cámara a medida que avanza toroidalmente (pérdidas geométricas), y por otro lado también puede verse cómo el haz intercepta zonas de alta y de baja densidad que determinan, en cada caso, las pérdidas por *shine-through.*

Respecto a las pérdidas geométricas, los principales obstáculos se ubican en la zona de entrada. La Fig.2.7 muestra un esquema de las partes vistas por el haz al entrar en la cámara. En ella puede observarse lo angosta que resulta esta zona: el espacio libre resultante es el que queda entre el contorno izquierdo de la ventana y la bobina toroidal TF-1 con los recortes de potencia que ello conlleva, representando además un riesgo para esas zonas por la carga térmica que depositan.

Es por tanto necesario, y es lo que se hace en los siguientes capítulos, evaluar la sensibilidad del sistema a ciertos parámetros que puedan afectar de forma determinante tanto a las cargas como a la potencia absorbida por el plasma.

Con el fin de facilitar comparaciones los cálculos están normalizados a una potencia incidente en el *shutter* de 1 MW. En la situación usual el *shutter* recibe en realidad 1.5 MW [1], [8]. Los cálculos teóricos efectuados para la absorción y pérdidas del haz en el plasma [12] predicen que para esos dos haces balanceados la eficiencia de absorción alcanza el 65% de la potencia entrante en el toro (930 kW por haz) para plasmas de alta densidad (valor central 10^{14} cm^{-3}).

Las pérdidas en el plasma son de tres tipos: *shine through*, pérdidas de iones rápidos y de cambio de carga (CX). Las primeras corresponden a la porción no ionizada del haz de neutros en el plasma. Al principio de la descarga (densidad central de corte 1.7×10^{13} cm^{-3}) pueden alcanzar un 50% aunque caen exponencialmente con la densidad hata un 7%. Las pérdidas de iones rápidos se

incrementan con la densidad hasta un máximo del 20%. Finalmente las pérdidas por CX son muy dependientes del perfil radial de la densidad de neutros fríos procedentes de la pared, estimándose en un 30% en el inicio de la descarga, decreciendo con la densidad hasta un 8% (Fig.2.8).

Finalmente las pérdidas de *shine through* y de iones rápidos crecen con la energía del haz mientras que las de CX disminuyen, dando lugar a una baja sensibilidad de la absorción para energías del haz comprendidas entre 27 y 40 keV, mientras que por encima de 40 keV la eficiencia de absorción comienza a deteriorarse debido, sobre todo, al incremento del *shine through* (Fig.2.9). Por esta razón una energía del haz de 40 keV constituye un buen compromiso entre eficiencia de absorción y cargas de *shine through* en la cámara de vacío [12].

Tabla-I

Parámetros de inyección para el TJ-II

Masa iónica	H^0
Energía del haz	40 keV
Mezca energética	80:10:10
Longitud del pulso	300 msec.
Radio fuente circular	0.15 m
Divergencia del haz (1/e)	1.3°
Distancia de la fuente a la ventana de inyección	4.05 m
Longitud focal	4 m
Geometría de inyección	45 en el plano x-y 0.201 por debajo del ecuador (COUNTER) 0.201 por encima del ecuador (CO)
Potencia	1500 kW por haz
Potencia entrante en el toro	930 kW por haz
Radio *shutter*	0.10 m
anchura ventana	0.27 m
altura ventana	0.34 m

3. Sensibilidad del sistema - Optimización

3.1. Distancia de la fuente de iones al TJ-II

En este primer apartado se analizan los efectos de una variación de la distancia de la fuente (y con ella todo el inyector) a la ventana de entrada del TJ-II. El intervalo evaluado es entre 380 y 480 cm, siendo la posición de referencia de 405 cm. Se debe notar que el *Shutter* se mantiene solidario con la fuente, es decir, la distancia entre la fuente y el diafragma es constante, cambiando por tanto la existente entre este último y la ventana de inyección.

Puede observarse un decrecimiento continuo tanto de la potencia transmitida (Ptor) como de la potencia disponible de calentamiento (Pav) al ir alejando la fuente de la ventana (Fig.3.1.1, Fig.3.1.2, y Fig.3.1.3) para baja, media y alta densidad de plasma. Lógicamente el ángulo sólido con el que es vista la puerta de entrada desde la fuente va decreciendo haciendo que sea cada vez menor la proporción de haz capaz de entrar por el ya angosto contorno de la ventana.

Este mismo razonamiento es el que justifica el constante decrecimiento de la potencia absorbida con inyección balanceada (Fig.3.1.4), de la absorbida para cada haz por separado (Pabs-CO y Pabs-CNT en Fig.3.11 y Fig.3.1.2) y las pérdidas por Shine Through (Fig.3.1.5), ya que todas ellas responden de manera proporcional a la potencia entrante. De hecho, un incremento de 10 cm en la distancia provoca un decrecimiento de un 1.8% en transmisión y un 4,4% en absorción de potencia a densidad intermedia.

Por otro lado, los cambios observados en la distribución de cargas en la cámara de vacío corresponden a los esperados. Efectivamente, la potencia interceptada aumenta en la zona de entrada a la cámara (ducto y TF-1) en la misma proporción que se va perdiendo potencia entrante (Fig.3.1.6). No ocurre lo mismo sin embargo para la densidad de potencia depositada que disminuye en el ducto y aumenta en la TF-1, aunque de forma poco significativa (Fig.3.1.7).

Como conclusión hay que decir que efectivamente cuanta menor distancia exista entre la fuente y el inyector mejores resultados obtenemos. Sin embargo no es posible reducir esta distancia mas allá de la posición de referencia dadas las dimensiones del inyector. En cualquier caso la sensibilidad a este parámetro no resulta de crucial importancia y se estima aceptable la posición de referencia.

3.2. Divergencia del haz

El valor de la divergencia para nuestro sistema es de 1.3º [7], [8], (tabla I,§2) y viene determinado por las características geométricas de las rejillas de extracción y aceleración. El intervalo de variación considerado es de 1º a 2.2º.

En los resultados, como era de esperar se observa un decrecimiento monótono de la potencia transmitida y de la potencia absorbida con el aumento de la divergencia (Fig.3.2.1). Este efecto lógicamente se mantiene a medida que aumenta la densidad del plasma ya que la causa fundamental de tal decrecimiento es la gran apertura con la que el haz llega al *shutter* y a la ventana de entrada quedando interceptado antes de entrar en la cámara. Para media densidad, por ejemplo, un cambio en la divergencia de 0.1º provoca un decrecimiento de aproximadamente un 7% en potencia transmitida y un 11% en la absorbida.

Sin embargo, las cargas a la salida del haz y en el hard-core (Fig.3.2.2) decrecen no solo en razón a la pérdida de potencia entrante en el toro sino también debido a la suavización de la densidad de potencia del centro del haz al tener éste una distribución gausiana más ancha.

Por otra parte zonas cercanas al foco del haz como son la protección de la TF-1 y el ducto (Fig.3.2.3) presentan el mismo efecto a altas divergencias pero sufren inicialmente un crecimiento de las cargas (máximo alrededor de 1.4 º para la TF-1 y de 1.8 º para el ducto). La razón es que en ambos casos solo se interceptan las partes más externas del haz en donde la densidad de potencia crece inicialmente al ensancharse la distribución pero vuelve a disminuir a divergencias muy altas.

Dada la gran sensibilidad de la transmisión a la divergencia del haz, nuestro interés será mantener ésta a su nivel óptimo para nuestro sistema, que es de 1.3º.

3.3. Distancia focal

El valor de referencia para la distancia focal es 400 cm y el barrido se ha realizado entre 250 y 450 cm. Como muestra la Fig.3.3.1 el punto focal cae alrededor de la puerta de entrada (la cual se encuentra exactamente a 405 cm de la fuente iónica). Por tanto es de esperar que sea precisamente este valor de referencia el que proporcione los mejores resultados en transmisión de potencia.

Efectivamente este hecho queda confirmado tanto para baja como para alta densidad en las Fig.3.3.2 y Fig.3.3.3. donde se muestra un claro máximo, aunque muy ancho, alrededor de esta longitud focal. También puede observarse cómo la transmisión y principalmente la absorción a alta densidad Fig.3.3.4 sólo se ve seriamente deteriorada para longitudes focales muy pequeñas (menores de 300 cm). En este caso, el foco recae muy cerca del *shutter* y el haz llega demasiado abierto al plasma originándose mayores pérdidas por *Shine Through* (Fig.3.3.5) y, sobre todo, mayores pérdidas por iones rápidos al nacer sus órbitas en puntos más externos del plasma.

Por otro lado al analizar la distribución de cargas en el interior de la cámara de vacío (Fig.3.3.6) se observa un notable incremento de las mismas en la zona de salida del haz (placas PLT-45, PLT-56 y PL-1). Estos puntos se encuentran para cualquiera de las longitudes consideradas en el barrido detrás del plano focal, es evidente que cuanto mas cerca estén del foco, el haz que interceptan está mas concentrado y las cargas serán mayores. No obstante, se debe notar que la evaluación de estas cargas se ha realizado en ausencia de plasma y que estas disminuirán muchísimo al ir creciendo la densidad del plasma [5]. El hard-core sin embargo se muestra bastante insensible a un cambio de longitud focal y la TF-1 presenta un máximo muy ancho alrededor de 350 cm por razones similares a las expuestas al discutir un aumento de divergencia.

En resumen, aunque la sensibilidad del sistema a un cambio en la longitud focal no es excesivamente notoria ni en potencia transmitida ni en potencia absorbida, se confirma la de referencia como la más indicada obteniéndose además unas cargas aceptables tanto en la protección de entrada donde no son suavizadas por el plasma y que a esta longitud focal son mas bajas, como en la zona de salida del haz donde aun siendo mayores se verán posteriormente muy atenuadas por el plasma.

4. Sensibilidad del sistema al desalineamiento del haz - Margen de operación

Como ya se mencionó al explicar la geometría de inyección (§2), el haz inyectado antiparalelamente al campo magnético toroidal (haz COUNTER) lo hace 20.1 cm por debajo del plano ecuatorial del TJ-II, formando un ángulo de 45° con la bobina toroidal TF-1 y interceptando el plano de la ventana de entrada en su cuadrante superior izquierdo.

En estas condiciones el haz encuentra dos obstáculos fundamentales que van a influir de forma determinante en el valor de la potencia entrante. El primero de ellos es la propia ventana de inyección, el haz no es concéntrico con ella y pequeños movimientos del haz lateralmente hacia arriba o hacia el centro pueden provocar recortes importantes (Fig.2.7). El otro obstáculo lo constituye el contorno de la bobina toroidal TF-1 que de hecho necesita una protección de grafito y recibe fuertes cargas incluso con la dirección de referencia. Variaciones del haz lateralmente hacia el exterior del toro o hacia abajo pueden suponer un empeoramiento notable de las mismas.

4.1. Desalineamiento angular del haz

Los efectos que un cambio en la dirección del haz tendrían sobre la potencia transmitida y absorbida, así como sobre la distribución de cargas en la cámara de vacío se han estudiado modificando estas direcciones entre -1.2^{o} y $+1.2^{o}$ alrededor de la de referencia a intervalos de 0.3^{o}.

Debe notarse que como la distancia de la fuente de iones al plano de la ventana de entrada es de 405 cm, el rango angular estudiado corresponde a un desplazamiento máximo en el punto de intersección del centro del haz con el plano de la ventana de 8.5 cm, y cada intervalo considerado a unos 2.1 cm.

a) Inclinaciones horizontales del haz

La Fig.4.1.1 muestra la dependencia con un cambio en la dirección angular horizontal del haz de la potencia entrante en el toro (después de la TF-1) , la potencia disponible de calentamiento (posterior a las pérdidas por *Shine Through*) y la potencia absorbida en el plasma para el haz CO y el COUNTER. La Fig.4.1.2 es equivalente pero para alta densidad de plasma.

Tal y como se esperaba, la potencia transmitida y la disponible para el calentamiento son máximas cerca del ángulo de referencia, con una ligerísima preferencia por $+0.15^{o}$ hacia fuera (un poco mas clara para alta densidad) que, sin embargo, se encuentra dentro de los márgenes de error del código de Montecarlo.

Sin embargo, cuando se analiza la potencia total absorbida para los dos haces balanceados (Fig.4.1.3) esta preferencia desaparece por completo y el óptimo se encuentra absolutamente centrado en la dirección angular de referencia.

Por otra parte en las Fig.4.1.4 y Fig.4.1.5, que muestran la dependencia de la máxima densidad de potencia con un cambio de dirección angular, puede observarse como el incremento de cargas en el ducto y la protección de la TF-1 responden a cambios angulares contrarios, de forma que, de nuevo la dirección de referencia se muestra como la mas idónea para que sean aceptables ambos niveles de cargas.

b) Inclinaciones verticales del haz

La Fig.4.1.6 y Fig.4.1.7 (equivalentes a las Fig.4.1.1 y 4.1.2), muestran una transmisión optima para el ángulo de referencia, mientras la potencia disponible para el calentamiento y la absorbida presentan una ligera preferencia por 0.1^{o} hacia arriba (aproximadamente 1 cm en el plano de la ventana).

Al igual que antes, para la potencia total absorbida con los dos haces balanceados (Fig.4.1.8), esta preferencia desaparece, excepto para alta densidad

donde la absorción es aproximadamente constante alrededor de la dirección de referencia.

Por otro lado, la carga máxima interceptada por la protección de la TF-1 (Fig.4.1.9) muestra un decrecimiento al inclinar el haz hacia arriba, sin embargo este hecho conlleva un incremento de las cargas en el *hard-core* por lo que, de nuevo, la dirección de referencia supone un buen compromiso entre las cargas en ambas zonas.

De hecho, una inclinación hacia arriba de la dirección angular podría no solo incrementar las cargas en *hard-core* sino que también se deterioraría la absorción a baja y media densidad en donde la eficacia de absorción es menor.

Puede concluirse por tanto, que el ángulo horizontal propuesto parece óptimo tanto desde el punto de vista de la absorción como de cargas, mientras que el ángulo vertical propuesto es óptimo desde el punto de vista de la absorción para casi todo el rango de densidades (principalmente para baja y media) y para alta densidad parece un buen compromiso entre absorción, cargas en TF-1 y cargas en el hard-core.

4.2. Desplazamientos laterales de la dirección del haz

En este caso se analiza el efecto que un cambio en la posición del eje del haz (aunque manteniendo la misma dirección angular) produciría sobre la transmisión, la potencia absorbida y las cargas .

Debe notarse que se estudia independientemente el efecto de desplazamientos verticales y laterales respecto a la posición de referencia. Las nuevas posiciones del haz, tanto verticales como horizontales, se encuentran entre -10 y +10 cm alrededor de la posición de la de referencia a intervalos de 2 cm.

a) Desplazamientos horizontales de la dirección del haz

La Fig.4.2.1 muestra, para baja densidad de plasma, la dependencia de la potencia entrante en el toro (una vez superada la protección de la TF-1), la potencia de calentamiento disponible (posterior a las pérdidas por *Shine Through*) y la

potencia absorbida en el plasma para el haz CO y el haz COUNTER. La Fig.4.2.2 es la equivalente para alta densidad central.

Como cabría esperar tanto la transmisión como la potencia disponible son máximas alrededor de la posición de referencia aunque se observa un leve aumento, más patente a alta densidad de plasma, al desplazar el haz 1 cm hacia el exterior del toro. Este hecho se debe básicamente a la geometría de la zona de entrada. Por un lado resulta evidente la conveniencia de desplazar el haz hacia el exterior del toro y de esta forma evitar el contorno de la ventana, sin embargo los beneficios de este desplazamiento se ven rápidamente atenuados al seguir desplazándolo ya que el otro gran delimitador del haz lo constituye el contorno de la bobina TF-1 que intercepta el haz por su parte inferior y derecha (Fig.2.7).

En cualquier caso, en la Fig.4.2.3 podemos observar que la potencia total absorbida de los dos haces balanceados pierde esta tendencia recayendo el optimo más o menos en la posición de referencia para media y baja densidad de plasma aunque se mantiene aún una leve preferencia hacia fuera del toro para alta densidad que, sin embargo, se encuentra dentro de los márgenes de error estadístico del código de Montecarlo.

La figura 4.2.4. muestra las cargas máximas sobre las diversas partes afectadas de la cámara. Han sido evaluadas considerando el peor de los casos, es decir suponiendo que no existe plasma y por tanto las cargas sobre la cámara no están atenuadas.

Puede observarse cómo la zona más afectada por un cambio en la posición horizontal de la fuente es el contorno de la bobina toroidal TF-1 y precisamente las cargas en esta zona no se ven en ningún momento atenuadas por la presencia del plasma.

Efectivamente, desplazamientos laterales del haz hacia el exterior del toro mejoran un poco (solo en el intervalo de 1 cm) las pérdidas de haz en la ventana de inyección pero provocan un fuerte incremento de las cargas en el contorno de la TF-1. Por tanto la posición horizontal de referencia parece óptima desde el punto de vista de absorción y es un buen compromiso para las cargas a la entrada.

b) Desplazamientos verticales de la dirección del haz

Las Fig.4.2.5 y Fig.4.2.6, equivalentes a las Fig.4.2.1 y 4.2.2, muestran cómo la transmisión es óptima para la posición de referencia, mientras que la potencia que llega al plasma y la potencia absorbida muestra una pequeña preferencia por una posición levemente mas alta, preferencia más notoria a densidades de plasma mayores.

También, al igual que antes, la potencia total absorbida (Fig.4.2.7) no refleja esta preferencia , excepto para alta densidad donde aún se aprecia una ligerísima mejoría al subir un poco el haz, como siempre, dentro de los márgenes de error estadístico del código de Montecarlo.

La carga máxima sobre la protección de la bobina TF-1 mostrado en la Fig.4.2.8 decrece al desplazar el haz verticalmente hacia arriba, sin embargo este hecho se compensa con el incremento de las cargas sobre el *hard core*.

Por tanto, cualquier desplazamiento vertical del haz respecto a la posición establecida anteriormente deteriora la absorción de potencia por un plasma de intermedia o baja densidad, incrementándose al mismo tiempo las cargas sobre el hard core. Debe concluirse entonces, que la altura a la que es inyectado el haz es óptima desde el punto de vista de absorción para casi todos los rangos de densidad (principalmente para valores de baja e intermedia densidad donde la absorción es menor), mientras que para alta densidad parece ser un buen compromiso entre la potencia absorbida, las cargas sobre la protección de entrada y las cargas sobre el hard core.

Una consecuencia suplementaria de todos éstos análisis es que el margen de error aceptable para todos los casos analizados corresponde a un desplazamiento equivalente a unos 2 cm en el plano de la ventana, margen que es estrecho pero factible.

5. Sensibilidad del sistema a diversos componentes - Minimización de cargas

Como se indicó en el §1, se consideran ahora cuatro posibles variaciones en el diseño del sistema enfocadas a suavizar las cargas depositadas sobre la zona de entrada de la cámara de vacío.

5.1. Distancia del *shutter* a la ventana de inyección

Se realiza un análisis del efecto que tiene un cambio en la posición del *shutter* sobre la potencia transmitida y la absorbida y sobre la distribución de cargas en la cámara de vacío, manteniendo constante la distancia de la fuente de iones a la ventana. El intervalo de variación considerado se situa entre 62 y 138 cm siendo las posiciones analizadas aquellas que posibilita la geometría de la zona de conexión al TJ-II.

Las Fig.5.1.1, Fig.5.1.2 y Fig.5.1.3 muestran la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida para tres densidades centrales de plasma. Se observa un levísimo incremento de las dos primeras con el aumento de la distancia.

Sin embargo, como se puede observar en la Fig.5.1.6 hay un aumento de potencia interceptada en el ducto y la TF-1 y un progresivo decrecimiento de la interceptada por el propio *shutter*.

De hecho, la potencia absorbida (Fig.5.1.4) y el Shine Through (Fig.5.1.5) no muestran un especial incremento con el aumento de la distancia aunque si se observa un pequeño máximo para la posición de referencia en el caso de baja y media densidad. Para alta densidad este máximo se traslada hacia distancias un poco mayores.

Los máximos de densidad de potencia (Fig.5.1.7) apenas si se ven afectados puesto que la densidad de potencia que aportan los halos no interceptados con anterioridad, son evidentemente mucho mas suaves que los máximos de densidad de potencia usuales en la cámara de vacío.

En cualquier caso, lo mas destacable de este análisis es la escasa sensibilidad del sistema a un cambio en la posición del *shutter*.

5.2. Diámetro de apertura del *shutter*

Se estudian los efectos de un cambio en el diámetro de apertura del *shutter* variando su valor ordinario de 20 cm entre 14 y 30 cm.

Obviamente, a medida que se va abriendo el diafragma la potencia que intercepta decrece (Fig.5.2.1) al igual que la densidad de potencia (Fig.5.2.3) y en consecuencia aumenta la potencia transmitida (concretamente un 0.9% por cada centímetro más de diámetro). Sin embargo es obvio también, que la potencia interceptada posteriormente por el ducto y la TF-1 también aumentarán.

Efectivamente, la Fig.5.2.2 muestra los máximos de densidad de potencia interceptados por las respectivas protecciones y el hard core. Se observa cómo para diámetros del *shutter* mayores que el de referencia las cargas en la protección de entrada aumentan notablemente hasta un diámetro de apertura de 24 cm a partir del cual se estabilizan (ya que con este diámetro el diafragma deja pasar la totalidad del haz) mientras que las cargas en el resto de protecciones y en el *hard-core* apenas si sufren variaciones ya que las partes de haz transmitidas al abrir el diafragma no aportan densidades de potencia significativas a estas zonas.

En cualquier caso, puede observarse en la Fig.5.2.4 que la potencia absorbida por el plasma tampoco se ve apreciablemente incrementada. La potencia del haz adicional transmitido con la apertura del *shutter* va a parar principalmente la periferia del plasma donde la densidad es muy baja y por tanto la mayoría de él se perderá por *Shine Trough* (Fig.5.2.5).

Por otro lado, si se intenta proteger la zona de entrada disminuyendo el diámetro del *shutter* (Fig.5.2.2), se observa que para reducir la máxima densidad de potencia en la protección de la TF-1 a la mitad es necesario cerrar el diafragma hasta los 14.4 cm de diámetro, reduciéndose la transmisión del 62% al 52%, pero además

con el grave inconveniente de incrementar fuertemente las cargas en el propio diafragma, las cuales son multiplican por un factor 2.4, pasando de 0.9a 2.4 kW/cm^2 (para 1 MW incidente). Por tanto, esta forma de proteger el ducto y la zona de entrada no hace más que trasladar el problema a las placas del *shutter* disminuyéndo además la potencia entrante.

En resumen, ni una apertura mayor del *shutter* resulta conveniente, ya que no se incrementa la potencia absorbida por el plasma y sí las cargas en la zona de entrada, ni un cierre mayor del mismo resulta eficaz para suavizar las cargas ya que eso solo es posible incrementándo inadmisiblemente las del propio *shutter* .

5.3. Adición de un segundo diafragma

Han sido estudiados los efectos de añadir un segundo diafragma situado en la misma posición que el *shutter* , con una forma geométrica adaptada a la forma de la bobina TF-1 y a la forma del contorno de la ventana de inyección (Fig.5.3.1), de manera que con la combinación de ambos (*shutter* y nuevo diafragma) pudiera restringirse convenientemente el haz por alguna de sus zonas y proteger así las regiones afectadas. Debe notarse que los efectos de recortar el haz rectangularmente y los de recortarlo de forma similar al contorno de la TF-1 son aproximadamente independientes.

Como puede verse en la Fig.5.3.3, cuando la anchura de la parte rectangular decrece ésta intercepta mas y mas potencia, sin embargo la transmisión no se ve especialmente afectada (Fig.5.3.2). De hecho, para reducir las cargas del ducto a la mitad es necesario una reducción de la anchura de la parte rectangular de 1.4 cm, lo cual supone únicamente una reducción de la transmisión (después de la TF-1) del 62% al 60%.

Pero por el contrario, el máximo de densidad de potencia interceptado por este diafragma adicional (Fig.5.3.3) se incrementa drásticamente hasta los 4 kW/cm^2, que es aproximadamente 3 veces el valor usual interceptado por el *shutter* y 3.3 veces el interceptado por el ducto.

Por otro lado si desplazamos hacia la izquierda el contorno de este diafragma coincidente con el contorno de la TF-1, conseguimos (Fig.5.3.4) un efecto similar sobre la TF-1.

Concretamente, para reducir la máxima densidad de potencia sobre la TF-1 a la mitad es necesario un desplazamiento de unos 2.5cm. El efecto resultante es bastante suave sobre la transmisión, que se reduce de un 62% al 58%, pero, de nuevo se produce un fortísimo aumento de las cargas en esta parte del diafragma (Fig.5.3.5) llegándose a superar los 3.6 kW/cm^2 lo que supone mas de 4 veces el valor usual interceptado por la protección de la TF-1.

En conclusión, la reducción de cargas en las protecciones con la instalación de un segundo diafragma no resulta conveniente ya que se alcanza únicamente con un intolerable incremento de las cargas interceptadas por el propio diafragma.

5.4. Desplazamiento de placas en las *Defining Plates*

Las *defining plates* (Fig.5.4.1) situadas entre el cajón principal del inyector y el cajón del calorímetro [1], [8] , constituyen el primer diafragma con el que se encuentra el haz, comprobando además, si éste está correctamente centrado. El diafragma viene definido por cuatro placas planas con movimiento independiente que en posición normal proporcionan un espacio cuadrado de 28 cm de lado y centrado con el haz. En esta posición interceptan una pequeñísima fracción de la potencia incidente, menos del 0.5 %, con un máximo de densidad de potencia de unos 360 W/cm^2 por MW incidente (un 38% del máximo de densidad de potencia en el suhtter).

Se ha realizado un análisis del efecto que en el sistema de inyección tendría un cambio de la superficie libre de ese diafragma. Sin embargo como el objetivo fundamental del análisis es explorar la posibilidad de rebajar las cargas tanto en el ducto como en la protección de la TF-1, solo se han realizado aquellos desplazamientos que puedan influir sobre las cargas en estas zonas.

a) Desplazamiento de la placa izquierda

Esta primera posibilidad consiste en cerrar la apertura desplazando la placa lateral izquierda hacia el centro del haz aunque con este movimiento se consiguiría proteger el ducto pero no la protección de la TF-1.

Tal y como era de esperar, la placa desplazada intercepta más y más potencia (Fig.5.4.2) a medida que la vamos acercando al centro, comenzando a ocultar las zonas de impacto del ducto (Fig.5.4.3) a partir de los 4 cm de desplazamiento.

De esta forma, para reducir a la mitad el máximo de densidad de potencia en el ducto (Fig.5.4.5) sería necesario un desplazamiento de hasta 8.7 cm, rebajándose la transmisión (fracción de potencia entrante en el toro mas allá de la bobina TF-1) al 55% y elevando drásticamente, y esto es lo mas preocupante, la máxima densidad de potencia interceptada por la placa de las *deffining plates* desplazada (Fig.5.4.4) a 4 kW/cm^2 por MW incidente, es decir 4 veces la interceptada por el *shutter* (y casi 5 veces la interceptada usualmente por el ducto). Además tampoco se observa ninguna mejora en otras zonas de impacto ya que el resto de las cargas no se ven afectadas. Evidentemente esta maniobra no representa ninguna ventaja para el sistema de inyección.

En conclusión es obvia la no conveniencia de tal desplazamiento al no conseguir una suavización importante de las cargas en el ducto sin crear otra zona de riesgo y empeorando considerablemente la transmisión de potencia disponible para el calentamiento.

b) Desplazamiento de las placas inferior y derecha

Otra posibilidad para conseguir la suavización de cargas a la entrada del toro consistiría en desplazar al mismo tiempo las placas inferior y derecha de forma que se restringiera la parte del haz que intercepta el contorno de la TF-1.

Como ya se esperaba esta combinación de desplazamientos eleva la potencia interceptada por ambas placas (Fig.5.4.6) y empieza a proteger la TF-1 a partir de unos 4 cm de desplazamiento (Fig.5.4.7).

Al igual que en el caso anterior, para reducir el máximo de densidad de la TF-1 a la mitad (Fig.5.4.9) sería necesario un desplazamiento combinado de unos 9.3 cm, que conllevaría un decrecimiento en la transmisión del 62% inicial al 45 %.

De nuevo, el principal efecto vuelve a ser el drástico aumento de las cargas en las placas desplazadas (Fig.5.4. 8) . Se alcanzarían los 4 kW/cm^2 por MW incidente, este valor es 4 veces el interceptado por el *shutter* y mas de 7 veces el usual en la protección de la TF-1.

Por tanto, de nuevo se concluye que la protección de la TF-1 con desplazamientos de las *deffining plates* sólo provocaría un intolerable incremento de las cargas en esas placas y un empeoramiento considerable de la potencia transmitida.

En conclusión ninguna de las cuatro opciones analizadas parecen convenientes.

6- Conclusiones

* Dada la complicada geometría de inyección en el TJ-II se ha hecho necesario analizar en detalle la sensibilidad del sistema a los principales parámetros.

* Se confirman como óptimos los valores adoptados para la distancia focal y la distancia entre la fuente y el TJ-II, aunque no se observa una sensibilidad importante a pequeñas variaciones de los mismos (§3.2). Dada la sensibilidad de la transmisión y las cargas térmicas a la divergencia del haz, se recomienda no sobrepasar el valor nominal del 1.3^{0}.

* La sensibilidad del sistema ante el desalineamiento del haz (tanto por traslación como por cambio en la inclinación) denota unos márgenes de operación relativamente estrechos, aunque factibles, correspondientes a un desplazamiento equivalente de unos 2 cm en el plano de la ventana de entrada, quedando de nuevo confirmada la dirección de referencia como la más indicada. Las ligerísimas preferencias que aparecen en algún caso se encuentran dentro de los márgenes de error estadístico del código de Montecarlo y quedan completamente disipadas al realizar un balance total de potencia absorbida.

* Ninguna de las cuatro opciones analizadas con el fin de reducir las cargas a la entrada del TJ-II se presentan como buenas soluciones del problema, puesto que en todos los casos se crean nuevas zonas de riesgo al tiempo que se disminuye la potencia entrante en la máquina.

* En suma, la elección de los parámetros de inyección (Tabla I, §2) es óptima.

Referencias

[1] M.Liniers, J.Alonso *et al.* "Neutral Beam Injection system for TJ-II". 20th SOFT. Marseille, October 1998.

[2] J.Guasp, M.Liniers. "Theoretical evaluations of neutral beam injection efficiency for the TJ-II helical axis Stellarator". Fusion Technol., **24**, 251 (1993).

[3] M. Liniers, J.Guasp. " An alternative scenario of NBI inyection into TJ-II ". Neutral Inyection Joint Development Committee Meeting, JDC 4/94, 30 October 1994, KFK, Julich, Germany.

[4] M.Liniers, J.Guasp. " Present Status of TJ-II NBI inyection system and deposition power calculations for shine through and fast ion losses ". Neutral Inyection Joint Development Committee Meeting, JDC 6/95, 27 November 1995, CIEMAT, Spain.

[5]. J. Guasp, C.Fuentes, M.Liniers. "Calculo de cargas térmicas en la cámara de vacío del TJ-II durante la inyección de Haces Neutros". Informe CIEMAT-797. Mayo 1996.

[6] J.Guasp, M.Liniers, C.Fuentes, G.Barrera. "Thermal load calculations at TJ-II Vacuum Vessel under NBI". Próxima publicación en Fusion Technol. Enero 1999.

[7]. M.Garcia, M.Liniers, J.Guasp. "Aplicación del código SLAC al estudio de sistemas de extracción de iones para Inyectores Neutros". Informe CIEMAT-820. Febrero 1987

[8] C.Fuentes, M.Liniers, J.Guasp. " Aplicación del código OPTIMUS al Sistema de Inyección de Neutros del TJ-II ". Informe CIEMAT en prensa.

[9] F.P.Penningsfeld. "DENSB Code". Report IPP/229. IPP Garching 1986.

[10] G.C.Lister. IPP/Report 4/222 , IPP Garching 1985.

[11] A.Teubel,J. Guasp and M.Liniers. IPP/Report 4/268 , IPP Garching 1994.

[12] TJ-II Group. "Application for Preferential Support Phase II. TJ-II Neutral Beam Inyection". EUR-FU (97) CCFP 74/8.5 (November 1997)

[13] J.Guasp, M.Liniers. "Dependencia de las pérdidas directas y de las propiedades de atrapamiento con la configuración magnética del TJ-II". Report CIEMAT-845. Mayo 1998.

Lista de Figuras

&2

Fig.2.1 Vista del TJ-II y del plasma

Fig.2.2 Vista de la bobina central y del plasma con tres cortes toroidales del mismo

Fig.2.3 Vista superior de la disposición de los haces neutros en el TJ-II con un modelo simplificado de la cámara de vacio mostrando los puntos críticos.

Fig.2.4 Vista CAD de las bobinas toroidales y de la bobina central del TJ-II con la trayectoria del haz representada por un cilindro

Fig.2.5 Vista del modelo simplificado del TJ-II con los puntos de nacimiento de iones durante la inyección

Fig.2.6 Posición relativa del haz COUNTER y del plasma para varios ángulos toroidales

Fig.2.7 Vista CAD de la posición relativa del haz a la entrada de la cámara con los principales elementos de intercepción

Fig.2.8 Variación con la densidad central del plasma de la fracción de potencia absorbida (Pabs), perdida por *shine through* (sh), por cambio de carga (cx) y pérdidas de iones rápidos (olt) para dos haces balanceados de 40 keV

Fig.2.9 Variación con la energía de la fracción de potencia absorbida y perdida por *shine through* , por cambio de carga y pérdidas de iones rápidos (olt) para una densidad central de plasma de $5*10^{19}$ m^{-3}

&.3.1

Fig.3.1.1 Variación con la distancia de la fuente a la ventana de inyección de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $1.7*10^{19}$ m^{-3}

Fig.3.1.2 Equivalente a la Fig 3.1.1 pero para una densidad de $5.4 *10^{19}$ m^{-3}

Fig.3.1.3 Equivalente a la Fig.3.1.1 pero para una densidad de 10^{20} m^{-3}

Fig.3.1.4 Variación con la distancia de la fuente a la ventana de inyección de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.3.1.5 Variación con la distancia de la fuente a la ventana de inyección de las pérdidas de potencia por *shine through* para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.3.1.6 Variación con la distancia de la fuente a la ventana de inyección del porcentaje de potencia transmitida y depositado sobre ducto y contorno de TF-1

Fig.3.1.7 Variación con la distancia de la fuente a la ventana de inyección de las cargas depositadas sobre el ducto, TF-1 y placas PLT45 y PLT56

&3.2

Fig.3.2.1 Variación con la divergencia del haz de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma intermedia

Fig.3.2.2 Variación con la divergencia del haz de las cargas depositadas sobre TF-1,hard-core y placas PL1, PLT45 y PLT56

Fig.3.2.3 Variación con la divergencia del haz de las cargas depositadas sobre TF-1, ducto y *shutter* .

& 3.3

Fig.3.3.1 Esquema de la distancia de la fuente iónica a diversos componentes del sistema de inyección

Fig.3.3.2 Variación con la longitud focal de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $1.7*10^{19}$ m^{-3}

Fig.3.3.3 Equivalente a la Fig 3.3.2 pero para una densidad de $11*10^{19}$ m^{-3}

Fig.3.3.4 Variación con la longitud focal de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.3.3.5 Variación con la longitud focal de las pérdidas de potencia por *shine through* para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.3.3.6 Variación con la longitud focal de las cargas depositadas sobre el hard-core, TF-1 y placas PL1, PLT45 y PLT56

Fig.3.3.7 Variación con la longitud focal de las cargas depositadas sobre el ducto, TF-1 y *shutter*

&.4.1

Fig.4.1.1 Variación con la inclinación angular horizontal del haz de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $5*10^{19}$ m^{-3}

Fig.4.1.2 Equivalente a la Fig.4.1.1 pero para una densidad de 10^{20} m^{-3}

Fig.4.1.3 Variación con la inclinación angular horizontal del haz de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.4.1.4 Variación con la inclinación angular horizontal del haz de las cargas depositadas sobre protección de la TF-1, hard-core y placas PL1,PLT45 y PLT56

Fig.4.1.5 Variación con la inclinación angular horizontal del haz de las cargas depositadas sobre el ducto y la tapa superior de la ventana de inyección

Fig.4.1.6 Variación con la inclinación vertical del haz de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $5.7*10^{19}$ m^{-3}

Fig.4.1.7 Equivalente a la Fig.4.1.6 pero para una densidad de 10^{20} m^{-3}

Fig.4.1.8 Variación con la inclinación vertical del haz de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.4.1.9 Variación con la inclinación vertical del haz de las cargas depositadas sobre hard-core, TF-1 y placas PL1, PLT45 y PLT56

Fig.4.1.10 Variación con la inclinación vertical del haz de las cargas depositadas sobre el ducto y la tapa de la ventana

&.4.2

Fig.4.2.1 Variación con el desplazamiento horizontal del haz de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $5*10^{19}$ m^{-3}

Fig.4.2.2 Equivalente a la Fig.4.2.1 pero para una densidad de 10^{20} m^{-3}

Fig.4.2.3 Variación con el desplazamiento horizontal del haz de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.4.2.4 Variación con el desplazamiento horizontal del haz de las cargas depositadas sobre el hard-core, TF-1 y placas PL1, PLT45 y PLT56

Fig.4.2.5 Variación con el desplazamiento vertical del haz de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $5*10^{19}$ m^{-3}

Fig.4.2.6 Equivalente a la Fig.4.2.5 pero para una densidad de 10^{20} m^{-3}

Fig.4.2.7 Variación con el desplazamiento vertical del haz de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.4.2.8 Variación con el desplazamiento vertical del haz de las cargas depositadas sobre el hard-core, TF-1 y placas PL1, PLT45 y PLT56

&.5.1

Fig.5.1.1 Variación con la distancia del *shutter* a la ventana de inyección de la potencia entrante, la potencia disponible de calentamiento y la potencia absorbida por cada haz para una densidad central de plasma de $1.7*10^{19}$ m^{-3}

Fig.5.1.2 Equivalente a la Fig 5.1.1 pero para una densidad de $5.4 *10^{19}$ m^{-3}

Fig.5.1.3 Equivalente a la Fig.5.1.1 pero para una densidad de 10^{20} m^{-3}

Fig.5.1.4 Variación con la distancia del *shutter* a la ventana de inyección de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.5.1.5 Variación con la distancia del *shutter* a la ventana de inyección de las pérdidas de potencia por *shine through* para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.5.1.6 Variación con la distancia del *shutter* a la ventana de inyección del porcentaje de potencia transmitida y depositado sobre el *shutter*, ducto y contorno de TF-1

Fig.5.1.7 Variación con la distancia del *shutter* a la ventana de inyección de las cargas depositadas sobre el ducto, TF-1 y placas PLT45 y PLT56

&.5.2

Fig.5.2.1 Variación con la apertura del *shutter* del porcentaje de potencia transmitida y depositado sobre ducto, contorno de TF-1 y *shutter*

Fig.5.2.2 Variación con la apertura del *shutter* de las cargas depositadas sobre el hard-core, TF-1 y placas PL1, PLT45 y PLT56

Fig.5.2.3 Variación con la apertura del *shutter* de las cargas depositadas sobre ducto, tapa de la ventana, lateral de la ventana y *shutter*

Fig.5.2.4 Variación con la apertura del *shutter* de la potencia absorbida con dos haces balanceados para alta, media y baja densidad de plasma

Fig.5.2.5 Variación con la apertura del *shutter* de las pérdidas de potencia por *shine through* para alta, media y baja densidad de plasma

&.5.3

Fig.5.3.1 Vista CAD del ducto y la ventana de entrada

Fig.5.3.2 Dependencia con la anchura rectangular del segundo diafragma, del porcentaje de potencia transmitida.

Fig.5.3.3 Dependencia con la anchura rectangular del segundo diafragma, de los máximos de densidad interceptados por ducto, tapa , shutter y segundo diafragma (rect)

Fig.5.3.4 Dependencia con la anchura del lateral derecho del segundo diafragma, del porcentaje de potencia transmitida.

Fig.5.3.5 Dependencia con la anchura del lateral derecho del segundo diafragma, de los máximos de densidad de potencia interceptados por ducto, tapa y *shutter*

&.5.4

Fig.5.4.1 Esquema de las deffining plates, *shutter* y entrada

Fig.5.4.2 Potencia transmitida e interceptada por las deffining plates al desplazar la placa izquierda.

Fig.5.4.3 Potencia interceptada por el ducto, TF-1 y tapa superior de la ventana al desplazar la placa izquierda

Fig.5.4.4 Máximos de densidad de potencia interceptada por las *deffining plates* y el *shutter* al desplazar la placa izquierda

Fig.5.4.5 Máximos de densidad de potencia interceptada por el ducto, TF-1 y tapa superior de la ventana al desplazar la placa izquierda

Fig.5.4.6 Potencia transmitida e interceptada por las deffining plates al desplazar las placas inferior y derecha

Fig.5.4.7 Potencia interceptada por el ducto, TF-1 y tapa superior de la ventana al desplazar las placas inferior y derecha

Fig.5.4.8 Máximos de densidad de potencia interceptada por las *deffining plates* y el *shutter* al desplazar las placas inferior y derecha

Fig.5.4.9 Máximos de densidad de potencia interceptada por el ducto, TF-1 y tapa superior de la ventana al desplazar las placas inferior y derecha

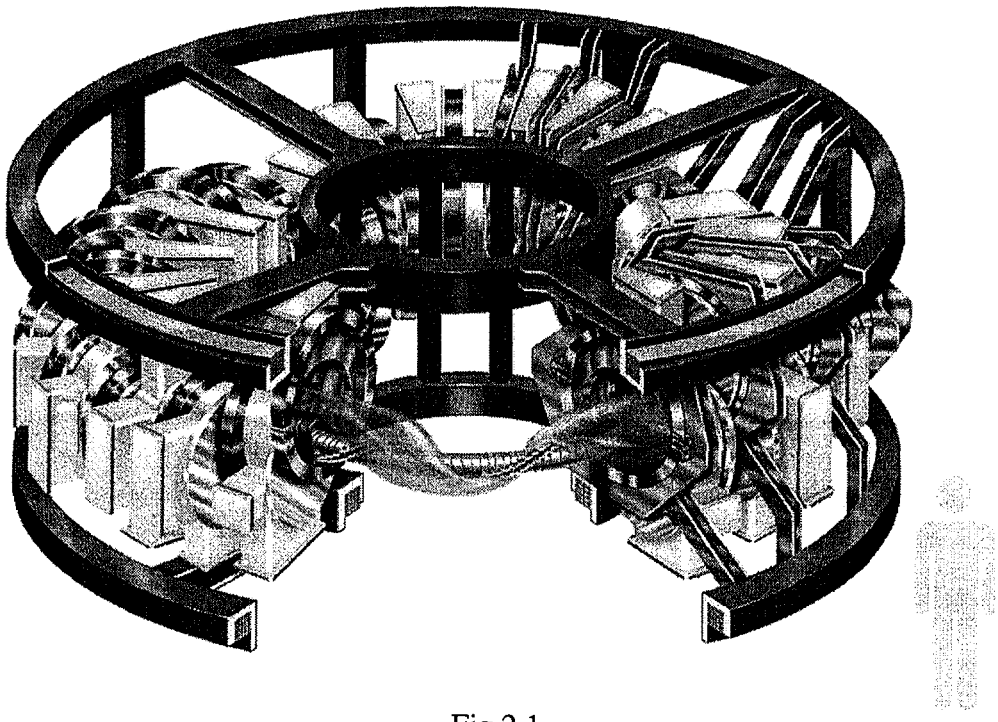


Fig.2.1

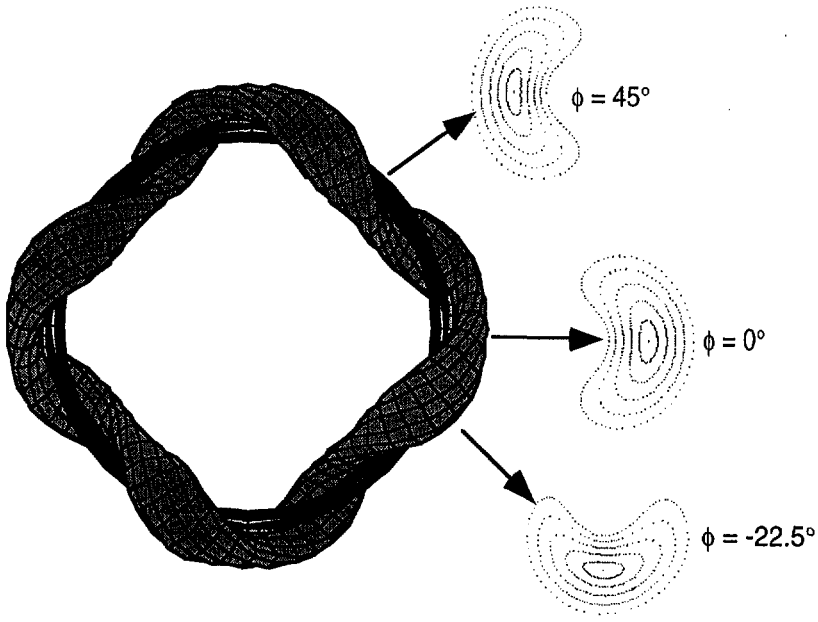


Fig.2.2

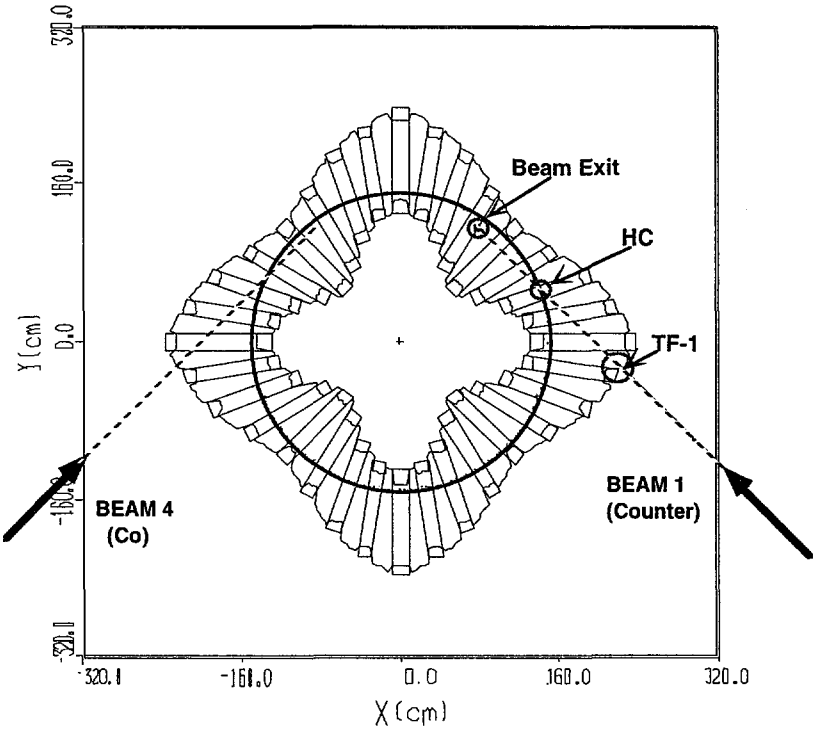

Beam Exit
HC
TF-1
BEAM 4
(Co)
BEAM 1
(Counter)
Y (cm)
X (cm)
320.0
160.0
0.0
-160.0
-320.0
-320.0
-160.0
0.0
160.0
320.0

Fig.2.3

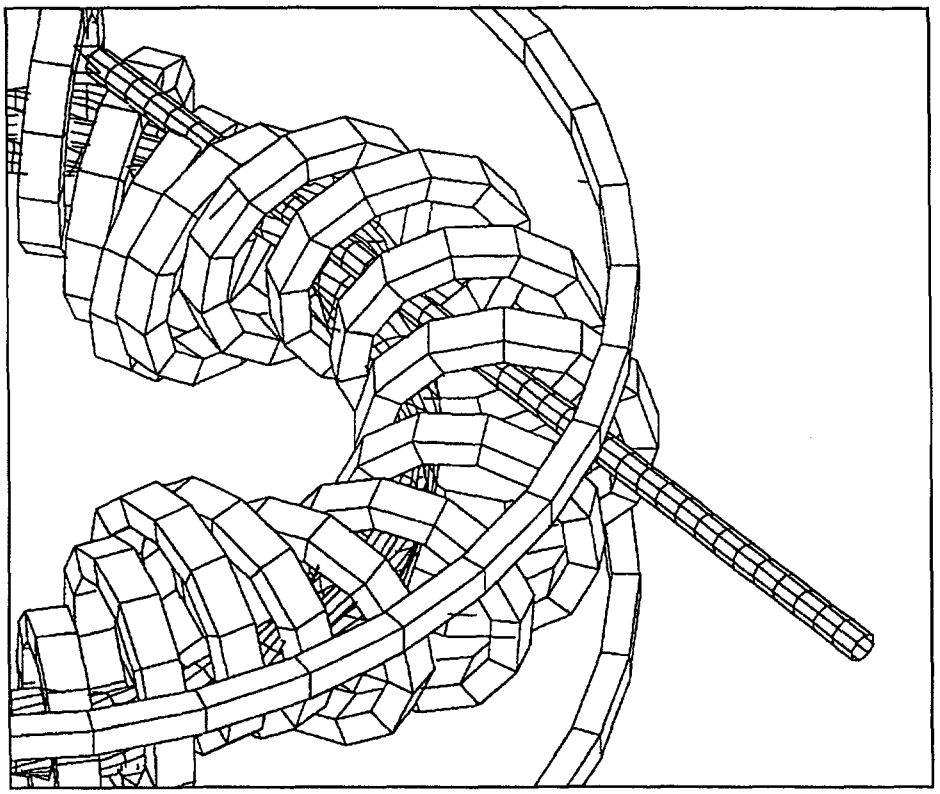


Fig.2.4

Intermediate density
40 keV, COUNTER

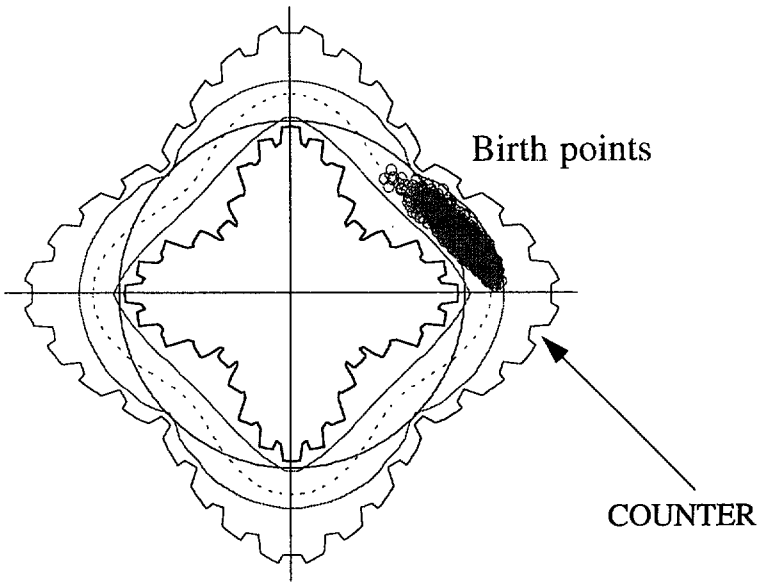


Fig.2.5

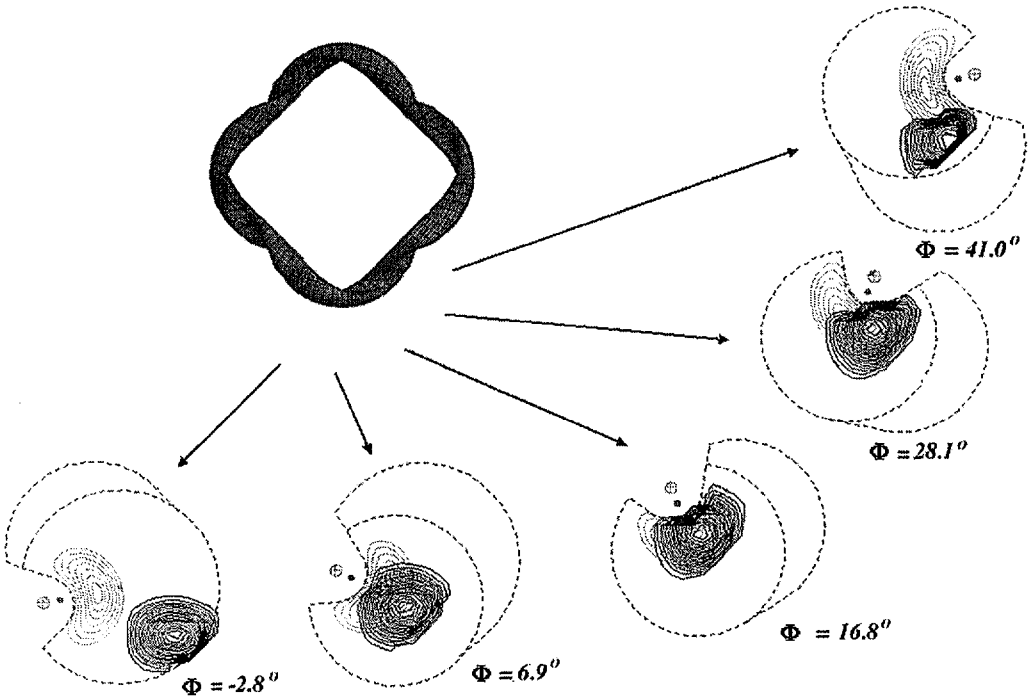


Fig.2.6

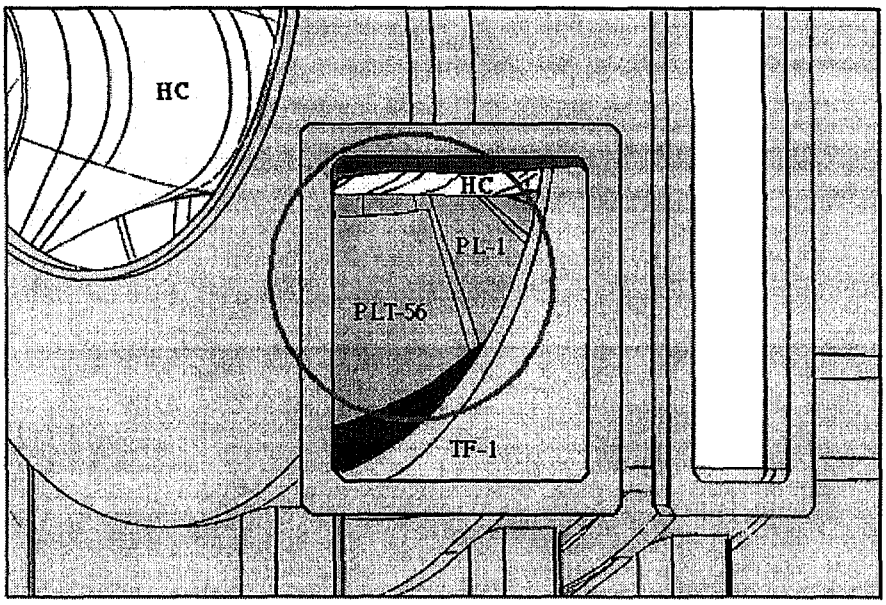


Fig.2.7

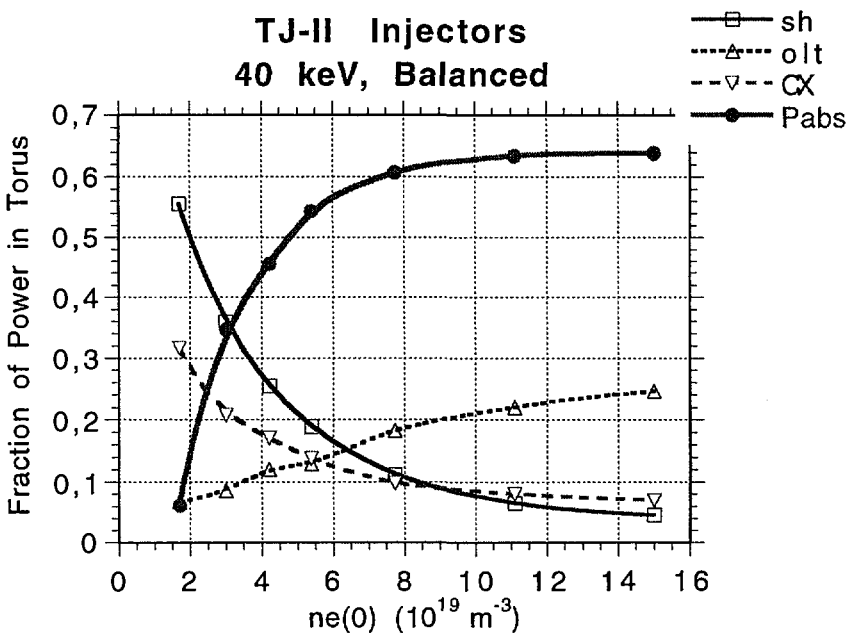

TJ-II Injectors
40 keV, Balanced
sh
olt
CX
Pabs
Fraction of Power in Torus
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
ne(0) (10^19 m^-3)

Fig.2.8

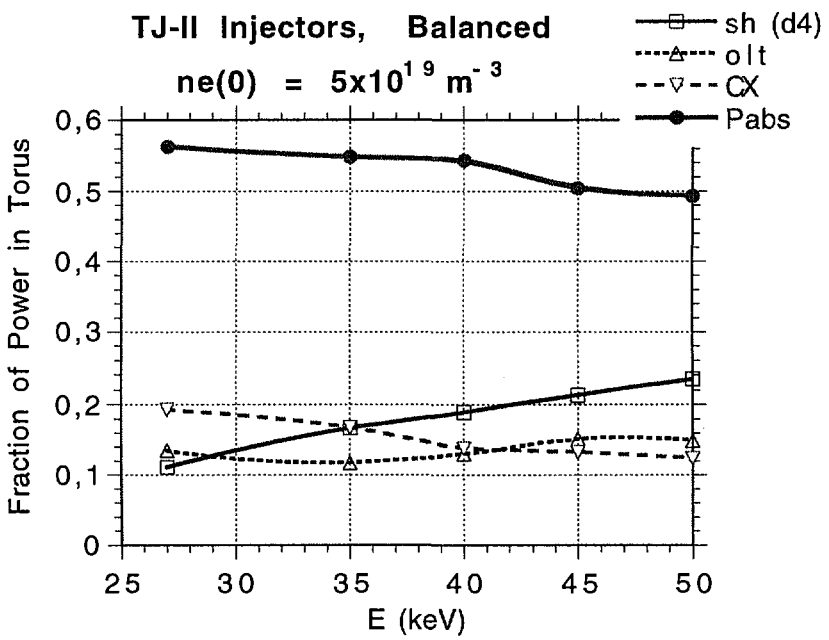

TJ-II Injectors, Balanced
ne(0) = 5x10^19 m^-3
sh (d4)
olt
CX
Pabs
Fraction of Power in Torus
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E (keV)

Fig.2.9

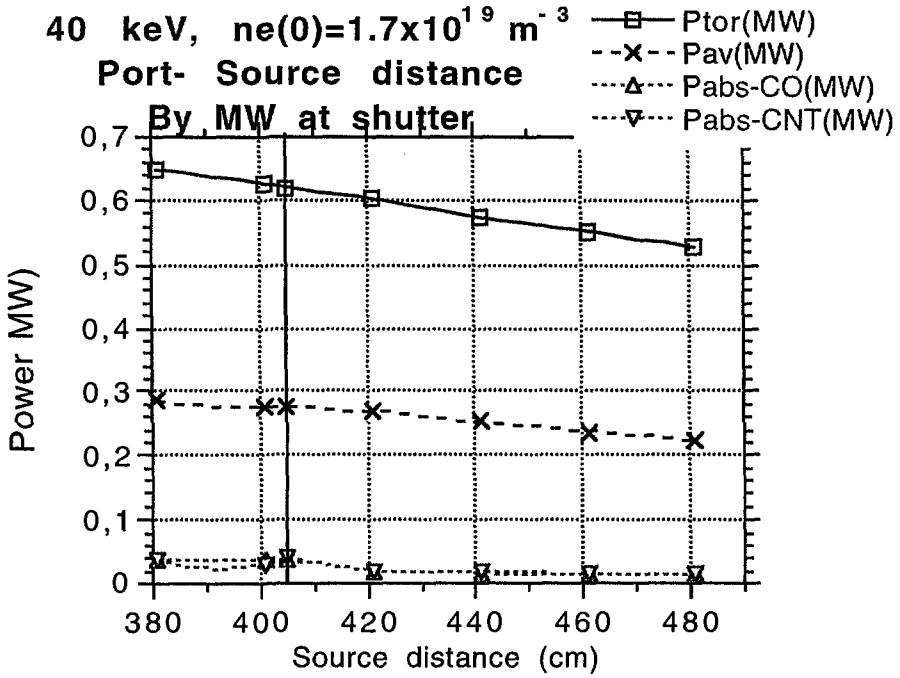


Fig.3.1.1

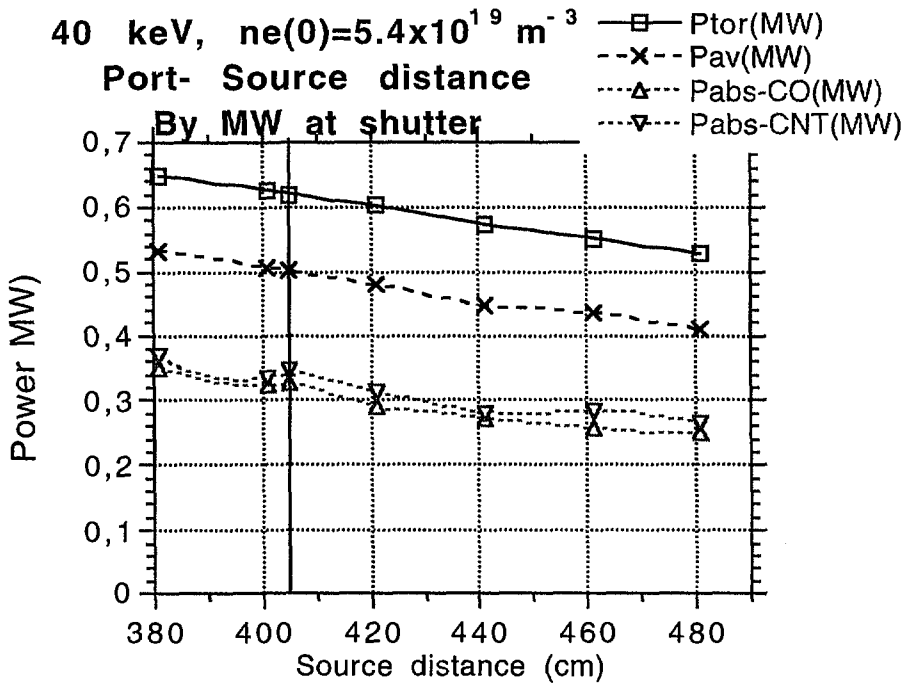


Fig.3.1.2

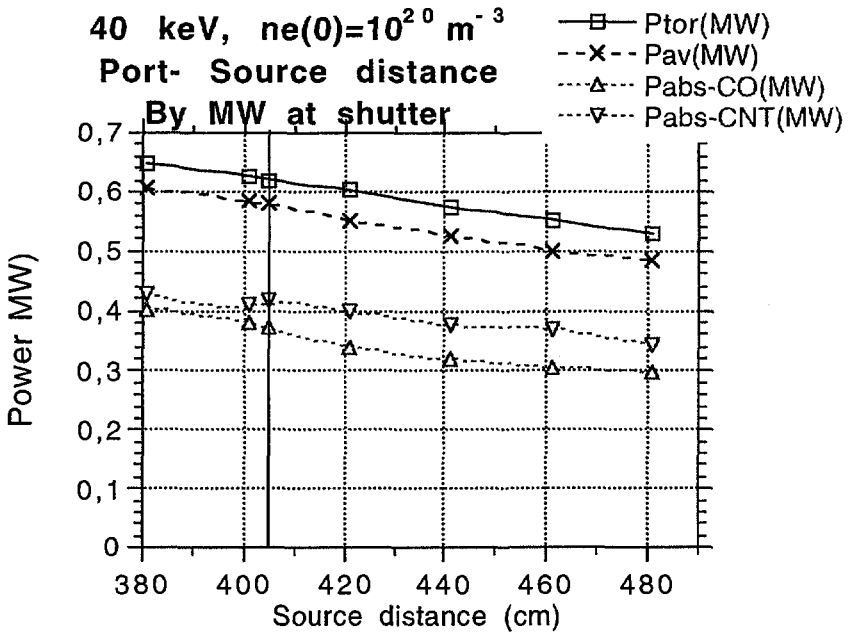


Fig.3.1.3

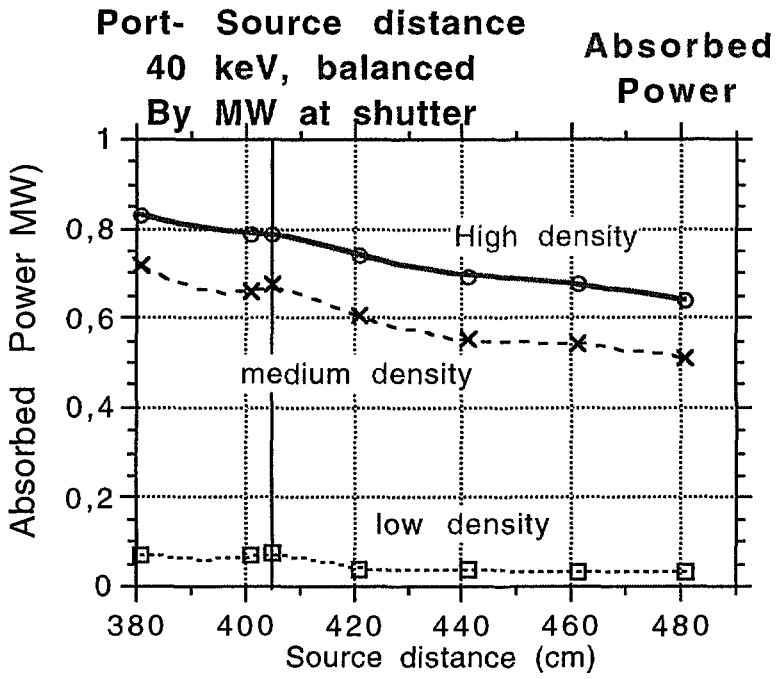


Fig.3.1.4

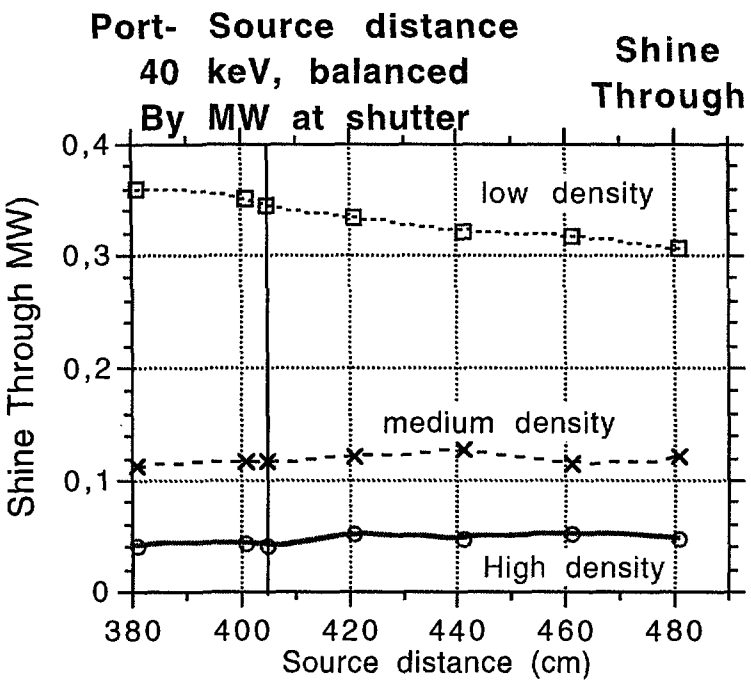

Port- Source distance
40 keV, balanced
By MW at shutter
Shine
Through
Shine Through MW)
0,4
0,3
0,2
0,1
0
low density
medium density
High density
380
400
420
440
460
480
Source distance (cm)

Fig.3.1.5

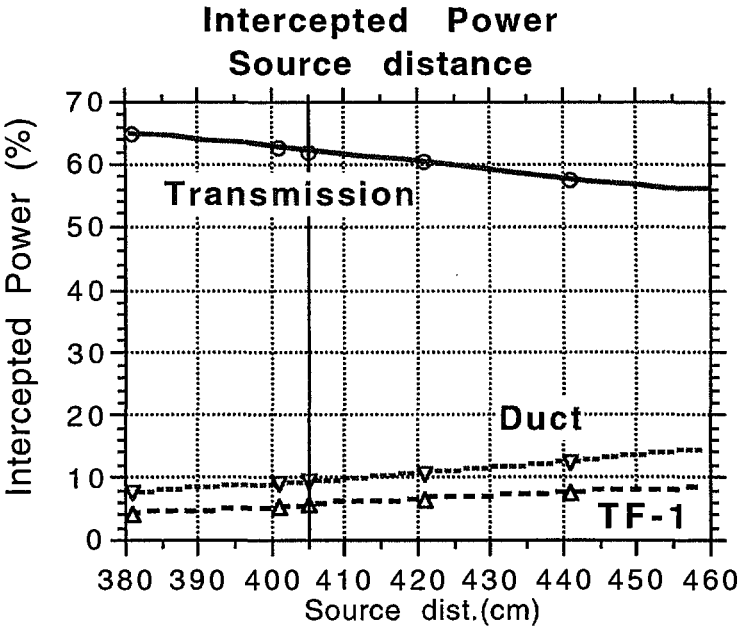


Fig.3.1.6

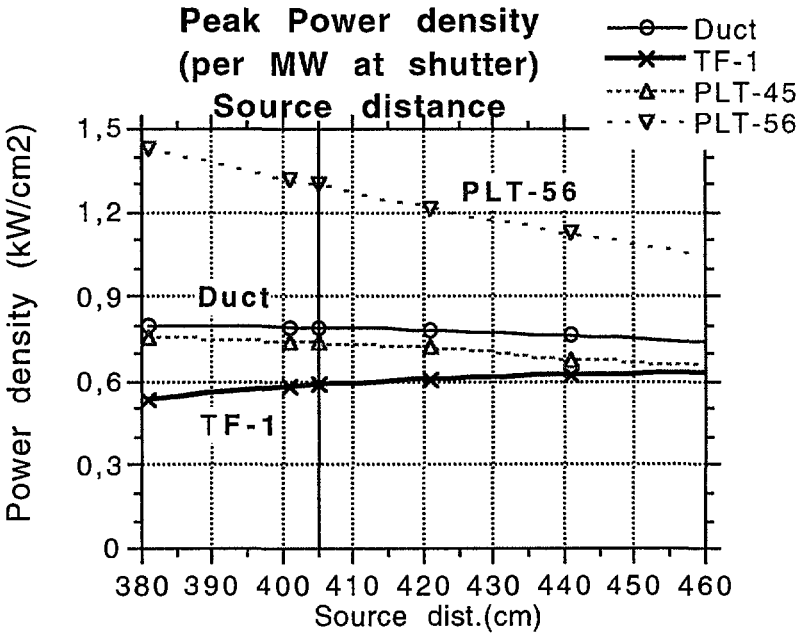


Fig.3.1.7

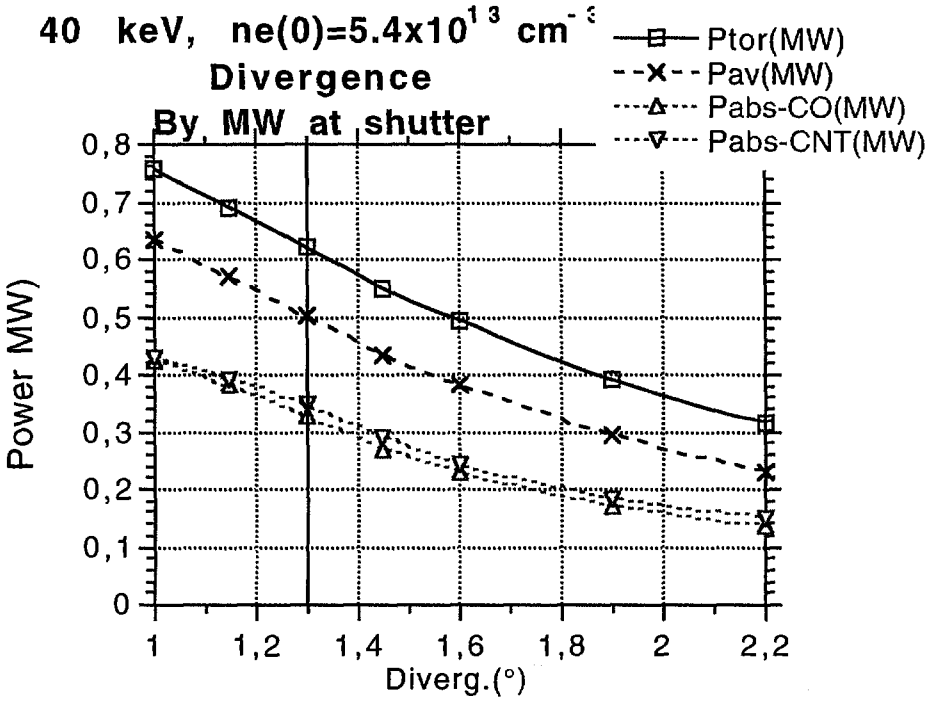

40 keV, ne(0)=5.4x10^13 cm^-3
Divergence
By MW at shutter
Ptor(MW)
Pav(MW)
Pabs-CO(MW)
Pabs-CNT(MW)
Power MW)
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
1
1,2
1,4
1,6
1,8
2
2,2
Diverg.(°)

Fig.3.2.1

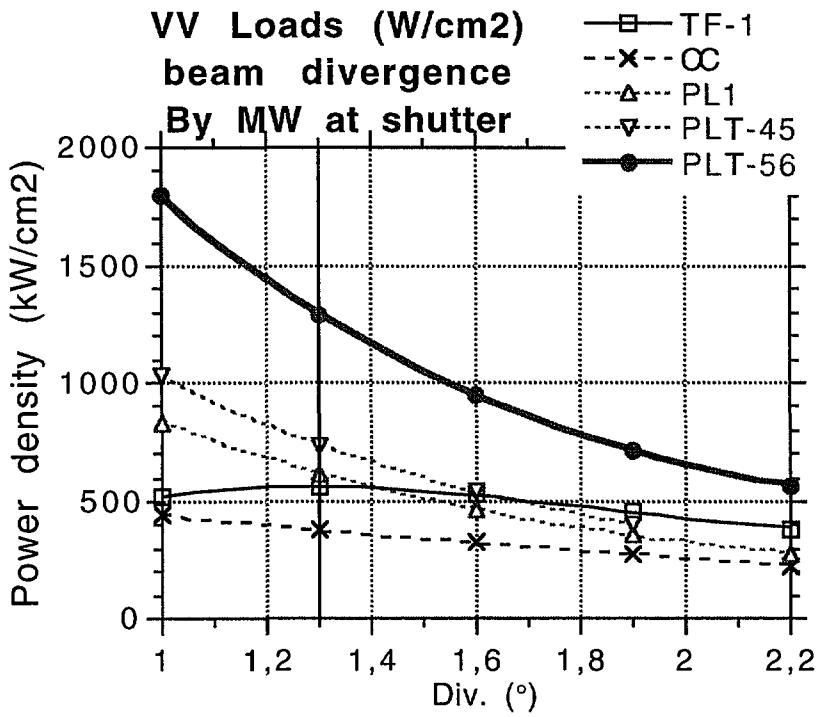


Fig.3.2.2

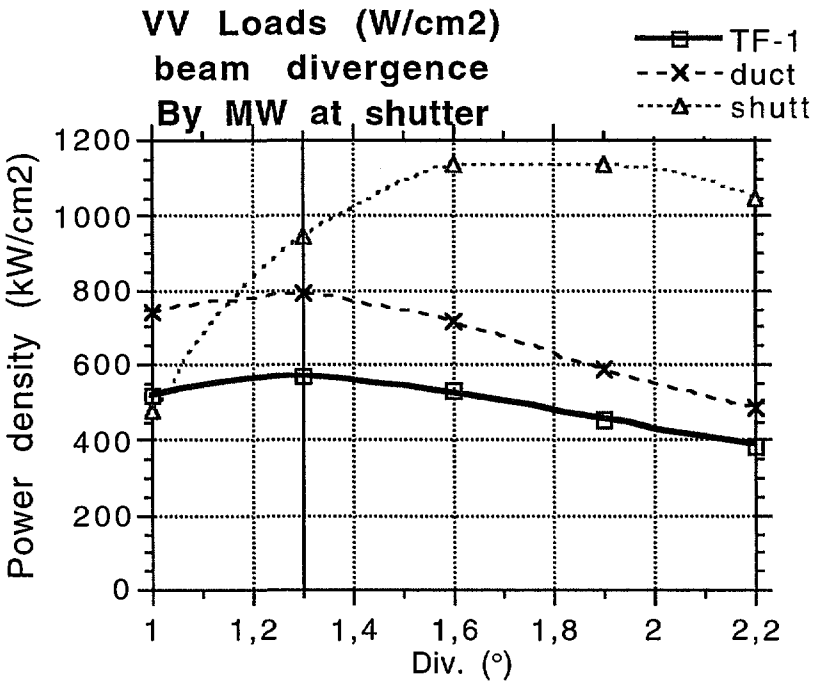
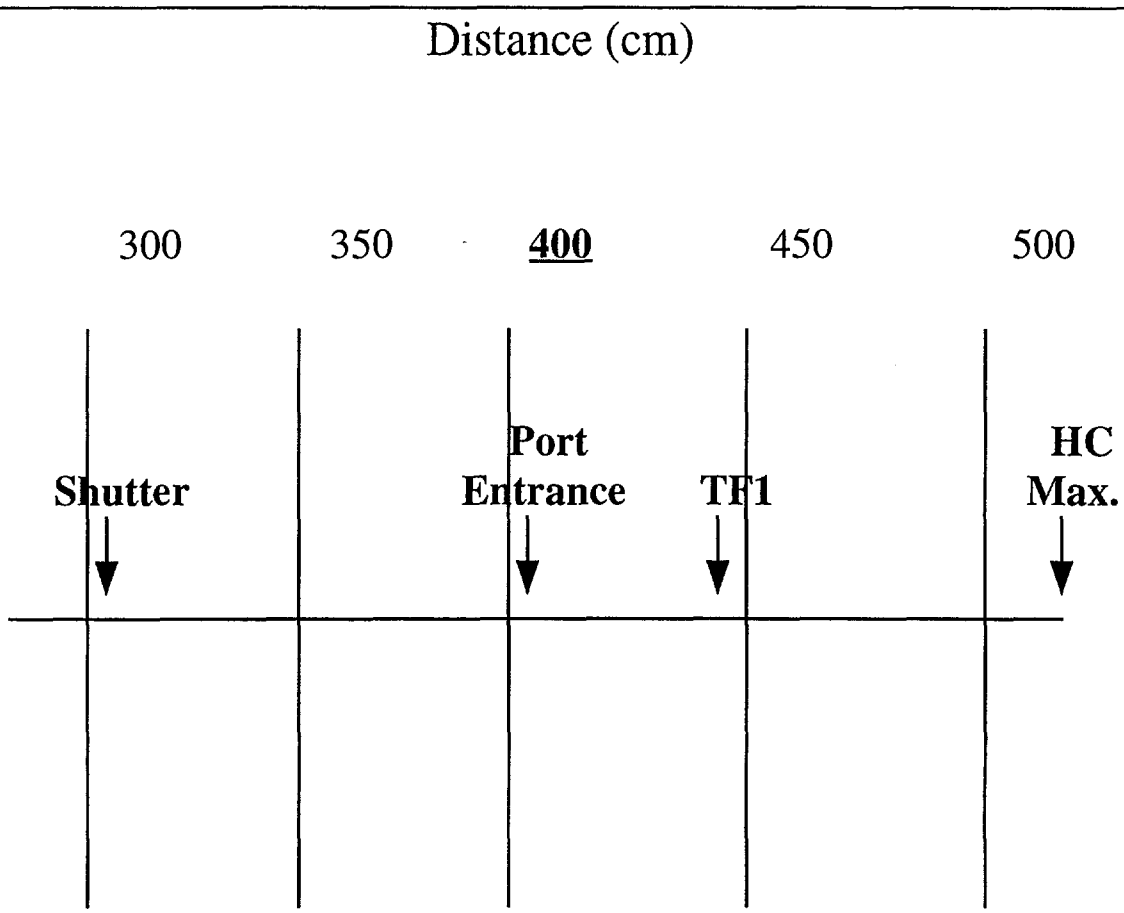


Fig.3.2.3



Distances to Ion Source

Shutter	303 cm
Port	405 cm
Prot .TF1	442 cm
HC max.	534 cm
Prot..PL45	599 cm
PL1 max.	630 cm
Prot..PL56	633 cm

Fig.3.3.1

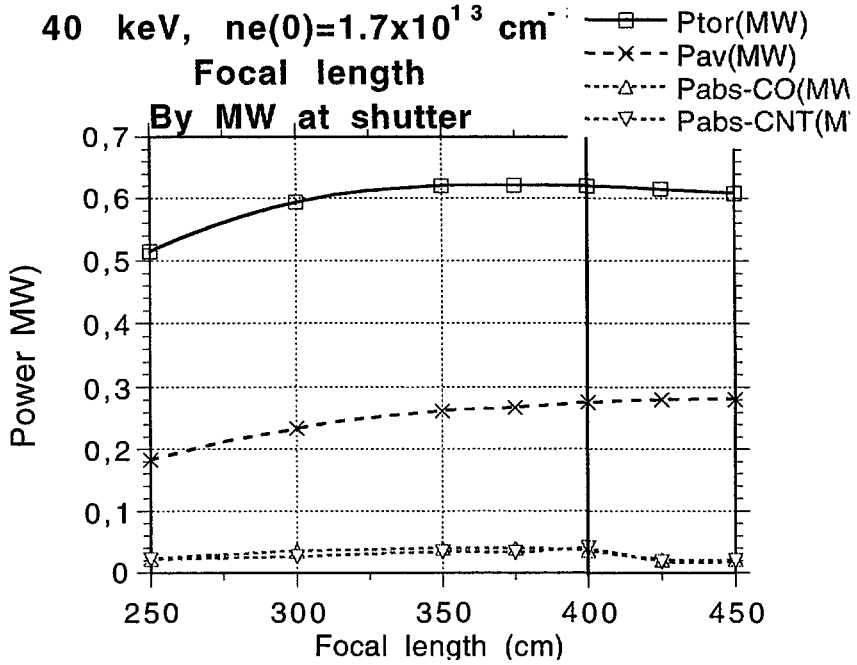


Fig.3.3.2

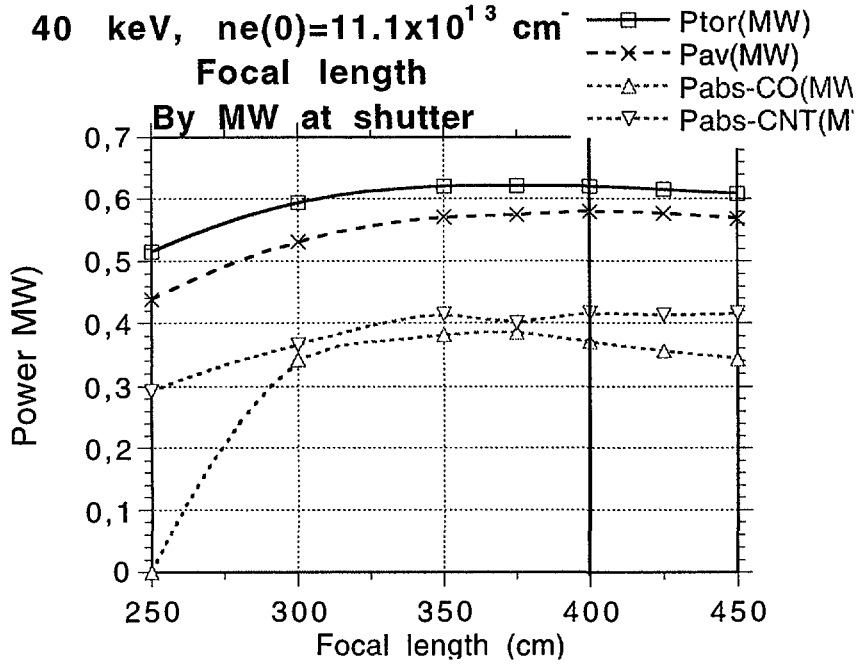


Fig.3.3.3

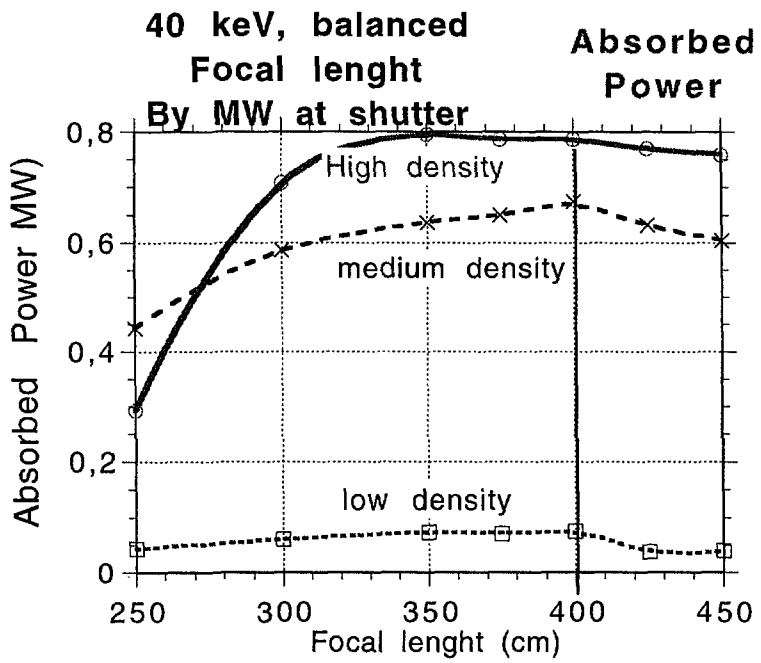


Fig.3.3.4

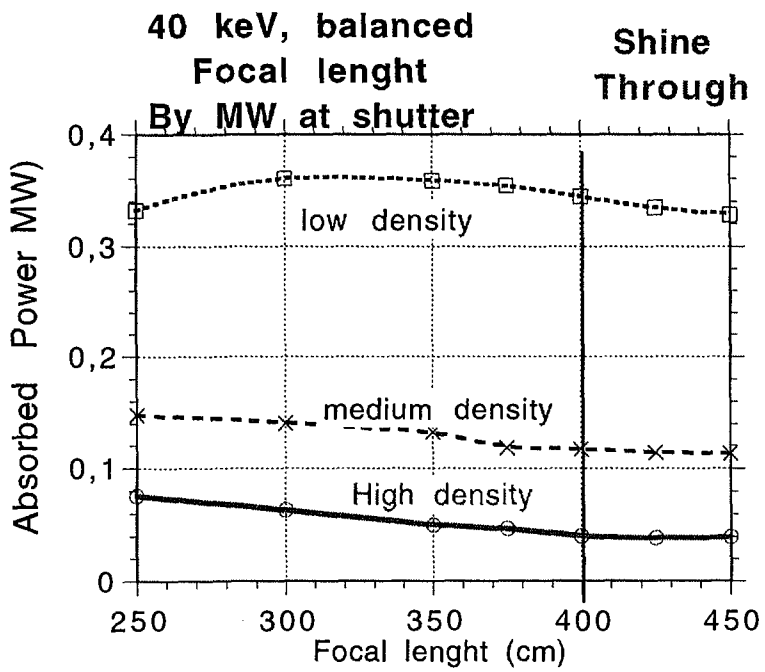


Fig.3.3.5

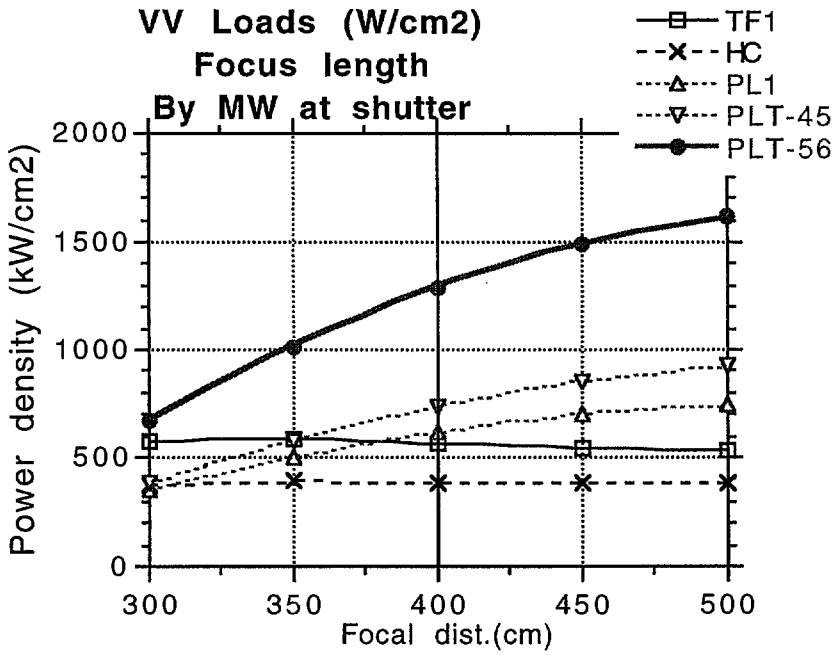


Fig.3.3.6

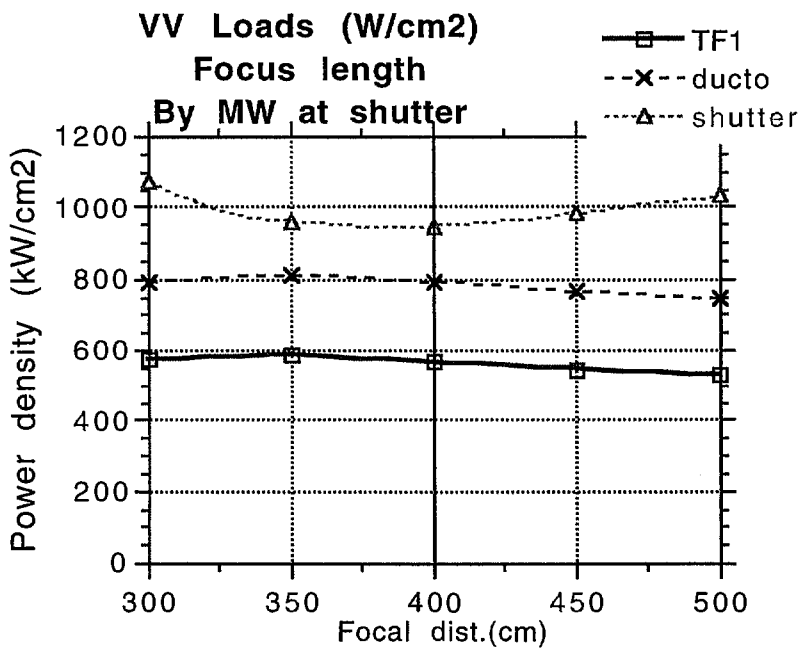


Fig.3.3.7

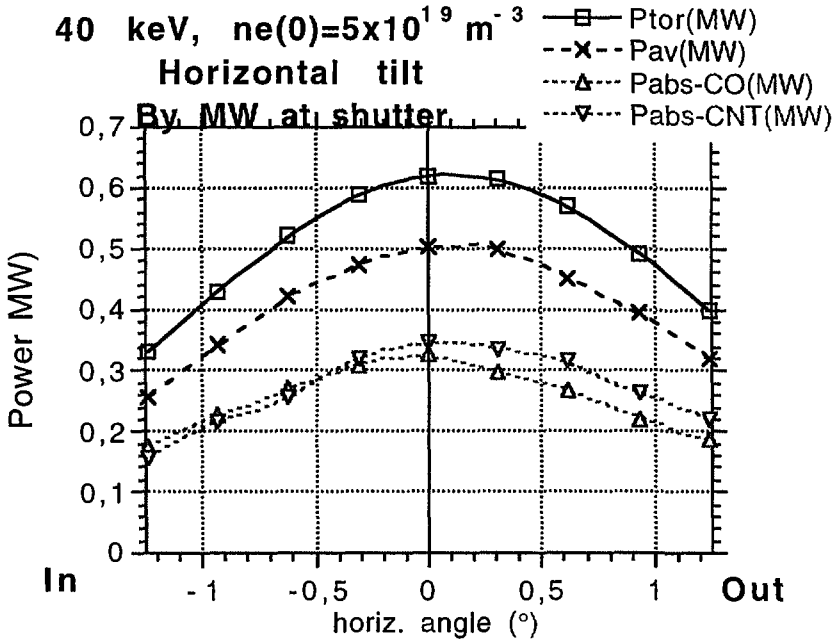


Fig.4.1.1

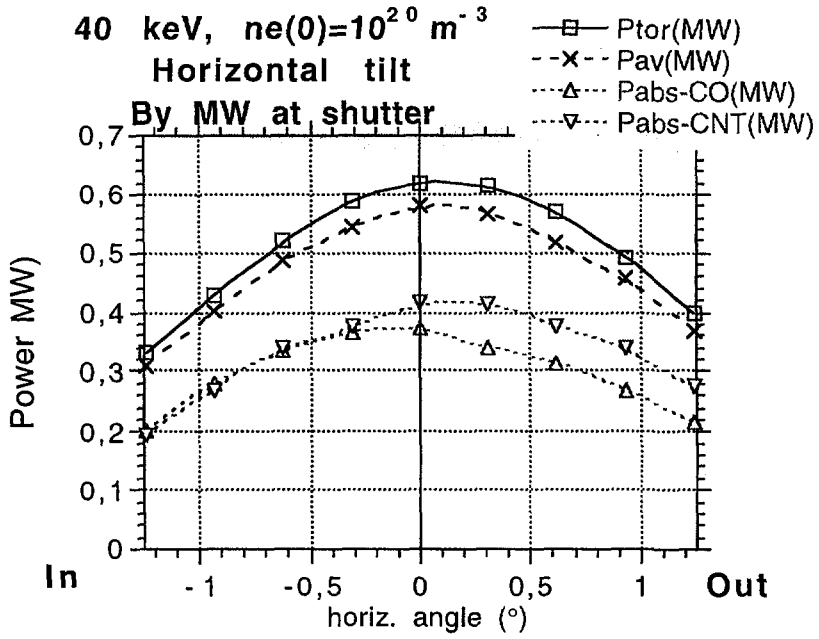


Fig.4.1.2

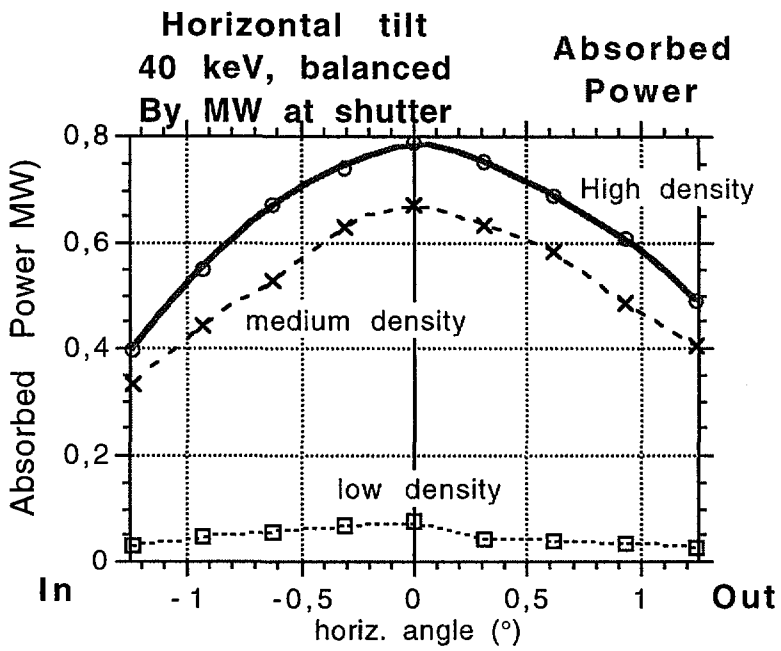


Fig.4.1.3

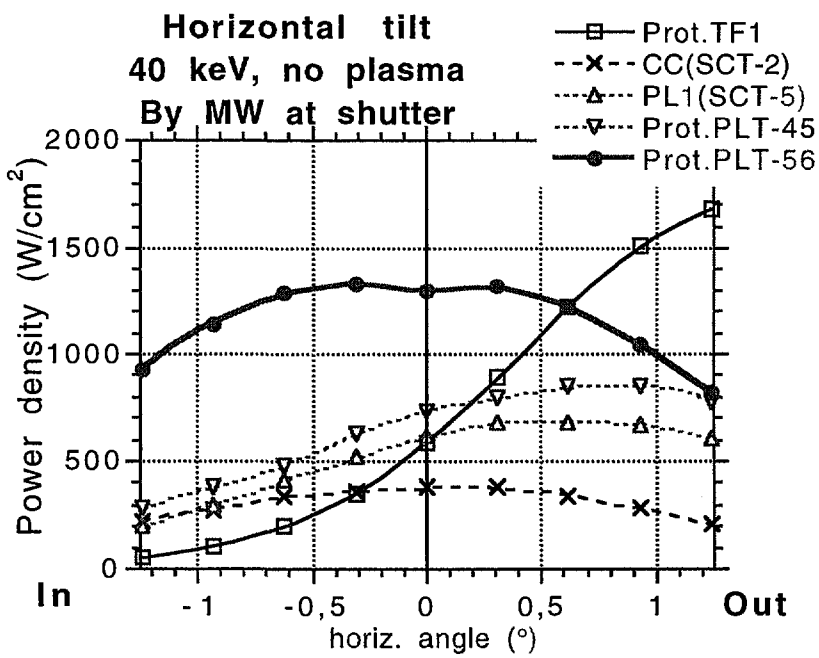


Fig.4.1.4

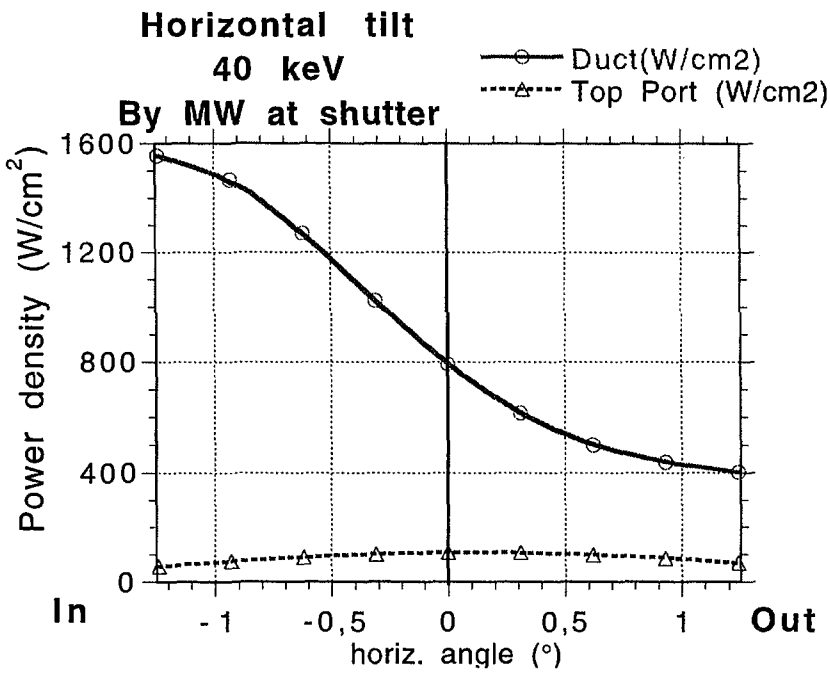

Horizontal tilt
40 keV
By MW at shutter
Duct(W/cm2)
Top Port (W/cm2)
Power density (W/cm2)
1600
1200
800
400
0
In
-1
-0,5
0
0,5
1
Out
horiz. angle (°)

Fig.4.1.5

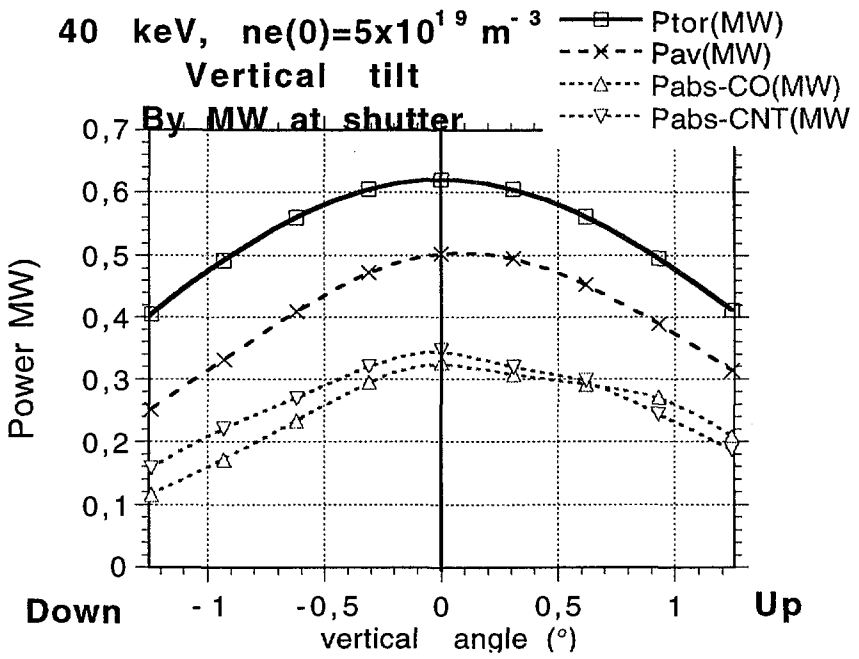


Fig.4.1.6

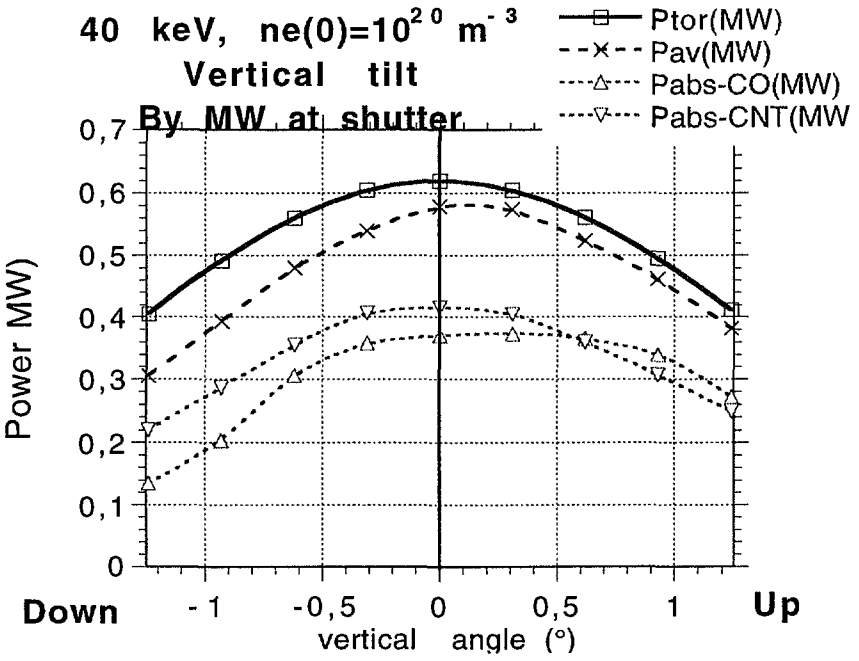


Fig.4.1.7

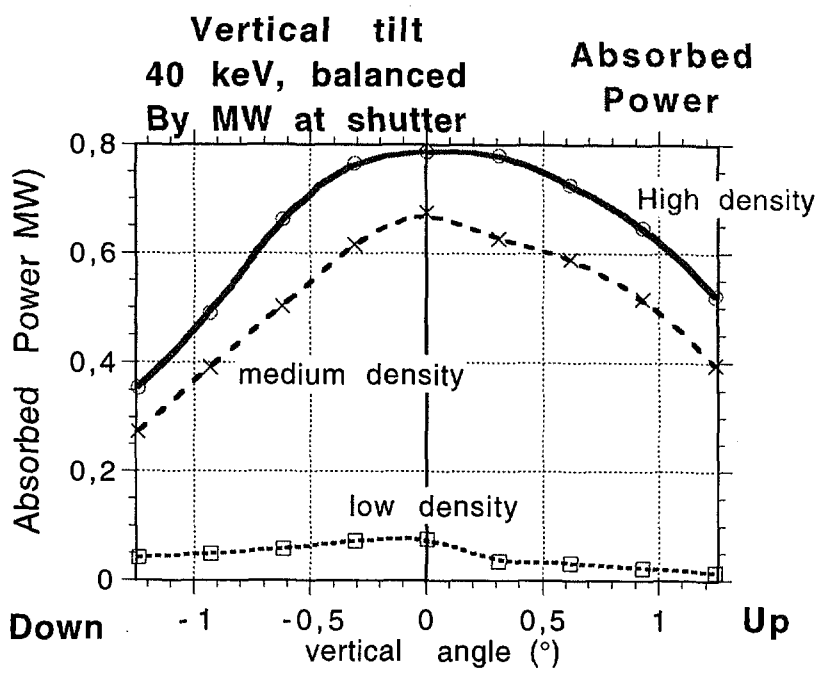


Fig.4.1.8

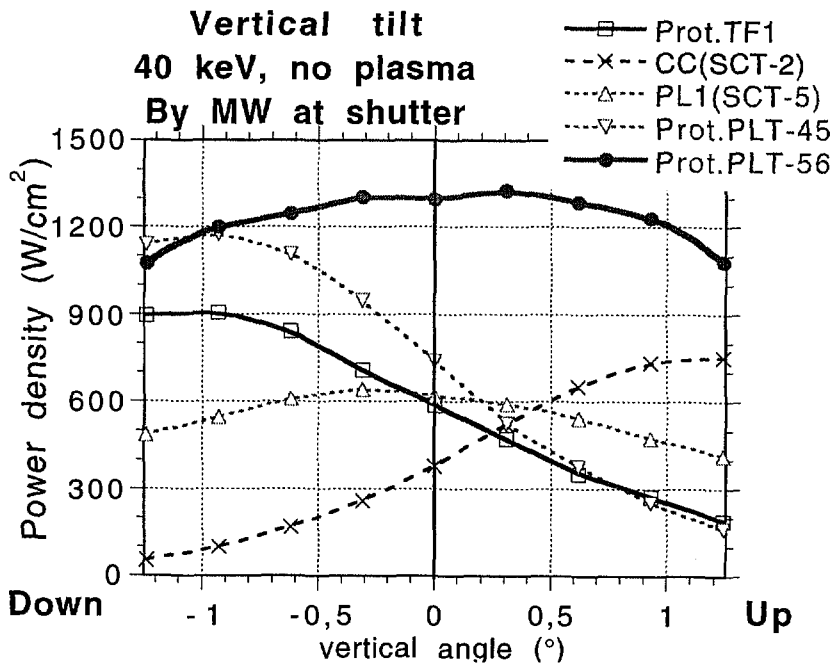


Fig.4.1.9

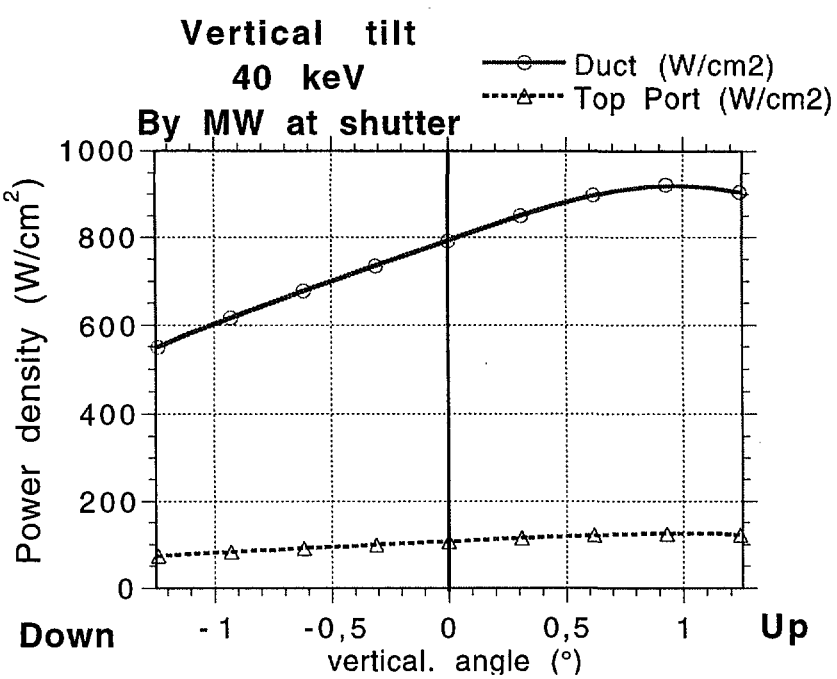

Vertical tilt
40 keV
By MW at shutter
Duct (W/cm2)
Top Port (W/cm2)
Power density (W/cm2)
1000
800
600
400
200
0
Down
-1
-0,5
0
0,5
1
Up
vertical. angle (°)

Fig.4.1.10

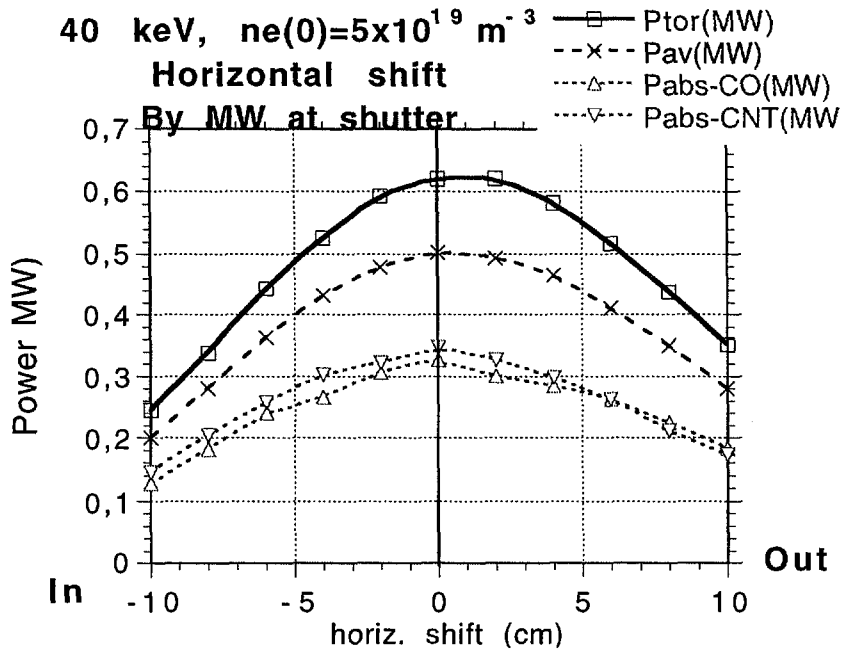


Fig.4.2.1

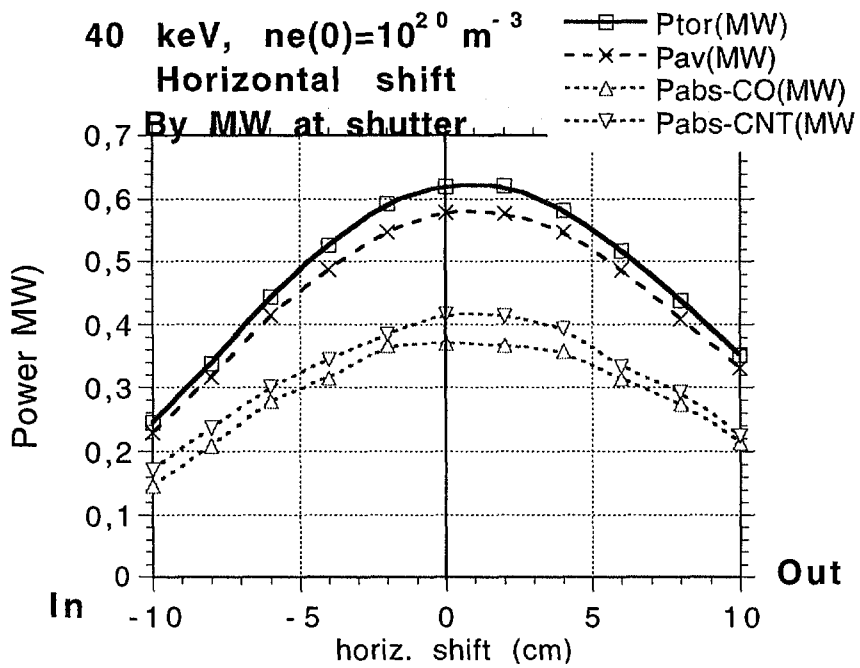


Fig.4.2.2

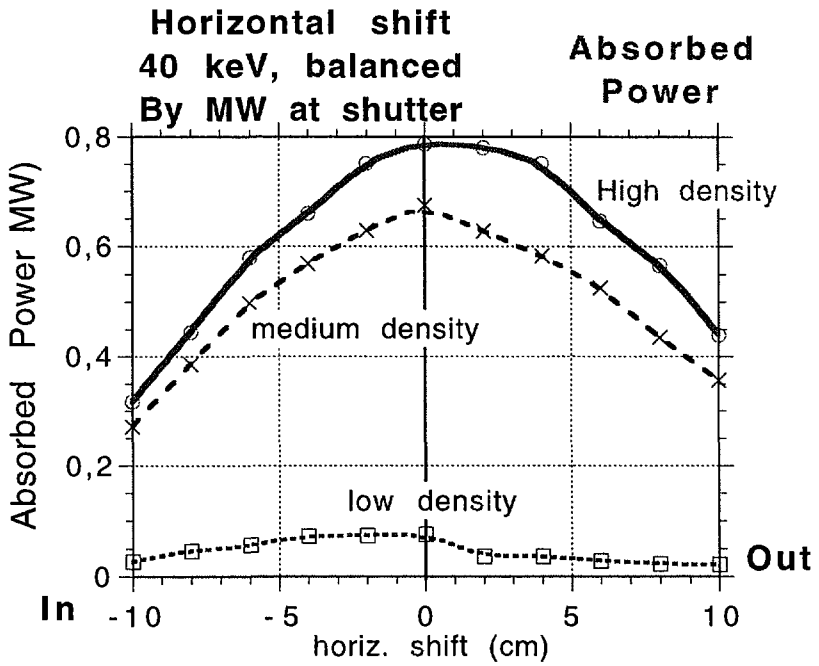


Fig.4.2.3

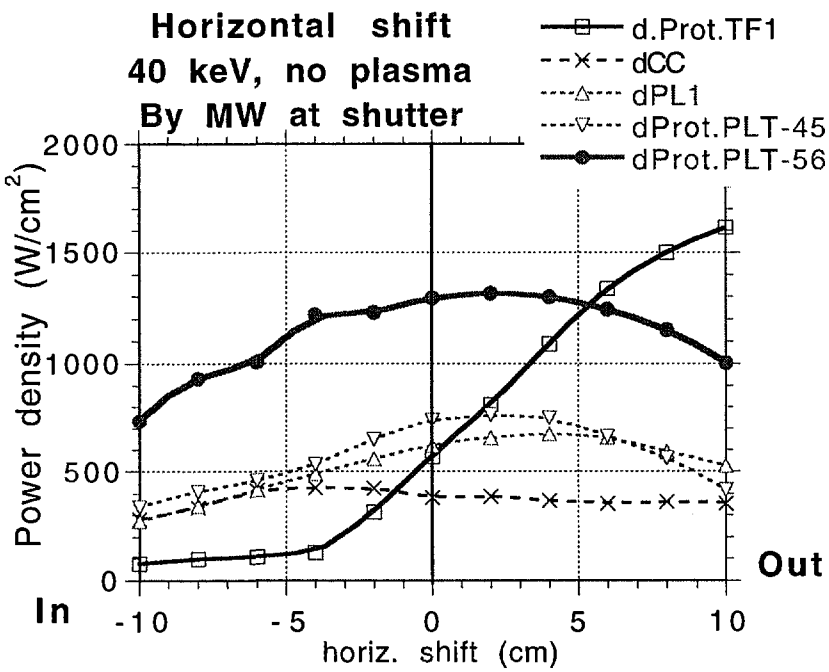


Fig.4.2.4

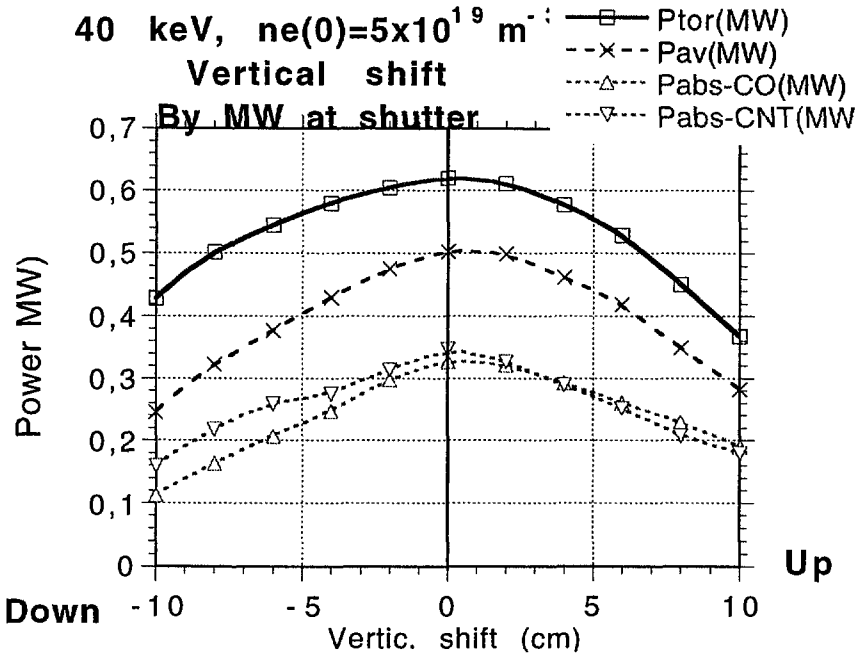


Fig.4.2.5

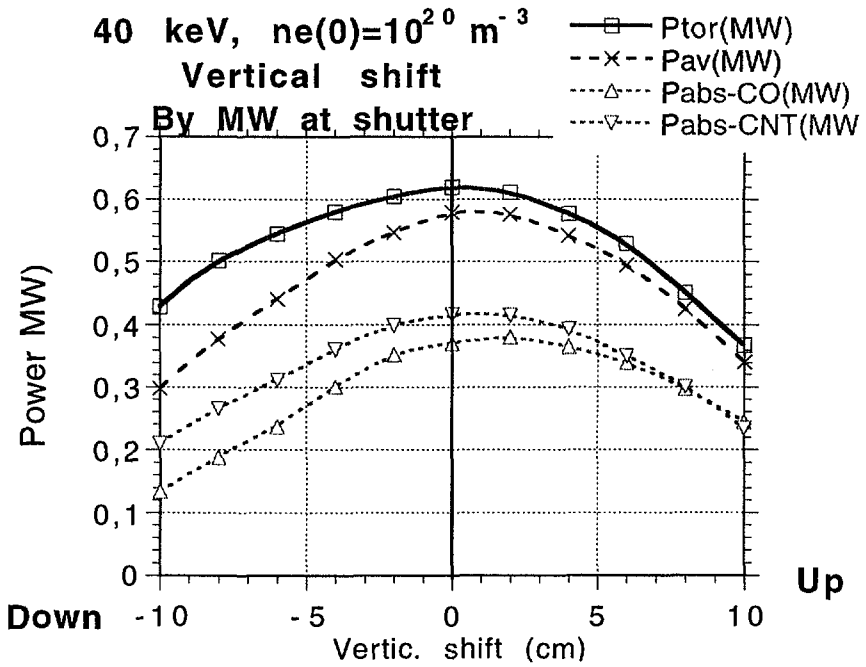


Fig.4.2.6

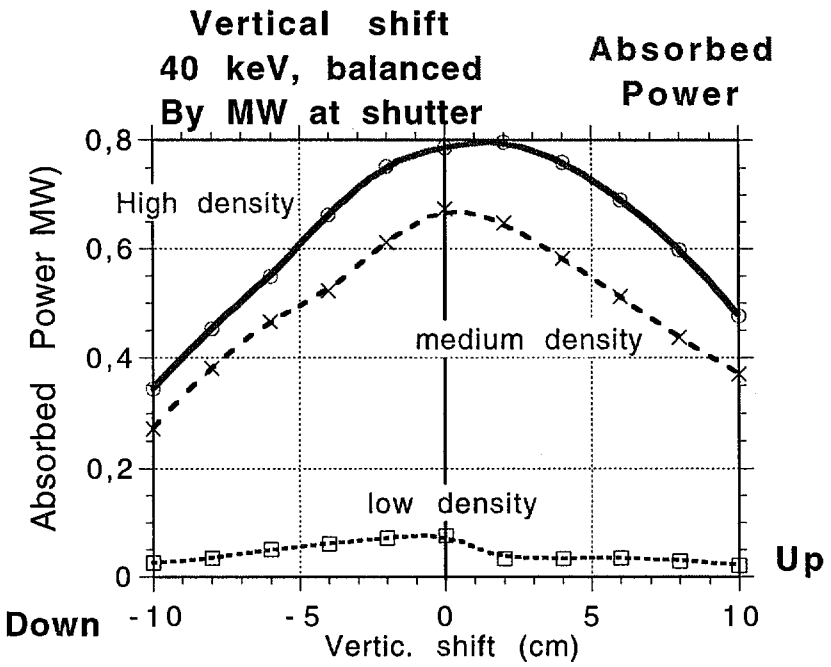


Fig.4.2.7

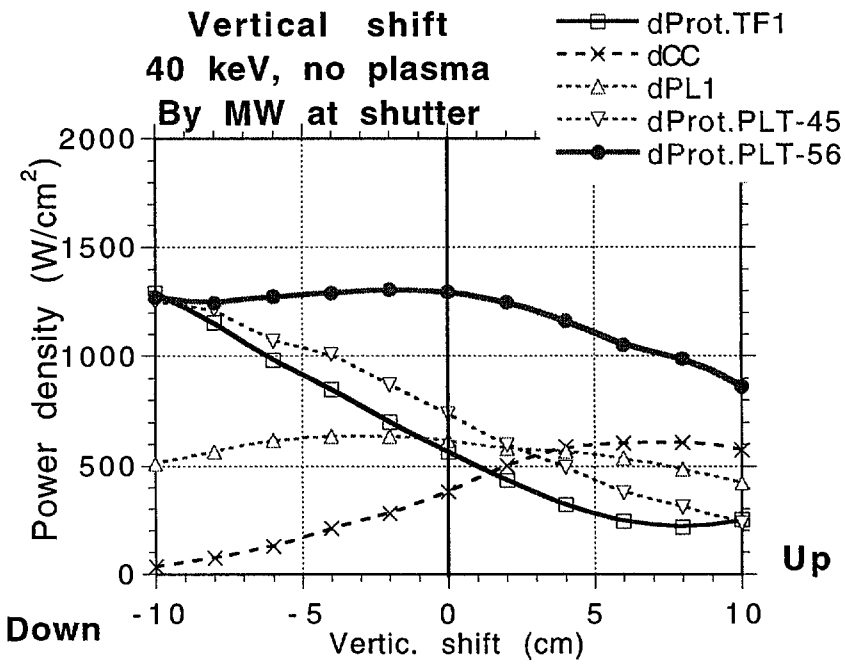


Fig.4.2.8

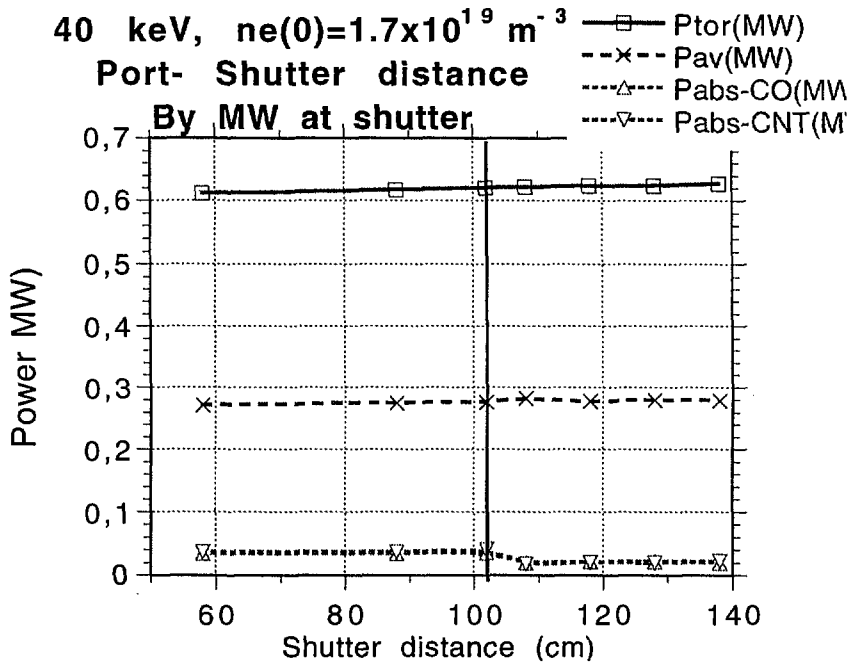


Fig.5.1.1

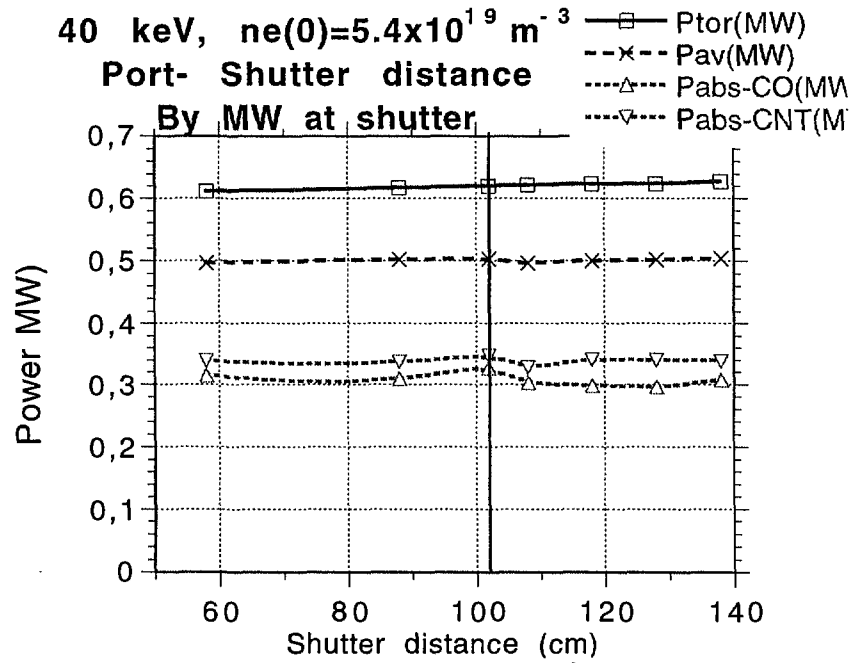


Fig.5.1.2

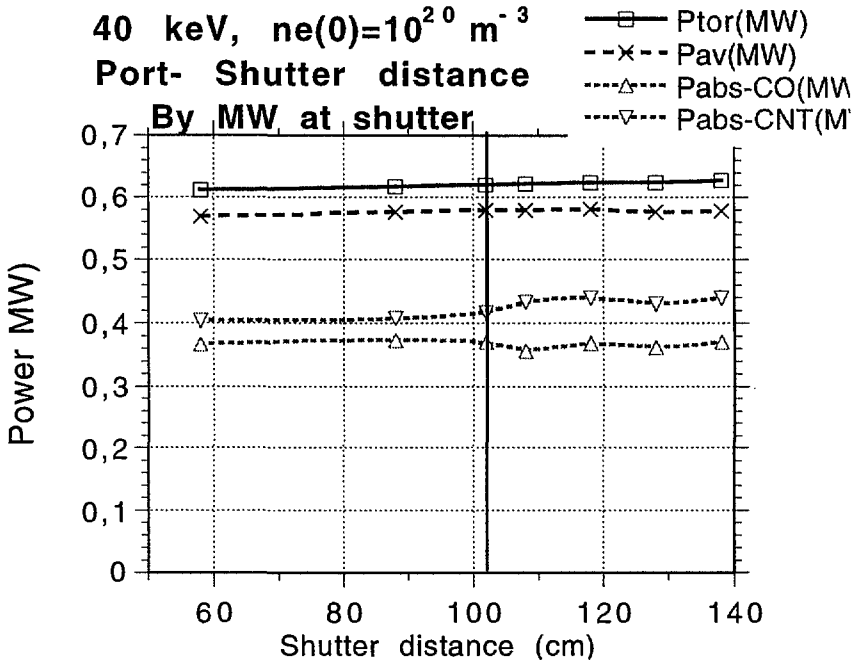


Fig.5.1.3

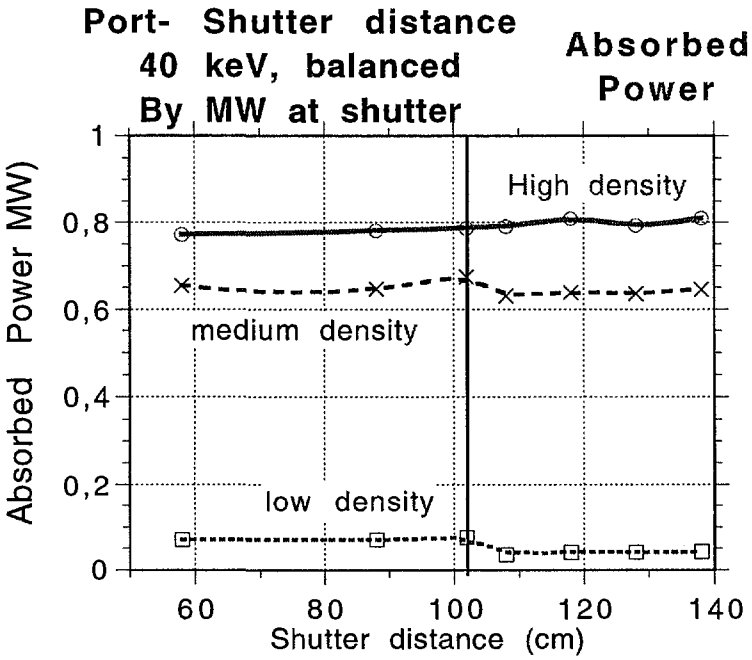


Fig.5.1.4

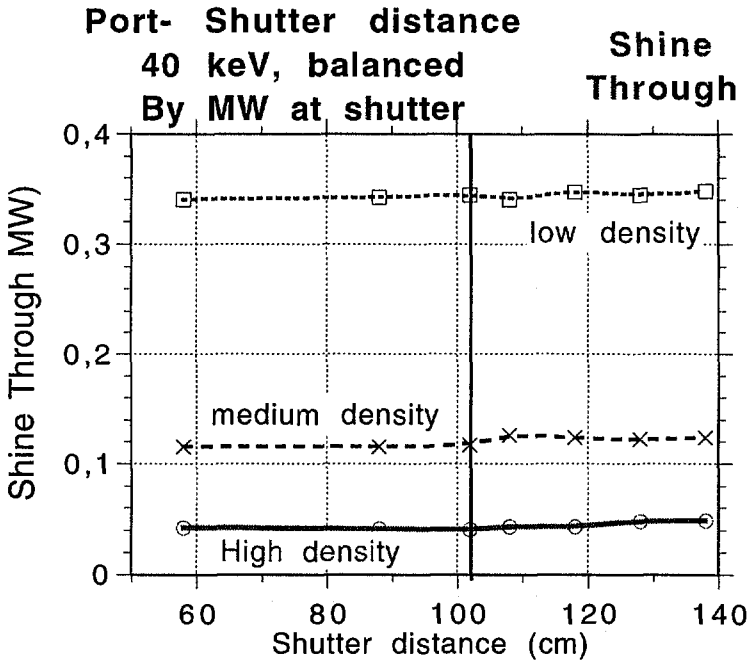

Port- Shutter distance
40 keV, balanced
By MW at shutter
Shine
Through
Shine Through MW)
0,4
0,3
0,2
0,1
0
low density
medium density
High density
60
80
100
120
140
Shutter distance (cm)

Fig.5.1.5

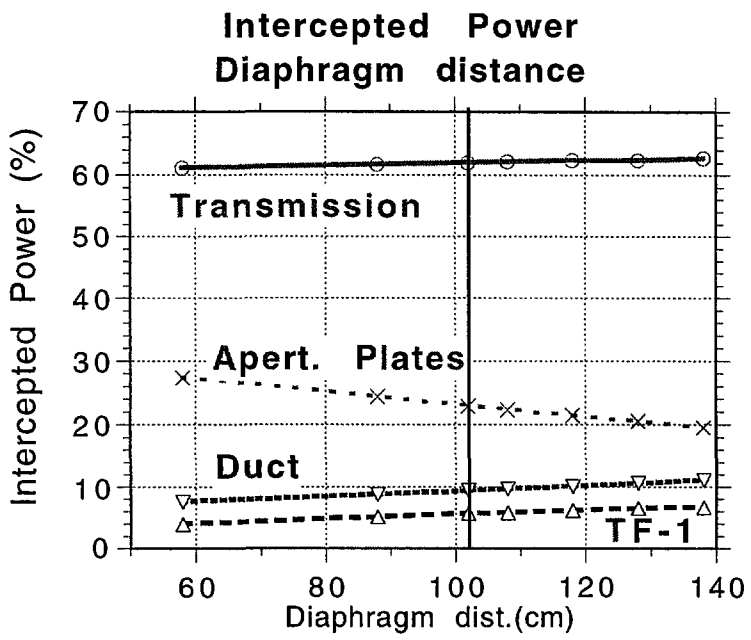


Fig.5.1.6

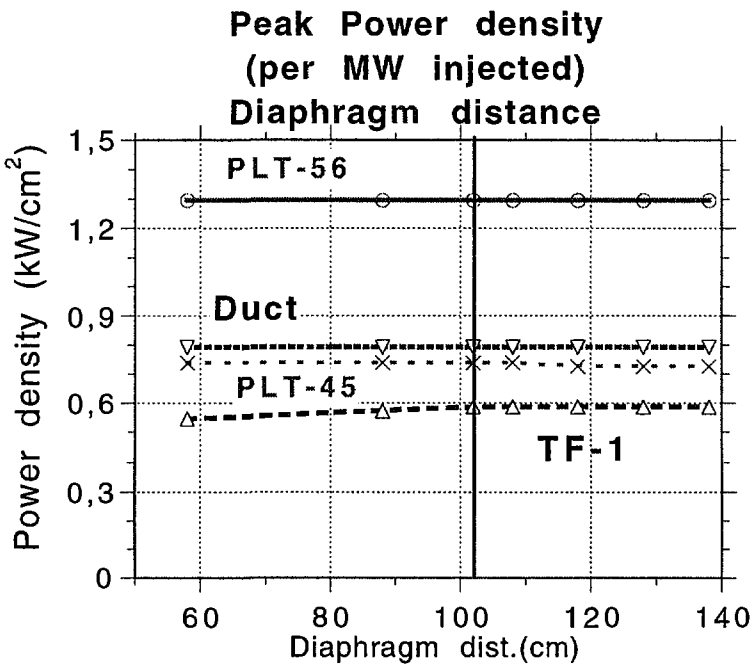


Fig.5.1.7

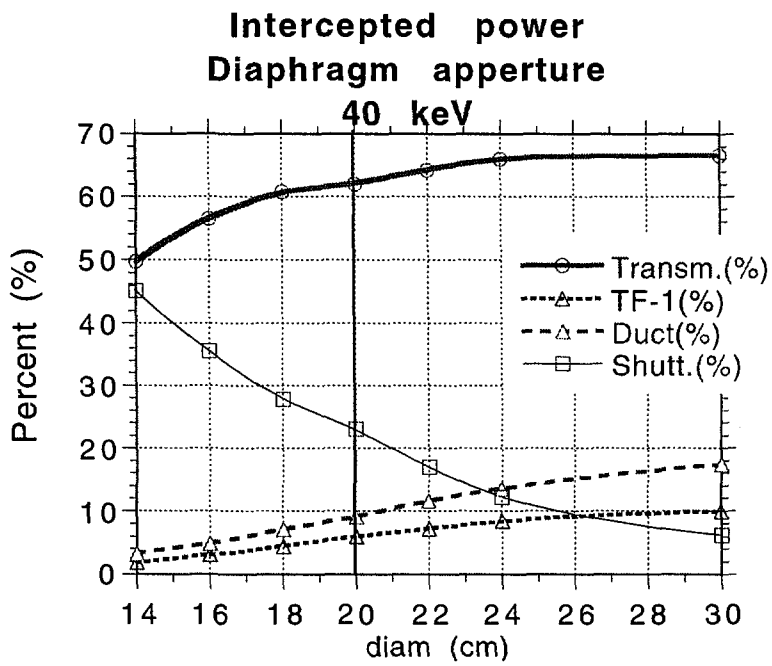


Fig.5.2.1

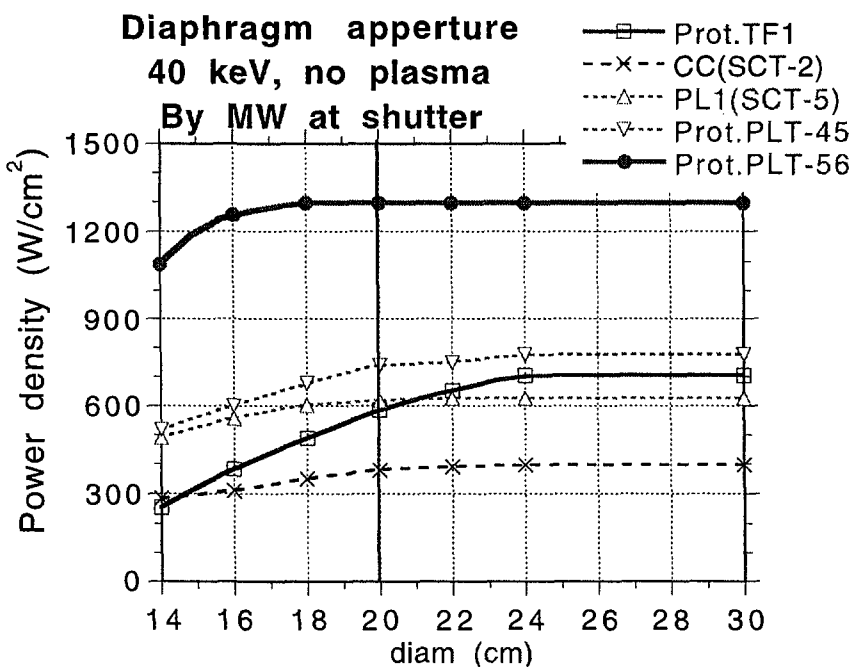


Fig.5.2.2

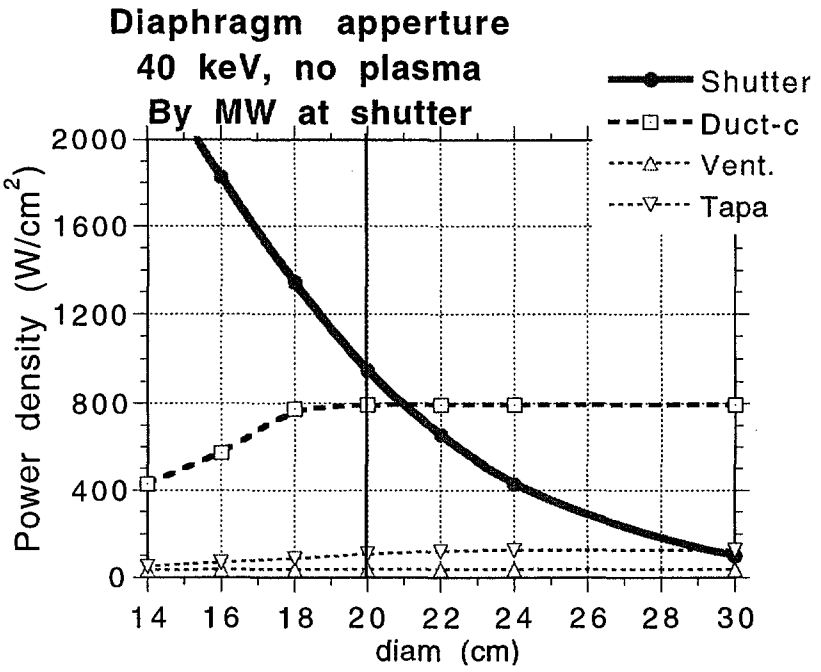


Fig.5.2.3

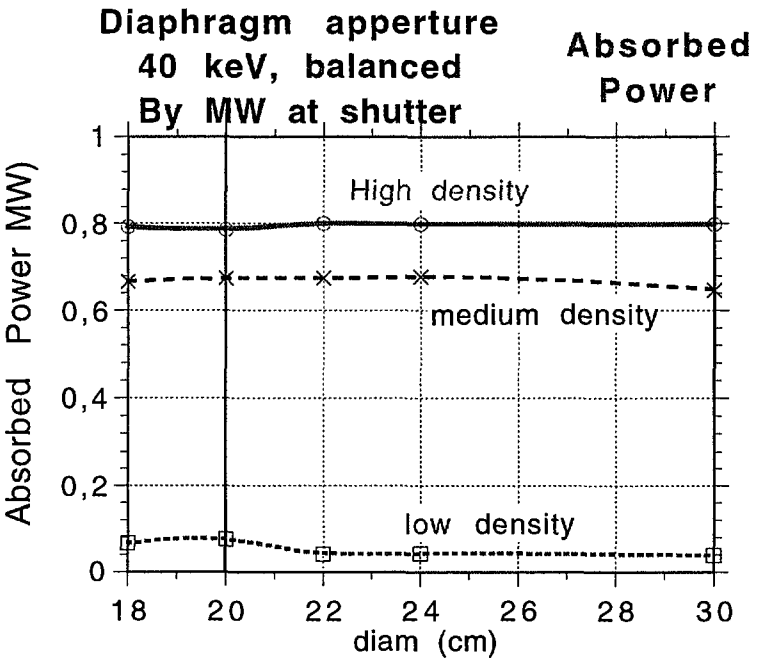


Fig.5.2.4

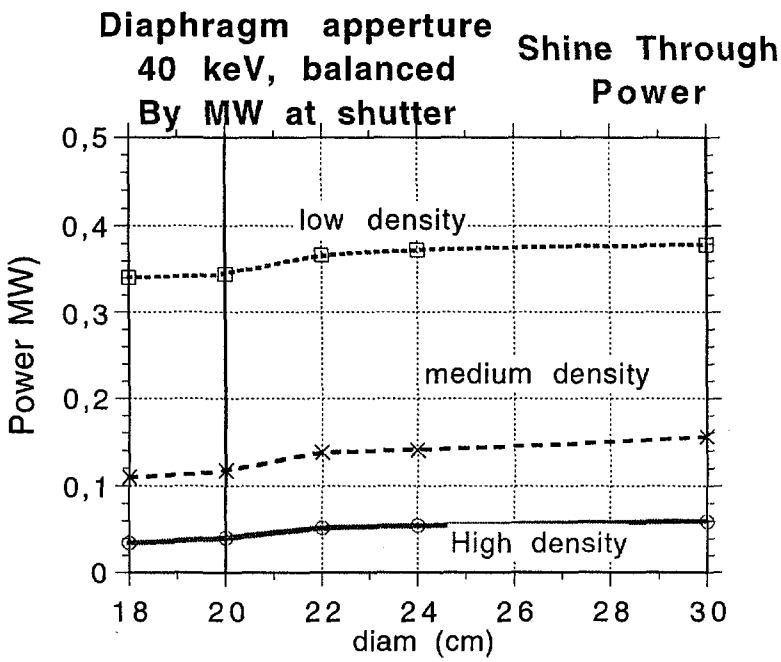

Diaphragm apperture
40 keV, balanced
By MW at shutter
Shine Through
Power
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Power MW)
low density
medium density
High density
18
20
22
24
26
28
30
diam (cm)

Fig.5.2.5

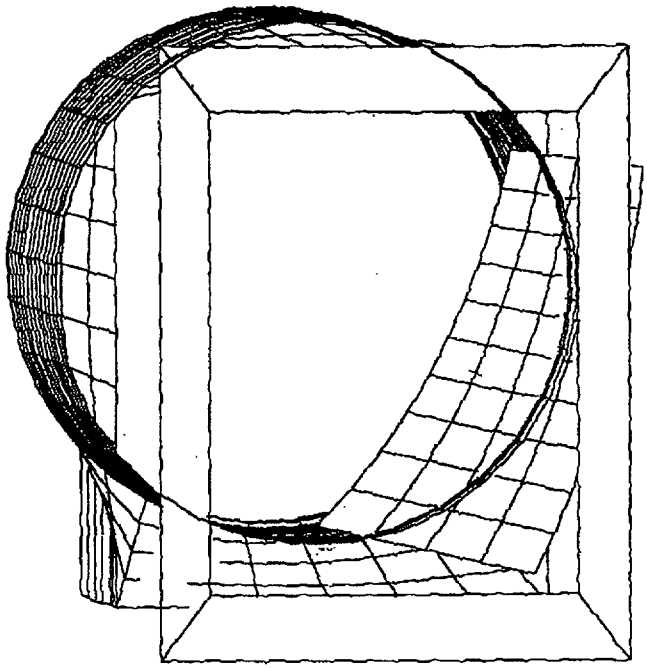


Fig.5.3.1

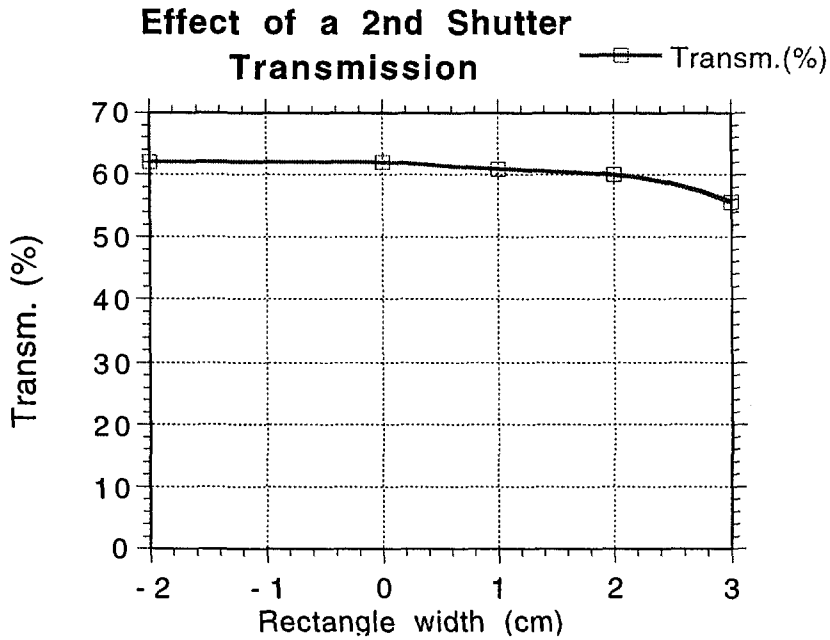


Fig.5.3.2

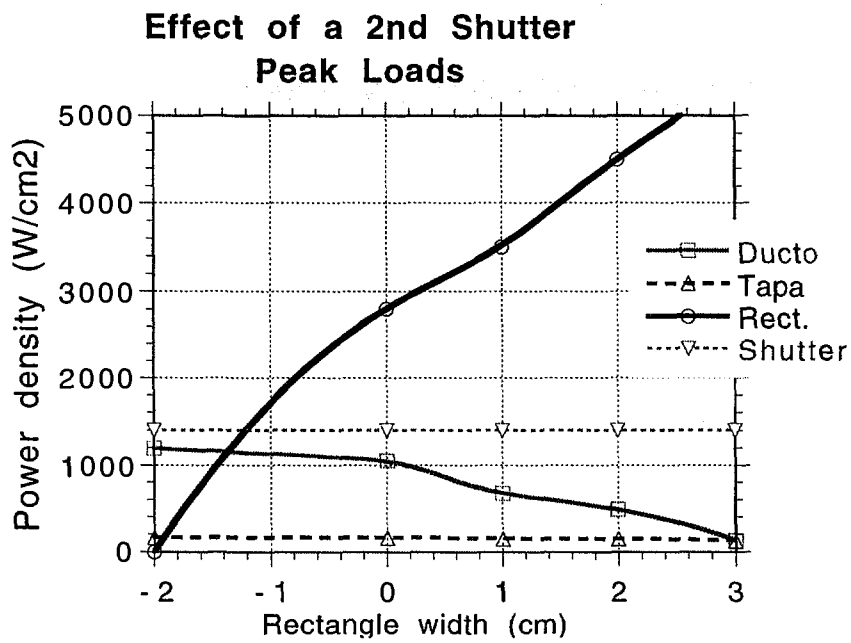


Fig.5.3.3

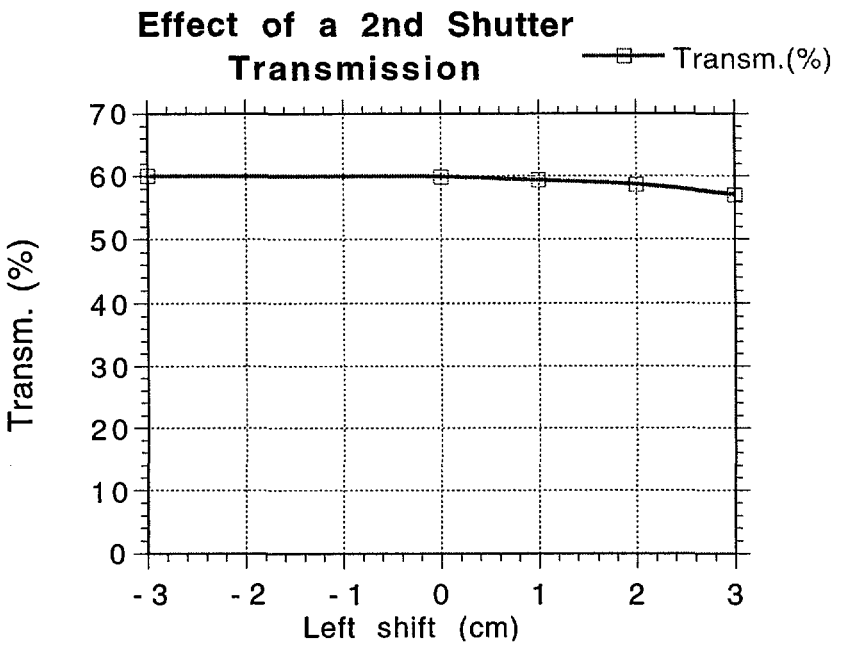


Fig.5.3.4

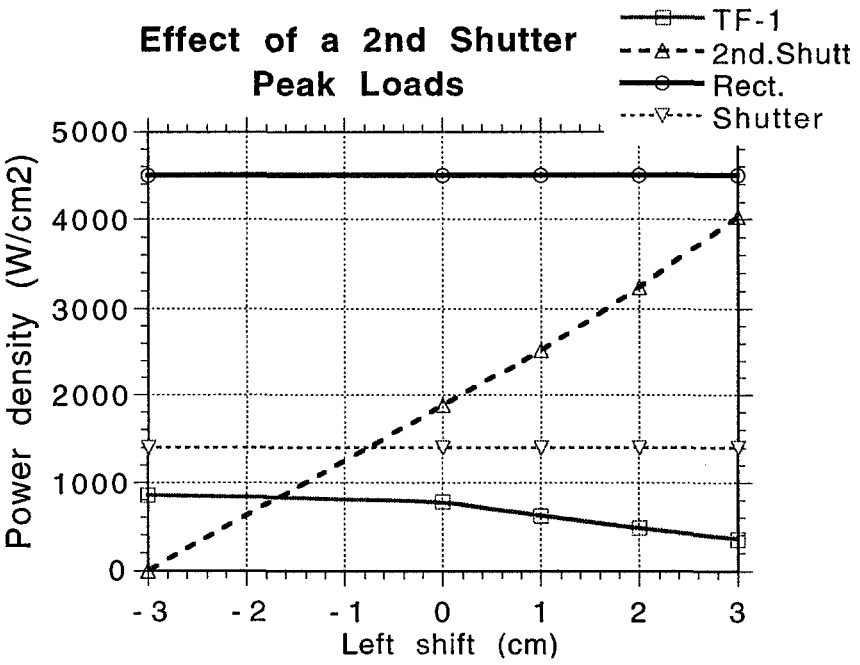


Fig.5.3.5

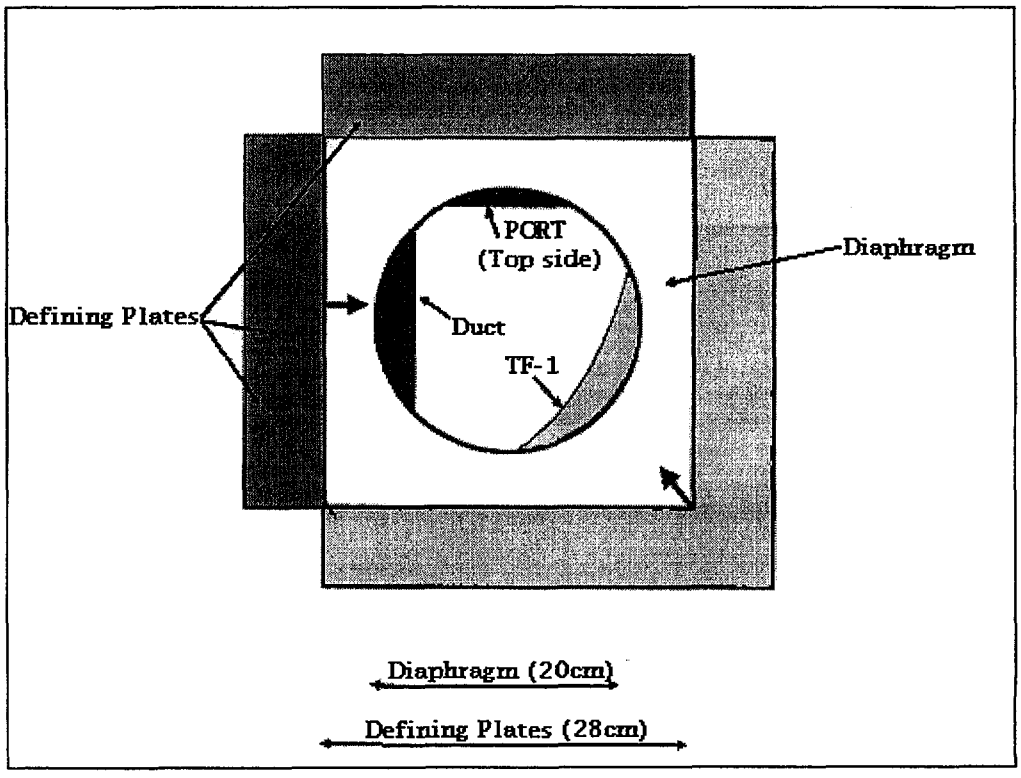

PORT
(Top side)
Diaphragm
Defining Plates
Duct
TF-1
Diaphragm (20cm)
Defining Plates (28cm)

Fig.5.4.1

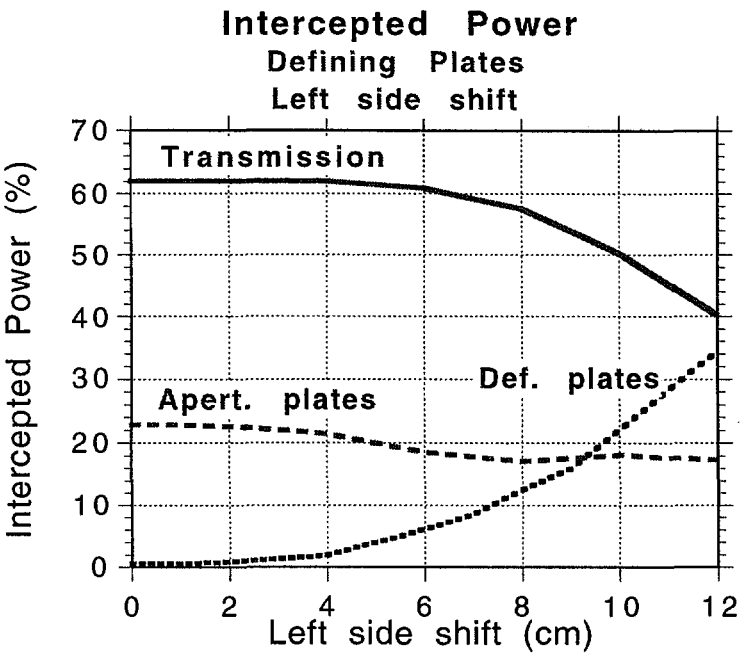


Fig.5.4.2

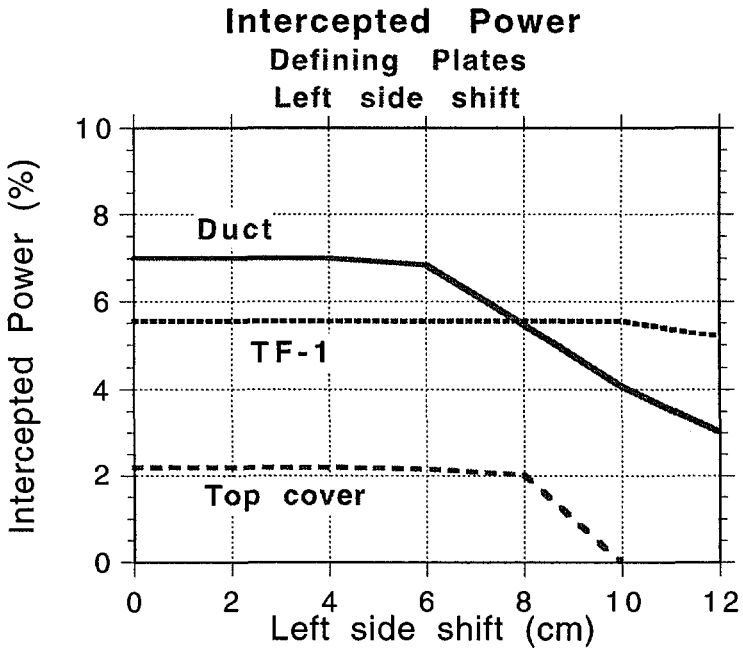


Fig.5.4.3

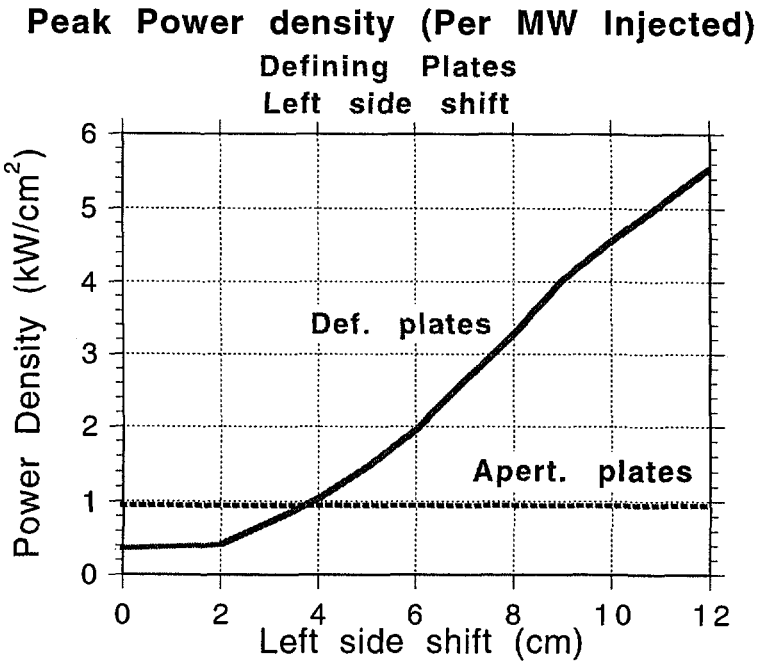


Fig.5.4.4

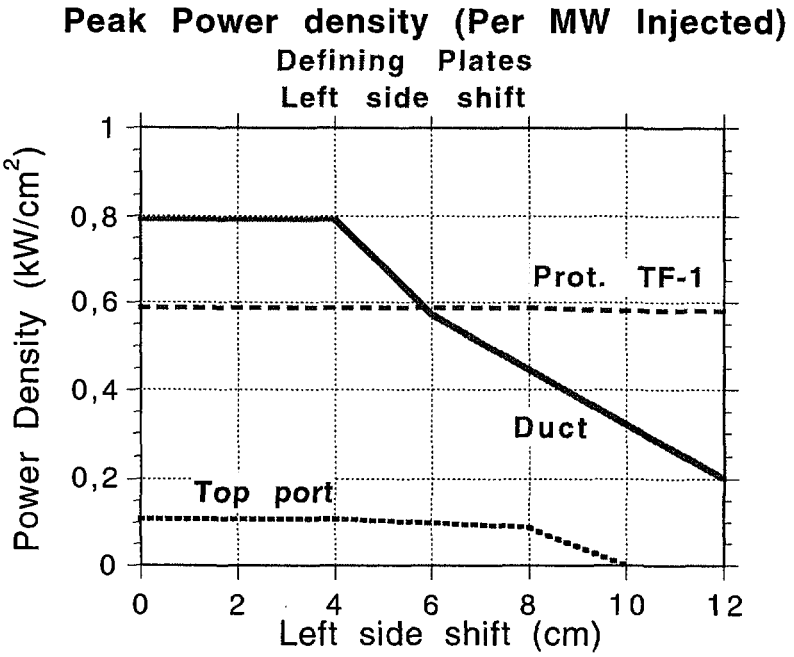


Fig.5.4.5

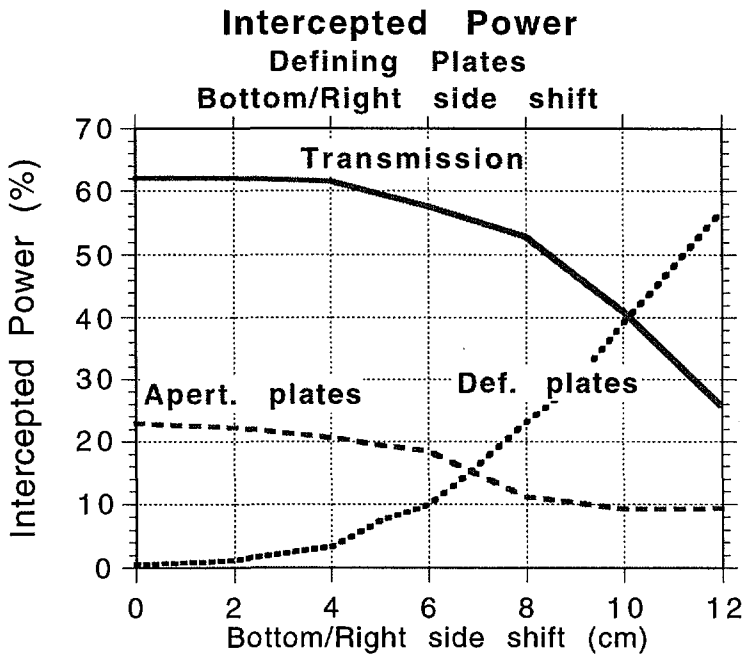


Fig.5.4.6

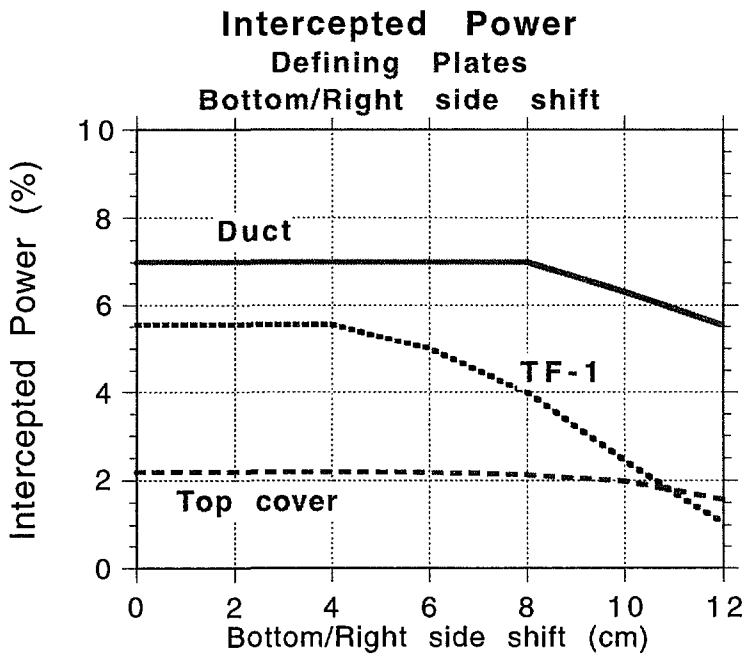


Fig.5.4.7

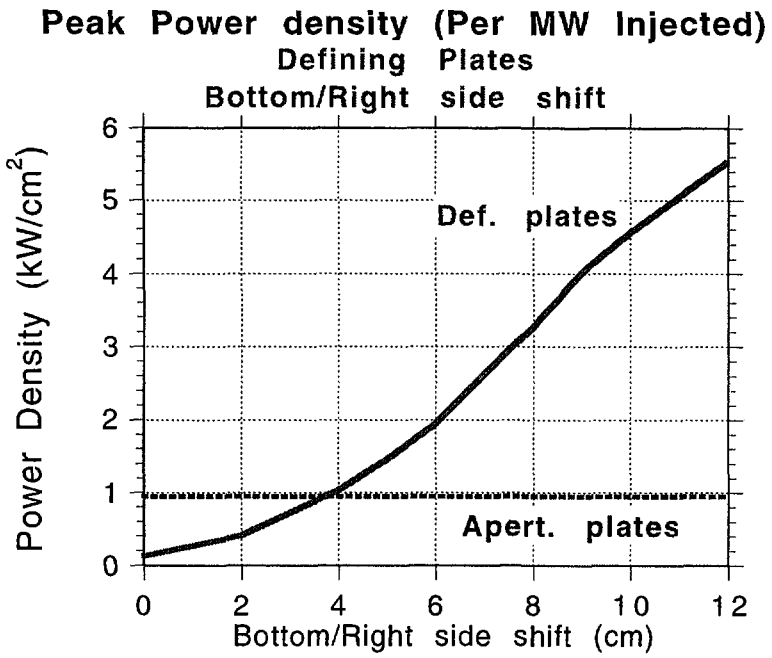


Fig.5.4.8

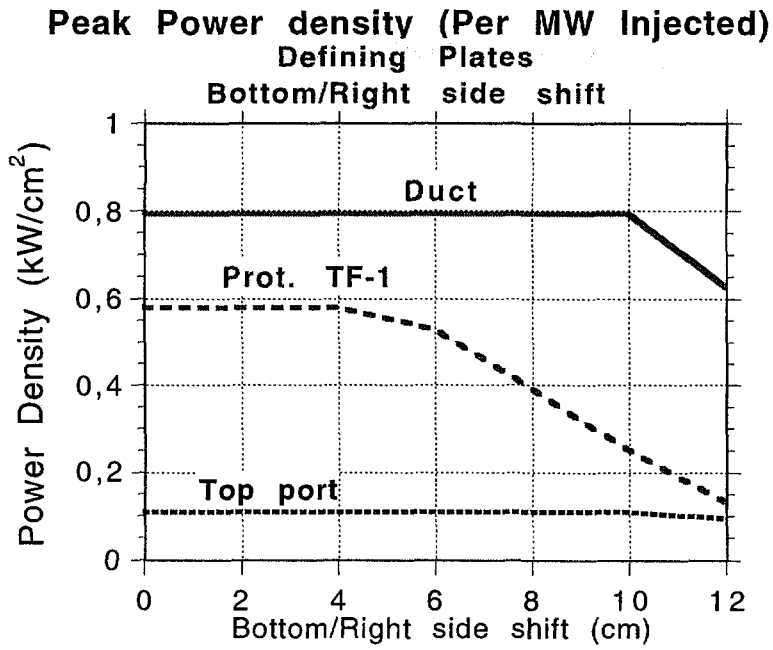


Fig.5.4.9