

Efectos de Configuración
Magnética en el Transporte de
Plasma durante la Inyección de
Haces Neutros en el TJ-II
(Simulación)

J. Guasp
C. Fuentes
M. Liniers

Asociación EURATOM/CIEMAT para Fusión - 76

Departamento de Fusión y Física de Partículas Elementales

Toda correspondencia 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 Thesaurus 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 Estados Unidos.

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

Depósito Legal: M-14226-1995
ISSN: 1135-9420
NIPO: 402-01-008-3

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S70

PLASMA; HELIAC STELLARATORS; HELICAL CONFIGURATIONS; PARTICLE LOSSES;
NEUTRAL ATOM BEAM INJECTION; NUMERICAL ANALYSIS; TOKAMAK DEVICES;
SPUTTRTING .

“Efectos de configuración magnética en el transporte de plasma durante la inyección de haces neutros en el TJ-II” (Simulación)

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.
48 pp., 18 fig., 12 refs.

Resumen:

Se ha efectuado un análisis sistemático de las configuraciones de la Serie 100, 27 en total, utilizando un modelo de transporte que incluye dinámica de impurezas y efectos de *sputtering*.

En las configuraciones de pequeño radio o cercanas a valores racionales de \underline{t} , aparece colapso radiativo, sea cual sea la estrategia de inyección externa de gas (GP) elegida. La causa estriba en la insuficiencia de la potencia absorbida por esas configuraciones, bien a causa de las altas pérdidas de *shine through* en las de pequeño tamaño, bien a causa de las elevadas pérdidas de iones rápidos en las cercanas a las resonancias.

Para la mayor parte de configuraciones en que no se produce colapso, las pérdidas de iones rápidos para inyección CO (la que posee la misma dirección que el campo magnético toroidal) son mayores, y por consiguiente la absorción y la β del plasma es menor, que las del caso opuesto. Sin embargo en la zona situada inmediatamente por encima de las resonancias principales (1/3 y 1/2 por periodo) la situación se invierte. Este fenómeno fue analizado y explicado en informes previos.

Una consecuencia de ésto es que los óptimos de confinamiento del caso Counter se encuentran desplazados hacia valores de \underline{t} (o I_{hc}) superiores a los del caso CO, con valores de β superiores, salvo cerca de las resonancias. Como es usual el caso de inyección balanceada es intermedio.

Los óptimos en que se alcanza estado estacionario son muy próximos (y a menudo coinciden) con aquellos que no tienen esa restricción. La configuración de mejores resultados (mayor β media) es la 100_48 en inyección balanceada, con $\langle\beta\rangle = 1.1\%$ y valor central 3.2%, aunque en esa zona los resultados son poco sensibles a la configuración o a la estrategia de GP. Las configuraciones situadas alrededor de la 100_44 serían las que necesitarían menor potencia entrante en el toro para producir descargas sin colapso y con absorción de NBI suficiente.

“Magnetic configuration effects on plasma transport under Neutral Beam Injection at TJ-II” (Simulation)

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.
48 pp., 18 fig., 12 refs.

Abstract:

A systematic analysis of magnetic configurations (27 in total), using a Transport model including impurity dynamics and sputtering effects has been done.

For small size configurations or those close to rational \underline{t} values there is radiative collapse, independently of the external gas puffing (GP) strategy chosen. The reason is the insufficiency of absorbed power, either by the high Shine Through losses due to their low radii, or by the increase of fast ion orbit losses near the resonances.

For the majority of configurations without collapse, fast ion orbit losses for CO injection (going in the same direction than the toroidal magnetic field) are higher, and in consequence the power absorption and the plasma β achieved are lesser, than for the opposite direction. Nevertheless in the region placed just above the main resonances (1/3 and 1/2 per period) this situation reverses. The reasons have been analysed and explained at previous studies.

A consequence of this fact is that the optima of confinement for the Counter case are shifted towards higher \underline{t} values than the CO one, with higher plasma β , except near the resonances. As usual the balanced case is in between.

The optima achieving stationary state are very close (and often are coincident) with those lacking that restriction. The best configuration (highest average β for balanced injection, with $\langle\beta\rangle = 1.1\%$ and central value 3.2%, although in this region the results are rather insensitive to configuration and GP strategy. The configurations placed around the 100_44 would need also the lowest power entering the torus in order to avoid collapse and to achieve an acceptable NBI absorption level.

Indice

1. Introducción.
2. Método de cálculo.
 - 2.1. Cálculos para los haces neutros.
 - 2.2. Modelo de transporte de plasma.
3. Resultados para los casos óptimos.
4. Potencia de inyección mínima.
5. Conclusiones.

Apéndice A. Utilización de la Base de Datos de NBI,

Referencias

Lista de Figuras

1. Introducción.

Este estudio extiende las simulaciones de transporte efectuadas para la configuración 100_44_64 del TJ-II [1], [2] a un considerable número (27) de configuraciones magnéticas, distribuidas de manera sistemática sobre el diagrama de configuración (la “Serie 100”, Tabla 1.I), utilizando un modelo de transporte que incluye los efectos de las impurezas y del *sputtering*.

Tabla 1.I.
Características principales de las configuraciones
de la Serie 100 ($I_{cc} = 100$ dkA)

Ihc (dkA)	Ivf (dkA)	raver (cm)	Iota Axis	Iota Border	Magnetic Well (%)	Shear (%)
0.00	50.0	10.1	0.95	1.00	0.43	4.47
10.0	53.0	12.8	1.13	1.19	0.96	5.26
16.0	55.0	13.7	1.22	1.29	1.02	5.90
20.0	56.0	10.9	1.27	1.32	0.83	4.12
22.0	56.0	15.4	1.31	1.38	1.65	5.55
24.0	58.0	15.9	1.33	1.41	1.79	6.11
26.0	58.0	16.4	1.35	1.43	1.89	6.14
28.0	59.0	17.1	1.37	1.46	1.98	6.47
30.0	59.0	17.3	1.40	1.49	2.08	6.56
32.0	60.0	17.7	1.42	1.52	2.16	6.60
36.0	61.0	18.4	1.47	1.57	2.18	6.82
40.0	63.0	18.8	1.51	1.61	2.30	6.55
44.0	64.0	19.2	1.55	1.65	2.36	6.57
48.0	65.0	19.2	1.59	1.68	2.56	5.81
50.0	65.0	19.1	1.61	1.70	2.65	5.63
55.0	67.0	19.0	1.66	1.74	2.81	4.84
56.0	67.0	18.9	1.67	1.74	2.69	4.52
60.0	68.0	19.0	1.70	1.77	2.72	4.33
64.0	70.0	18.8	1.73	1.80	2.68	3.77
68.0	72.0	18.5	1.77	1.83	2.45	3.08
70.0	73.0	18.2	1.78	1.84	2.45	3.17
80.0	77.0	16.7	1.86	1.88	1.82	1.62
90.0	80.0	13.9	1.93	1.94	0.74	0.28
95.0	82.0	11.3	1.97	1.96	0.069	-0.14
105	86.0	17.0	2.02	2.05	1.42	1.27
110	88.0	18.9	2.02	2.07	2.37	2.62
120	92.0	17.6	2.06	2.11	3.79	2.38

2. Método de cálculo.

El método de cálculo utilizado es idéntico al de [1] por lo que solo se mencionarán aquí sus características más esenciales.

2.1. Cálculos para los haces neutros.

Como se indicó en [1] el cálculo de las magnitudes asociadas con la inyección de haces neutros (NBI) ha sido efectuado con el código de Montecarlo Fafner-2 [2], [3], [4], [5].

Todas esas magnitudes se almacenan en una Base de Datos que contiene los cálculos para varias densidades (8), inyección CO y Counter separadamente, coeficientes de sensibilidad a las temperaturas iónica y electrónica del plasma, a su Z efectiva y al perfil de neutros fríos, para un total de más de 170 configuraciones del TJ-II. Esa base de datos permite interpolar los resultados para densidades y temperaturas diferentes sin necesidad de repetir los cálculos de NBI que son bastante costosos en tiempo de cálculo. El acceso a esa base de datos se realiza mediante una subrutina Fortran (cf. Apéndice A) que es llamada por el código de transporte (§2.2).

Las configuraciones para las que existen datos de la base aparecen señaladas en el diagrama de configuración de la Fig.2.1a (triángulos, 177 en total), que muestra los contornos de radio medio del plasma constante, superpuestos a los de transformada rotacional en el eje con valores racionales de bajo orden. Se observará, como ya fue indicado en [6] y [7], que algo por debajo de esos valores racionales el radio del plasma colapsa a valores reducidos debido a la presencia de gruesas islas magnéticas en la periferia que son interceptadas por la cámara de vacío. Eso se manifiesta en el profundo surco cercano a la racional 2 (1/2 por periodo) de la parte superior del diagrama.

Ese comportamiento es aún más evidente cuando se representa a lo largo de la línea vertical correspondiente a corriente en el conductor circular (I_{cc}) igual a 10 kA (la "Serie 100", visible por una mayor densidad de puntos a la derecha del diagrama, 27 en total). Ese comportamiento se muestra en la Fig.2.1b en función de la corriente en el conductor helicoidal (I_{hc}), junto con el de la transformada rotacional en el eje (t), que crece monótonamente con I_{hc} . La configuración 100_44_64 para la que se efectuaron todos los cálculos de [1] aparece con un aspa superpuesta en el diagrama de la Fig.2.1.a. Son las configuraciones de esta línea las que van a ser objeto de los cálculos de transporte de este estudio.

Por otro lado el diagrama muestra una tendencia general del radio del plasma a crecer con ambas corrientes, con una amplia meseta en la zona central derecha, en donde se encuentra el máximo (19.50 cm, configuración 120_30_67) y que comprende la configuración 100_44 (con radio 19.25, el máximo de la serie 100) y otra amplia zona de máximo por encima de la racional 2 (1/2 por periodo) en la parte superior derecha del diagrama.

Este comportamiento del radio del plasma tiene repercusión directa sobre las pérdidas de *Shine Through* (ST) de los haces neutros (NBI). Efectivamente el diagrama de la Fig.2.2a muestra que la parte inferior izquierda del diagrama (la de corrientes menores) da lugar a pérdidas de ST con valor superior al 90% de la potencia entrante en el toro. Como era de esperar el comportamiento de esta magnitud es complementario al del radio medio.

Algo similar se observa en la Fig.2.2.b a lo largo de la serie 100 para tres valores de la densidad del plasma (baja: valor central de la densidad electrónica $n_e(0) = 1.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, media 5.4×10^{19} y alta 1.1×10^{20}). Por debajo de $I_{hc} = 22 \text{ dKA}$ el valor de ST supera el 90% de la potencia entrante en el toro, lo que hace que esa zona sea inadecuada para NBI.

Consecuencia de ello es que la potencia disponible en el plasma, es decir la diferencia entre la entrante en el toro y la perdida por ST, presente un comportamiento parecido al del radio medio (Fig.2.3). Esta potencia disponible es la que se deposita en el plasma en forma de iones rápidos que, posteriormente, están sujetos a otros tipos de pérdidas (órbitas de iones rápidos no confinadas y cambio de carga, CX), por consiguiente constituiría el máximo idealmente alcanzable por la absorción en el plasma.

Esa absorción, una vez descontado todo tipo de pérdidas, aparece en la Fig.2.4 para el caso de alta densidad (valor central de la densidad electrónica $n_e(0) = 1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) e inyección balanceada ($2 \times 930 \text{ kW}$ entrantes en el toro), también aquí el comportamiento general refleja, principalmente, el del radio medio, con un máximo del 67.5% de la potencia entrante en el toro para la configuración 120_40_70 con una amplia meseta alrededor, mientras para la serie 100 el máximo (Fig.2.4b) se encuentra también para la 100_44_64 (65.7%), no muy distinto del máximo absoluto.

No obstante ahora la zona de máximo del radio situada por encima de la racional 2 no produce valores de la absorción comparables a los de la meseta anterior sino que en esa zona no se supera el 43% (configuración 30_120_63). La razón estriba en el diferente comportamiento de la inyección CO (la dirigida en la misma dirección que el campo toroidal) y la Counter (Fig.2.5). También se observa (Fig.2.4b) un claro desplazamiento hacia valores de I_{hc} mayores de los máximos de absorción para la dirección Counter que, salvo cerca de las resonancias, es considerablemente más elevada que la CO.

Como es bien conocido [8], en el TJ-II, las pérdidas de iones rápidos, sobre todo directas, del haz CO son usualmente considerablemente mayores que las del Counter. Esto puede comprobarse en la Fig.2.6 que muestra los contornos de pérdidas de iones rápidos totales (directas y colisionales) para el caso de alta densidad en ambas direcciones de inyección. Se observa ahí que el haz CO presenta máximos de pérdidas por debajo de la racional 1/2, mientras al haz Counter le sucede lo contrario. Este comportamiento se observa todavía más claramente en la Fig.2.7 a lo largo de la Serie 100.

Se observa también en esas Fig., sobre todo en la 2.7b en donde, por estar referida a la potencia disponible en el plasma, los efectos del ST están

compensados, que efectivamente las pérdidas CO son considerablemente más elevadas que las Counter para casi todas las configuraciones. No obstante por encima de las resonancias principales (1/3 para $I_{hc} \sim 25$ dkA y 1/2 para $I_{hc} > 100$ dkA) la situación se invierte. Las razones, ligadas a la topología de las órbitas de esos iones, fueron analizadas y explicadas en [6] y [7].

Además el fuerte predominio de las pérdidas directas sobre las colisionales queda patente en la Fig.2.8a, las primeras constituyen entre el 70 y el 90% del total.

Se recordará también [2] que la absorción crece, al principio, rapidísimamente con la densidad debido al fuerte descenso de las pérdidas de ST y CX, para estabilizarse más tarde a causa del aumento de las pérdidas de iones rápidos que compensan la disminución de las otras (Fig.2.9a). Solo a muy altas densidades (superiores a $1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, poco realistas para el TJ-II) ese aumento comenzaría a producir una disminución de la absorción.

Por el contrario esa absorción total es poco sensible a las temperaturas, aunque hay una leve disminución al incrementarse éstas. Así para un caso típico [1] de inyección balanceada a alta densidad (densidad electrónica central $1.2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$) un incremento de la temperatura electrónica (valor central 390 eV) de un 10% se traduce en una disminución de la absorción total de menos de un 2.7%, mientras que en el caso de la iónica (valor central 300 eV) esa disminución es mucho menor, inferior al 0.1%.

Por su parte la proporción de potencia que se llevan los electrones presenta sensibilidad similar. Así para el mismo caso anterior, esta proporción disminuye un 2.2% para un incremento de la temperatura electrónica de un 10%, mientras que con la temperatura iónica se incrementa solo en un 0.1%.

Por último, a las energías de inyección utilizadas ($E = 40$ keV, con mezcla de especies de energía $E:E/2:E/3$ igual a 80:10:10 [4]) la absorción de los electrones predomina fuertemente sobre la de los iones, éstos últimos no se llevan más de un 20% del total de la potencia absorbida (Fig.2.9b).

2.2. Modelo de transporte de plasma.

El modelo de transporte utilizado es el mismo que el de [1] por lo que aquí se resumirá solamente lo esencial.

El cálculo de la evolución del plasma y sus balances energéticos ha sido realizado mediante el código 1-1/2D Proctr [9], profundamente modificado para el TJ-II y el calentamiento por NBI. Los perfiles radiales iniciales para la densidad y temperaturas del plasma se toman de datos experimentales (descarga #3088 con la configuración 100_44_64 del TJ-II [10]). Los valores de absorción y pérdidas de NBI se interpolan de la Base de Datos (§2.1, Apéndice A).

El *density buildup* producido por NBI se genera, al igual que en [1], tanto por los iones que se incorporan al plasma como por el reciclado de las pérdidas de ST y de iones rápidos, dando lugar a una inyección de gas “equivalente” (Fig.2.10).

La estrategia de inyección externa de gas (*gas puffing*, GP) se ajusta para conseguir un *plateau* de densidad y absorción hacia mitad de la descarga. Los cálculos indican que, en ausencia de colapso, y mientras los coeficientes de reciclado sean inferiores a la unidad, siempre es posible elegir una estrategia de GP que cumpla este objetivo sin superar el límite semiempírico de densidad [11] ni el técnico impuesto al sistema de GP en el TJ-II (unos 10 T-l/s y unos 5 ms de tiempo característico) con absorción de NBI eficiente (> 50% de la potencia inyectada).

El cálculo del perfil radial de neutros fríos procedente de la pared se efectúa por medio de una ecuación de Boltzmann monodimensional en geometría cilíndrica. La pérdidas de CX de los iones rápidos inyectados se reevalúan con ese perfil.

Los coeficientes de transporte para la fase de NBI (coeficiente de difusión de partículas y de conductividades térmicas electrónica e iónica) se ajustan para reproducir, en *plateau*, las predicciones de las Leyes de Escala (usualmente LHD) para la configuración 100_44_64. El perfil radial de esos coeficientes tiene forma de escalón redondeado.

Las impurezas se tratan con mucho detalle [1],[12]. En el modelo actual se permiten tres tipos distintos de impurezas: el hierro, el carbono y el “oxígeno”, la naturaleza de este último tipo de impureza puede ser cambiada a otras especies, aunque usualmente se toma realmente O, de ahí las comillas.

La fuente de Fe es el *sputtering* en el *Hard Core* (HC) y en la pared de la cámara de vacío (VV) causado por las pérdidas de ST, las de iones rápidos y las de CX (tanto de los NBI como del plasma). La fuente del C es el *sputtering* en las protecciones de grafito de las pérdidas anteriores. La fuente de la 3ª impureza (el “O”) es la cámara de vacío, tanto el HC como el resto de la pared, y se considera proporcional al flujo de partículas del plasma que inciden sobre ella.

Esas tres poblaciones de impurezas se siguen, mediante las ecuaciones acopladas de evolución y transporte, para cada estado de carga de cada una de ellas, permitiendo difusión y reciclado en la pared. Por simplicidad, en estas simulaciones, los coeficientes de difusión de las impurezas se toman iguales a los de partículas del plasma

y también los de reciclado, aunque esos coeficientes podrían ser modificados.

Como ahora, en este recorrido de configuraciones, los volúmenes del plasma pueden ser muy diferentes, las tasas de inyección de gas adecuadas también van a serlo y han de ser elegidas separadamente para cada configuración y cada posibilidad de inyección.

En todos los ejemplos de este estudio la estrategia de GP externa es similar a la de la Fig.2.10. Su evolución temporal consta de tres etapas. Durante la primera, de 0 a 50 ms, antes del inicio de los NBI, la tasa se mantiene en un valor constante Puff1 (0.35 T-l/s en los casos típicos de [1]) con el fin de mantener en estado estacionario la descarga durante la fase en que el ECRH actúa en solitario. Una vez se inician los NBI, a los 50 ms, esa tasa sube a un valor elevado Puff2 (4.8 T-l/s en el caso típico CO de [1]) con el fin de hacer subir paulatinamente la densidad. Finalmente a los 190 ms (es decir 140 ms después del inicio de los NBI) la tasa externa desciende al valor Puff3 (0.8 en el caso mencionado) en el cual se mantiene hasta el final de la descarga (350 ms) con el fin de conseguir estado estacionario. Todos los cambios de tasa de GP se efectúan de manera suave con un tiempo de subida o bajada de 5 ms.

3. Resultados para los casos óptimos.

Con el fin de poder sintetizar adecuadamente los resultados de tantas configuraciones (27), se han elegido, para cada configuración y cada posibilidad de inyección, aquellos casos que corresponden a la estrategia de GP que da lugar, al final de la descarga, al máximo valor de la energía total almacenada en el plasma, es decir de la β media en volumen, en otras palabras: el “óptimo” global de confinamiento.

La búsqueda de ese óptimo se ha efectuado, para cada configuración y cada posibilidad de inyección, con recorridos sistemáticos del valor de Puff2 para Puff3 constante. El primer parámetro se ha hecho variar entre 0 y 10 T-l/s (con 48 valores distintos) y esos recorridos se han repetido para 21 valores de Puff3 (entre 0 y 7 T-l/s).

Como ese óptimo, sin restricciones, no siempre da lugar a estado estacionario (*plateau*) de duración suficiente, también se ha considerado el caso de β óptima que sí que produce estado estacionario durante al menos los últimos 150 ms de la descarga (la mitad del tiempo de inyección), el criterio elegido para determinar si se verifica esa condición es que la variación total de la densidad electrónica en volumen y de la potencia total absorbida durante los últimos 100 ms de descarga sean inferiores a un 3%. Como se comprobará generalmente, a menos que se produzca colapso radiativo, ambos criterios conducen a resultados muy similares.

Los comportamientos en la evolución temporal de las magnitudes y de los perfiles radiales de todos los casos individuales son muy similares a los obtenidos en [1] para la configuración 100_44_64, tanto si hay colapso como si no, por lo que los análisis efectuados en aquel informe se mantienen vigentes y, por lo tanto, no se repetirán aquí.

Los casos óptimos de cada configuración dan lugar a valores de la β del plasma que aparecen representados, para las 27 configuraciones de la Serie 100, en la Fig.3.1 con las tres posibilidades de inyección (Tabla 3.I).

Se observa claramente el hundimiento de los valores de β para configuraciones de baja corriente (es decir bajo radio medio) y cerca de los valores racionales de t así como el pequeño *plateau* situado alrededor de $I_{hc} = 44$ dkA. Consecuencias directas de los comportamientos de la absorción de NBI mencionados en el §2.1.

Para el caso de inyección CO la mejor configuración, es decir el óptimo de todos los óptimos (cf. Tabla 3.I), se consigue para la 100_120 con $\langle\beta\rangle = 0.94$ y $\beta(0) = 2.93$, mientras que en la zona intermedia (la situada entre los dos valores racionales principales) el máximo está en la 100_40 con 0.80 y 2.30, respectivamente. Estos dos últimos valores son muy cercanos al óptimo de la 100_44 (0.77 y 2.29), que a su vez no son muy lejanos del caso “típico” utilizado como ejemplo característico en [1] que daba 0.75 y 2.38, con una estrategia de GP distinta (cf. Tabla 3.1 de [1]).

Para la inyección Counter el óptimo se desplaza a configuraciones de mayor t (cf. §2.1), encontrándose en la 100_68 con $\langle\beta\rangle = 0.90$ y $\beta(0) = 2.53$, algo mejor que la 100_44 que da 0.84 y 2.38, a comparar con el caso “típico” de [1] con 0.80 y 2.51.

Finalmente la inyección balanceada conduce al óptimo general en la 100_48 con $\langle\beta\rangle = 1.10$ y $\beta(0) = 3.16$, mientras la 100_44 da valores muy similares (1.09 y 3.19)

muy cercanos también a los 1.06 y 3.27 del caso típico de [1].

Conviene notar la inversión que se produce por encima de las resonancias principales respecto a la situación usual de mejor eficiencia para la dirección Counter que la CO, consecuencia directa del comportamiento de las pérdidas de iones rápidos mencionadas en el §2.1 (Figs. 2,4 y 2.7). Esto hace que por encima de la resonancia 1/2 el haz CO recupere valores muy notables de confinamiento (es precisamente ahí donde se encuentra el óptimo), pero no lo hace así el Counter, con lo cual la inyección balanceada es esa zona no es eficiente.

Como era de esperar el óptimo de β media no coincide con el de la central, la relación entre ambas, que es siempre del orden de 1/3, depende de la anchura o estrechez de los perfiles radiales de presión. Como la β media en volumen es más representativa del confinamiento global que su valor central, hemos preferido definir los óptimos por medio de la primera.

Como ya se ha indicado esos óptimos no están sujetos a restricción. Si, por el contrario, se desea retener solo aquellos casos que conduzcan a estado estacionario al final de la descarga, entonces los óptimos resultantes conducen a valores de $\langle\beta\rangle$ solo ligeramente menores e incluso, en algunos casos idénticos. Esto puede observarse en la Fig.3.2a que compara los dos tipos de óptimos de cada configuración en el caso de inyección balanceada. Algo similar ocurre para las dos direcciones de inyección con un solo haz. Las Tablas 3.II a 3.IV muestran algunas de las características de esos óptimos estacionarios para cada configuración.

Tales óptimos estacionarios excluyen, como es lógico, los casos de colapso radiativo, casos que pueden ser detectados en la Fig.3.2b que muestra el tiempo de finalización de la descarga en los casos óptimos sin constricciones. Así, para el caso CO, todas las configuraciones por debajo de $I_{hc} \leq 22$ dkA y las comprendidas entre 64 y 105 dkA presentan colapso, no así las de $I_{hc} \geq 110$ dkA, es decir a corrientes elevadas por encima de la resonancia 1/2. Para el caso Counter la zona sin colapso se encuentra desplazada hacia valores de I_{hc} algo mayores (30 a 80 dkA, ambas inclusive) pero ya no se recupera a corrientes elevadas, mientras que la situación de inyección balanceada es intermedia, con ausencia de colapso entre 30 y 70 dkA.

Inversamente: todos los casos sin colapso conducen a algún óptimo estacionario, aunque para algunos casos de inyección CO, cerca de los extremos ($24 \leq I_{hx} \leq 30$ dkA y la 100_60) la densidad de línea puede quedar algo por encima del presunto límite semiempírico [11]. Como no está nada claro si ese límite es aplicable o no al TJ-II hemos preferido retenerlos.

Otra magnitud de importancia evidente es la potencia absorbida. La Fig.3.3a muestra su dependencia con la configuración para las tres situaciones de inyección, como era de esperar ese comportamiento es muy similar al del cálculo del código de neutros (Fig.2.4) y al de la β del plasma (Fig.3.1, Tabla 3.I). También en este caso los dos tipos de óptimos dan resultados muy similares (Fig.3.3b y Tablas 3.II a 3.IV).

Al igual que en [1] la evidencia del colapso radiativo se hace patente cuando se compara la potencia absorbida por los electrones con las pérdidas por radiación al final de la descarga para los casos óptimos de cada configuración (Figs. 3.4 y 3.5): en todos

los casos con colapso estas últimas (líneas de puntos) igualan o superan a la primera (líneas continuas). Esos colapsos se producen por la insuficiencia de la potencia absorbida (cf. §4.3 de [1]) causada, bien por el pequeño tamaño de las configuraciones de baja \underline{t} , bien por su elevada tasa de pérdidas cerca de las resonancias.

En cualquier caso conviene resaltar la similitud de los resultados obtenidos, en los casos sin colapso, para los óptimos sin constricciones y los estacionarios y que el mayor contenido energético de todos los casos se alcanza para la configuración 100_48 con inyección balanceada, en donde se obtiene una β media de 1.098 (1.085 para el caso estacionario) (cf. Tablas 3.I y 3.IV).

Por último, cuando se comparan las Tablas anteriores con la Tabla 3.I de [1] para los casos típicos de la configuración 100_44, se observa que ahora los óptimos sin restricción alcanzan densidades bastante superiores a las de [1], resultado de la diferente estrategia de GP que ahora, en estos casos óptimos no da lugar a estado estacionario, mientras que las temperaturas son algo inferiores. Esas diferencias son algo menores en los casos de óptimo estacionario en donde la estrategia de GP es similar.

Tabla 3.I.
Magnitudes principales al final de la descarga (350 ms)
para los casos óptimos sin constricciones

	CO	Counter	Balanced
Configuración óptima	100_120	100_68	100_48
Pow. CO (MW)	0.930	0	0.930
Pow. Counter (MW)	0	0.930	0.930
Puff2 (T-l/s)	7.7	7.9	8.7
Puff3 (T-l/s)	0.	1.4	0.3
ne(0) (m ⁻³)	1.30x10 ²⁰	1.24x10 ²⁰	1.40x10 ²⁰
ne-line (m ⁻³)	8.2x10 ¹⁹	8.3x10 ¹⁹	8.8x10 ¹⁹
<ne> (vol.) (m ⁻³)	6.1x10 ¹⁹	6.4x10 ¹⁹	6.6x10 ¹⁹
ne-line limit (m ⁻³)	8.4x10 ¹⁹	8.9x10 ¹⁹	1.1x10 ²⁰
Pabs. Tot. (MW)	0.65	0.71	1.20
Pabs/Pinj. (%)	70%	76%	65%
Pabs. el (MW)	0.54	0.60	0.913
Pel/Pabs (%)	82%	84%	82%
Pot. Rad (MW)	0.27	0.32	0.47
P. Rad / P. el (%)	51%	54%	48%
Te(0) (eV)	313	278	320
Ti(0) (eV)	268	246	266
β(0) (%)	2.9	2.5	3.2
<β> (volum.) (%)	0.94	0.90	1.1
τ _E (ms)	7.9	7.5	6.0
τ _p (ms)	8.9	8.8	7.5
<Zeff> (vol.)	1.4	1.4	1.5
Zeff Max.	2.7	2.5	3.0
nn(0) (cm ⁻³)	3.8x10 ⁷	2.8x10 ⁷	3.1x10 ⁷
nn(a) (cm ⁻³)	6.2x10 ¹⁰	6.8x10 ¹⁰	8.5x10 ¹⁰
nn(a)/ nn(0)	1600	2400	2700
V(0) (V)	-610	-520	-670
V(0)/Te(0)	-1.9	-1.9	-2.1
E(a) (V/cm)	-123	-110	-150
J beam (kA)	+3.0	-2.9	-0.87
Stationary (%)	No (-22%)	No (-14%)	No (-12%)

Tabla 3.II
Magnitudes principales al final de la descarga (350 ms)
para los casos óptimos estacionarios
Inyección CO (930 kW)

Ihc (dkA)	$\langle\beta\rangle$ (%)	$\beta(0)$ (%)	ne(0) (*)	Pabs (kW)	Te(0) (eV)	Ti(0) (eV)	τ_E (ms)	Puff2 (T-l/s)	Puff3 (T-l/s)
24.0	0.690	1.99	11.7	465	233	202	6.68	3.63	0.20
26.0	0.715	2.06	11.5	482	246	213	7.10	4.00	0.40
28.0	0.712	2.05	11.3	496	249	214	7.45	4.39	0.60
30.0	0.730	2.11	11.3	517	257	222	7.51	4.64	0.60
32.0	0.741	2.14	11.2	524	263	226	7.89	4.89	0.80
36.0	0.753	2.11	11.6	550	247	217	8.26	5.91	1.40
40.0	0.766	2.26	10.7	555	292	248	8.67	5.40	0.80
44.0	0.758	2.32	10.5	550	308	257	9.26	5.15	1.20
48.0	0.756	2.30	10.6	539	301	253	9.18	5.65	0.80
50.0	0.750	2.36	10.2	517	326	266	9.43	4.64	0.80
52.0	0.740	2.26	10.6	511	300	250	8.83	4.64	0.80
55.0	0.717	2.20	10.3	496	296	250	9.33	4.64	0.80
56.0	0.711	2.26	10.3	482	306	256	9.40	4.64	0.30
60.0	0.674	2.21	10.1	443	307	254	9.82	4.39	0.05
110	0.680	1.80	9.74	575	240	236	7.48	4.39	0.01
120	0.909	2.85	11.8	641	341	281	7.85	5.15	1.60

(*) 10^{19} m^{-3} .

Tabla 3.III
Magnitudes principales al final de la descarga (350 ms)
para los casos óptimos estacionarios
Inyección Counter (930 kW)

Ihc (dkA)	$\langle\beta\rangle$ (%)	$\beta(0)$ (%)	ne(0) (*)	Pabs (kW)	Te(0) (eV)	Ti(0) (eV)	τ_E (ms)	Puff2 (T-l/s)	Puff3 (T-l/s)
30.0	0.689	1.98	10.6	551	257	223	6.65	4.14	0.400
32.0	0.745	2.12	11.5	622	253	220	6.69	5.40	1.40
36.0	0.789	2.21	11.8	684	255	224	6.90	6.91	2.00
40.0	0.807	2.36	10.7	659	308	257	7.68	5.65	1.60
44.0	0.822	2.47	10.9	686	315	265	8.07	5.65	2.00
48.0	0.828	2.29	11.9	731	262	231	7.38	7.17	3.00
50.0	0.838	2.33	11.9	725	266	234	7.51	7.92	2.50
52.0	0.830	2.28	12.1	717	256	227	7.03	7.42	2.50
55.0	0.869	2.43	11.9	733	279	243	7.63	7.92	2.50
56.0	0.868	2.36	12.1	750	266	235	7.36	7.92	3.00
60.0	0.876	2.47	12.1	727	278	245	7.77	7.92	2.50
64.0	0.873	2.39	12.3	753	263	233	7.24	7.92	3.00
68.0	0.869	2.42	12.3	726	267	236	7.27	7.67	2.50
70.0	0.838	2.33	12.3	736	257	226	7.10	7.42	3.00
80.0	0.831	2.40	12.4	641	266	232	6.44	5.15	1.60

(*) 10^{19} m^{-3} .

Tabla 3.IV
Magnitudes principales al final de la descarga (350 ms)
para los casos óptimos estacionarios
Inyección Balanceada (2x930 kW)

Ihc (dkA)	$\langle\beta\rangle$ (%)	$\beta(0)$ (%)	ne(0) (*)	Pabs (MW)	Te(0) (eV)	Ti(0) (eV)	τ_E (ms)	Puff2 (T-l/s)	Puff3 (T-l/s)
30.0	0.962	2.57	14.0	1.09	255	218	4.71	5.15	0.05
32.0	1.01	2.74	14.1	1.15	271	228	4.93	5.40	0.60
36.0	1.05	2.94	13.9	1.18	298	247	5.35	5.65	0.80
40.0	1.08	3.07	13.4	1.19	326	265	5.69	4.89	0.60
44.0	1.07	3.21	13.0	1.20	354	282	6.05	4.00	0.80
48.0	1.09	3.03	13.9	1.24	305	255	5.75	6.66	1.40
50.0	1.08	3.12	13.4	1.19	333	269	5.93	5.40	0.80
52.0	1.07	2.94	14.1	1.20	293	246	5.42	6.41	1.20
55.0	1.08	3.20	13.5	1.14	338	274	6.10	4.00	0.80
56.0	1.07	3.08	13.4	1.16	327	265	5.86	5.65	0.80
60.0	1.04	3.12	13.6	1.11	325	265	6.08	5.91	0.40
64.0	1.00	2.99	13.5	1.07	314	255	5.83	5.65	0.30
68.0	0.889	2.71	13.6	1.02	281	230	5.30	5.65	0.00
70.0	0.835	2.58	13.5	0.978	269	220	5.33	4.64	0.20

(*) 10^{19} m^{-3} .

4. Potencia de inyección mínima.

Uno de los problemas que podrían presentarse en los casos de inyección con un solo haz sería el de colapso por insuficiencia de potencia inyectada, analizado extensamente en §4.3 de [1] para la configuración 100_44. Se observaba allí que por debajo de unos 500 kW entrantes en el toro se producía colapso radiativo para el caso de inyección CO, mientras que en los casos Counter o balanceado esto sucedía por debajo de 400 kW aproximadamente.

Como en las primeras etapas del experimento de inyección con NBI se dispondrá de un solo haz, es conveniente intentar localizar qué configuraciones necesitarían menos potencia inyectada para conseguir una descarga sin colapso. Esta información también sería útil, incluso en el caso de inyección balanceada, en la eventualidad en que pudiera producirse bloqueo del haz debido a exceso de reionización en la cámara de neutralización o en el ducto.

La Fig.4.1a muestra, en trazos punteados, esa potencia de inyección mínima (Pinj.), sin colapso, para el caso de inyección CO. Se observa que la configuración 100_44 es la que requiere menos potencia (490 kW entrantes en el toro), sin embargo esa escasa potencia de inyección produce una absorción total (electrones más iones) de NBI de solamente 290 kW (Fig.4.1b), menos que con ECRH en solitario, lo que es totalmente insatisfactorio para la fase de NBI. Por esa razón se ha estudiado también, cuál es el valor de Pinj que, además de no producir colapso, alcanza una absorción de, al menos, 400 kW (un 33% superior a la de ECRH). Esa cota aparece en líneas continuas en la Fig.4.1 y, en este caso, la configuración más favorable es la 100_40 que necesitaría 680 kW (un 73% de la potencia entrante esperada) aunque, esta vez, la absorción alcanzaría ya los 404 kW. Los valores para la 100_44 son casi idénticos.

La Fig. muestra que con esa restricción de que la absorción supere los 400 kW, las potencias mínimas de inyección son mucho más similares para todas las configuraciones de la serie, la 100_60 sería la más desfavorable (820 kW), seguida de la 100_28 (770 kW). Aunque no aparece en las gráficas, la configuración 100_120 también da valores muy similares a los de la 100_40 (cf. Figs. 3.1 y 3.2).

La Fig.4.2 muestra los valores para la β del plasma de los casos anteriores. La comparación de la 100_40 con la 100_44 muestra que la primera alcanzaría una β media ligerísimamente mayor (0.65% frente a 0.64%), lo contrario le sucede al valor central (2.0% frente a 2.1%). Por consiguiente ambas configuraciones serían igualmente adecuadas a esa potencia inyectada mínima de 680 kW

La Fig.4.3 muestra las mismas magnitudes que la 4.1 para el caso de inyección Counter. En este caso la situación es muy similar: la configuración más favorable, sin constricciones, sería también la 100_44 con 430 kW inyectados aunque con solo 310 kW absorbidos. Cuando se establece la restricción de absorción superior a 400 kW, entonces, la más favorable vuelve a ser la 100_44 con 560 kW inyectados (un 60% de la potencia entrante esperada) y 405 kW absorbidos y con valores medio y central de β de 0.62% y 1.95% respectivamente, resultados muy similares se obtienen para la 100_40. Esta vez la configuración 100_120 produce colapso (cf. Figs. 3.1 y 3.2).

Finalmente, el caso de inyección balanceada repite las pautas de los anteriores. La configuración más favorable es, como siempre, la 100_44 en donde el colapso desaparece por encima de 440 kW inyectados (220 por cada haz, un 24% de la potencia entrante prevista) si bien la absorción es solo de 260 kW (un 59% de la entrante), algo totalmente insatisfactorio. Para superar los 400 kW de absorción es necesario inyectar 670 kW (335 por cada haz, un 36% de la potencia entrante prevista), la configuración más favorable sigue siendo la 100_44, se absorbe un 59% de la potencia entrante y las β media y central alcanzan 0.56% y 2.0%. Valores muy similares se alcanzan en las configuraciones cercanas.

En suma, en todas las situaciones de inyección las configuraciones situadas alrededor de la 100_44 serían las que necesitarían menor potencia entrante en el toro para producir descargas sin colapso y con absorción de NBI suficiente.

5. Conclusiones.

Se ha efectuado un análisis sistemático de las configuraciones de la Serie 100, 27 en total, utilizando un modelo de transporte que incluye dinámica de impurezas y efectos de *sputtering*.

En las configuraciones de pequeño radio o cercanas a valores racionales de t , aparece colapso radiativo, sea cual sea la estrategia de inyección externa de gas (GP) elegida. La causa estriba en la insuficiencia de la potencia absorbida por esas configuraciones, bien a causa de las altas pérdidas de *shine through* en las de pequeño tamaño, bien a causa de las elevadas pérdidas de iones rápidos en las cercanas a las resonancias.

Para la mayor parte de configuraciones en que no se produce colapso, las pérdidas de iones rápidos para inyección CO (la que posee la misma dirección que el campo magnético toroidal) son mayores, y por consiguiente la absorción y la β del plasma es menor, que las del caso opuesto. Sin embargo en la zona situada inmediatamente por encima de las resonancias principales ($1/3$ y $1/2$ por periodo) la situación se invierte. Este fenómeno fue analizado y explicado en [6] y [7].

Una consecuencia de esto es que los óptimos de confinamiento del caso Counter se encuentran desplazados hacia valores de t (o I_{hc}) superiores a los del caso CO, con valores de β superiores, salvo cerca de las resonancias. Como es usual el caso de inyección balanceada es intermedio.

Los óptimos en que se alcanza estado estacionario son muy próximos (y a menudo coinciden) con aquellos que no tienen esa restricción. La configuración de mejores resultados (mayor β media) es la 100_48 en inyección balanceada, con $\langle\beta\rangle = 1.1\%$ y valor central 3.2% , aunque en esa zona los resultados son poco sensibles a la configuración o a la estrategia de GP.

Las configuraciones situadas alrededor de la 100_44 serían las que necesitarían menor potencia entrante en el toro para producir descargas sin colapso y con absorción de NBI suficiente.

Apéndice A. Utilización de la Base de Datos de NBI.

Esos datos se obtienen por medio de una subrutina Fortran que proporciona las principales magnitudes asociadas a la absorción de NBI. Por ejemplo:

- Pérdidas de *Shine through*.
- Pérdidas de iones rápidos, tanto directas como colisionales.
- Pérdidas de CX con el fondo de neutros fríos.
- Potencia total absorbida por el plasma (electrones e iones).
- Potencia absorbida por los iones del plasma.
- Corriente de iones rápidos entrante en el toro.
- Perfil radial de potencia absorbida por el plasma (electrones e iones).
- Perfil radial de potencia absorbida por los iones del plasma.
- Perfil radial de nacimiento de iones rápidos.

Para ello necesita como datos de entrada:

- Configuración magnética (p. Ej. '60_60_46'). Si la configuración no estuviera disponible en la Base de Datos se toma la más próxima y lo advierte.
- Densidad media en volumen del plasma.
- Temperaturas electrónica e iónica medias en volumen.
- Número de puntos en que se desean los perfiles radiales.

Sin embargo la absorción de NBI depende también de otras magnitudes: cantidad de impurezas, perfil de neutros fríos procedentes de la pared, etc. Estas magnitudes también pueden suministrarse, aunque si no se hace explícitamente se toman valores por defecto adecuados.

La subrutina está disponible en tres de los ordenadores del Ciemat y existe un manual de instrucciones detallado, en un fichero de texto cuyo nombre es `calc_nbi.help` que se encuentra en los directorios siguientes:

Origin-3800 (jen50):

`/r4/temporal/guasp/bases`

Cray-T3E (crayc):

`/fusion3/guasp/nbi_new/bases`

AlphaServer8400 (fusc):

`/usr/users2/guasp/proctr/bases`

Referencias

- [1]. J.Guasp, C.Fuentes, M.Liniers. "Dinámica de impurezas durante la Inyección de haces Neutros en el TJ-II". Informe CIEMAT en prensa.
- [2]. J.Guasp, M.Liniers. "Efectos de configuración magnética en la inyección de haces neutros en el TJ-II". Informe CIEMAT-873. (Diciembre 1998).
- [3]. G.C.Lister. Report IPP 4/222. IPP Garching 1985.
- [4]. J.Guasp, M.Liniers, C.Fuentes et al. Fusion Technol. **35**, (1999), 32.
- [5]. J.Guasp, M.Liniers, C.Fuentes. "Efectos resonantes durante la moderación de haces neutros en el TJ-II". Informe CIEMAT-878. (Febrero 1999).
- [6]. J.Guasp, M.Liniers, "Búsqueda de efectos *quasi-isodinámicos* en el TJ-II". Informe CIEMAT-946 (Diciembre 2000).
- [7]. J.Guasp, M.Liniers. "Comparación entre las trayectorias correspondientes a Resonancias del Campo Eléctrico y las de Superficies Racionales en el TJ-II". Informe CIEMAT-951 (Diciembre 2000).
- [8]. J.Guasp, M.Liniers. Nucl. Fusion **40**, (2000), 397.
- [9]. H.Howe. "Physics models in the toroidal transport code PROCTR". Report ORNL/TM-11521 (1990)
- [10]. F. Castejón, et al. "Transport analysis of first TJ-II plasmas". 26th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Junio 1999.
- [11]. S.Sudo, Y.Takeiri, et al. Nucl. Fusion **30** (1990) 11.
- [12]. M.A.Ochando, F.Castejón, A.P.Navarro. Nucl. Fusion **37** (1997) 225.

Lista de Figuras

§2

Fig. 2.1. a). Mapa de los contornos del radio medio de las configuraciones. El eje horizontal es la corriente del conductor circular (I_{cc}, en dkA), el vertical la del helicoidal (I_{hc}). Las líneas continuas suaves corresponden a los valores racionales de bajo orden de la transformada rotacional en el eje, sobre ellas aparecen sus valores y, entre paréntesis, sus valores por periodo. La línea de nivel más gruesa corresponde al valor promedio de todo el diagrama, las líneas continuas indican niveles con valores superiores al promedio y las punteadas valores inferiores.

b). Comportamiento del radio medio de la configuración (r_{av}) y de la transformada rotacional en el eje y en el borde (iota) a lo largo de la línea vertical del diagrama de configuración correspondiente a $I_{cc} = 100$ dkA (“Serie 100”). Las líneas verticales corresponden a los valores racionales de bajo orden (1/3 y 1/2 por periodo) de la transformada rotacional en el eje.

Fig. 2.2. a). Mapa de los contornos de potencia perdida por *Shine Through* (en términos de potencia entrante en el toro). Caso de alta densidad (valor central para la densidad electrónica $n_e(0) = 1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$).

b). Comportamiento para la serie 100 a tres densidades:

baja : $n_e(0) = 1.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$.

media: $5.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$.

alta: $1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$.

Fig. 2.3. a). Mapa de los contornos de potencia disponible en el plasma (en MW). Caso de alta densidad ($n_e(0) = 1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$) e inyección balanceada (2x930 kW).

b). Comportamiento de la potencia disponible en el plasma para la serie 100 (P_{av}), junto con el del radio de la configuración (r_{eff}).

Fig. 2.4. a). Mapa de los contornos de potencia total absorbida por el plasma (en términos de potencia entrante en el toro). Caso de alta densidad e inyección balanceada.

b). Comportamiento para la serie 100 en las tres situaciones de inyección.

Fig. 2.5. Mapas de los contornos de potencia total absorbida por el plasma (en términos de potencia entrante en el toro). Caso de alta densidad (valor central para la densidad electrónica $n_e(0) = 1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$). Inyección CO (a) y Counter (b).

Fig. 2.6. Mapas de los contornos de las pérdidas totales de iones rápidos (en términos de potencia disponible en el plasma). Caso de alta densidad. Inyección CO (a) y Counter (b).

Fig. 2.7. Comportamiento de las pérdidas totales de iones rápidos para la serie 100 a alta densidad, para las 3 posibilidades de inyección.

- (a). En términos de potencia entrante en el toro.
- (b). En términos de potencia disponible en el plasma.

Fig. 2.8. a) Comportamiento de las pérdidas de iones rápidos para la serie 100 a alta densidad, para los casos CO y Counter. Las líneas gruesas representan las pérdidas totales (directas y colisionales), las finas solo las directas.

b). Comportamiento de la fracción de pérdidas directas, con respecto al total, para la serie 100 a alta densidad, casos CO y Counter.

Fig. 2.9. a) Dependencia de la absorción y pérdidas de NBI con la densidad (en fracción de la potencia entrante en el toro). Inyección balanceada, configuración 100_44_64.

b) Comportamiento de la fracción de la potencia total absorbida por los iones a alta densidad para los casos CO y Counter.

Fig. 2.10. Evolución temporal de la tasa de *gas puffing* externa (línea de puntos) y total "equivalente" (línea continua) para un caso de inyección CO.

§3.

Fig. 3.1. Comportamiento de la β media en volumen (a) y de la central (b) para los casos óptimos de la serie 100 en las tres situaciones de inyección.

Fig. 3.2. a). Comparación de la β media en volumen para el caso óptimo sin constricciones (línea continua) y la de los óptimos que alcanzan estado estacionario en el caso de inyección balanceada (círculos).

b). Duración de la descarga en los casos óptimos para las tres situaciones de inyección.

Fig. 3.3. a). Potencia absorbida total en los casos óptimos para las tres situaciones de inyección.

b). Comparación de la Potencia absorbida total y la de los iones para el caso óptimo sin constricciones (líneas continuas) y la de los óptimos que alcanzan estado estacionario (símbolos).

Fig. 3.4. Potencia absorbida por los electrones y perdida en radiación para los casos de inyección CO (a) y Counter (b).

Fig. 3.5. Similar a la Fig.3.4 para inyección balanceada

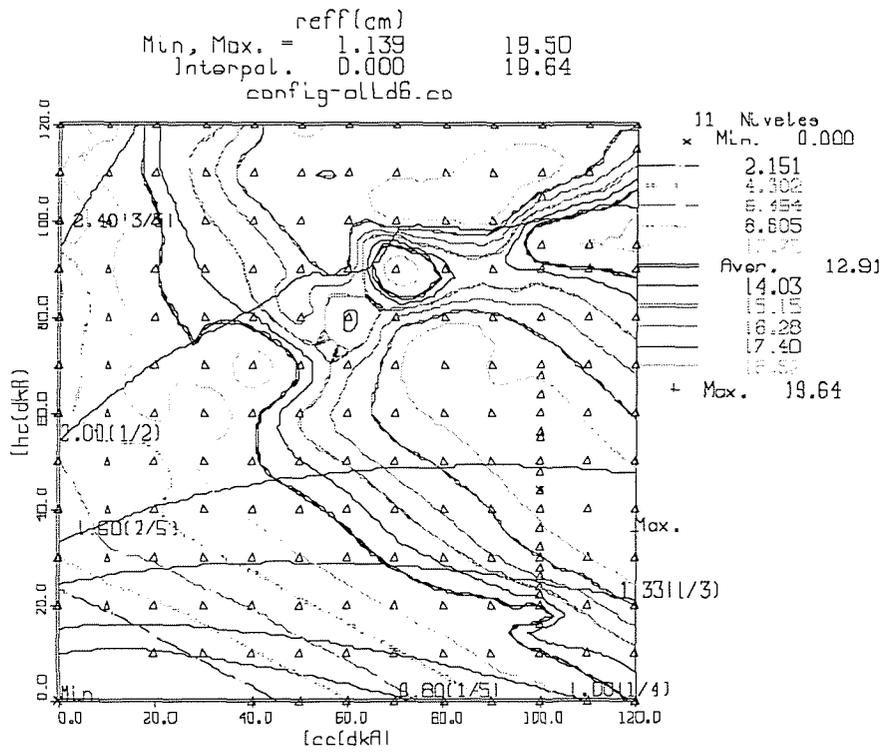
§4.

Fig. 4.1. a). Potencia de inyección mínima sin colapso (línea de puntos). Idem. para producir una absorción de NBI igual o superior a 400 kW (línea continua). Caso de inyección CO.

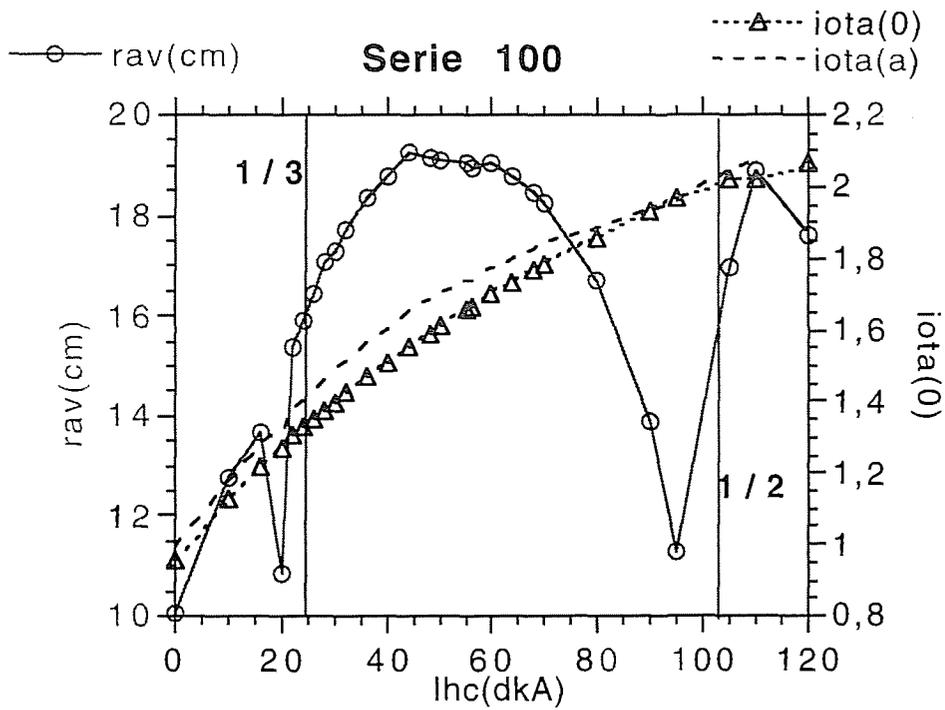
b). Potencia de NBI absorbida en los casos anteriores.

Fig. 4.2. Similar a la Fig.4.1 para la β media en volumen (a) y la β central (b).

Fig. 4.3. Similar a la Fig.4.1 para el caso de inyección Counter

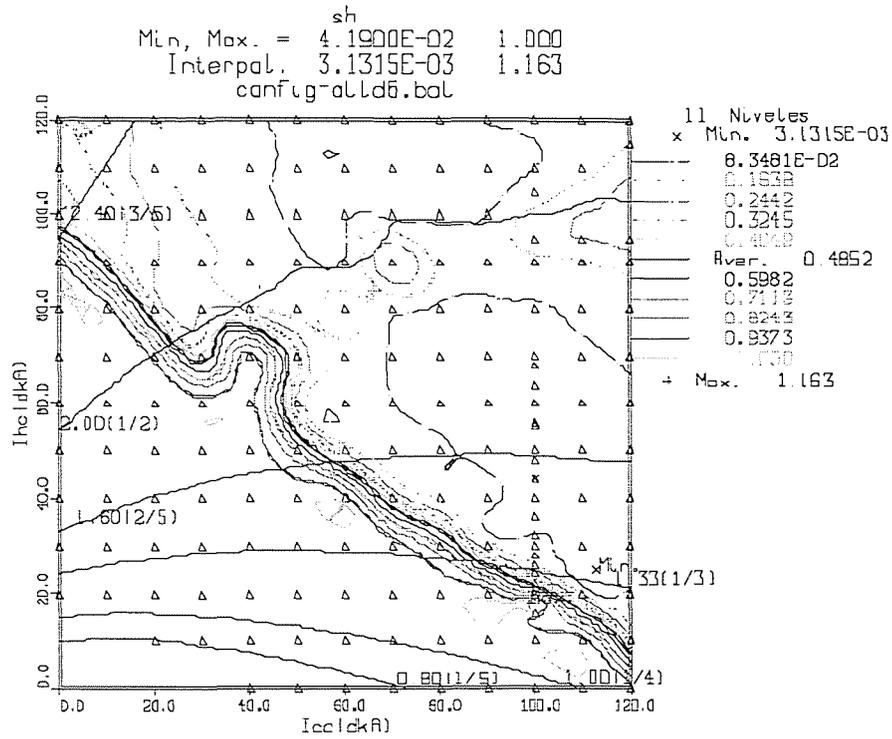


(a)



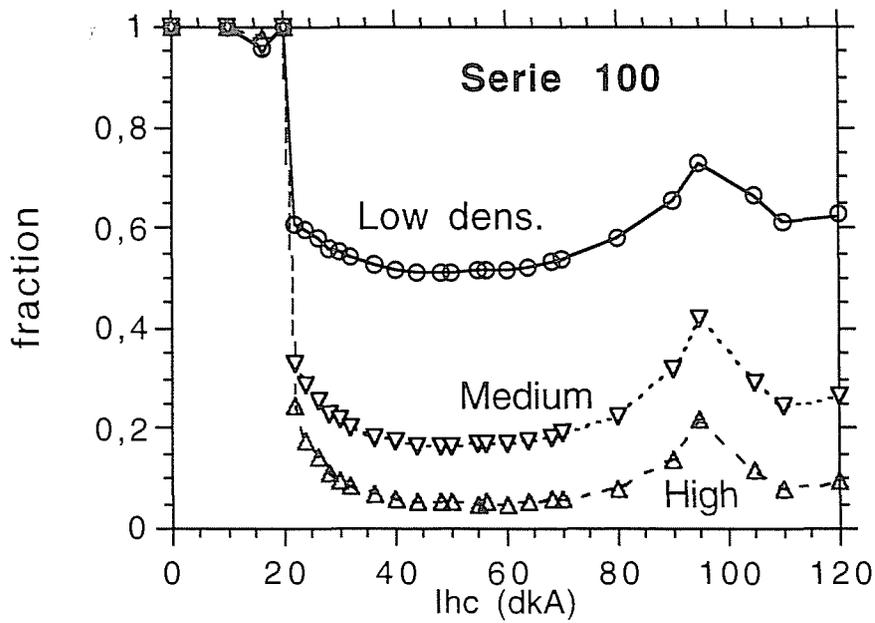
(b)

Fig.2.1



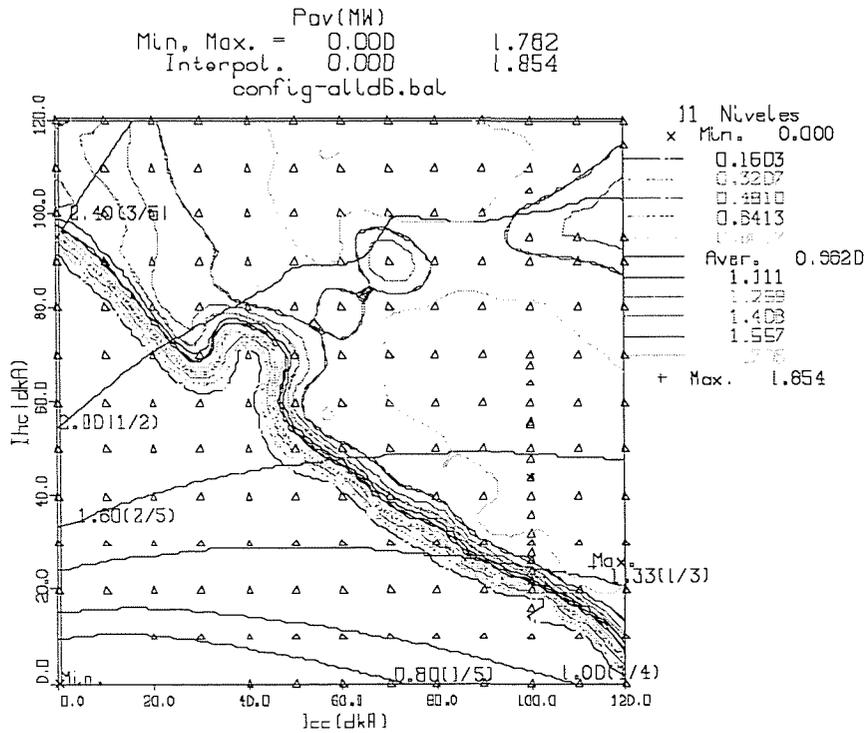
(a)

Shine Through Fraction of Power in Torus

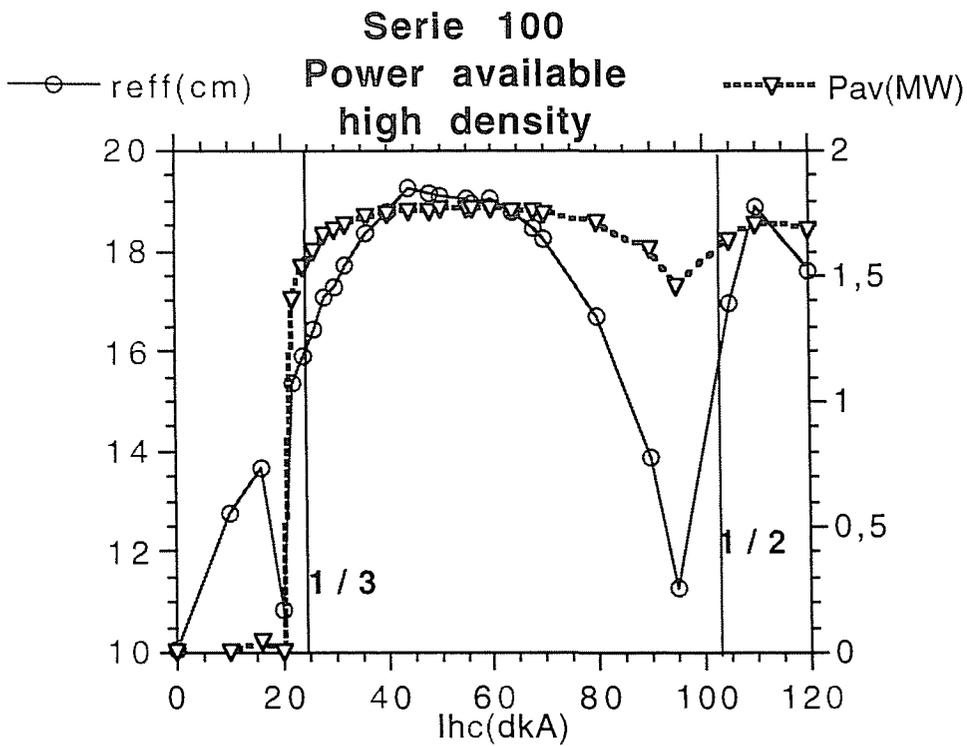


(b)

Fig.2.2

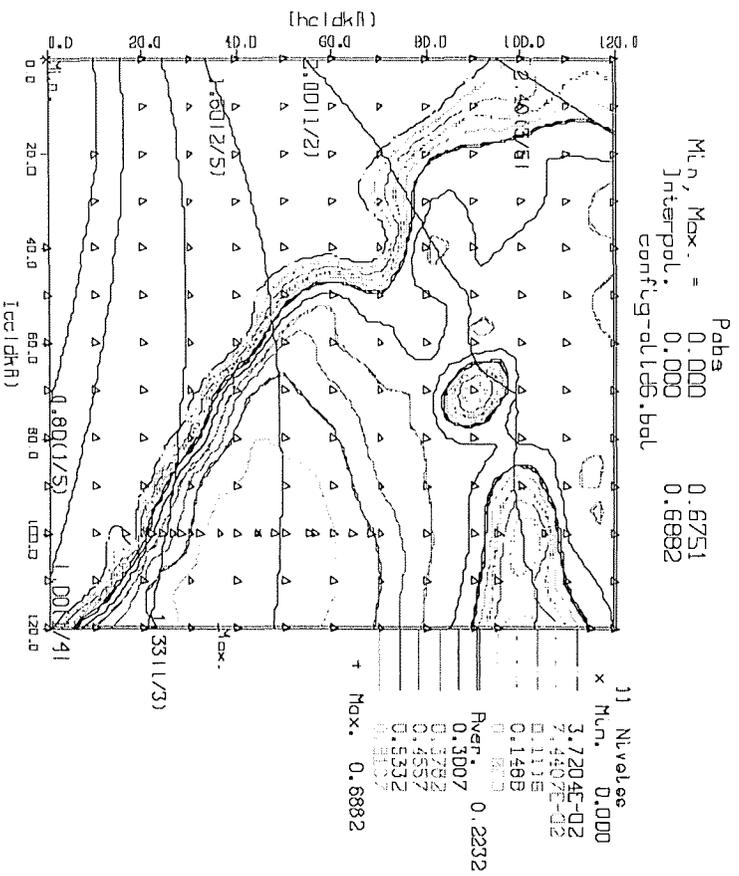


(a)

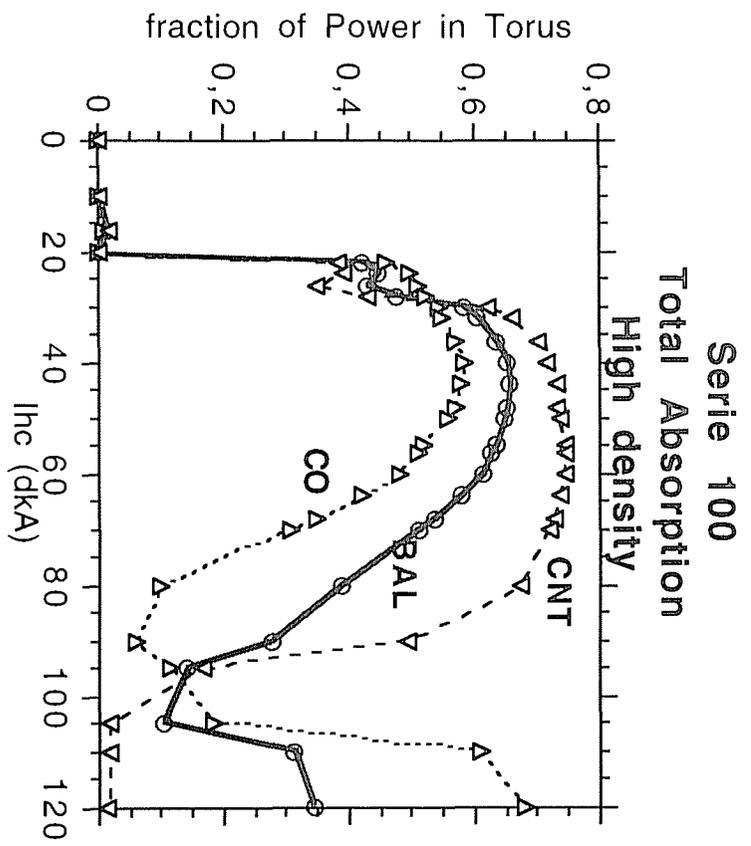


(b)

Fig.2.3



(a)



(b)

Fig.2.4

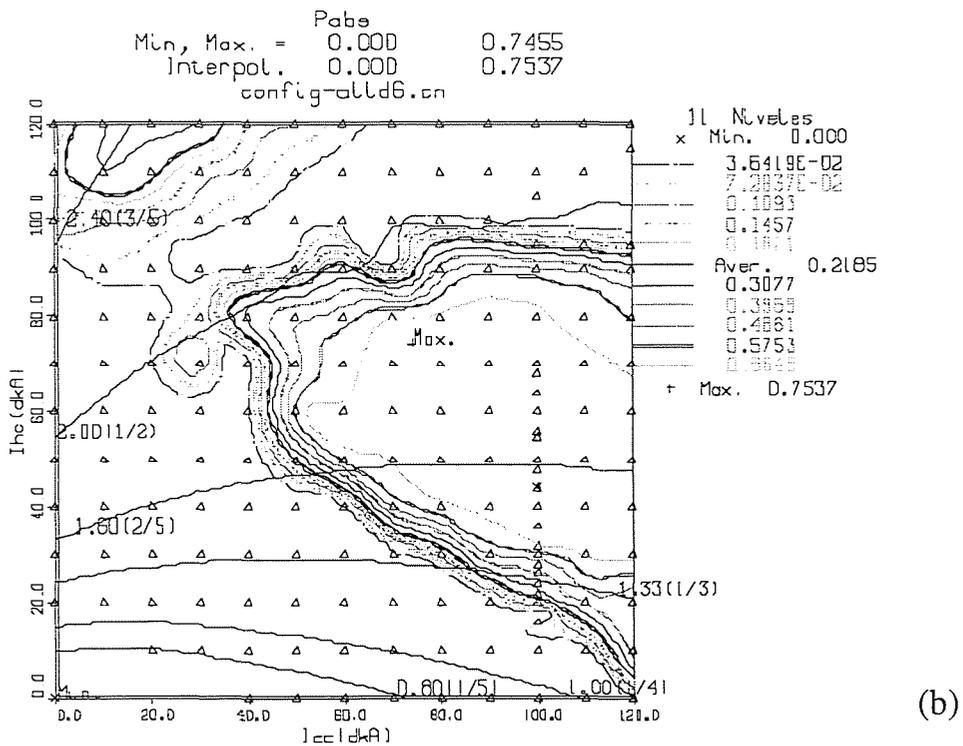
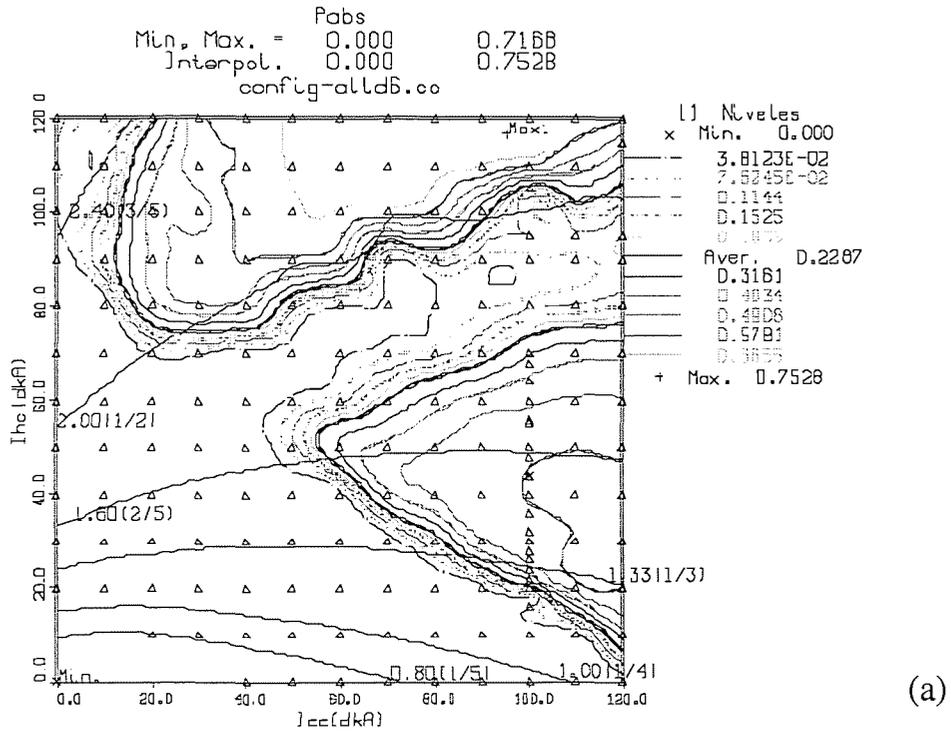
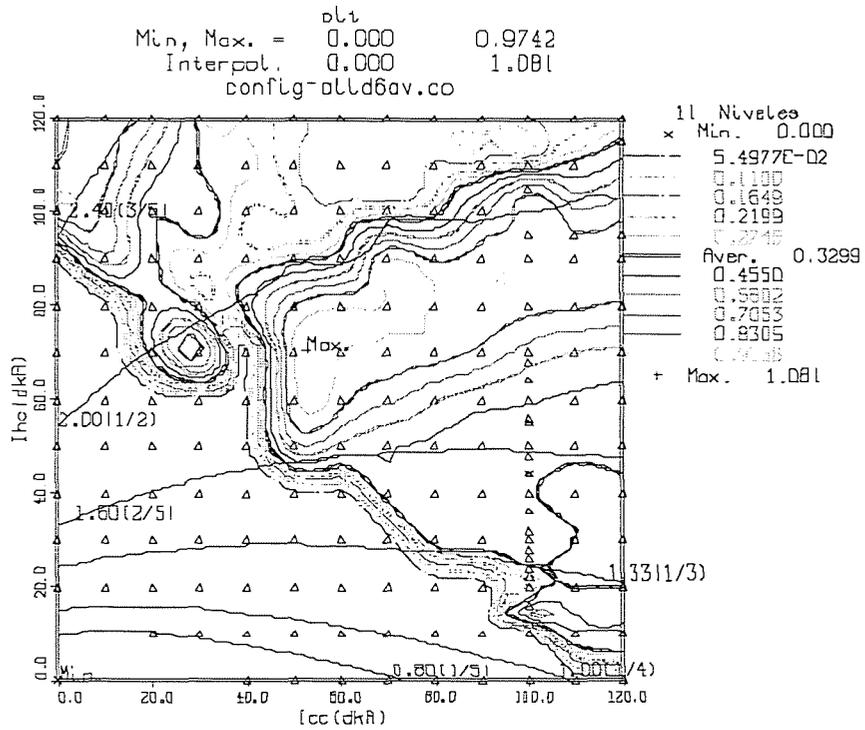
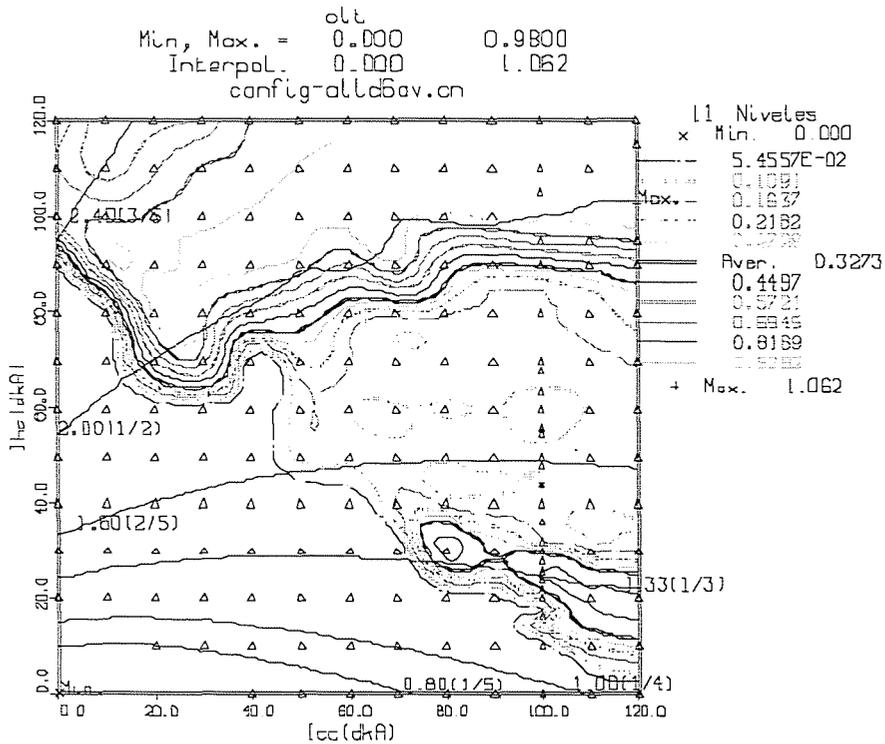


Fig.2.5



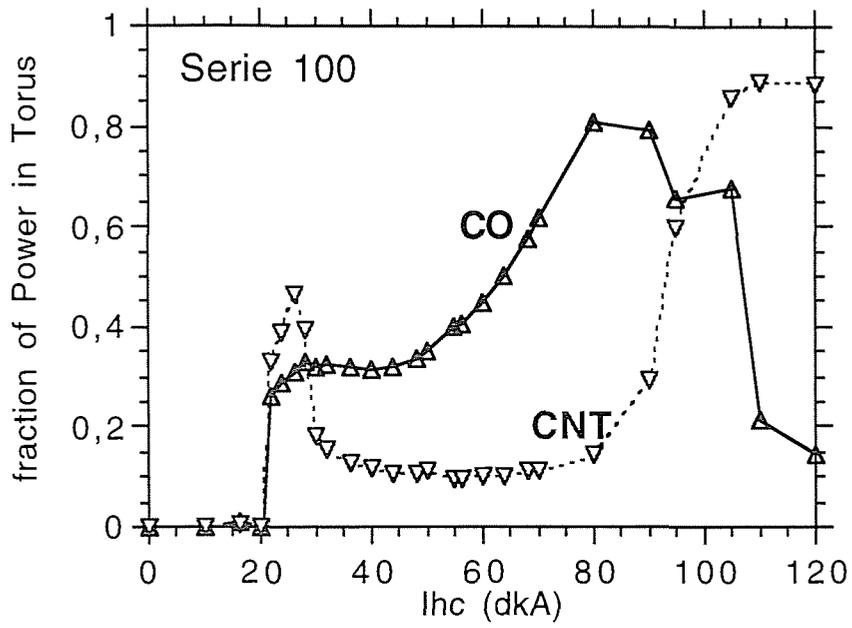
(a)



(b)

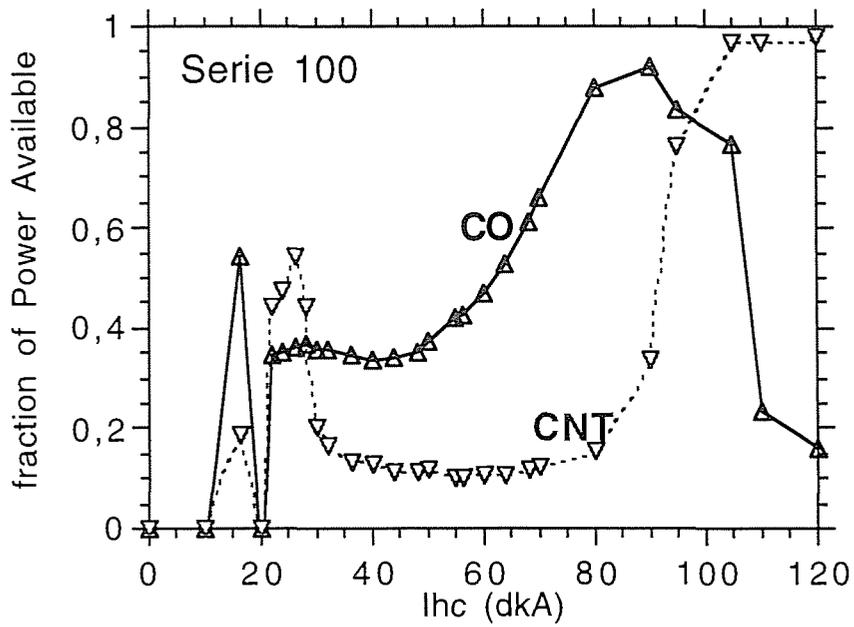
Fig.2.6

Orbit Losses High density



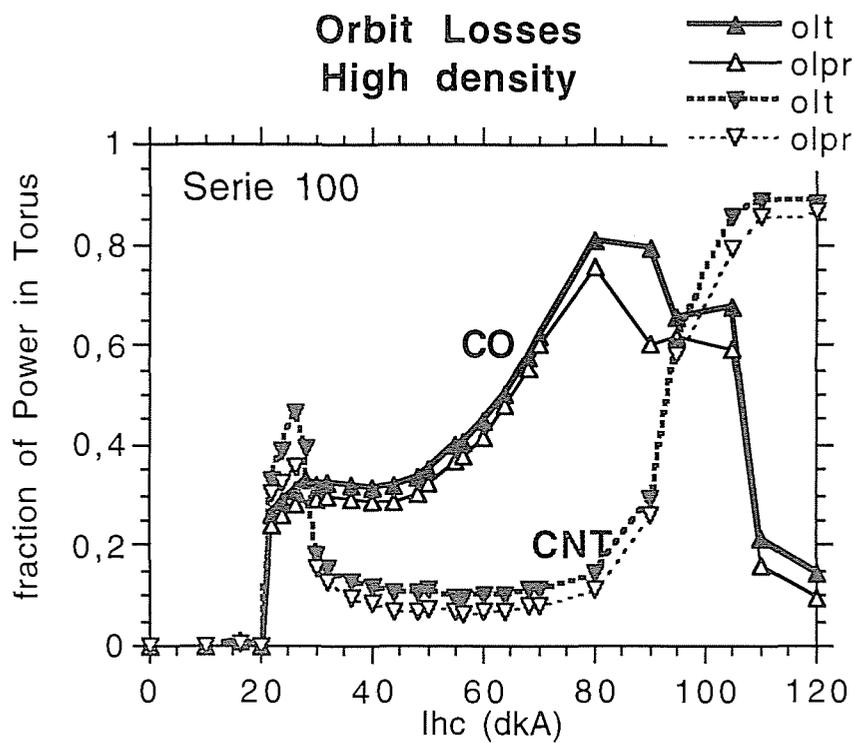
(a)

Orbit Losses High density

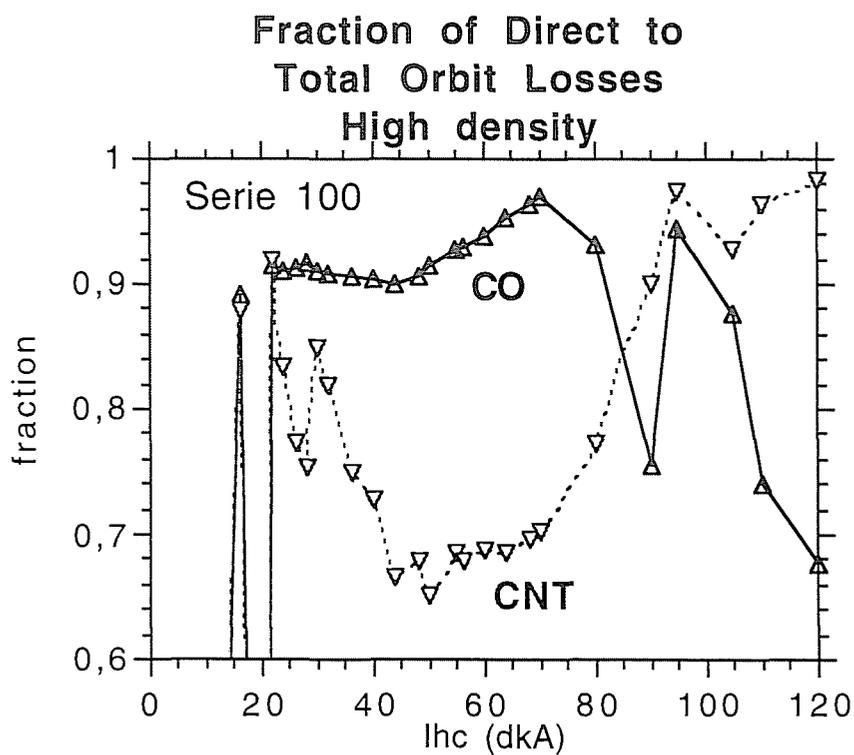


(b)

Fig.2.7

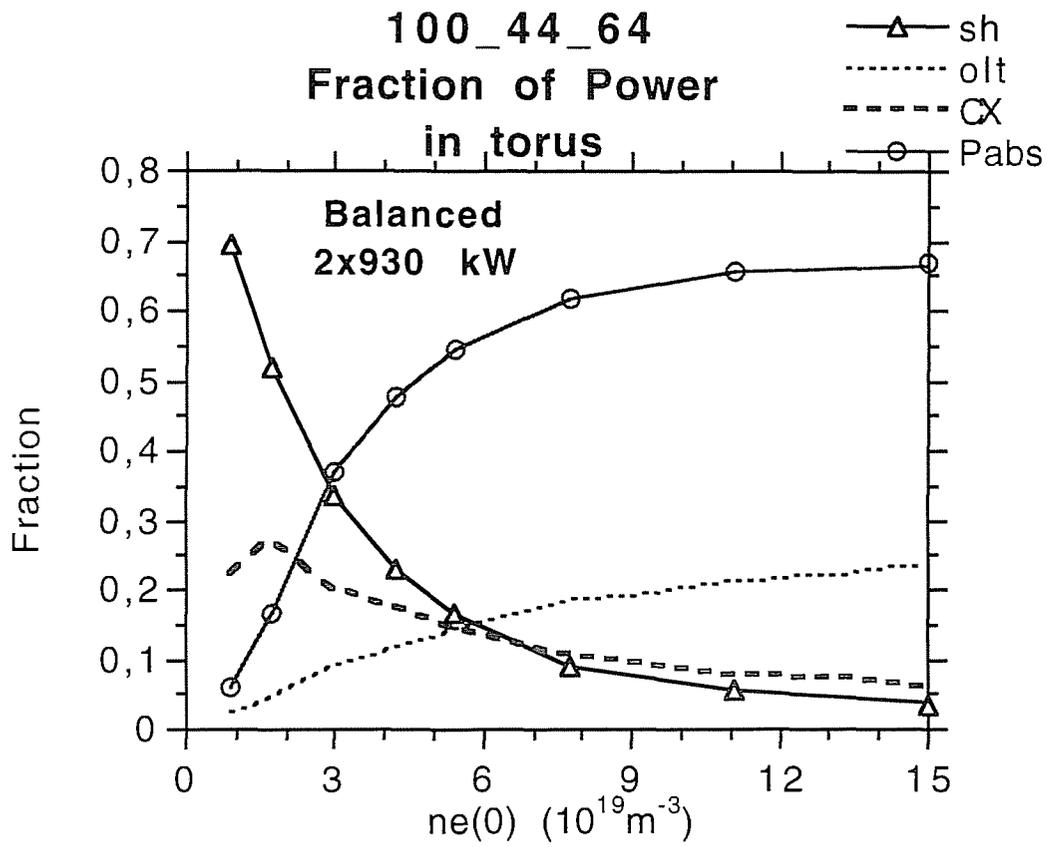


(a)

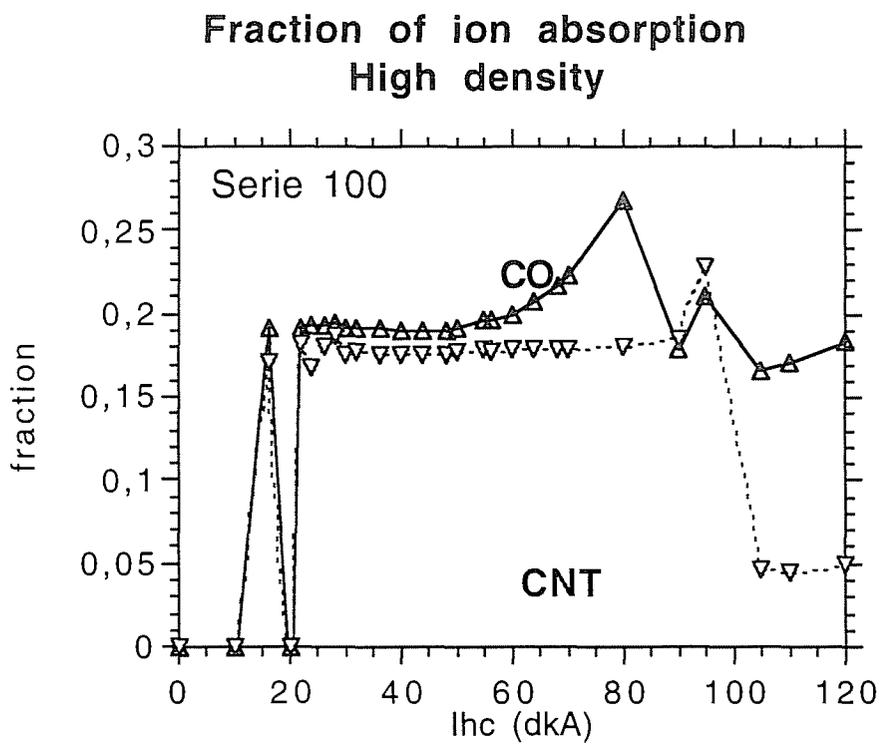


(b)

Fig.2.8



(a)



(b)

Fig.2.9

100_44_64
Gas Puffing

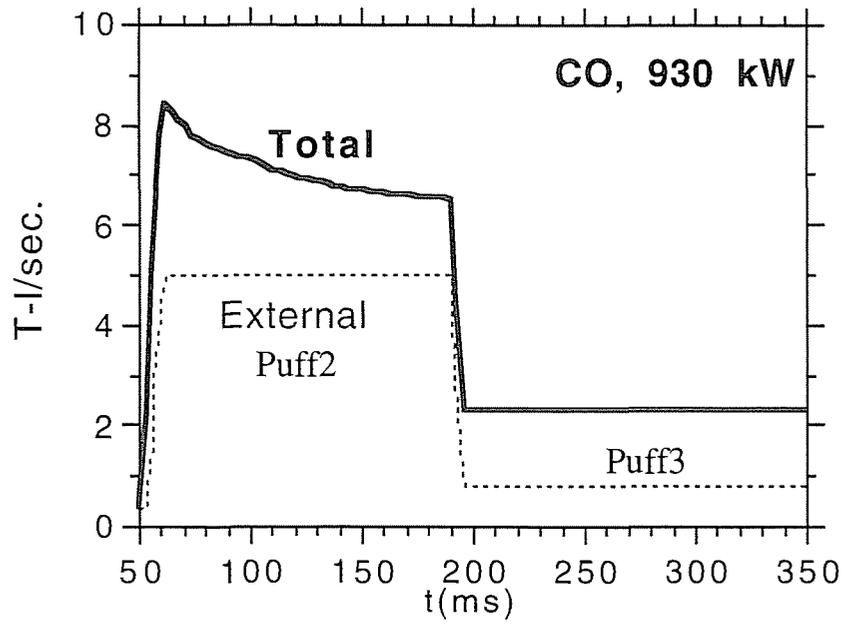
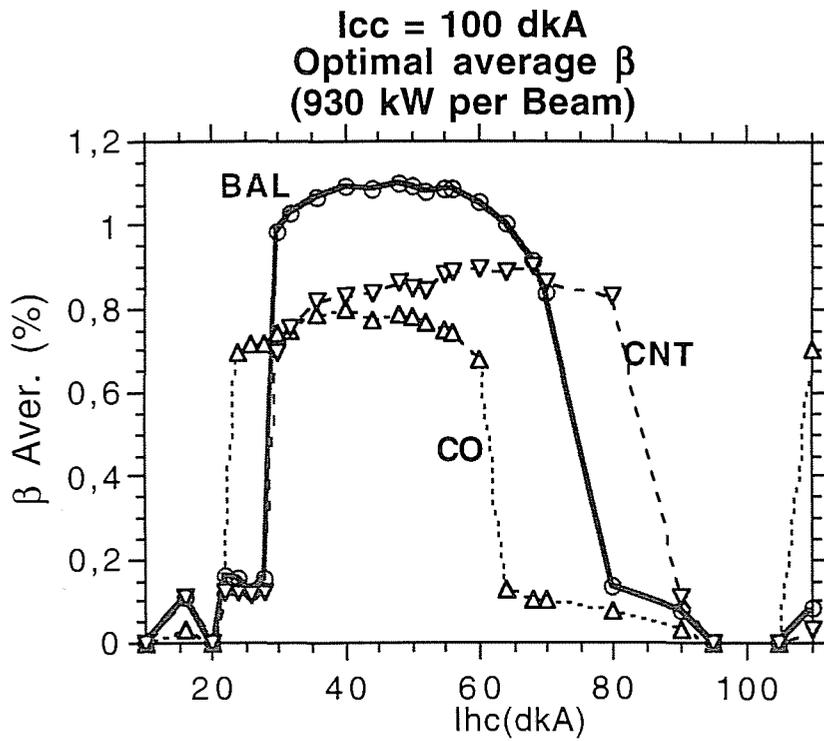
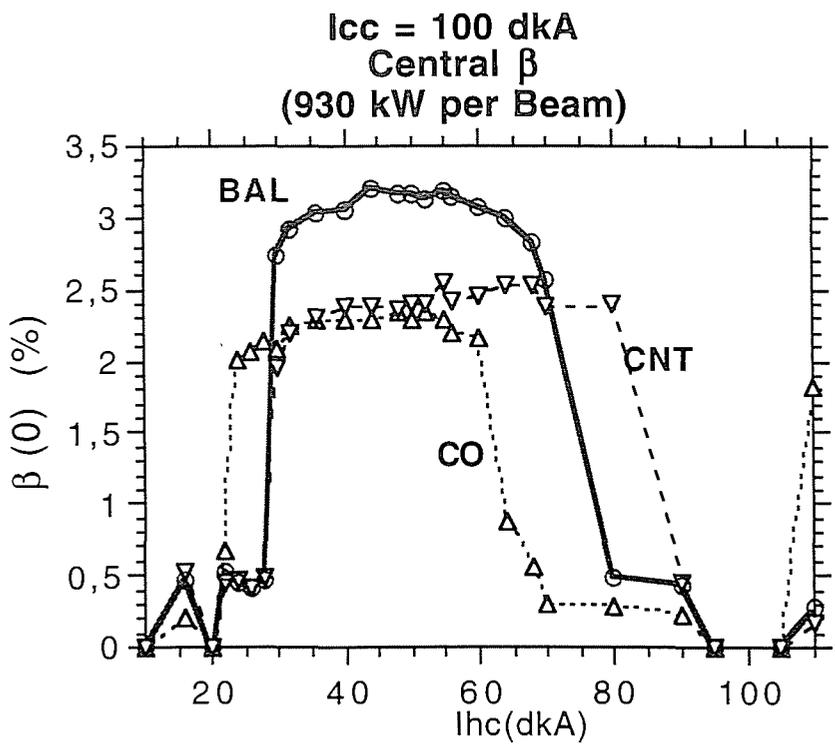


Fig.2.10

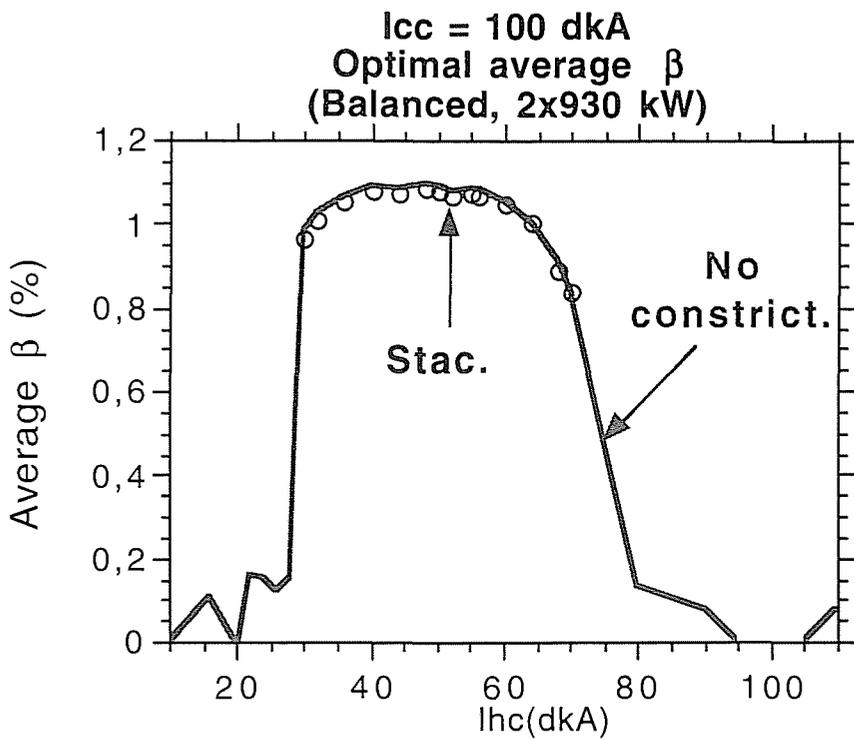


(a)

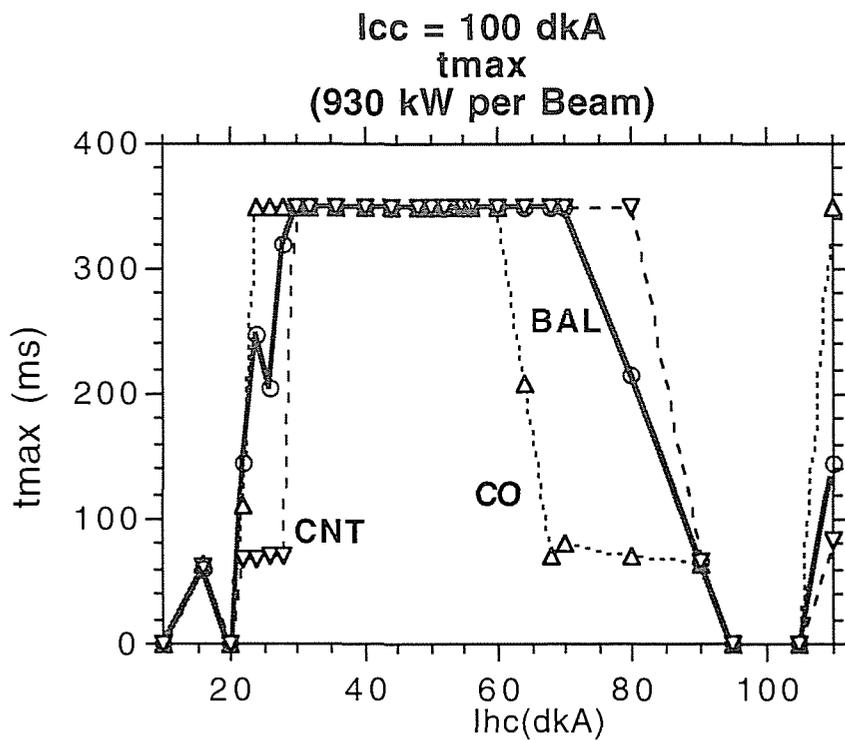


(b)

Fig.3.1



(a)



(b)

Fig.3.2

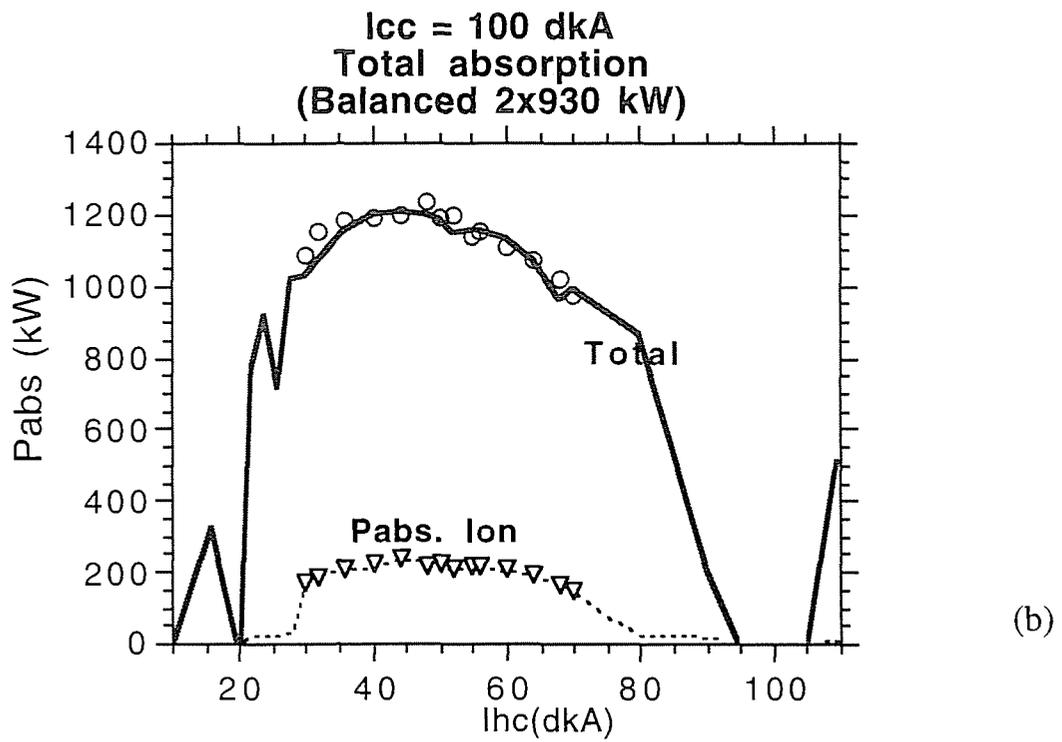
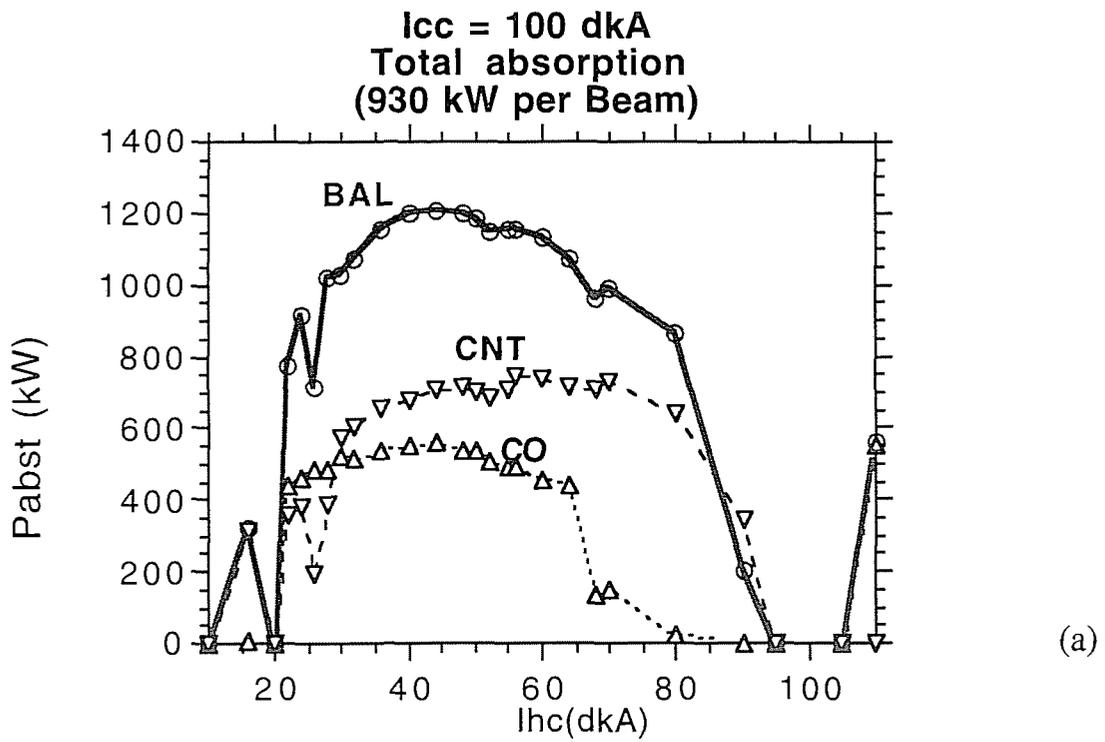
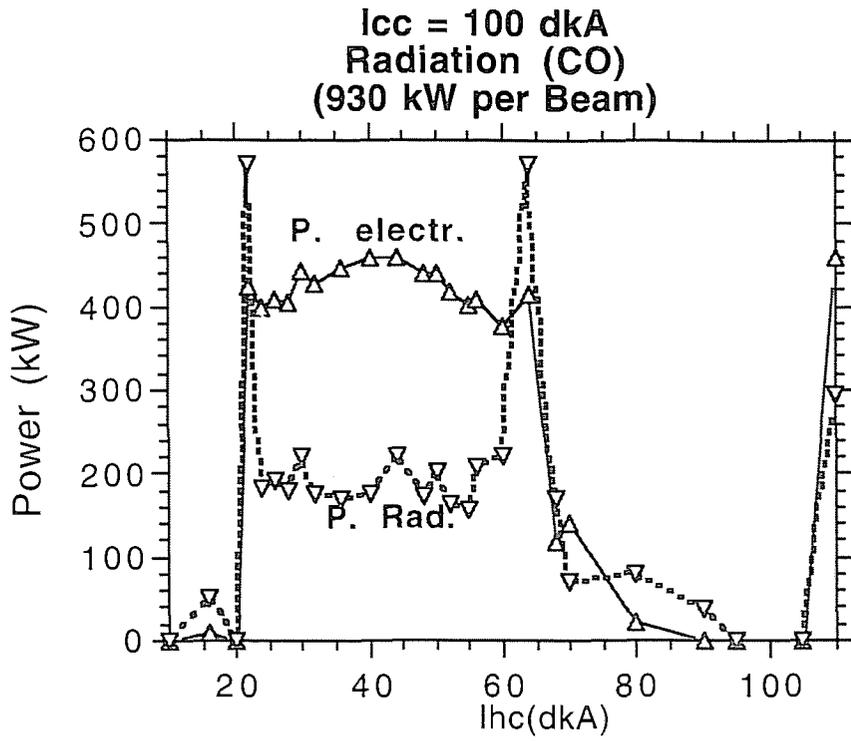
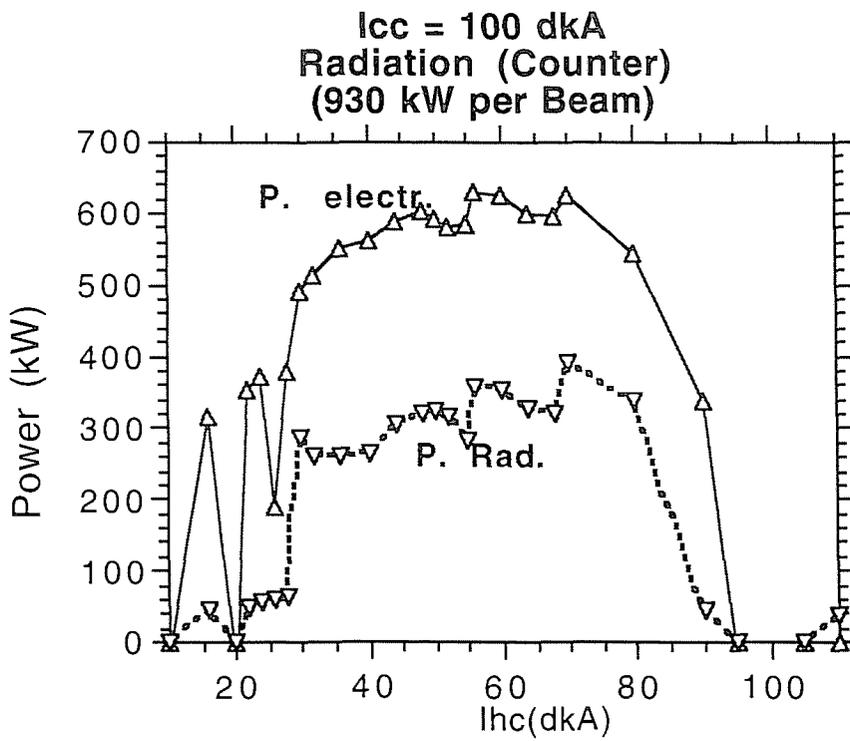


Fig.3.3



(a)



(b)

Fig.3.4

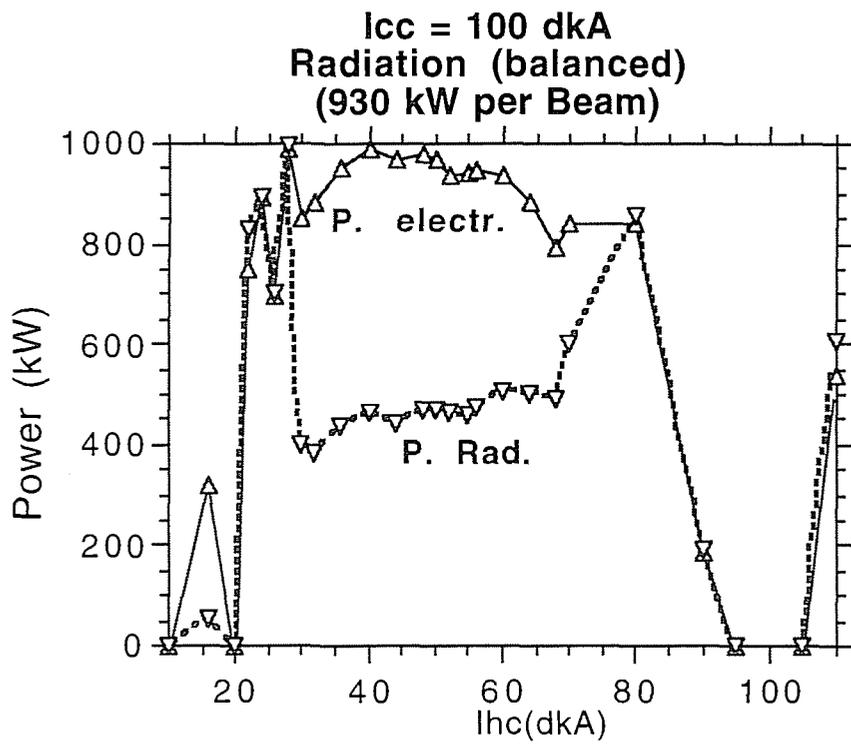
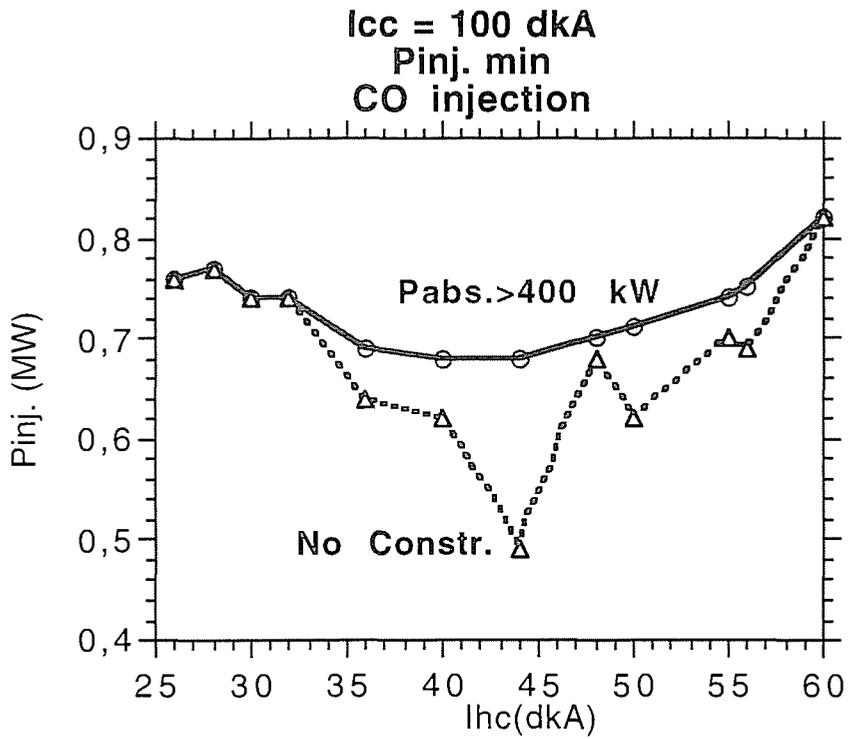
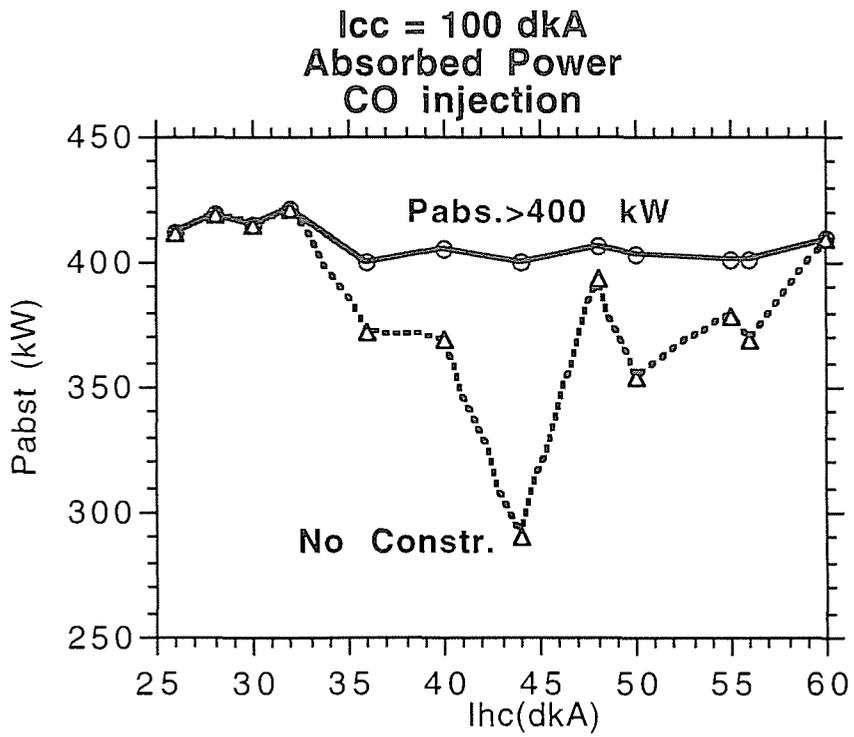


Fig.3.5

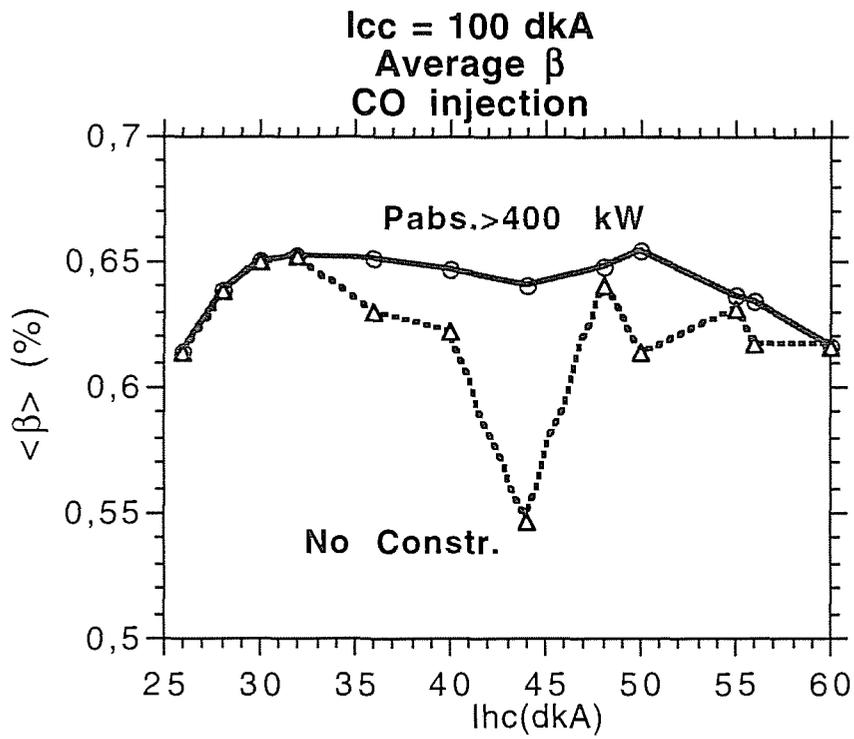


(a)

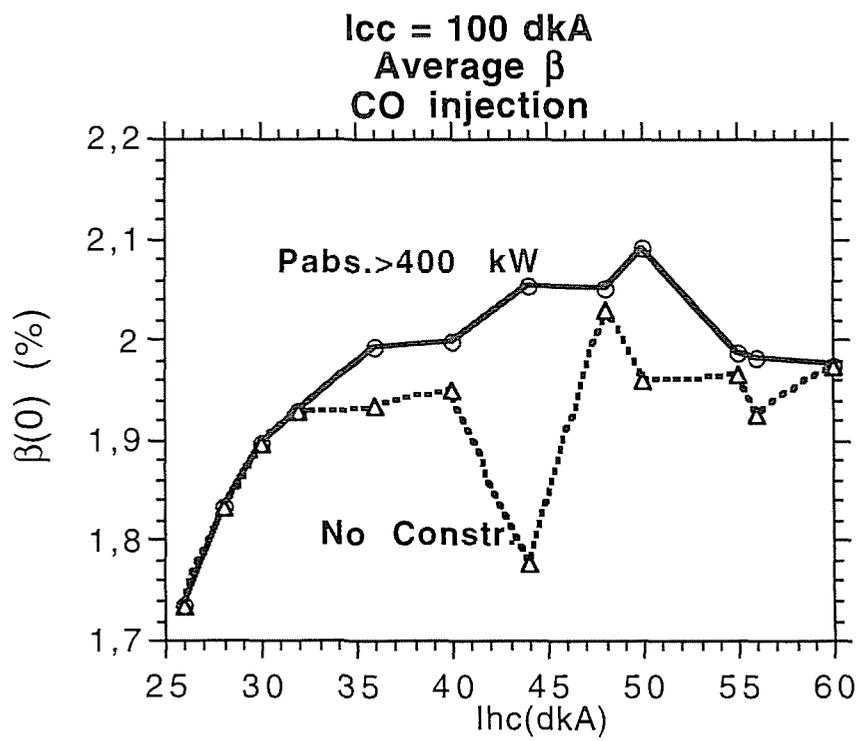


(b)

Fig.4.1

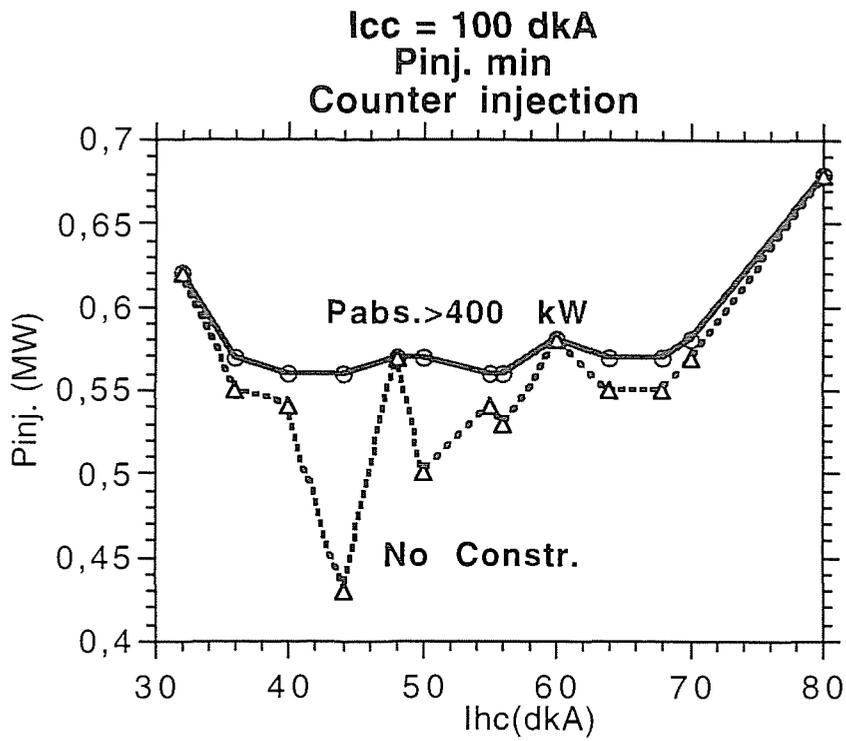


(a)

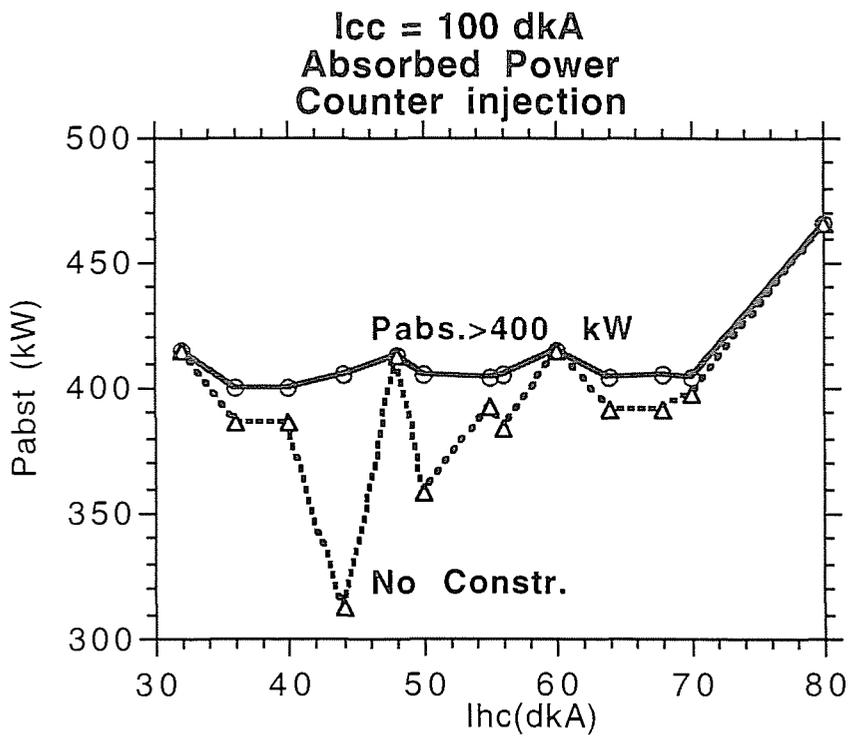


(b)

Fig.4.2



(a)



(b)

Fig.4.3