

Dinámica de Impurezas durante  
la Inyección de Haces Neutros  
en el TJ-II (Simulación)

J. Guasp  
C. Fuentes  
M. Liniers

*Asociación EURATOM/CIEMAT para Fusión - 75*

**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;  
BEAM INJECTION; NUMERICAL ANALYSIS; TOKAMAK DEVICES; NEUTRAL ATOM  
BEAM INJECTION.

## **“Dinámica de Impurezas durante la Inyección de Haces Neutros en el TJ-II (Simulación)”**

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.

84 pp., 51 fig., 12 refs.

### **Resumen:**

En este estudio se extienden las simulaciones de transporte con inyección de haces neutros (NBI) efectuadas anteriormente para el TJ-II. Desde entonces un considerable número de modificaciones importantes ha sido introducido en el modelo: cambio de configuración magnética, uso de perfiles iniciales experimentales, extensión de la Base de Datos de los cálculos para NBI y, sobre todo, un tratamiento detallado de las impurezas con inclusión de los efectos de *sputtering*. Además ahora se ha puesto énfasis particular en el análisis de las condiciones de colapso de la descarga y en los posibles efectos de la inyección con un solo haz.

Este análisis detallado de la dinámica de impurezas con *sputtering* indica que en los casos previstos como usuales no aparecería colapso radiativo y que si los coeficientes de reciclado se mantienen por debajo de la unidad siempre es posible elegir una estrategia de inyección externa de gas que conduzca a estado estacionario con densidades por debajo del límite y absorción de NBI eficiente (> 50%).

El colapso radiativo puede producirse a densidades elevadas (valor central superior a  $1.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ), flujo excesivo de impurezas (p. ej. tasas de *sputtering* unas dos veces superiores a las previstas) o potencia de inyección insuficiente (por debajo de 450 kW en total).

El estudio presente analiza solo los resultados correspondientes a la configuración 100\_44\_64 del TJ-II, aunque en próximos trabajos se efectuará un recorrido sistemático de las configuraciones de la “Serie 100” utilizando este mismo modelo.

## **“Impurity Dynamics under Neutral Beam Injection at TJ-II (simulation)”**

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.

84 pp., 51 fig., 12 refs.

### **Abstract:**

In this study the simulations of plasma transport under NBI for TJ-II, previously performed, are extended. Since then a considerable number of important modifications have been introduced in the model: change of magnetic configuration, use of experimental initial profiles, expansion of the Data Base from NBI calculations and, mainly, a detailed handling of impurities with inclusion of sputtering effects. Moreover there is now a particular emphasis on the analysis of the conditions for discharge collapse and on the possible effects of single beam injection.

This analysis of impurity behaviour with sputtering shows that in the expected usual cases there is no radiative collapse and that if the recycling coefficients remain lower than unity it is always possible to find a strategy for external gas puffing leading to a stationary state, with densities below the limit and efficient NBI absorption (>50 %).

The radiative collapse can appear either at high densities (central value higher than  $1.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ), excessive influx of impurities (i.e. with sputtering rates higher than twice the expected values) or for insufficient injected beam power (less than 450 kW).

The present study analyses only the 100\_44\_64 configuration of TJ-II, but future works will start a systematic scan of configurations using this same model.



# **INDICE**

## 1. Introducción.

## 2. Método de cálculo.

- 2.1. Tratamiento de la inyección de haces neutros
- 2.2. Tratamiento del transporte de plasma.
- 2.3. Tratamiento de las impurezas

## 3. Resultados en los casos normales.

- 3.1. Evolución temporal.
- 3.2. Perfiles radiales.

## 4. Ejemplos de colapso radiativo.

- 4.1. Colapso por exceso de densidad.
- 4.2. Colapso por exceso de impurezas.
- 4.3. Colapso por insuficiencia de potencia inyectada.
- 4.4. Necesidad de inyección externa de gas.

## 5. Caso de inyección con un solo haz.

## 6. Conclusiones.

Referencias.

Lista de figuras.



## 1. Introducción

En este estudio se extienden las simulaciones de transporte con inyección de haces neutros (NBI) efectuadas anteriormente para el TJ-II [1]. Desde entonces un considerable número de modificaciones importantes ha sido introducido en el modelo: cambio de configuración magnética (100\_44\_64 en lugar de la antigua Ref2), uso de perfiles iniciales experimentales, extensión de la Base de Datos de los cálculos para NBI y, sobre todo, un tratamiento detallado de las impurezas con inclusión de los efectos de *sputtering*, etc., cambios que serán discutidos en el §2. Esto hace que las comparaciones de los resultados actuales con los anteriores [1] no siempre sean relevantes.

Además ahora se ha puesto énfasis particular en el análisis de las condiciones de colapso de la descarga (§4) y en los posibles efectos de la inyección con un sólo haz (§5).

El estudio presente analiza solo los resultados correspondientes a la configuración 100\_44\_64 del TJ-II, aunque en próximos trabajos se efectuará un recorrido sistemático de las configuraciones de la “Serie 100” utilizando este mismo modelo.

## 2. Método de cálculo

El método de cálculo seguido es similar al utilizado en [1], aunque se han introducido notables modificaciones, especialmente en los perfiles radiales iniciales, que ahora son los experimentales (§2.2), y sobre todo en el tratamiento de las impurezas (§2.3).

### 2.1. Tratamiento de la inyección de haces neutros.

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],[6]. Este código incluye, entre muchos otros efectos y resultados, los siguientes:

- Pérdidas de *Shine Through* (ST).
- Pérdidas de cambio de carga (CX) con el fondo de neutros fríos procedentes de la pared de la cámara de vacío (VV).
- Pérdidas de iones rápidos, tanto directas como colisionales.
- *Pitch angle scattering* y difusión de energía.
- Moderación y termalización de los iones rápidos en el plasma.
- Perfiles radiales de nacimiento de iones rápidos y de absorción de los electrones e iones del plasma.
- Efecto de las impurezas del plasma.
- Coeficientes de *sputtering* debidos al ST y al CX.
- Cálculo separado de la inyección CO y Counter.
- Cálculo de espectros y de la función de distribución.

El código necesita, entre otras cosas:

- Datos del sistema de inyección.
- Datos de la configuración magnética.
- Perfil radial de neutros fríos fijo, dado externamente.
- Perfiles de densidad y temperaturas fijos, dados externamente, distintos para cada densidad.

Además en esta última versión se utilizan:

- Perfiles radiales experimentales para densidades bajas, tomados de la descarga #3088 con la configuración 100\_44\_64 del TJ-II [7].
- Uso de la rejilla tridimensional en espacio real [8],[9], en lugar de las coordenadas de flujo.
- Paralelización en el ordenador Origin-3800.

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 [6].

Se recordará también [4] 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. 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 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 en un 0.1%.

## 2.2. Tratamiento del transporte de plasma.

El cálculo de la evolución del plasma y sus balances energéticos ha sido realizado mediante el código 1-1/2D Proctr [10]. El método seguido ha sido el mismo que en [1], aunque se han introducido algunas diferencias notables que se mencionan a continuación.

Al igual que en [1] las evaluaciones para el *Shine Through* (ST), pérdidas y absorción del plasma se interpolan de la base de datos procedente de cálculos previos de NBI, aunque ahora esas tablas son mucho más extensas.

Los perfiles radiales iniciales para la densidad y temperaturas del plasma se toman, esta vez, de datos experimentales (descarga #3088 con la configuración 100\_44\_64 del TJ-II [7], Fig.2.1).

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 (*gas puffing*, GP) “equivalente” (Fig.2.2).

La estrategia de inyección de gas (*gas puffing*, GP) se ajusta para conseguir un *plateau* de densidad y absorción hacia mitad de la descarga (Fig.2.3). 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). El perfil radial de esos coeficientes tiene forma de escalón redondeado (Fig.2.4). Durante la fase de ECRH esos coeficientes se ajustan a los datos experimentales y existe una transición suave entre los coeficientes de transporte de la fase ECRH y NBI (cf. §2.4 de [1]).

Durante las primeras fases de la descarga la densidad del plasma puede ser inferior a la de corte del ECRH, por lo que pueden coexistir ECHR y NBI. El perfil radial de deposición de ECRH se ha tomado de los cálculos de trazado de rayos [7] para la línea de inyección QTL2, que ahora es mucho más estrecho que en [1] (Fig.2.5). Durante la coexistencia con los NBI ese perfil de deposición se va modificando paulatinamente a medida que la densidad va sobrepasando el corte.

El código de transporte ha sido transferido al Origin-3800 permitiendo su paralelización cuando se efectúan recorridos de parámetros. Para un caso típico (el de inyección balanceada, con modelo completo de impurezas, del §3.1) el tiempo de CPU en el Origin-3800 (jen50) es de unos 4 min., mientras en el AlphaServer-8400 (fusc) es de 11 min. Debe recordarse [1] que cada caso individual del código no es paralelizable.

Pero, sin duda, el cambio más importante es el tratamiento de las impurezas del plasma.

### 2.3. Tratamiento de las impurezas.

En las simulaciones anteriores [1] el efecto de las impurezas del plasma solo se tenía en cuenta en la dependencia de la absorción de NBI con la Z efectiva ( $Z_{\text{eff}}$ ) del plasma. En el código de transporte, por el contrario, se limitaba a suponer que ese efecto se traducía, simplemente, en una pérdida de radiación proporcional a la potencia total absorbida por los electrones del plasma (usualmente un 20%). Además los criterios de “colapso” se basaban en una ley de escala semiempírica [11]. Es evidente que este modelo era excesivamente simple y necesitaba modificación.

Ahora, en cambio, las impurezas se tratan con mucho más detalle [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. En principio una buena parte de las pérdidas de ST irían a las protecciones de grafito (~ 75%), lo contrario sucedería con el resto de pérdidas. Como la proporción de pérdidas que va a cada una de esas partes es difícil de calcular, varía dinámicamente a lo largo de la descarga y depende fuertemente de la configuración, se ha introducido un parámetro que fija esa proporción. Los diversos coeficientes de *sputtering* también pueden ser variados por encima, o por debajo, de sus valores reales.

La fuente de la 3ª impureza (el “O”, cuya naturaleza, como ya se ha indicado, puede ser modificada) 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. Tanto ese coeficiente de proporcionalidad, como la proporción inicial de O, pueden ser variados. Los valores usuales para esos dos parámetros se fijan de manera que, en ausencia de *sputtering*, se reproduzcan los resultados en *plateau* del modelo [1] para el caso balanceado (es decir  $Z_{\text{eff}} = 1$  para el plasma y 20% de pérdidas por radiación).

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.

### 3. Resultados en los casos normales

Los casos que denominamos “normales” serían aquellos con tasas de *gas puffing* (GP) moderadas y potencias de inyección usuales, que, en principio, cabría esperar que no dieran lugar a colapso de la descarga.

#### 3.1. Evolución temporal.

La Tabla 3.I muestra los valores de las principales magnitudes de plasma al final de la descarga (a los 350 ms, es decir 300 ms después del inicio de la inyección). En todos los casos la inyección de haces neutros comienza 50 ms después del inicio de la descarga que, en ese momento, se supone que ha alcanzado ya un estado estacionario con solo ECRH [1]. Es evidente que ese valor de 50 ms para el instante inicial es completamente arbitrario.

Los haces poseen un tiempo característico de variación de potencia de 5 ms y una duración de 300 ms. La tasa inicial de GP durante los primeros 50 ms de la descarga es de 0.35 T-l/s, la necesaria para mantener la descarga durante la fase de ECRH. A partir de ese momento esa tasa sube al valor Puff2 de la Tabla 3.I, para bajar más tarde, a los 190 ms, al valor Puff3 con el fin de mantener la descarga en *plateau* (Fig.2.2). La potencia de ECRH, que solo actúa mientras la densidad local es inferior a la de corte, es inicialmente 300 kW.

Los perfiles de partida aparecen en la Fig.2.1, corresponden a la descarga #3088 con la configuración 100\_44\_64 del TJ-II [7]. Como se observará el perfil de densidad es prácticamente plano, con valor central  $n_e(0) = 0.89 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , hasta un valor del radio medio, normalizado a 1 en el borde (s), de 0.6 y cae luego muy rápidamente para mantenerse en valores muy bajos,  $0.05 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , a partir de  $s \sim 0.85$ . El de la temperatura electrónica es casi triangular con valor central  $T_e(0) = 1037 \text{ eV}$ , mientras el de la iónica es bastante redondeado con valor central  $T_i(0) = 93 \text{ eV}$ .

La evolución temporal de las principales magnitudes aparece en las figuras siguientes para varias condiciones de inyección. Así la Fig.2.3 muestra la evolución de la densidad para los casos de inyección CO y Balanceada, mientras la 3.1.1 muestra la potencia total absorbida para los tres casos. Pasados los primeros momentos de la descarga todas esas magnitudes crecen muy rápidamente y acaban saturándose hacia los 200 ms (es decir 150 ms después del inicio de la inyección). Como es lógico [6] el haz CO (el que inyecta en la misma dirección que el campo magnético toroidal) produce menor absorción que el Counter.

La Fig.3.1.2 muestra la evolución de la  $\beta$  central y media en volumen, con comportamiento similar a los anteriores. Para el caso balanceado la  $\beta$  central, en saturación, alcanza un 3.3%, mientras la media en volumen  $\langle \beta \rangle$  es 1.1%. Estos valores son, respectivamente, 9.7 y 19 veces superiores a los de partida (los de la fase ECRH). Por otro lado esos valores de  $\beta$  son ligeramente inferiores (2% y 11%) a los que se obtienen con el modelo [1] (ausencia de impurezas con un 20% de pérdidas por radiación) y un 3% y 13% inferiores al caso sin pérdidas por radiación ni impurezas (Fig.3.1.3).

Por su parte la temperatura electrónica muestra oscilaciones antes de alcanzar saturación (Fig.3.1.4). Esas oscilaciones son fáciles de comprender; inicialmente la densidad está por debajo de la de corte y tanto ECRH como NBI coexisten, con lo cual, al comenzar el aporte suplementario de los NBI, las temperaturas crecen ligeramente. Sin embargo al llegar a corte (Fig.3.1.5) la absorción de ECRH desaparece muy rápidamente, mucho más aprisa de lo que aumenta la de NBI y las temperaturas bajan bruscamente. A partir de entonces solo actúan los NBI y como la

densidad es todavía relativamente baja y, en esas condiciones, los electrones absorben la mayor parte de la potencia [4], suben otra vez las temperaturas, sobre todo la electrónica. Posteriormente, al aumentar todavía más la densidad, se satura la absorción y las temperaturas decaen algo hasta alcanzar estado estacionario. La temperatura iónica presenta menos oscilaciones.

Esas variaciones, sobre todo en los primeros momentos de la descarga, aparecen muy claramente cuando se analizan los diversos términos de la potencia absorbida y radiada. Esto se muestra en las Fig.3.1.5 y 3.1.6 en donde se observa cómo, en estos casos “normales”, la caída en la absorción producida por la desaparición del ECRH se recupera rápidamente, en unos 30 ms para el caso balanceado, algo más (unos 65 ms) en el CO.

Por su parte las pérdidas por radiación permanecen siempre inferiores la potencia total absorbida por los electrones con un máximo hacia los 190 ms y otro máximo local, más visible en el caso CO, en el momento de desaparición del ECRH. En total las pérdidas por radiación representan el 42% (39%) de la potencia absorbida por los electrones en el caso balanceado (CO). El momento de máximo de radiación se alcanza hacia los 190 ms en que ésta constituye el 56% (58%). Para el caso CO, en el momento de la desaparición del ECRH (hacia los 68 ms), en donde aparece un máximo secundario local de la radiación, esta representa un 56%, en el caso balanceado esto sucede a los 62 ms con un 35%. Esos dos momentos son los más peligrosos y, como se verá en §4, es cuando en casos extremos puede producirse el colapso radiativo.

En cuanto al comportamiento de las impurezas la Fig.3.1.7a muestra la evolución de las densidades medias en volumen del Fe, C y O. La densidad de Fe y de C crecen hasta alcanzar un máximo hacia 150 ms y luego se saturan, mientras que la de O decrece monótonamente. Por su parte la  $Z_{eff}$  (Fig.3.1.7b) presenta oscilaciones similares a las de la temperatura electrónica y, en saturación, alcanza un valor máximo de 2.7 en el caso balanceado (cf. Tabla 3.I). Salvo en los primeros ms de la descarga el principal emisor de radiación es siempre el Fe.

Al igual que en [1], durante la fase de estado estacionario la colisionalidad, tanto electrónica como iónica, se encuentran en el régimen de *plateau*, el análisis para los regimenes de colisionalidad efectuado en §4.7 de [1] permanece vigente.

También el campo eléctrico, obtenido del balance de fuerzas (§4.12 de [1]), sigue mostrando una fuerte raíz “iónica”, es decir el campo eléctrico está dirigido hacia el interior del plasma, su valor en el borde para el caso balanceado es  $E(a) = -140$  V/cm, con potencial eléctrico central  $V(0) = -750$  V, lo que corresponde a casi 2 veces la temperatura electrónica central. Los valores para otras direcciones de inyección se muestran en la Tabla 3.I. Al igual que en [1] debe tenerse en cuenta que el efecto de ese intenso campo eléctrico no se ha tenido en cuenta ni en los coeficientes de transporte (en donde su influencia podría no ser excesivamente importante dado el régimen de colisionalidad, salvo quizás al principio de la descarga) ni en las pérdidas de iones rápidos (sobre todo las directas) en donde sí que podría tener importantes consecuencias [5].

En cuanto a la corriente eléctrica inducida por los haces neutros, su evolución, perfiles radiales y posibles efectos, será analizada posteriormente en el §5.

**Tabla 3.I. Magnitudes principales al final de la descarga**  
(t = 350 ms). Configuración 100\_44\_64.

	CO	Counter	Balanced
Pow. CO (MW)	0.930	0	0.930
Pow. Counter (MW)	0	0.930	0.930
Puff2 (T-l/s)	4.8	5.1	3.8
Puff3 (T-l/s)	0.8	1.4	0.1
ne(0) (m <sup>-3</sup> )	1.02x10 <sup>20</sup>	1.04x10 <sup>20</sup>	1.24x10 <sup>20</sup>
ne-line (m <sup>-3</sup> )	6.3x10 <sup>19</sup>	6.4x10 <sup>19</sup>	7.5x10 <sup>19</sup>
<ne> (vol.) (m <sup>-3</sup> )	4.6x10 <sup>19</sup>	4.6x10 <sup>19</sup>	5.4x10 <sup>19</sup>
ne-line limit (m <sup>-3</sup> )	6.5x10 <sup>19</sup>	7.9x10 <sup>19</sup>	1.13x10 <sup>20</sup>
Pabs. Tot. (MW)	0.54	0.66	1.16
Pabs/Pinj. (%)	58	71	62
Pabs. el (MW)	0.45	0.54	0.913
PeI/Pabs (%)	83	82	79
Pot. Rad (MW)	0.18	0.22	0.39
P. Rad / P. el (%)	39%	40%	42%
Te(0) (eV)	330	343	390
Ti(0) (eV)	270	280	300
β(0) (%)	2.4	2.5	3.3
<β> (vol.) (%)	0.75	0.80	1.1
τ <sub>E</sub> (ms)	6.5	8.2	6.1
τ <sub>p</sub> (ms)	10.2	9.3	7.7
<Zeff> (vol.)	1.4	1.4	1.6
Zeff Max.	2.2	2.4	2.7
nn(0) (cm <sup>-3</sup> )	6.7x10 <sup>7</sup>	8.0x10 <sup>7</sup>	9.2x10 <sup>7</sup>
nn(a) (cm <sup>-3</sup> )	4.7x10 <sup>10</sup>	5.2x10 <sup>10</sup>	7.2x10 <sup>10</sup>
nn(a)/ nn(0)	700	650	770
V(0) (V)	-620	-660	-750
V(0)/Te(0)	-1.9	-1.9	-1.9
E(a) (V/cm)	-100	-110	-140
J beam (kA)	+3.3	-4.3	-0.76
J beam Max (kA)	+10.6	-14.2	-5.1

### 3.2. Perfiles radiales.

La Fig.3.2.1 muestra los perfiles radiales de densidad y temperaturas al final de la descarga para los casos de inyección CO y balanceada. Se observará que estos perfiles son bastante más anchos y redondeados que los de partida (Fig.2.1), y permanecen con su máximo en el centro del plasma a lo largo de toda la descarga. Se observa también que en la periferia del plasma, al contrario que en el centro, la temperatura iónica es superior a la electrónica, sobre todo en el caso balanceado. Esto tiene consecuencias para el balance de potencia en esa zona.

El perfil del balance de potencia de los electrones, para el instante final, en el caso balanceado, se muestra en la Fig.3.2.2 con sus diversos aportes. En este caso "normal" (sin colapso) el balance de potencia se establece, principalmente, entre la absorción de los NBI (que a esta densidad relativamente alta presenta un perfil ligeramente hueco) y la transferencia de potencia entre electrones e iones y, en menor medida, con el término de conducción, en este caso el término de radiación es aún más débil. Algo similar ocurre para las otras posibilidades de inyección.

Conforme a lo indicado anteriormente, en la periferia del plasma son los electrones los que reciben energía de los iones y lo mismo ocurre ahí con el término de conducción. Esto quiere decir que si, como ocurre en este caso, la radiación se concentra en esa zona, los electrones podrían "tolerar" fácilmente pérdidas de radiación aún más elevadas. Lo contrario sucedería si la radiación se concentrara algo más al interior, sobre todo en el centro. Como se verá en §4, cuando eso sucede aparece el colapso radiativo.

Un esquema más nítido de ese balance aparece en la Fig.3.2.3, que esta vez muestra solamente la potencia absorbida por los electrones y las pérdidas por radiación (cambiadas de signo para poder así compararlas mejor con las anteriores) y también la correspondiente a los iones junto con sus pérdidas de CX. También se incluye el caso de inyección CO. Es evidente que tanto las pérdidas por radiación como las de CX se concentran en la periferia y son mucho menores que los aportes de potencia en la mayor parte del plasma.

La evolución del perfil de radiación aparece en la Fig.3.2.4 y muestra claramente su concentración periférica, con un máximo que inicialmente va progresando paulatinamente hacia el interior del plasma, aunque acaba estabilizándose sin penetrar excesivamente.

La Fig.3.2.5 muestra una gráfica similar para la densidad del Fe, que es quien produce la mayor parte de la radiación. Esos perfiles son huecos durante la primera parte de la descarga pero al final, una vez conseguida la estabilización, se convierten en ligeramente centrados (Fig.3.2.6). Los del resto de las impurezas (C y O) son, en este caso, bastante planos. Por el contrario los perfiles radiales de la  $Z_{eff}$  del plasma están extremadamente concentrados en la periferia (Fig.3.2.7), consecuencia de los altos estados de carga del Fe a esas temperaturas.

El perfil radial de neutros fríos procedentes de la pared aparece en la Fig.3.2.8 para dos instantes de tiempo, junto con el perfil utilizado para los cálculos de NBI [3]. Se observará que el obtenido mediante el código de transporte permanece por debajo o es muy cercano al utilizado para los NBI, salvo durante los primeros instantes de la descarga (Fig.3.2.8b) en donde la densidad central de neutros es algo mayor. La pendiente, que está ligada a la atenuación de esa población de neutros causada por su ionización en el plasma, también es muy similar. Lo que puede comprobarse también en la Fig.3.2.9 en donde se muestra la evolución

temporal de los valores central y en el borde. Esto muestra que, al menos en estos casos, la hipótesis de partida para este perfil parece bastante razonable.

#### 4. Ejemplos de colapso radiativo

Los casos analizados en el §3 (que son, en principio, los esperados para el TJ-II) no presentan colapso radiativo, la descarga consigue alcanzar un estado estacionario con potencia radiada intensa pero tolerable. Sin embargo si se fuerzan algunos de los parámetros fuera del rango esperado la radiación puede incrementarse lo suficiente para dar lugar a colapso, la descarga acaba entonces prematuramente. De las muchas posibilidades de conseguir este fenómeno analizaremos solo tres suficientemente representativas.

##### 4.1. Colapso por exceso de densidad

La primera posibilidad de colapso que analizaremos es la que podría producirse por un exceso de densidad en el plasma que “ahogara” la descarga. Un modo sencillo de reproducir esta posibilidad con el modelo es incrementar las tasas de inyección externa de gas (el *gas puffing*, GP, Fig.2.2).

La Fig.4.1.1 muestra el efecto del aumento de esa tasa sobre los valores  finales  de la densidad central y la  $\beta$  media en volumen (es decir del contenido energético del plasma) para las tres condiciones de inyección. Se observa que al ir aumentando el valor de GP (Puff2 de la Tabla 3.I) la densidad crece paulatinamente, como cabía esperar, pero a partir de cierto valor (diferente en cada caso) comienza a decrecer. Mientras que  $\beta$  decrece al principio muy suavemente y, repentinamente, se derrumba a valores muy pequeños, del orden de 1/10 del valor usual.

La razón de ese colapso puede verse en la Fig.4.1.2, se observa ahí cómo, para esos valores críticos la descarga termina prematuramente, mucho antes de los 350 ms que serían capaces de mantener los inyectores, acabando a los 150 o 200 ms. Además en Fig.4.1.2b se muestra la dependencia de las potencias absorbidas y radiadas con el GP. Es evidente que el colapso tiene lugar cuando la potencia radiada supera, con creces, la absorbida por los electrones (e incluso la total), en esas condiciones la potencia depositada por los haces no puede sostener la descarga, las temperaturas caen y la descarga termina. Se trata de un colapso radiativo.

Para el caso balanceado el colapso tiene lugar para valores de Puff2 superiores a 8 T-l/s (Puff3 > 1.4) cuando la densidad central alcanza  $1.38 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ . En el caso CO eso sucede antes: a 6.7/1.5 T-l/s y  $1.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , mientras que el Counter es intermedio. El colapso del caso CO ocurre a nivel más bajo ya que absorbe menos potencia que los otros (con lo cual tiene menos capacidad para soportar las pérdidas por radiación) y además produce más pérdidas directas que ocasionan mayor *sputtering* y, por lo tanto, mayor flujo de impurezas de Fe.

Como ejemplo de descarga de este tipo se muestra en la Fig.4.1.3 la evolución temporal de las densidades y temperaturas para un caso balanceado con tasa de GP de 8.5 y 1.6 T-l/s, algo más del doble del caso usual (§3.1). Se observa que, por un lado, no llega a alcanzarse estado estacionario en la densidad, mientras que las temperaturas no se recuperan (comparar con Fig.3.1.4) y acaban derrumbándose.

La Fig.4.1.4 muestra la evolución de la  $\beta$  central y media, que solo alcanzan valores usuales (comparar con Fig.3.1.2) durante un brevísimo periodo de tiempo y enseguida se derrumban aceleradamente. La evolución de las potencias absorbidas y radiadas (comparar con 3.1.5) muestra que las pérdidas por radiación igualan a la absorción de los electrones hacia los 120 ms, el inicio del colapso comienza ahí. Posteriormente las pérdidas llegan a superar a la potencia total y el colapso se acelera irremisiblemente.

La evolución de los perfiles de radiación y de densidad del Fe (Fig.4.1.5a) muestra dramáticamente la secuencia. El máximo de radiación se mantiene en la periferia del plasma durante cierto tiempo aunque algo más al interior que en el caso normal (Fig.3.2.4) y más tarde, de manera muy rápida, llega hasta el mismo centro del plasma, simultáneamente aparece otro pico más periférico procedente del flujo de impurezas procedente de la pared.

Por su parte el perfil de densidad del Fe (Fig.4.1.5b) es claramente hueco al principio pero posteriormente su máximo se va desplazando hacia el interior del plasma. Esos perfiles, junto con los del plasma y de las otras impurezas, algo antes del final de la descarga (204 ms, la descarga termina a los 211) aparecen en la Fig. Fig.4.1.6, se observará ahora la estrechez de los perfiles de temperatura que, esta vez, al contrario que en §3.2 (Fig.3.2.1) poseen valores parecidos, y muy bajos, para electrones e iones.

El balance de potencia en el inicio del colapso, hacia los 130 ms, aparece en la Fig.4.1.7 (a comparar con las 3.2.2 y 3.2.3 del caso “normal”), en ese momento solo hay un pico de radiación, situado periféricamente, pero más al interior que en el caso normal y, sobre todo, mucho más intenso, ya que ahora la densidad del plasma es mayor y las temperaturas menores y la radiación crece con la densidad y se incrementa a bajas temperaturas. Aunque, como en §3.2, la transferencia de potencia entre iones y electrones ayuda a compensar algo de las pérdidas por radiación, al menos temporalmente, hasta que finalmente las impurezas (Fe) se propagan hacia el interior y desequilibran definitivamente el balance.

La Fig.4.1.8 muestra los mismos balances a los 204 ms, ya muy cerca del final de la descarga. En este caso aparecen los dos máximos de radiación que se comentaron anteriormente (Fig.4.1.5.a), el más externo podría ser compensado parcialmente, aunque probablemente es ya demasiado intenso, pero lo contrario sucede al más interno, producido por la propagación del Fe hacia el interior. Es éste el principal responsable del colapso acelerado final.

Este tipo de colapso podría aparecer eventualmente en las descargas del TJ-II en el caso en que no fuera posible el control de la densidad, no solo, como en esta simulación, a causa de un exceso de GP externo, sino también porque las condiciones de la pared produjeran coeficientes de reciclado de las partículas del plasma, o de las impurezas, muy superiores a los previstos.

## 4.2. Colapso por exceso de impurezas

Esta sería la causa más obvia de colapso y el modo más sencillo de simularla es incrementar, artificialmente, por encima de los valores usuales cualquiera de los parámetros ligados al tratamiento de las impurezas. Por ejemplo la tasa de *sputtering* en el Fe.

La Fig.4.2.1 muestra el efecto del aumento de esa tasa sobre el valor final de la  $\beta$  media en volumen y el tiempo de finalización de la descarga, para las tres condiciones de inyección. Se observa que al ir aumentando el valor del factor multiplicativo del *sputtering* en el Fe (Fac. Sputt), se produce una situación muy similar a las del §4.1. Mientras que  $\langle\beta\rangle$  decrece al principio suavemente, se derrumba bruscamente a valores muy pequeños y, en esos casos, la descarga termina prematuramente, a los 150 o 200 ms.

También en este caso, y por las mismas razones, el colapso tiene lugar antes, para valores de Fac. Sputt inferiores, en el caso CO que en los demás (2, frente a 3.6 para el balanceado) y, al igual que allí, aparece cuando las pérdidas por radiación superan a la absorción de los electrones (Fig.4.2.2).

Un ejemplo de este tipo de colapso aparece en las Fig.4.2.3 y 4.2.4 que muestran la evolución temporal de las temperaturas, de la  $\beta$  central y media del plasma y de las potencias absorbidas y radiadas, en un caso de inyección CO con valor de Fac. Sputt 2.5, es decir 2.5 veces superior al predicho por el código de NBI. Los comportamientos son enteramente similares a los del §4.1.

También son similares los perfiles de radiación y de impurezas (Figs.4.2.5, 4.2.6, 4.2.7). El máximo de radiación penetra paulatinamente en el plasma, apareciendo finalmente un doble pico, mientras los perfiles de impurezas, tanto Fe como C u O, permanecen huecos durante la mayor parte de la descarga. Finalmente el balance de potencia electrónica hacia el final de la descarga repite las mismas pautas que en §4.1 (Fig.4.2.8).

Las simulaciones muestran bastante poca sensibilidad al coeficiente que determina la parte de pérdidas que van al Fe y al C (las protecciones de grafito, §2.3) ya que las pérdidas por radiación se encuentran fuertemente dominadas por el Fe.

Algo similar sucede con los factores ligados a la impureza O: densidad inicial y coeficiente de reflexión (§2.3). Solo para una presencia masiva de esa impureza se produce el colapso y, en ese caso, usualmente, ocurre durante la fase de ECRH, violando la hipótesis inicial de que los NBI comienzan sobre un plasma "base" estable producido previamente por el ECRH. Por consiguiente si esa fase logra ser alcanzada, entonces no aparece colapso debido al exceso de O durante la fase de NBI.

Este tipo de colapso podría aparecer eventualmente en las descargas del TJ-II en el caso en que los espectros de energía del ST y del CX calculados para NBI, que son los que determinan la tasa de *sputtering*, fueran muy diferentes de los previstos, p.ej. con un exceso de partículas de baja energía, o bien apareciera un incremento importante en el *sputtering* químico, o en el inducido por otras impurezas de bajo número atómico (C, O), etc.. Otra posibilidad sería un exceso del flujo de impurezas por cualquier otra causa: contaminación de la pared, etc.

### 4.3. Colapso por insuficiencia de potencia inyectada

Este es otro caso obvio de posible colapso y es quizás el de mayor riesgo para el TJ-II, al menos durante las primeras etapas en que se utilizará un solo inyector.

La Fig.4.3.1a muestra la dependencia de la potencia total absorbida al final de la descarga (electrones e iones) en función de la potencia inyectada (la entrante en el toro) en cada caso. Debe mencionarse que, en este caso, la potencia de inyección del caso balanceado es la total (al contrario que en los §§3, 4.1 y 4.2). Es decir, si en las gráficas se indica que el parámetro P.Inj. es 0.930 MW (este valor es la potencia entrante esperada para cada haz), eso significa que en el caso balanceado estarían funcionando los dos inyectores (CO y Counter) a mitad de potencia (0.465 MW cada uno de ellos). Solo así se puede hacer una comparación adecuada para las variaciones de este parámetro. Pues bien, como era de prever, la potencia absorbida crece monótonamente, aunque aparece un pequeño escalón hacia 0.45 MW en todos los casos.

Ese escalón marca la separación entre una zona, la de potencia inferior, en que hay colapso y otra en que la descarga se desarrolla (Fig.4.3.1b). En este caso la  $\beta$  media, una vez superado el umbral, crece monótonamente y, como siempre, el colapso aparece en los casos en que las pérdidas por radiación superan la potencia absorbida (Fig.4.3.2b). La diferencia mayor con los casos anteriores es que ahora, cuando hay colapso, la descarga termina mucho más prematuramente, a los 100 ms (es decir 50 ms después del inicio de la inyección).

Un ejemplo de este tipo de colapso aparece en las Figs.4.3.3 y 4.3.4. que muestran la evolución temporal de un caso de inyección CO con solamente 450 kW entrantes en el toro, (un 48% de lo esperado). Se observa que, en este caso, el colapso tiene lugar en cuanto desaparece el ECRH, cuando las pérdidas por radiación superan la potencia absorbida por los electrones, la potencia de NBI es insuficiente para sostener la descarga sin ayuda del ECRH.

En este caso de colapso muy temprano, éste tiene lugar antes de que el máximo de radiación llegue al centro del plasma (Fig.4.3.5), ya que ahora las pérdidas por radiación en la mitad exterior del plasma superan los aportes positivos pues la potencia del haz está muy reducida (Fig.4.3.6).

Este tipo de colapso podría aparecer eventualmente en las descargas del TJ-II en el caso en que la eficiencia de los inyectores fuera muy inferior a la calculada, bien por bajo rendimiento de la fuente de iones, por mal alineamiento de los haces o, lo que es mucho más probable, por bloqueo del haz debido a exceso de reionización en la cámara de neutralización o en el ducto.

Existe otro supuesto de colapso, complementario de éste, que sería debido a exceso de potencia. Esto parece poco probable en estas primeras etapas de utilización de NBI en el TJ-II, en que la preocupación es más bien la contraria, pero sí sería relevante en el futuro, si se decidiera aumentar el número de inyectores. Los cálculos (muy preliminares) indican que, en inyección balanceada, ese límite se encontraría hacia los 1.8 MW (es decir un 97% superior a la potencia inyectada prevista actualmente). No obstante ese tipo de colapso es de naturaleza idéntica al del §4.1 de exceso de densidad, por lo que no será analizado aquí.

#### 4.4. Necesidad de inyección externa de gas

En el §4.1 hemos visto la posibilidad de colapso por exceso de inyección de gas. Cabe preguntarse entonces ¿qué pasaría si, por el contrario, la inyección de gas fuera insuficiente?. ¿Sería posible prescindir de ella?.

La Fig.4.4.1 muestra la dependencia de la densidad central y de la potencia total absorbida, al final de la descarga, con el valor de la tasa de GP, en un caso en que ésta se mantiene constante a lo largo del tiempo ( $P_{uff3} = P_{uff2}$ , §3.1) y se mantiene en valores bajos. Se observa que en el caso balanceado (en el que se están inyectando, como en §§4.1 y 4.2, 1.86 MW) ambas magnitudes crecen monótonamente de manera suave, con valores elevados. Por el contrario, tanto en el caso CO como en el Counter (en donde solo se inyectan 0.93 MW), aparece una inflexión hacia tasas de GP del orden de 1.3 T-l/s y por debajo de ese valor la potencia absorbida no supera los 400 kW, es decir: es apenas algo superior a la que se obtendría con ECRH exclusivamente.

El efecto todavía se nota más cuando se observa el comportamiento de la  $\beta$  media (Fig.4.4.2a). Sin embargo, en contra de lo que parecería a primera vista, esto no es un colapso, la descarga no termina prematuramente (Fig.4.4.2) sino que llega hasta el final (350 ms) e incluso logra alcanzar estado estacionario.

Esto puede comprobarse siguiendo la evolución temporal de una descarga con inyección CO y ausencia total de GP externo. La Fig.4.4.3a muestra la evolución de la densidad, el valor central llega a superar al de corte (línea horizontal) pero se estabiliza en un nivel inferior al doble del de corte. Este valor es suficiente para que buena parte del plasma se encuentre en la zona de corte y no reciba ECRH pero es insuficiente para la absorción de NBI, como puede comprobarse en la Fig.4.4.3b. Se observa en ella que el ECRH casi desaparece, aunque no del todo, hacia los 90 ms (16 kW), mientras la absorción de NBI es baja debido a la poca densidad (277 kW, apenas 30% de la potencia inyectada), eso hace que la absorción total (el residuo de ECRH más del de NBI) sea incluso inferior a los 300 kW (la del ECRH en solitario). Por su parte las pérdidas por radiación permanecen muy por debajo de la absorción electrónica.

Esto quiere decir que, efectivamente, no se trata de ningún tipo de colapso sino, simplemente, de insuficiencia de densidad para llevar la absorción de NBI a valores adecuados. En ese sentido se trataría de una descarga “frustrada” desde el punto de vista del uso de NBI, por así decir, en este caso los haces neutros no “cuajan”.

Por consiguiente, cuando se inyecta con un solo haz, sea cual sea la dirección de inyección, es indispensable la utilización de GP externo. Si convenimos en establecer el criterio de descarga “útil” como aquel en donde el valor de la potencia total absorbida supere los 400 kW (un 33% superior al ECRH en solitario), entonces el umbral para el caso CO (Counter) se situaría en 1.1 T-l/s (1.2), que correspondería a una densidad central de  $4.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  (5.4).

Por el contrario (Fig.4.4.1) en el caso balanceado, incluso en ausencia total de GP, se alcanzarían valores adecuados para la absorción de los NBI. Sin embargo, en ese caso no llega a alcanzarse nunca estado estacionario, por lo que el control de densidad se hace imposible. Por consiguiente, aunque en este caso la inyección externa de gas no sería indispensable sí que sería muy conveniente.

## 5. Caso de inyección con un solo haz

En el caso de inyección con un solo haz pueden aparecer otro tipo de fenómenos debido a la falta de simetría de la inyección. P. ej. podría producirse rotación toroidal o inducirse una fuerte corriente eléctrica. En este capítulo nos vamos a centrar en éste último efecto, ya que el de rotación toroidal será estudiado más adelante y, al menos en la fase estacionaria de NBI, cabe pensar que no será muy importante pues las viscosidades a esas densidades y con el régimen de colisionalidad predicho (§3.1, §4.7 de [1]) deberían ser altas.

En el caso balanceado la corriente eléctrica inducida por cada haz (Tabla 3.I) tiende a compensarse, aunque no completamente, ya que la inyección Counter, que produce corriente en sentido opuesto al campo magnético toroidal, es más eficiente que la CO. Esto da lugar a valores de corriente relativamente bajos: -0.76 kA, frente a +3.3 y -4.3 y menores que en los otros dos casos.

La Fig.5.1 muestra la evolución temporal de esa corriente para los casos “normales” del §3.1. Se observa que, en todos los casos, el máximo de corriente se alcanza hacia los 100 ms, que es bastante mayor que el valor alcanzado en la fase estacionaria y que sigue, aproximadamente, las fluctuaciones de la temperatura electrónica (Fig.3.1.4).

Los perfiles radiales de esas corrientes, para diversos instantes de tiempo, aparecen en la Fig.5.2 para los casos CO y balanceado, el perfil del caso Counter es similar (aunque no idéntico) al del CO con el signo cambiado. Se observa que, mientras en el caso CO son bastante redondeados, los del caso balanceado son mucho más irregulares, resultado de la compensación incompleta de los otros dos.

Una consecuencia inmediata de esas corrientes es que la transformada rotacional ( $t$ ) de la configuración se altera (Fig.5.3). Para el caso balanceado, como las corrientes son relativamente pequeñas, la deformación de  $t$  es visible, aunque no exagerada, disminución de -0.5% al final de la descarga, aunque hacia los 100 ms aparece un claro transitorio que hace bajar  $t$  algo más (-2.6%).

La situación es mucho más complicada en el caso CO en donde esa variación es mucho más importante (Fig.5.4), sobre todo durante el transitorio en la primera parte de la descarga, en este caso la transformada aumenta (+6% al final de la descarga, +23% durante el transitorio). Esto podría alterar considerablemente la configuración magnética, acercándola a la zona de valor racional 2 (resonancia 1/2 por periodo), lo que se traduciría, durante esos transitorios, en fuertes aumentos de las pérdidas de iones rápidos de NBI, sobre todo las directas [4], [5].

En el caso Counter (Fig.5.5) también hay una fuerte alteración de  $t$ , que en este caso disminuye (-6% al final de la descarga, -26% durante el transitorio) y acercaría la configuración a la resonancia 4/3 (1/3 por periodo) y, mucho más grave, a la resonancia  $\underline{0}$  que tiene fortísima influencia [6] y que también podría incrementar considerablemente las pérdidas de iones rápidos [5].

Esta modificación de la configuración magnética es inconsistente con la hipótesis fundamental de ese estudio, en el cual se supone que aquella no se altera notablemente a lo largo de la descarga. Un tratamiento exacto necesitaría tener en cuenta la evolución dinámica, que puede ser muy rápida, tanto en las propiedades de equilibrio como de las pérdidas de NBI y, por supuesto, en los coeficientes de transporte. Desgraciadamente ese tratamiento parece totalmente inabordable.

No obstante, el propio aumento de las pérdidas de NBI haría que disminuyera fuertemente la corriente inducida y, por lo tanto, la propia modificación

de la transformada rotacional, con lo que, tal vez, esas extremas variaciones de configuración no tendrían lugar. Este es un problema muy difícil de dilucidar que solo encontrará respuesta en el experimento real.

En cualquier caso la modificación de  $t$  en el estado estacionario es mucho más moderada y creíble y, si la descarga logra alcanzar ese estado estacionario, el cambio de configuración sería moderado, al menos lejos de valores de  $t$  racionales de bajo orden [9].

## 6. Conclusiones

El análisis detallado de la dinámica de impurezas con *sputtering* durante la inyección de haces neutros en el TJ-II indica que en los casos usuales no aparecería colapso radiativo y que si los coeficientes de reciclado se mantuvieran por debajo de la unidad siempre sería posible elegir una estrategia de inyección externa de gas que condujera a estado estacionario con densidades por debajo del límite y absorción de NBI eficiente (> 50%).

Los perfiles radiales predichos por el modelo para el fondo de neutros fríos procedentes de la pared son consistentes con los utilizados en los cálculos de NBI. Esta es una de las mayores incógnitas del TJ-II.

El colapso radiativo puede producirse a densidades elevadas (valor central superior a  $1.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ), flujo excesivo de impurezas (p. ej. tasas de *sputtering* unas dos veces superiores a las previstas) o potencia de inyección insuficiente (por debajo de 450 kW en total).

La utilización de un solo inyector podría hacer aparecer cambios importantes en la configuración magnética durante la fase intermedia de la descarga, lo que podría afectar a su vez fuertemente a la tasa de pérdidas. Este es uno de los puntos más difíciles de dilucidar.

En próximos estudios se efectuará un recorrido sistemático de las configuraciones de la "Serie 100" utilizando este mismo modelo.

## Referencias

- [1]. J.Guasp, F.Castejón, M.Liniers. "Cálculos de transporte para la configuración de referencia durante la inyección de neutros en el TJ-II". Informe CIEMAT-888. (Abril 1999).
- [2]. G.C.Lister. Report IPP 4/222. IPP Garching 1985.
- [3]. J.Guasp, M.Liniers, C.Fuentes et al. Fusion Technol. **35**, (1999), 32.
- [4]. J.Guasp, M.Liniers. "Efectos de configuración magnética en la inyección de haces neutros en el TJ-II". Informe CIEMAT-873. (Diciembre 1998).
- [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. Nucl. Fusion **40**, (2000), 397.
- [7]. F. Castejón, et al. "Transport analysis of first TJ-II plasmas". 26<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Junio 1999.
- [8]. J.Guasp, M.Liniers, "Búsqueda de efectos *quasi-isodinámicos* en el TJ-II". Informe CIEMAT-946 (Diciembre 2000).
- [9]. 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).
- [10]. H.Howe. "Physics models in the toroidal transport code PROCTR". Report ORNL/TM-11521 (1990)
- [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. Perfiles radiales de partida.

Fig.2.2. Evolución temporal de la tasa externa de inyección de gas (línea de puntos) y de la total (línea gruesa).

Fig.2.3. Evolución temporal de las densidades central, media de línea y media en volumen para un caso de inyección balanceada (a) y CO (b).

Fig.2.4. Evolución temporal del perfil radial de conductividad térmica electrónica.

Fig.2.5. Perfil radial inicial de deposición de potencia de ECRH. La línea vertical indica la posible presencia de corte, la potencia depositada más al interior de esa línea es nula.

§3.1

Fig.3.1.1. Evolución temporal de la absorción total de potencia para tres situaciones de inyección.

Fig.3.1.2. Evolución temporal de la  $\beta$  media en volumen (a) y central (b) para tres situaciones de inyección.

Fig.3.1.3. Comparación de la evolución temporal de la  $\beta$  media en volumen (a) y central (b) para inyección balanceada con tres modelos de impurezas.

Fig.3.1.4. Evolución temporal de las temperaturas centrales electrónica e iónica para inyección balanceada (a) y CO (b).

Fig.3.1.5. (a): Evolución temporal de las potencias absorbidas y radiadas para un caso de inyección balanceada. (b): Ampliación para los primeros 40 ms de la descarga tras el inicio de la inyección.

Fig.3.1.6. Similar a la Fig.3.1.5 para el caso de inyección CO.

Fig.3.1.7. Evolución temporal de la densidad media de impurezas (a) y de la  $Z_{eff}$  del plasma (b) en el caso de inyección balanceada.

### §3.2

Fig.3.2.1. Perfiles radiales de densidad y temperaturas al final de la descarga para el caso de inyección balanceada (a) y CO (b).

Fig.3.2.2. Perfil radial del balance de potencia electrónica al final de la descarga para el caso de inyección balanceada mostrando los diversos aportes.

Fig.3.2.3. Perfil radial del balance de potencia electrónica e iónica al final de la descarga mostrando solo los aportes a la absorción de los electrones (pbmel), a los iones (pbmion), las pérdidas por radiación (rad) y de CX. Las pérdidas están cambiadas de signo. (a) caso de inyección balanceada, (b) caso CO.

Fig.3.2.4. Evolución temporal del perfil radial de las pérdidas por radiación para el caso de inyección balanceada (a) y CO (b).

Fig.3.2.5. Evolución temporal del perfil radial de la densidad del Fe para el caso de inyección balanceada (a) y CO (b).

Fig.3.2.6. Perfiles radiales de densidad de impurezas de Fe y C (a), del O y del plasma (electrónica e iónica) al final de la descarga para el caso de inyección balanceada.

Fig.3.2.7. Perfiles radiales de la Zeff del plasma al final de la descarga para el caso de inyección balanceada (a) y CO (b).

Fig.3.2.8. Perfiles radiales de la población de neutros fríos procedentes de la pared al final de la descarga (a) y 21 ms tras el inicio de la inyección (b) para el caso de inyección CO. La línea de puntos corresponde al perfil utilizado para los cálculos de NBI.

Fig.3.2.9. Evolución temporal de la densidad central (ennz) y en el borde (enna) de la población de neutros fríos en el caso de inyección balanceada (a) y CO (b). La línea horizontal corresponde al valor utilizado para ennz en los cálculos de NBI. El utilizado para enna es el borde superior de la gráfica.

### §4.1

Fig.4.1.1. Dependencia de la densidad central (a) y de la  $\beta$  media en volumen (b), al final de la descarga, con la tasa de inyección externa de gas para las tres situaciones de inyección.

Fig.4.1.2. Similar a la Fig.4.1.1 mostrando el tiempo de finalización de la descarga (a) y la dependencia de las potencias absorbidas y radiadas (b).

Fig.4.1.3. Evolución temporal de la densidades central, media de línea y media en volumen (a) y de las temperaturas centrales electrónica e iónica (b) para un caso de inyección balanceada con tasas de inyección externa de gas de 8.5 y 1.6 T-l/s.

Fig.4.1.4. Similar a la Fig.4.1.3 mostrando la  $\beta$  central y media del plasma (a) y la evolución de las potencias absorbidas y radiadas (b).

Fig.4.1.5. Evolución temporal del perfil radial de las pérdidas por radiación (a) y de la densidad del Fe (b) para el caso anterior.

Fig.4.1.6. Perfil radial de las densidades del plasma y de sus temperaturas (a) y de la densidad de impurezas (b) para el caso anterior momentos antes del final de la descarga.

Fig.4.1.7. Perfil radial de las diversas componentes del balance de potencia electrónico (a) y de sus componentes más importantes (b) en la etapa intermedia de la descarga (134 ms). La notación es idéntica a la de las Fig. 3.2.2 y 3.2.3.

Fig.4.1.8. Similar a la Fig.4.1.7 pero mostrando la situación momentos antes del final de la descarga (204 ms).

## §4.2

Fig.4.2.1. Dependencia de la  $\beta$  media al final de la descarga (a), y de su tiempo de duración, con el factor multiplicativo de la tasa de *sputtering* para las tres situaciones de inyección.

Fig.4.2.2. Similar a la Fig.4.2.1 mostrando la dependencia de las potencias absorbidas y radiadas.

Fig.4.2.3. Evolución temporal de las temperaturas centrales, electrónica e iónica (a) y de la  $\beta$  central y media del plasma (b) para un caso de inyección CO en que el factor de *sputtering* fuera 2.5 veces superior al esperado.

Fig.4.2.4. Similar a la Fig.4.2.3 mostrando la evolución de las potencias absorbidas y radiadas.

Fig.4.2.5. Evolución temporal del perfil radial de las pérdidas por radiación (a) y de la densidad del Fe (b) para el caso anterior.

Fig.4.2.6. Evolución temporal del perfil radial de la densidad del C (a) y de la del O (b) para el caso anterior.

Fig.4.2.7. Perfil radial de las densidades del plasma y de sus temperaturas (a) y de la densidad de impurezas (b) para el caso anterior momentos antes del final de la descarga (208 ms).

Fig.4.2.8. Perfil radial de las diversas componentes del balance de potencia electrónico (a) y de sus componentes más importantes (b) hacia el final de la descarga (208 ms). La notación es idéntica a la de las Fig. 3.2.2 y 3.2.3.

#### §4.3

Fig.4.3.1. Dependencia de la absorción total (a) y de la  $\beta$  media del plasma (b), al final de la descarga, con la potencia total entrante en el toro, para las tres situaciones de inyección.

Fig.4.3.2. Similar a la Fig.4.3.1 mostrando el tiempo de finalización de la descarga (a) y la dependencia de las potencias absorbidas y radiadas (b).

Fig.4.3.3. Evolución temporal de las temperaturas centrales, electrónica e iónica (a) y de la  $\beta$  central y media del plasma (b) para un caso de inyección CO en el que la potencia total entrante en el toro fuera solo 450 kW.

Fig.4.3.4. Similar a la Fig.4.3.3 mostrando la evolución de las potencias absorbidas y radiadas.

Fig.4.3.5. Evolución temporal del perfil radial de las pérdidas por radiación para el caso anterior.

Fig.4.3.6. Perfil radial de las diversas componentes del balance de potencia electrónico (a) y de sus componentes más importantes (b) momentos antes del final de la descarga (90 ms). La notación es idéntica a la de las Fig. 3.2.2 y 3.2.3.

#### §4.4

Fig.4.4.1. Dependencia de la densidad central (a) y de la potencia total absorbida (b), al final de la descarga, con la tasa de inyección externa de gas (constante) para las tres situaciones de inyección.

Fig.4.4.2. Similar a la Fig.4.4.1 mostrando la  $\beta$  media del plasma (a) y el tiempo de finalización de la descarga (b). En esta última gráfica la escala horizontal se ha extendido hasta 5 T-l/s en lugar de 3 como en el resto.

Fig.4.4.3. Evolución temporal de las densidades centrales, media de línea y media en volumen (a) y de las potencias absorbidas y radiadas (b) para un caso de inyección CO en ausencia total de inyección externa de gas.

§5

Fig.5.1. Evolución temporal de la corriente eléctrica inducida por los haces neutros, en el caso §3.1, para las tres situaciones de inyección.

Fig.5.2. Evolución temporal del perfil radial de la densidad corriente eléctrica inducida por los haces neutros, en el caso §3.1, para inyección CO (a) y balanceada (b).

Fig.5.3. Evolución temporal del perfil radial de la transformada rotacional, en el caso §3.1, para inyección balanceada.

Fig.5.4. Similar a la Fig.5.3 para inyección CO.

Fig.5.5. Similar a la Fig.5.3 para inyección Counter.



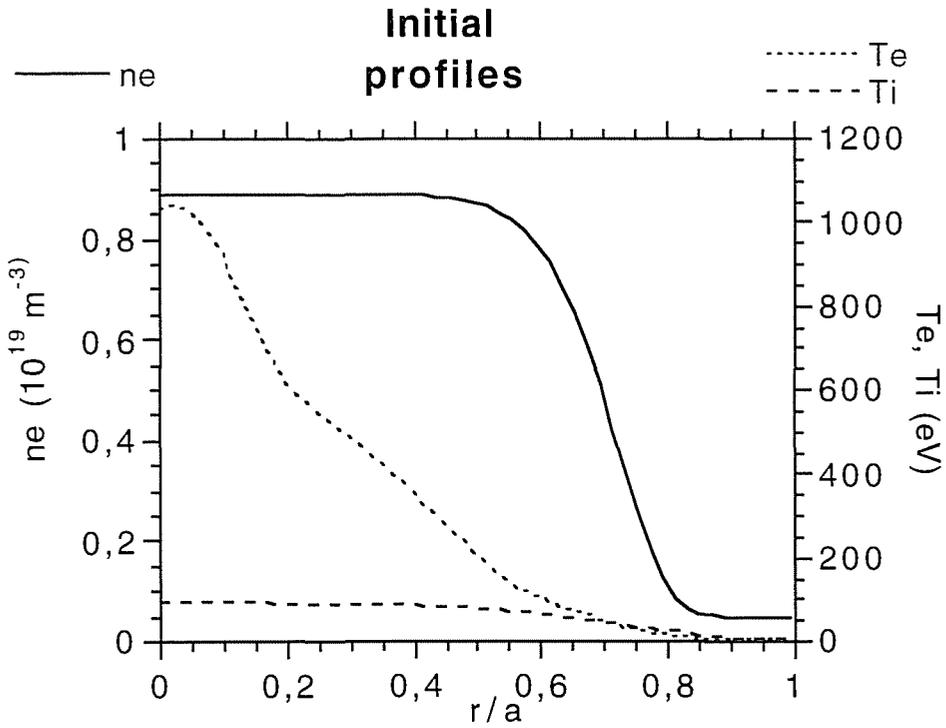


Fig.2.1

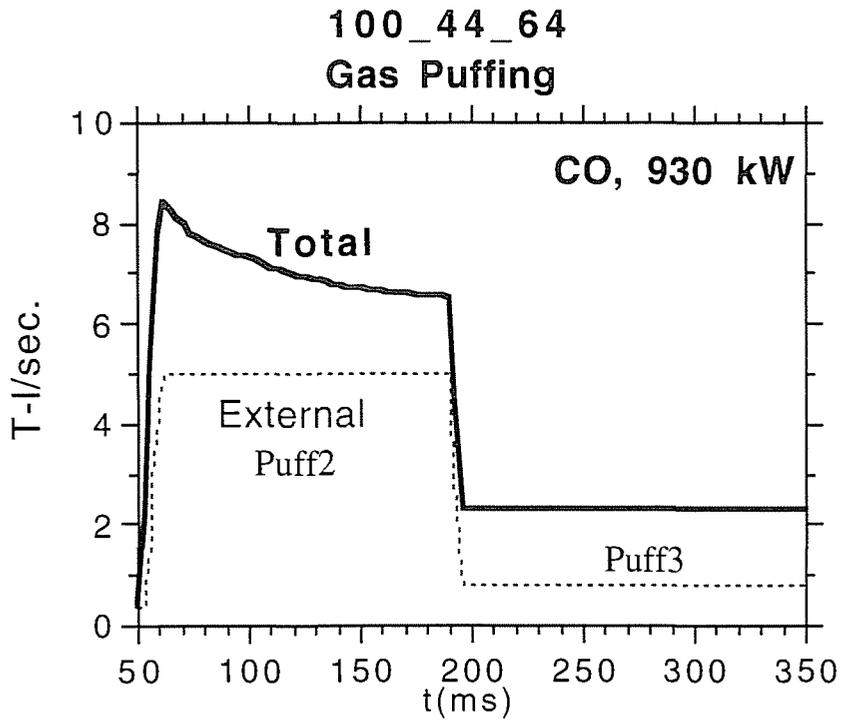


Fig.2.2

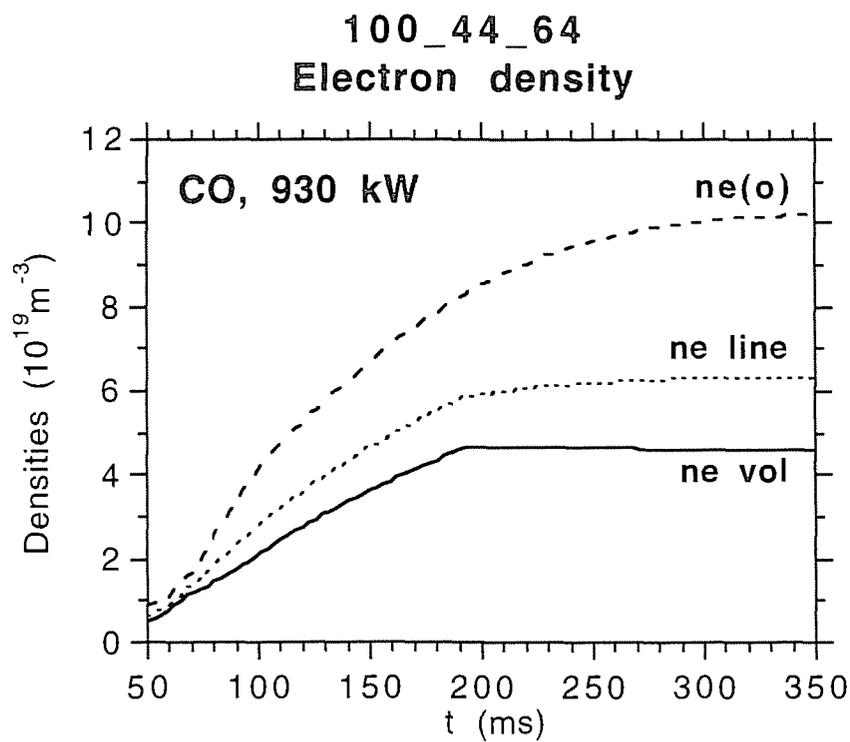
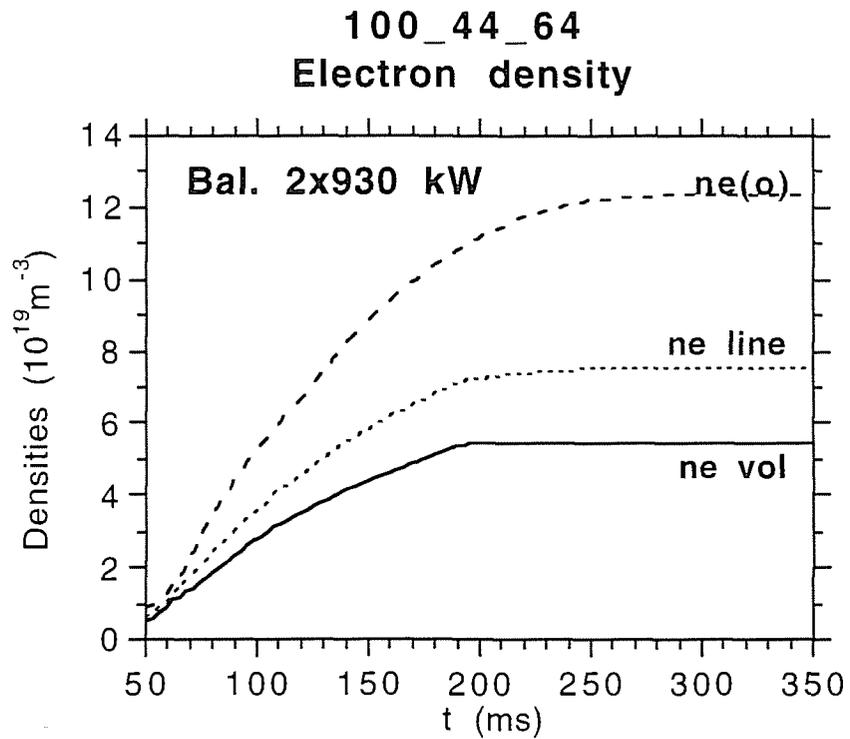


Fig.2.3

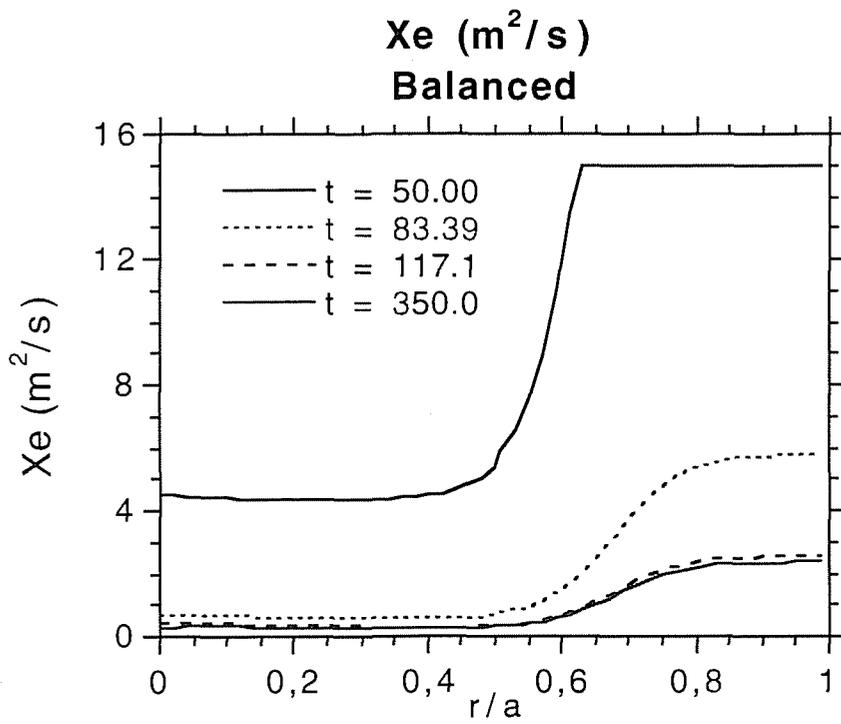


Fig.2.4

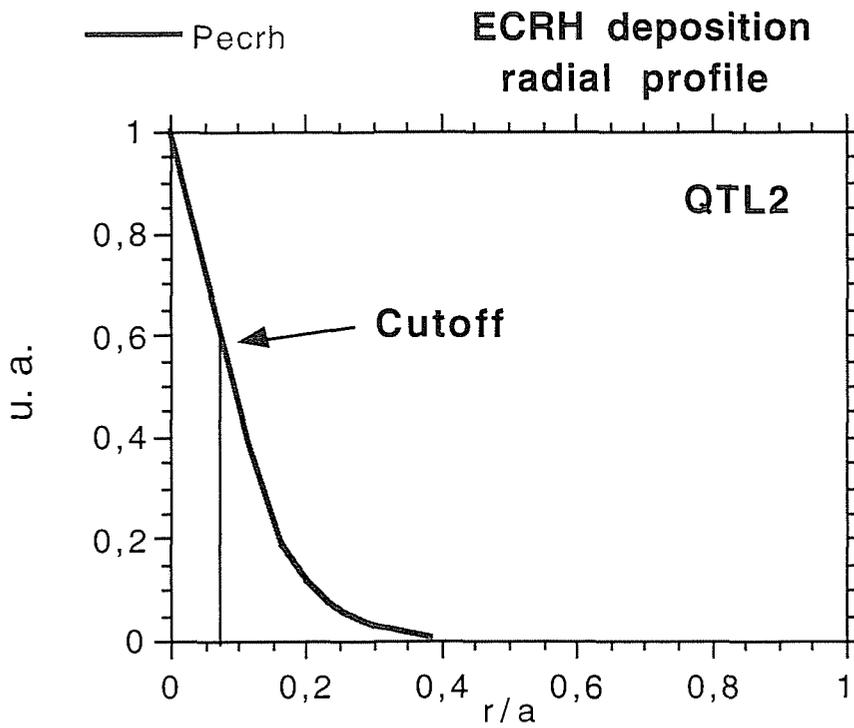


Fig.2.5

100\_44\_64  
Absorption (kW)

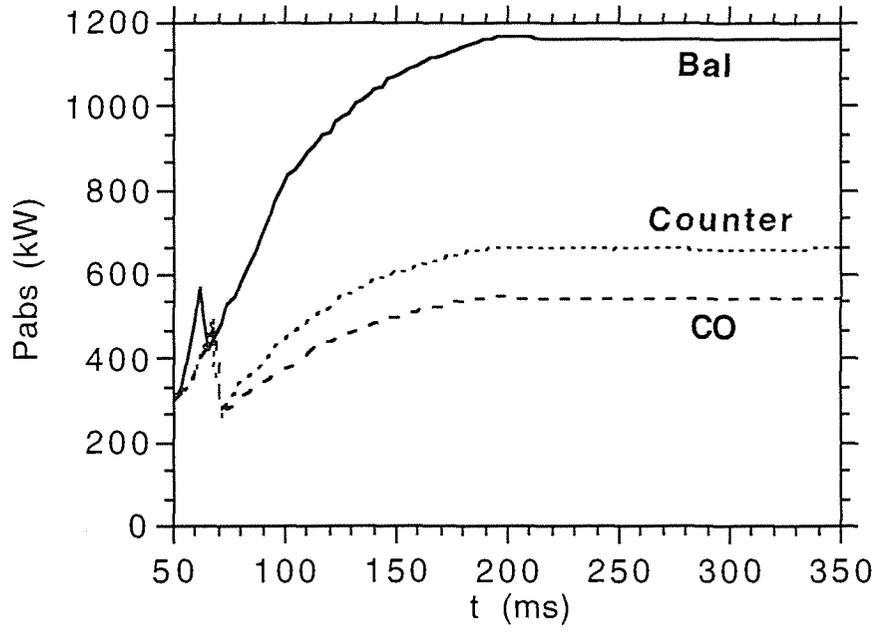
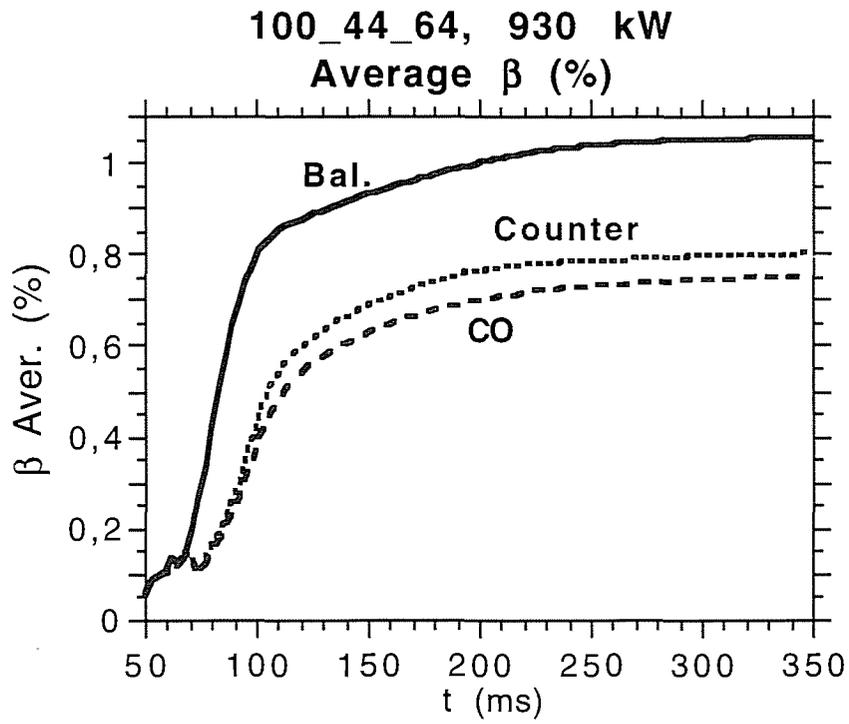
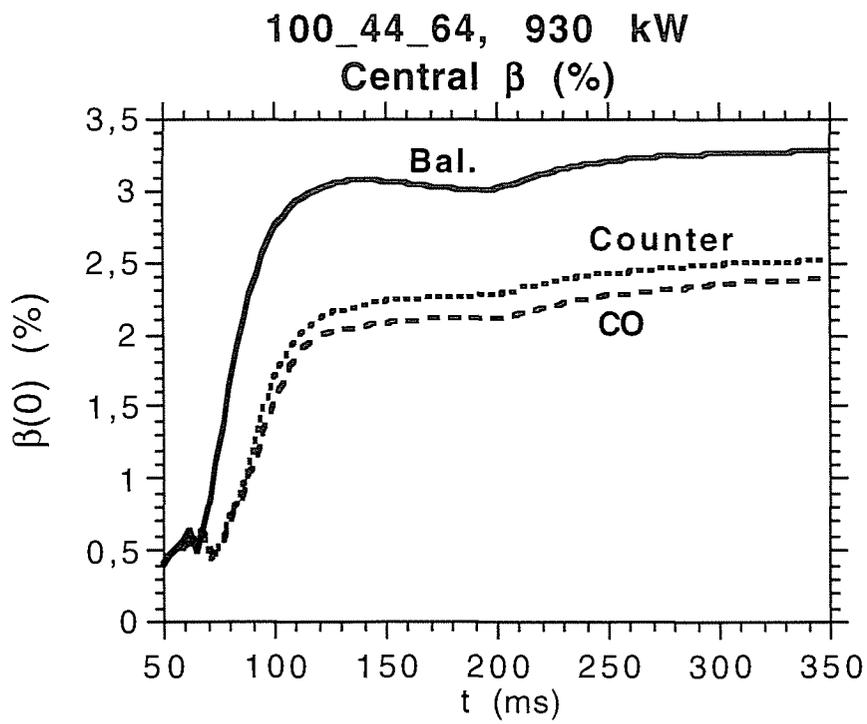


Fig.3.1.1



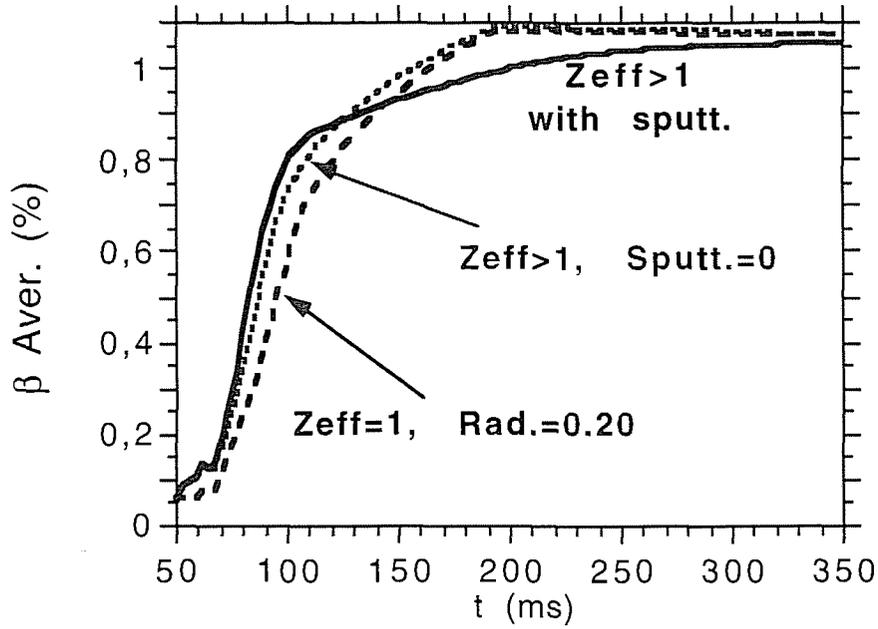
(a)



(b)

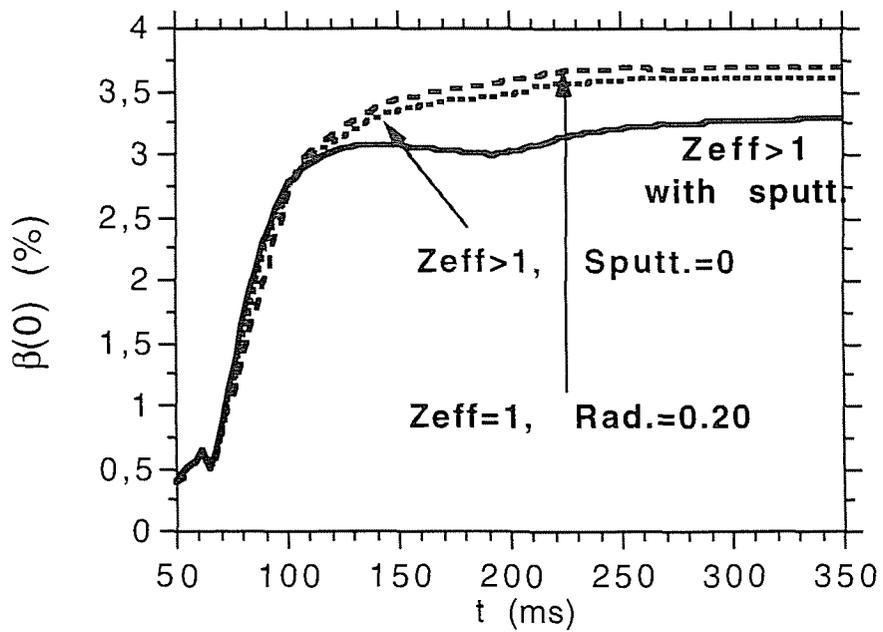
Fig.3.1.2

100\_44\_64, Balanced 2x930 kW  
Average  $\beta$  (%)



(a)

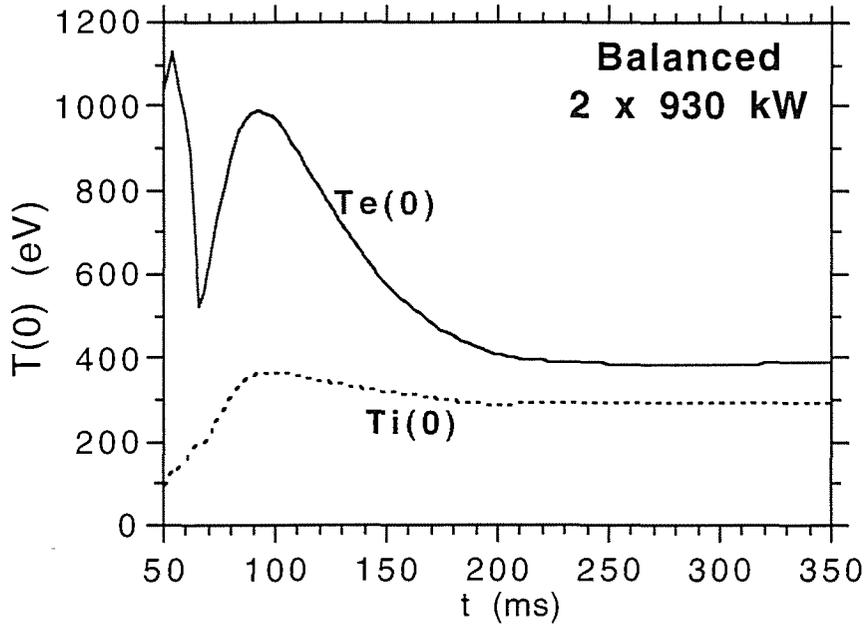
100\_44\_64, Balanced 2x930 kW  
Central  $\beta$  (%)



(b)

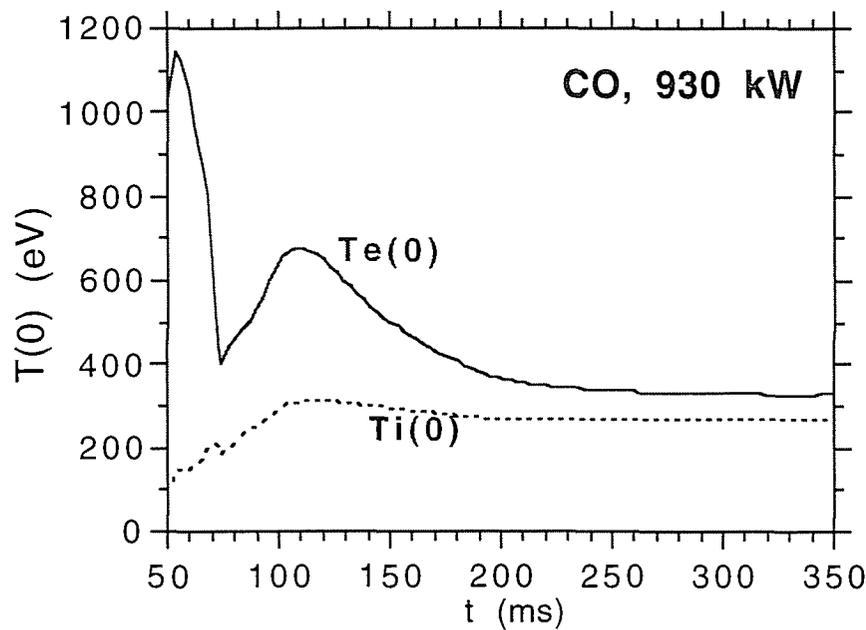
Fig.3.1.3

100\_44\_64  
Central Temperatures



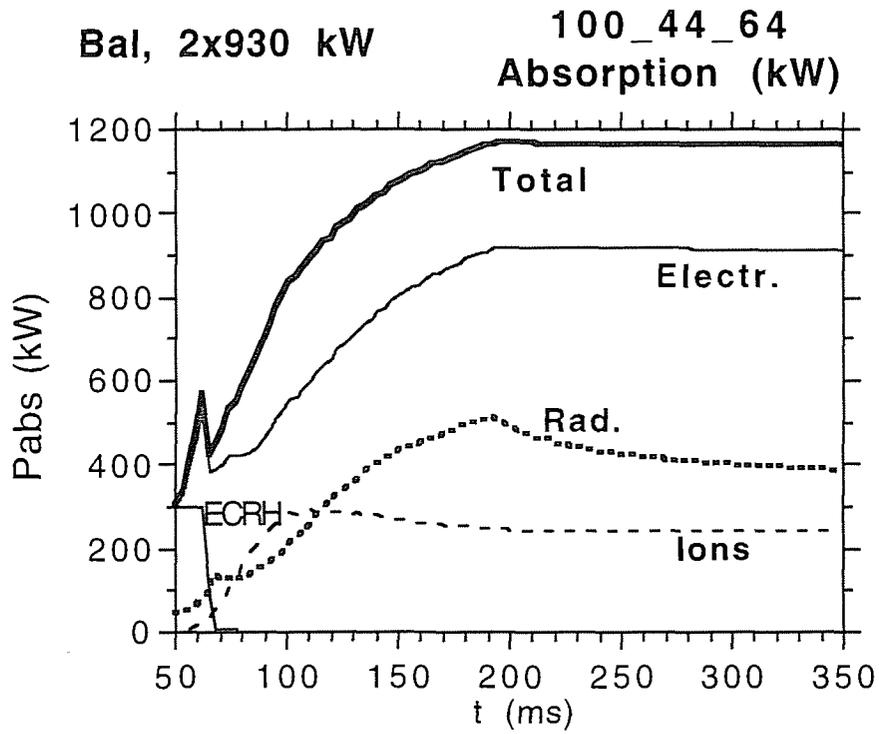
(a)

100\_44\_64  
Central Temperatures

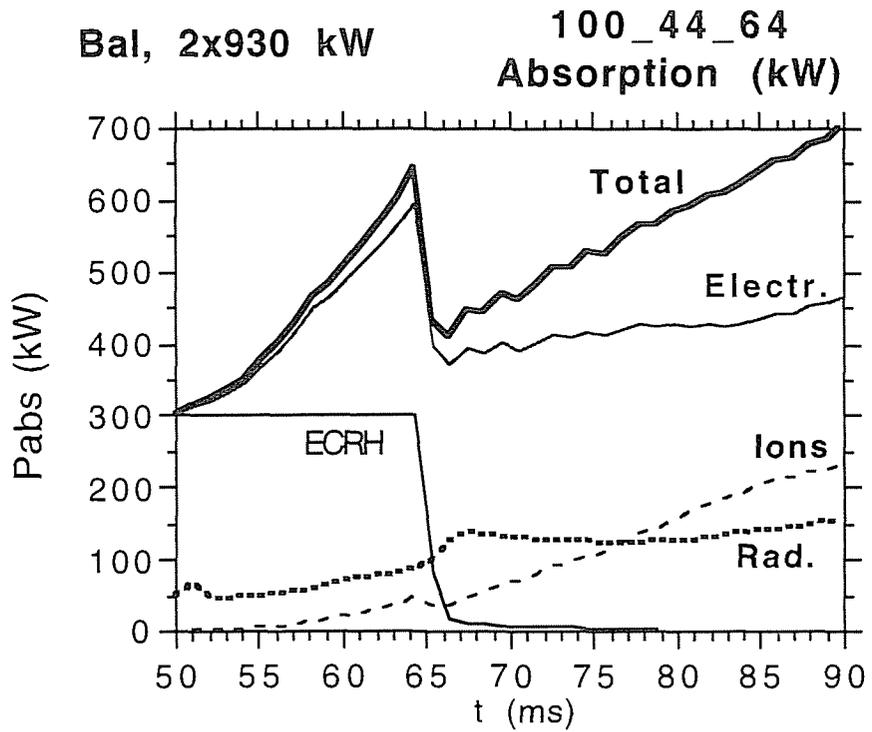


(b)

Fig.3.1.4

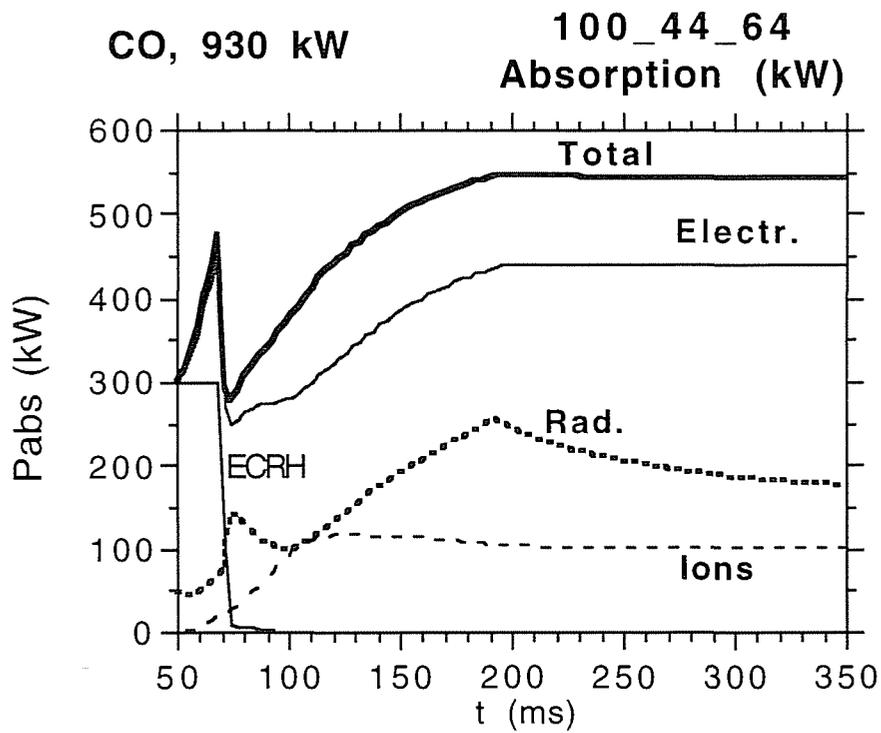


(a)

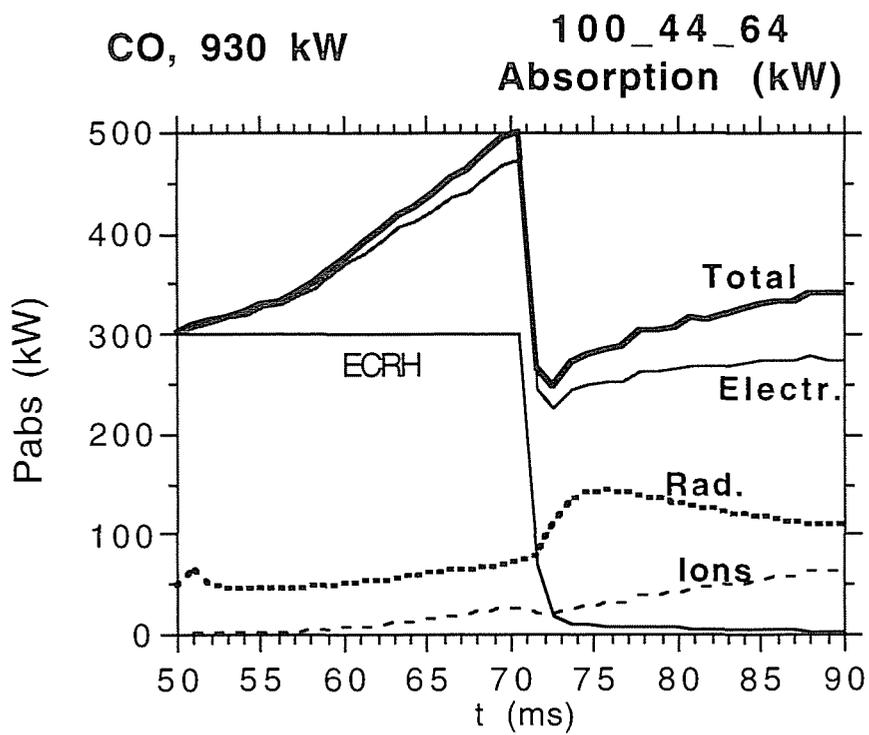


(b)

Fig.3.1.5



(a)



(b)

Fig.3.1.6

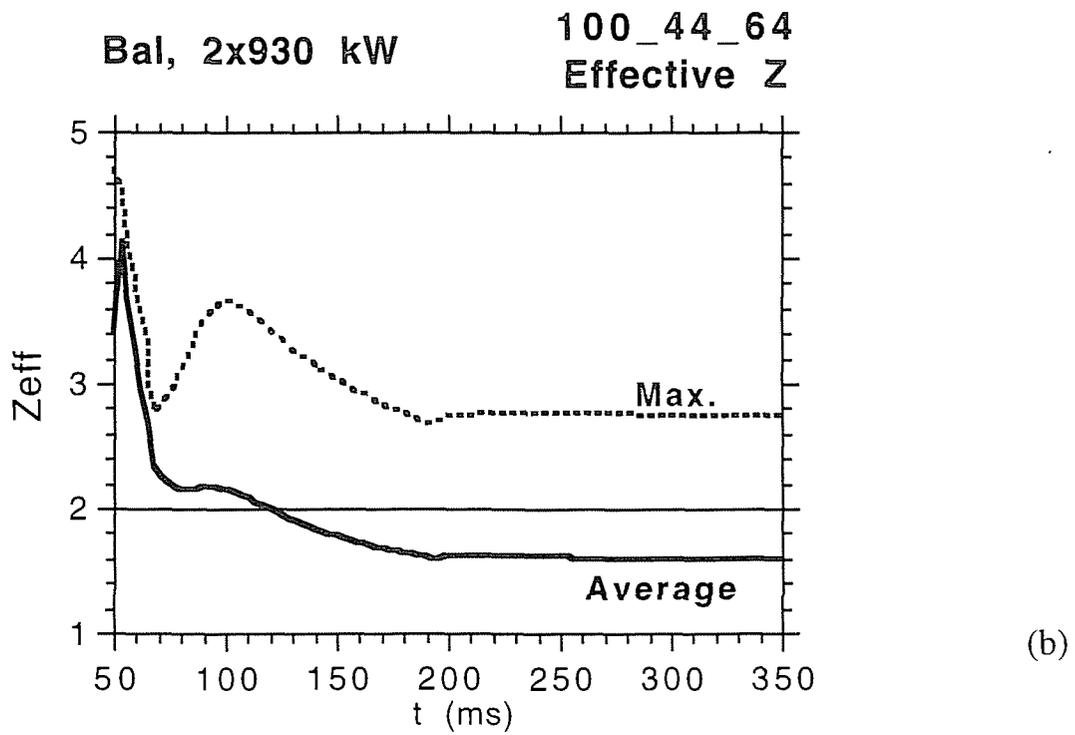
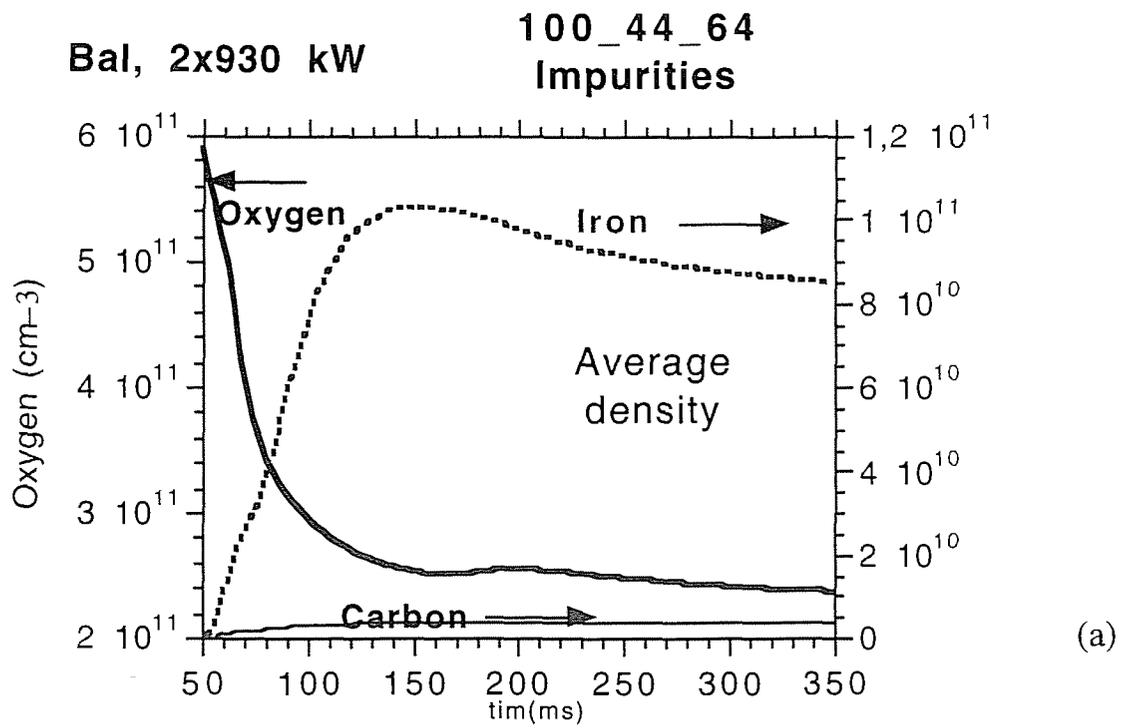
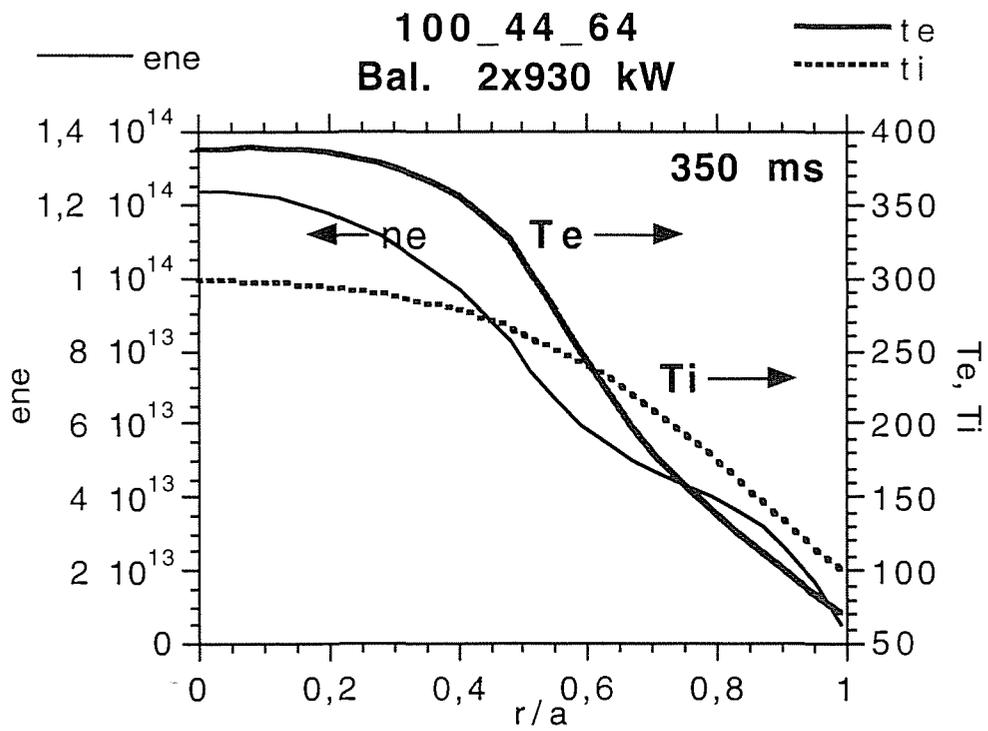
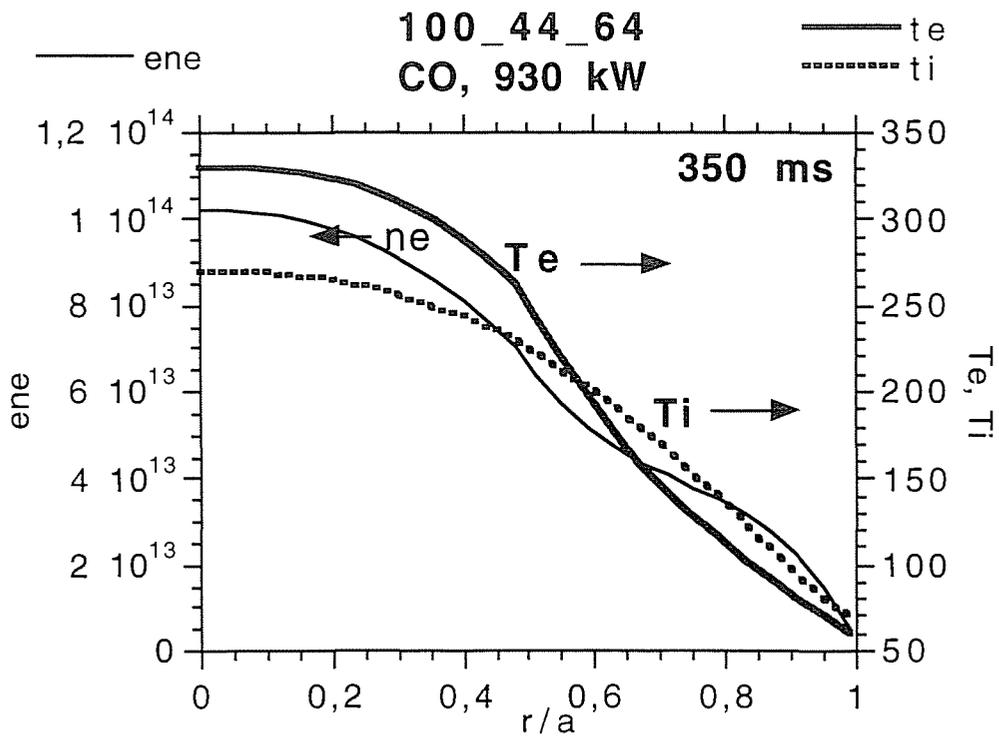


Fig.3.1.7



(a)



(b)

Fig.3.2.1

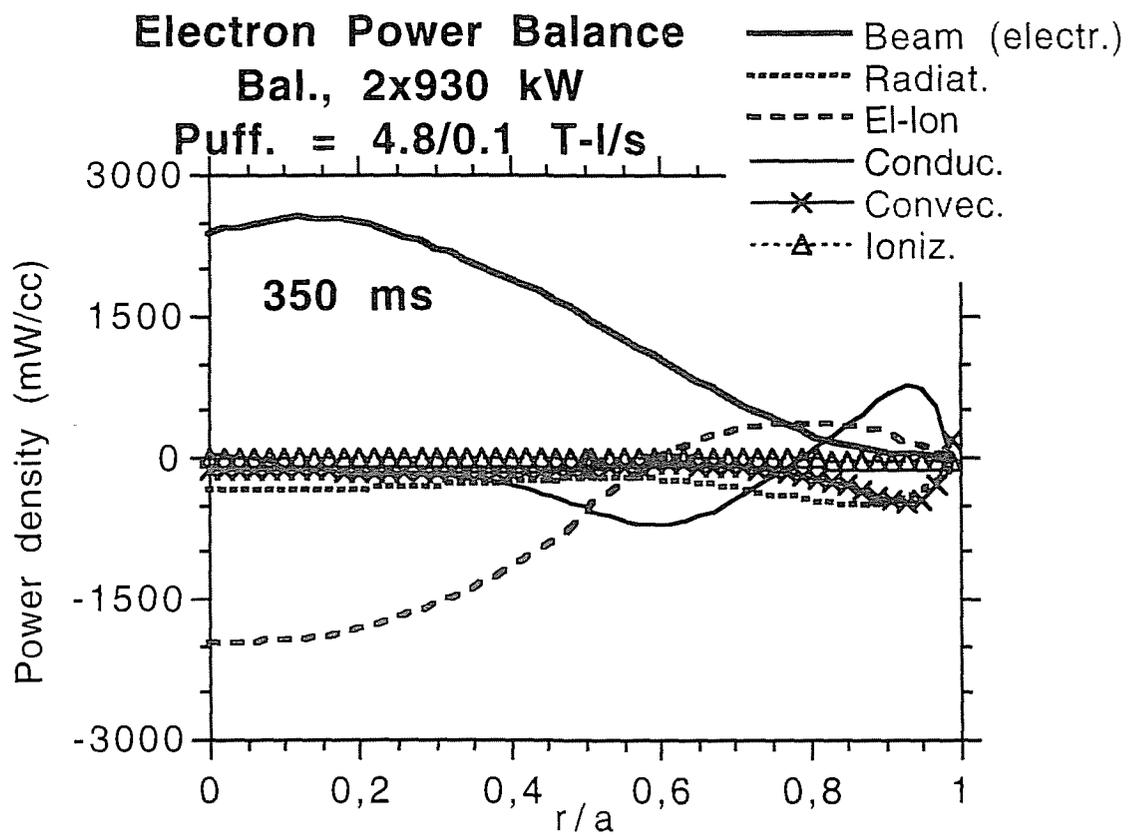


Fig.3.2.2

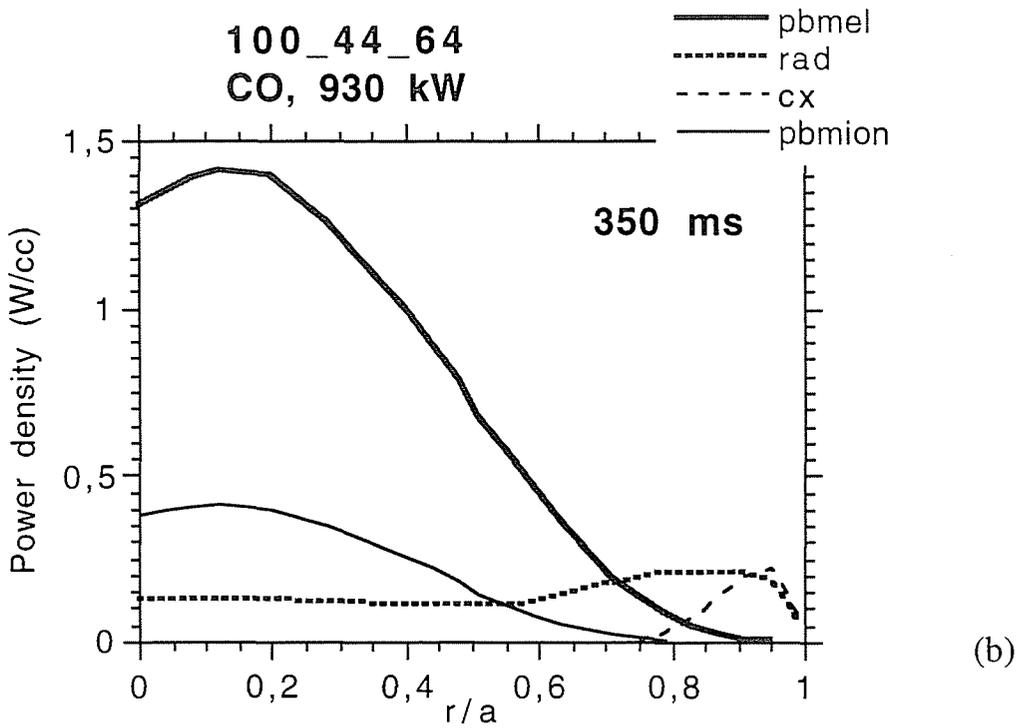
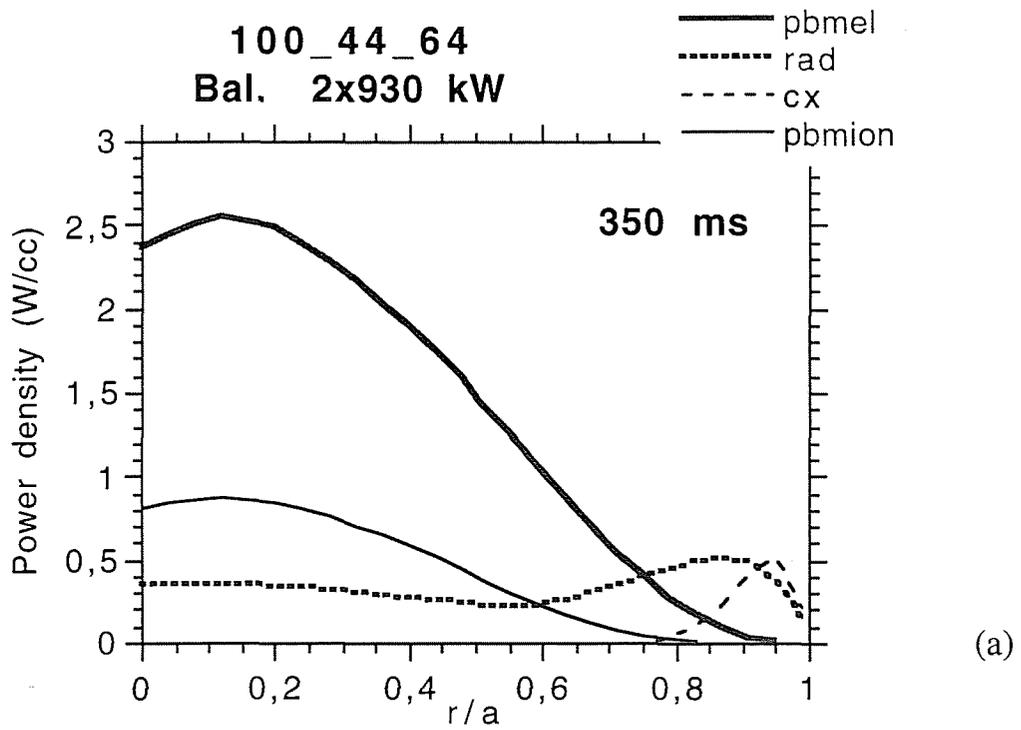
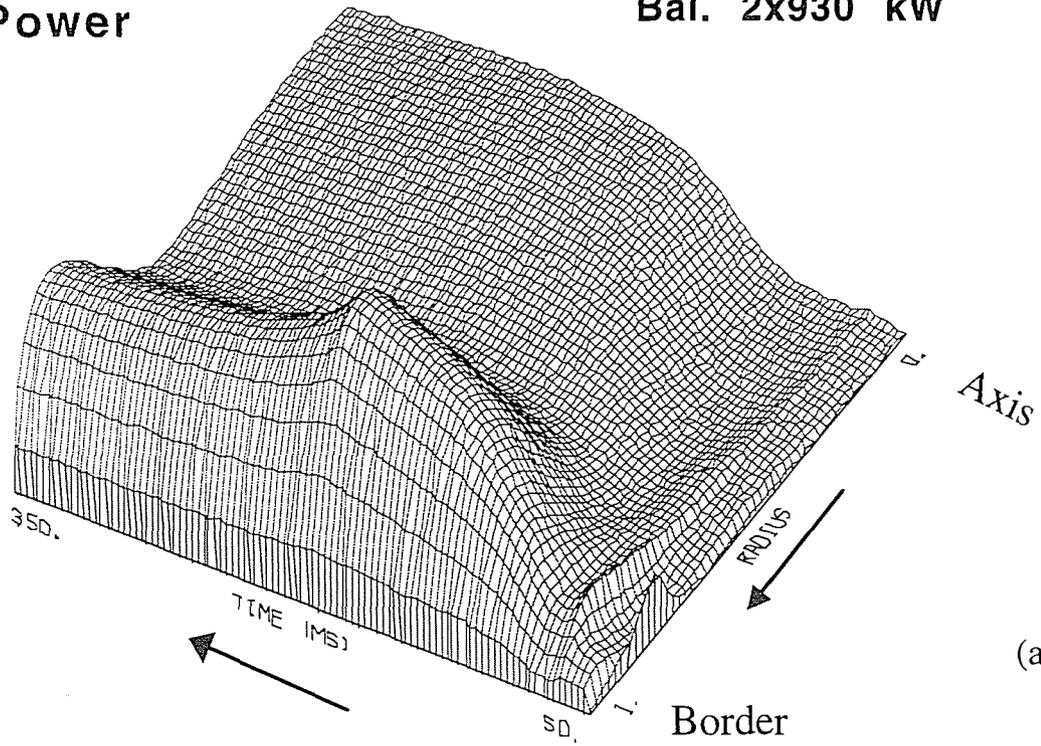


Fig.3.2.3

Radiated  
Power

100\_44\_64  
Bal. 2x930 kW



Radiated  
Power

100\_44\_64  
CO, 930 kW

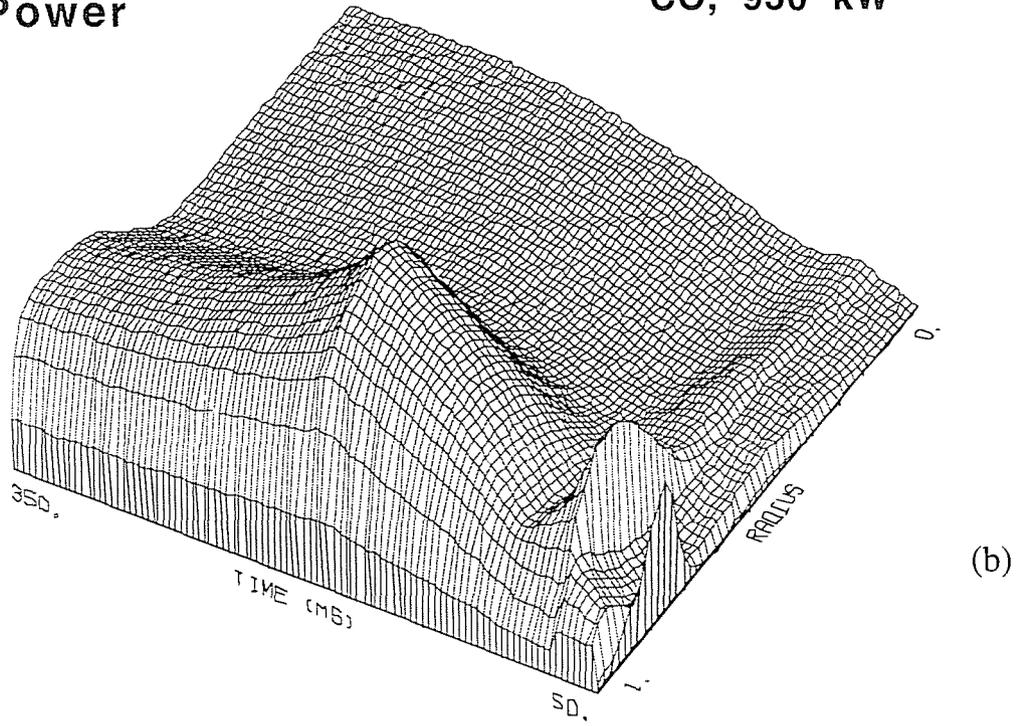
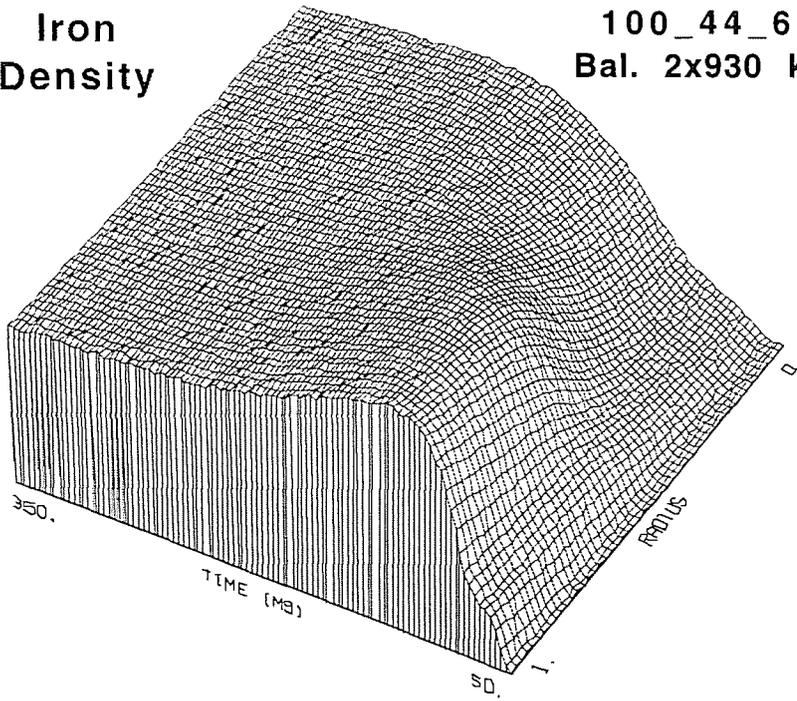


Fig.3.2.4

Iron  
Density

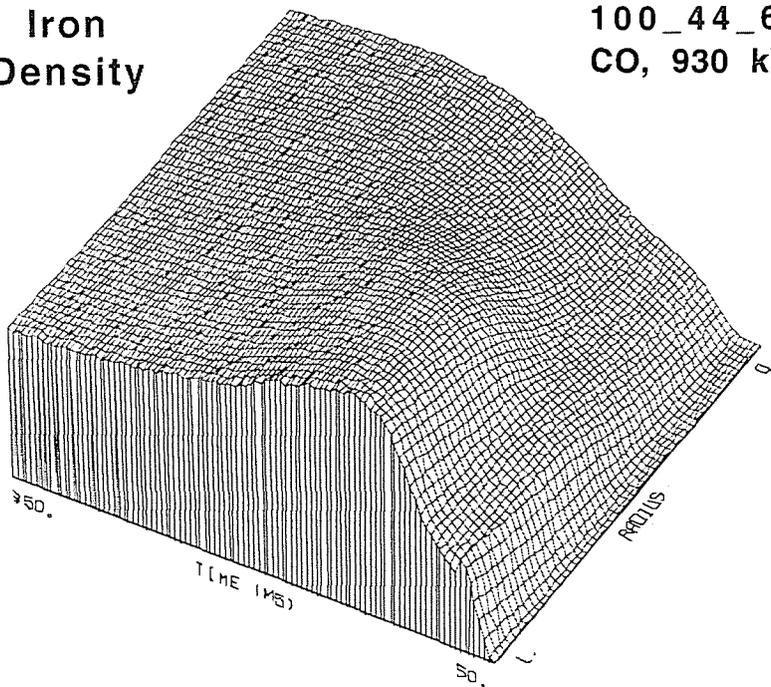
100\_44\_64  
Bal. 2x930 kW



(a)

Iron  
Density

100\_44\_64  
CO, 930 kW



(b)

Fig.3.2.5

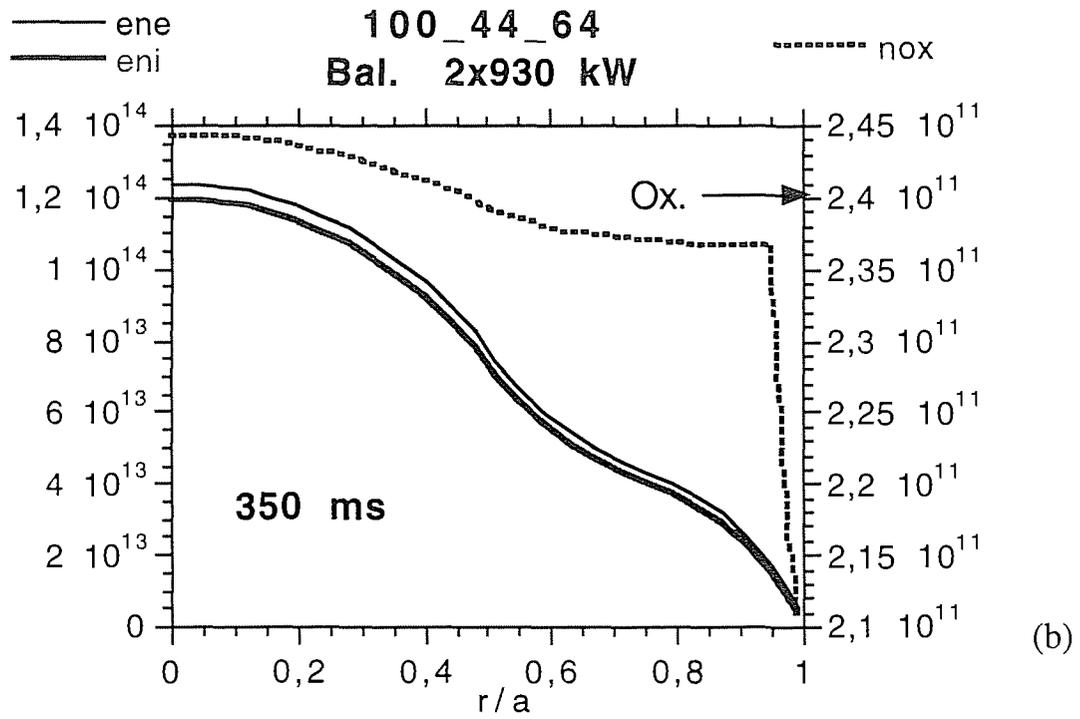
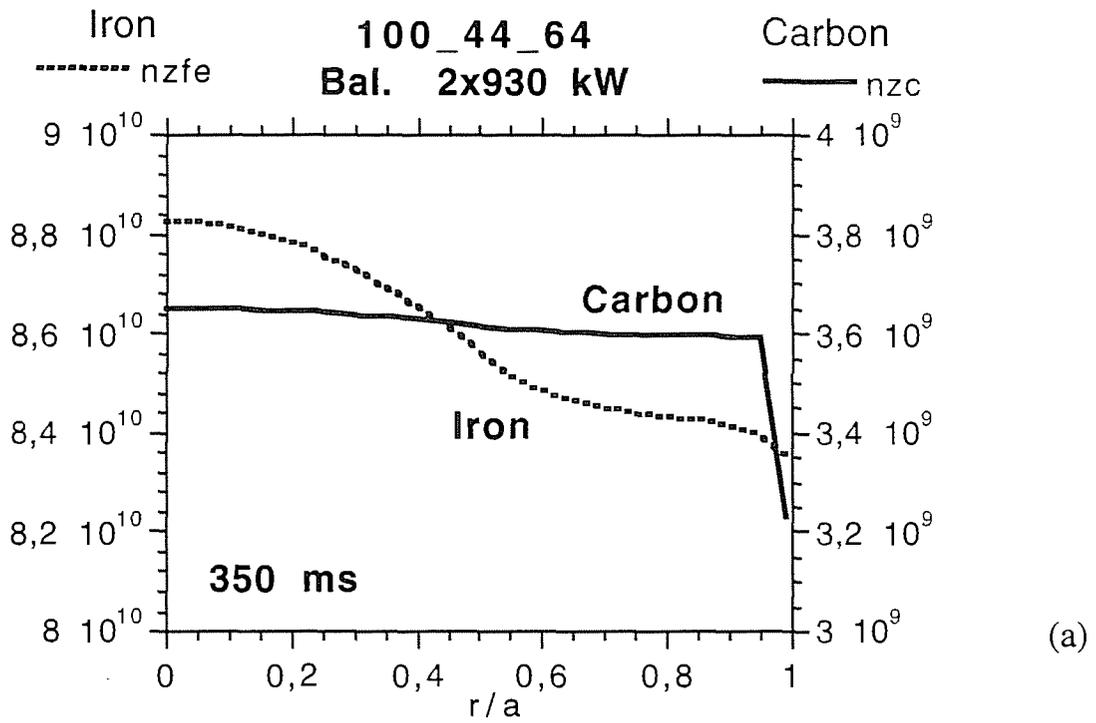
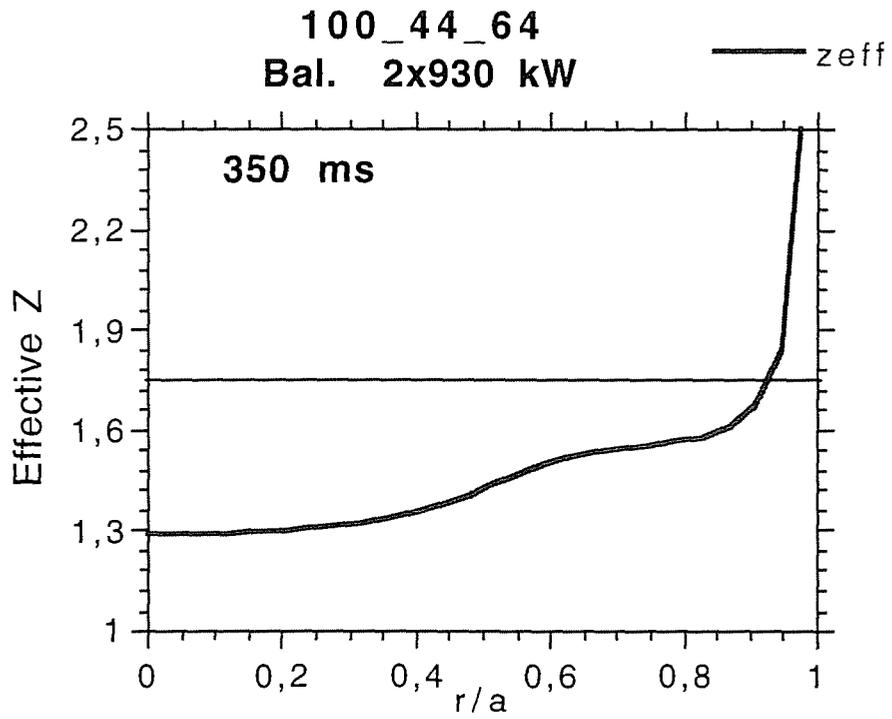
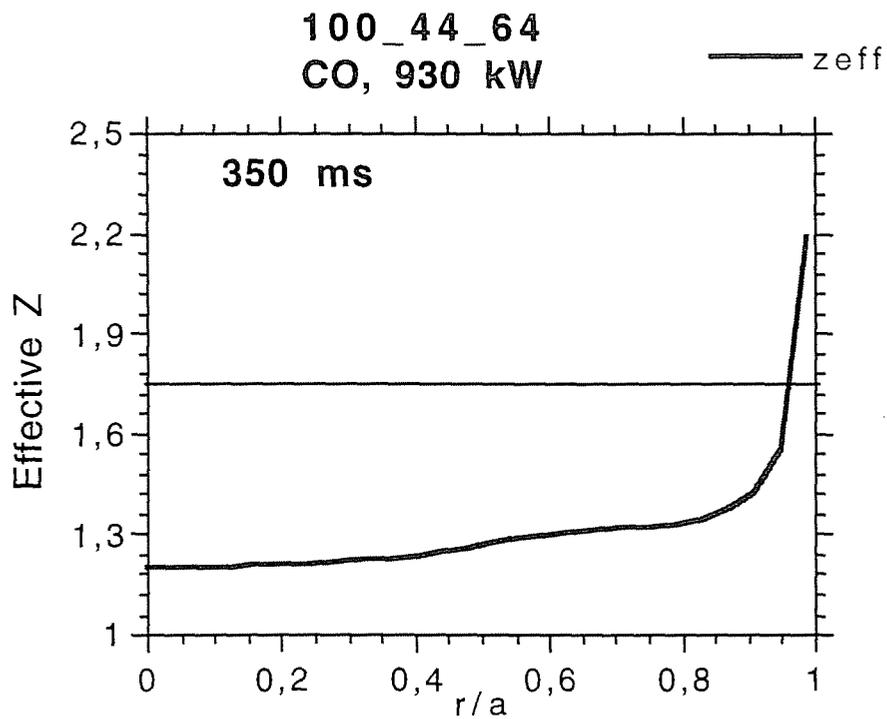


Fig.3.2.6

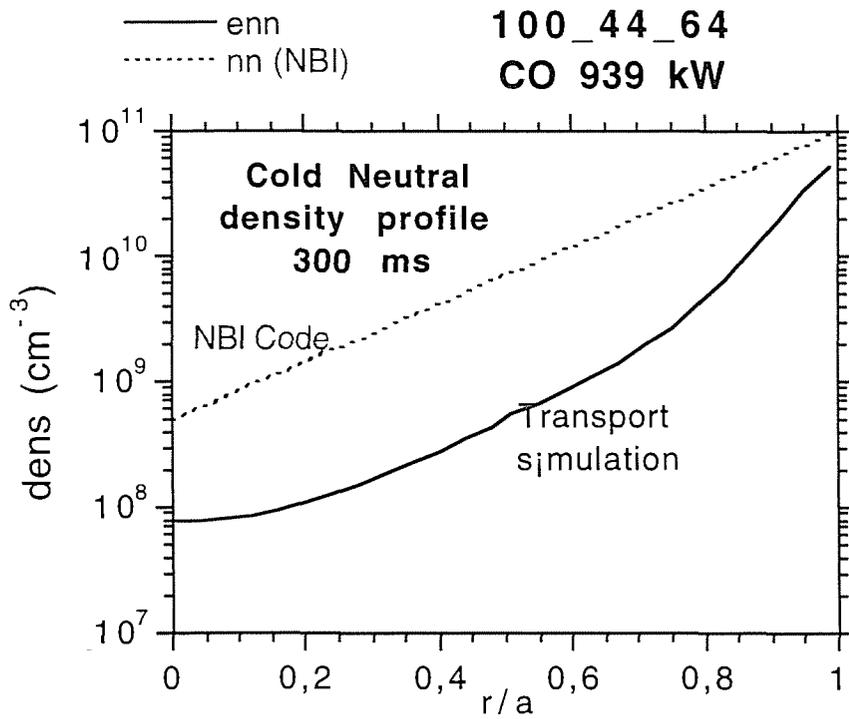


(a)

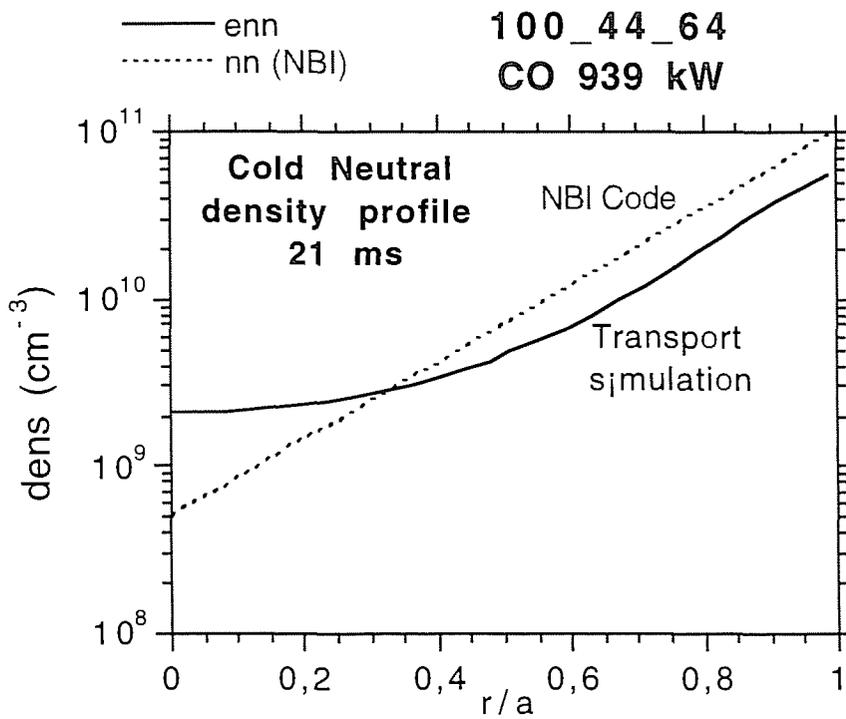


(b)

Fig.3.2.7

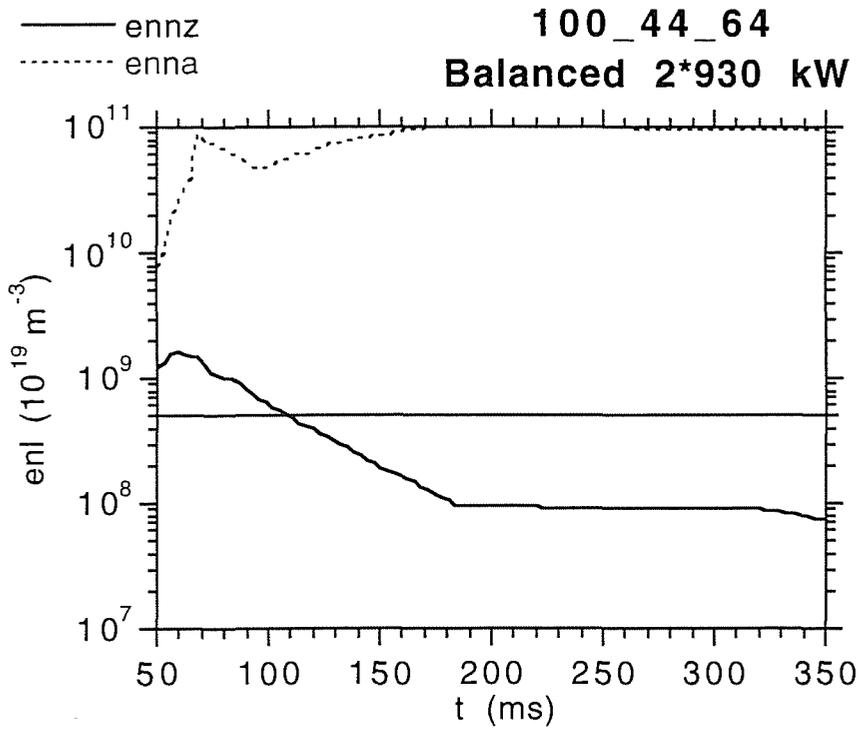


(a)

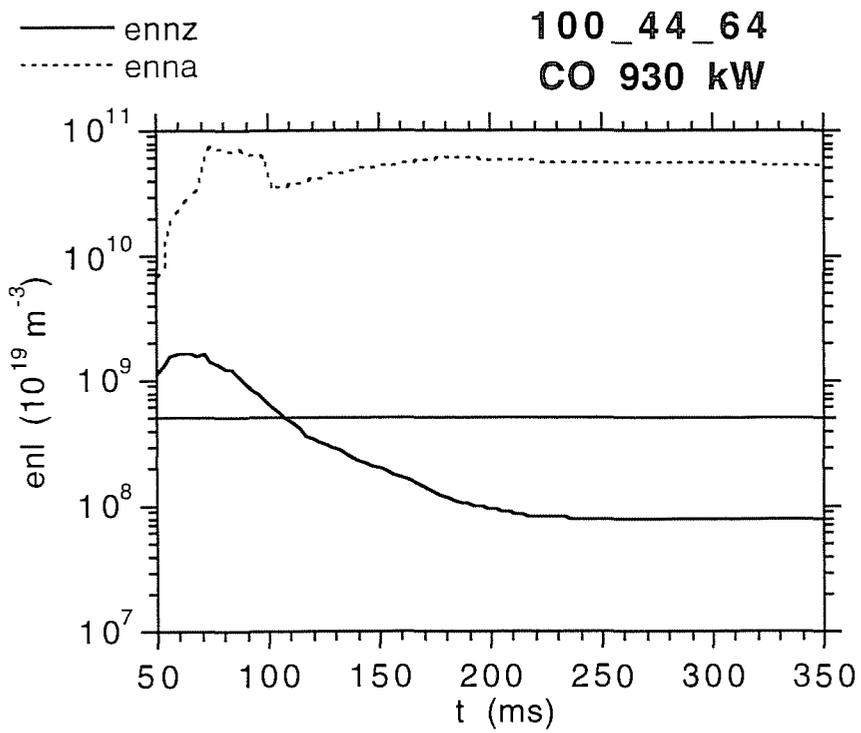


(b)

Fig.3.2.8



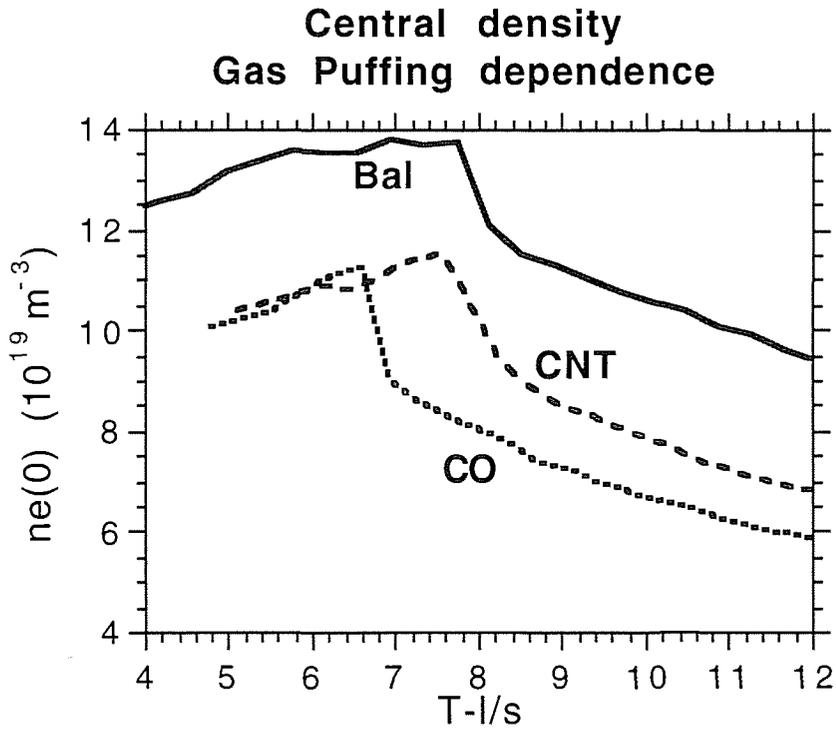
(a)



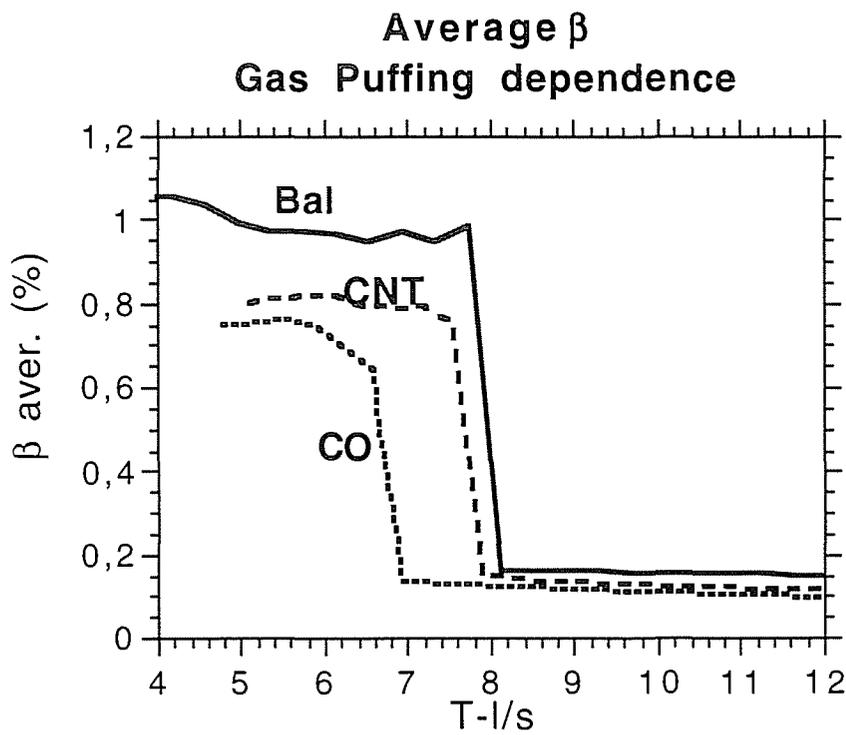
(b)

Fig.3.2.9





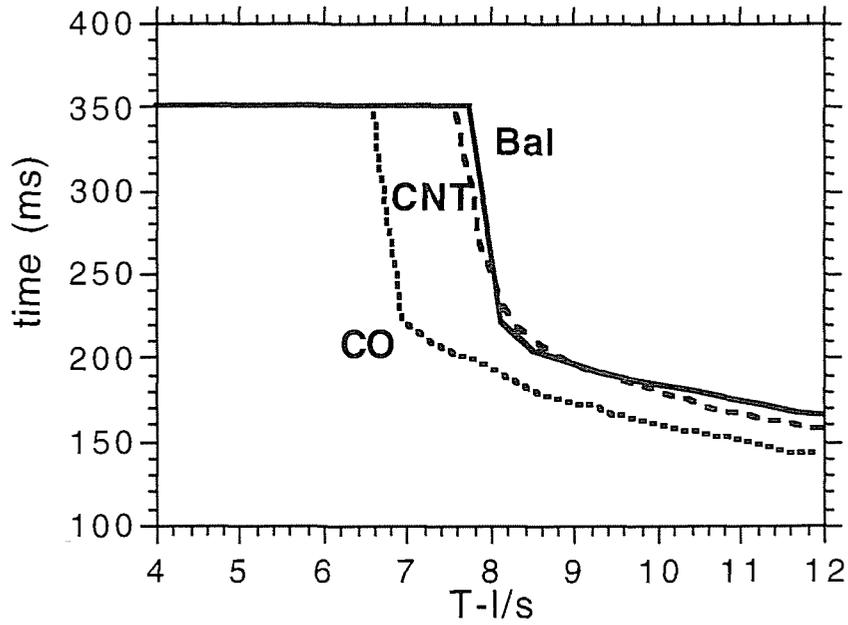
(a)



(b)

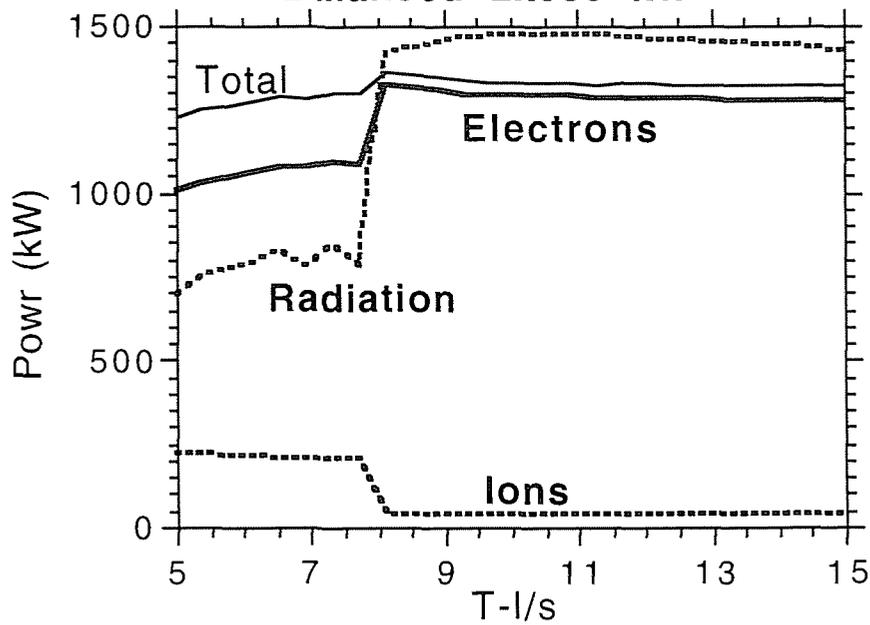
Fig.4.1.1

**Max. time  
Gas Puffing dependence**



(a)

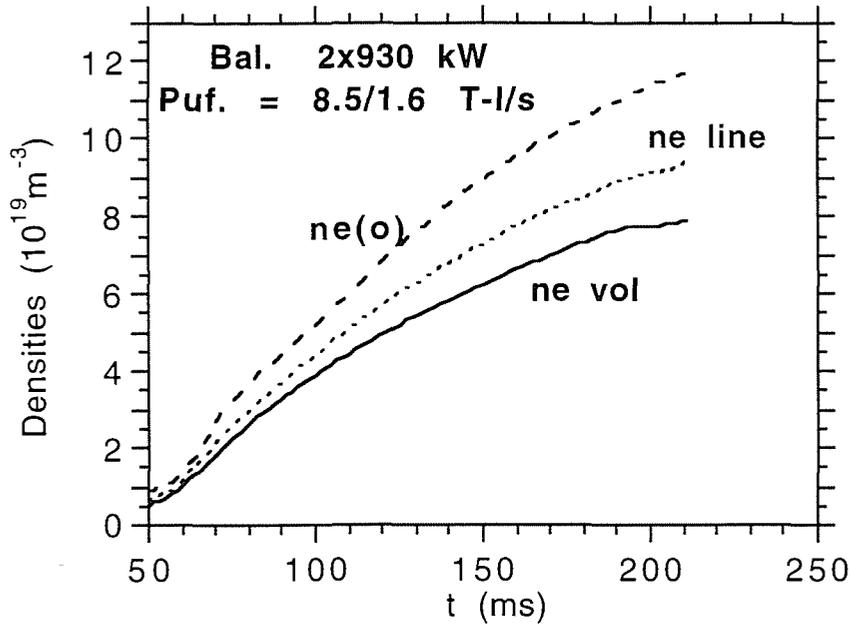
**Absorbed Power  
Gas Puffing dependence  
Balanced 2x930 kW**



(b)

Fig.4.1.2

100\_44\_64  
Electron densities



100\_44\_64  
Central Temperatures

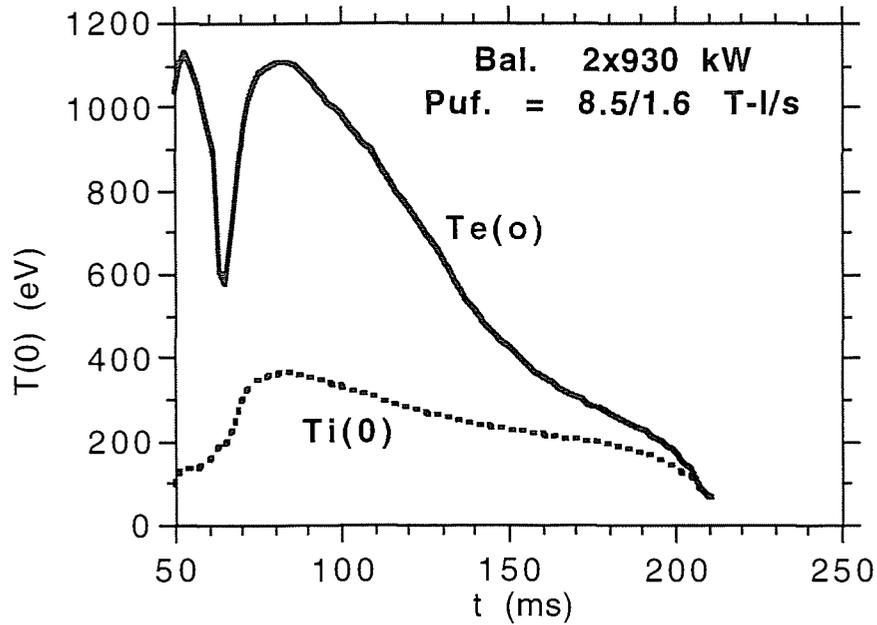


Fig.4.1.3

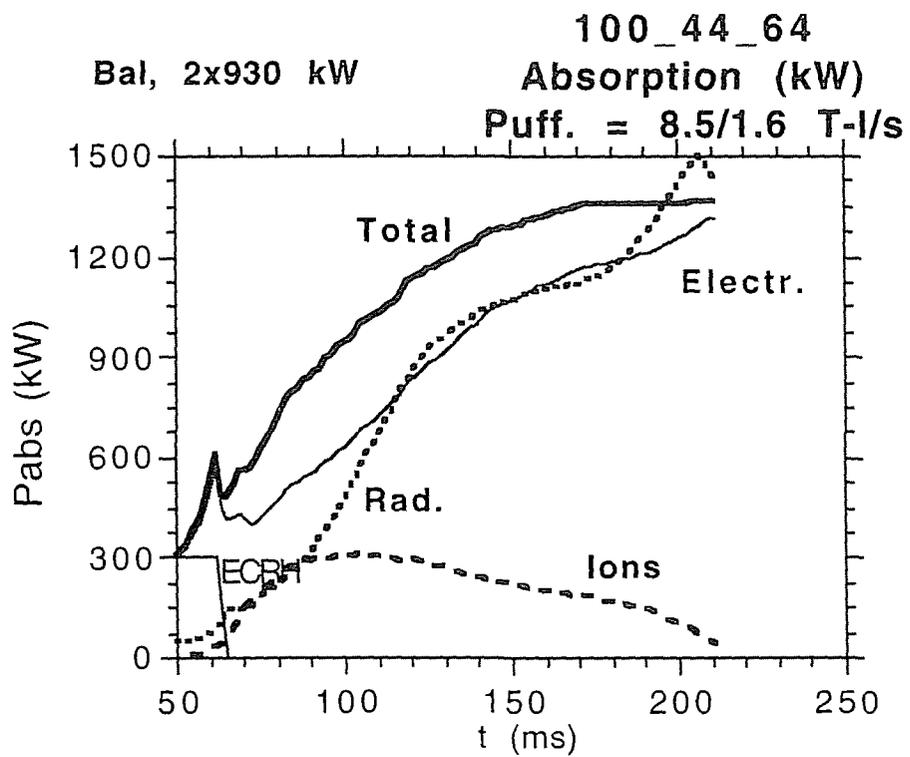
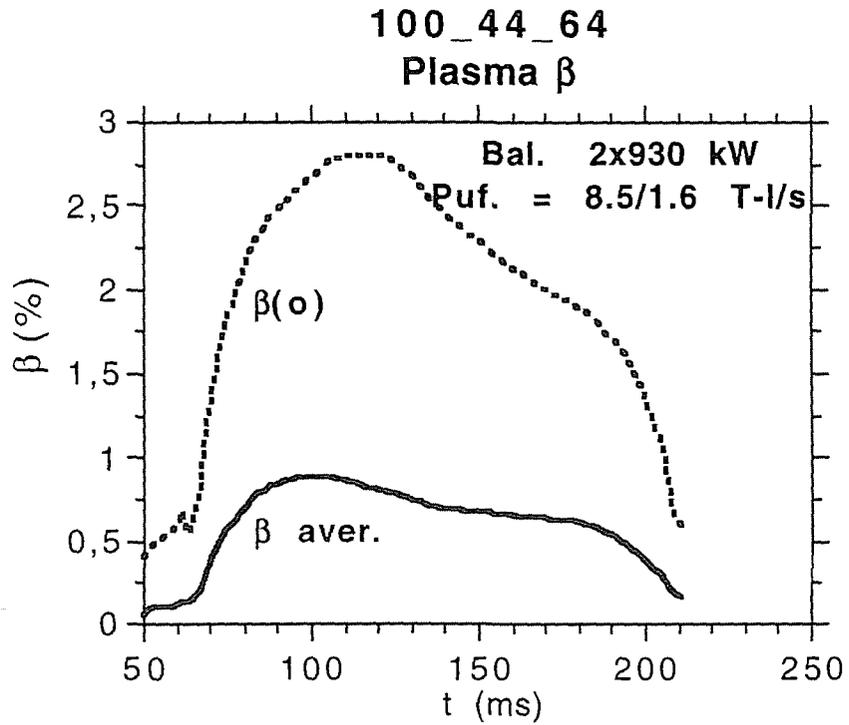
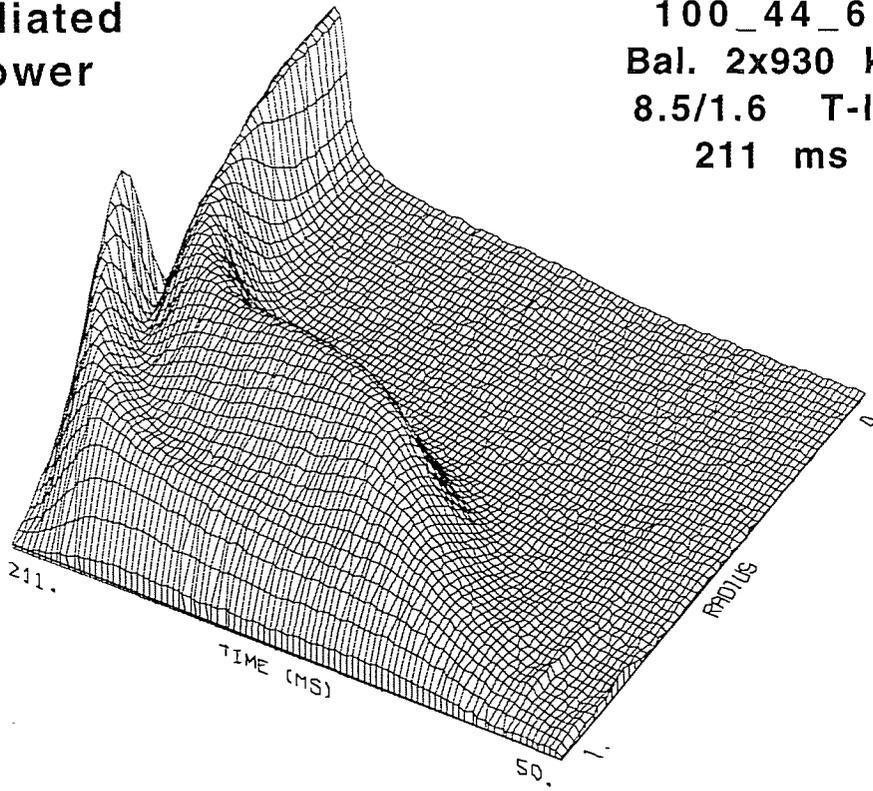


Fig.4.1.4

**Radiated  
Power**

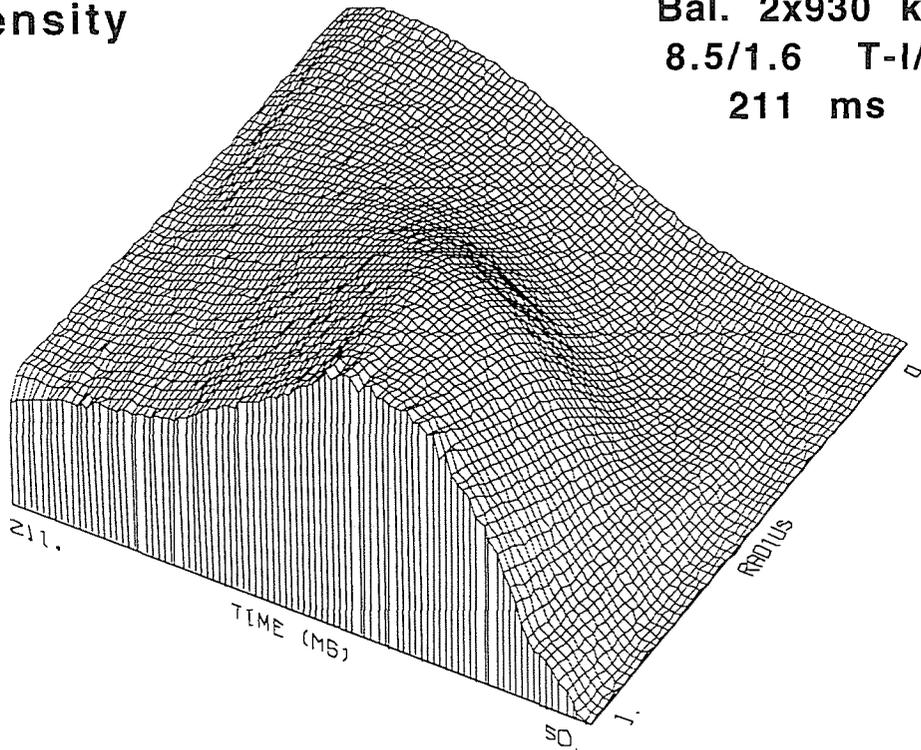
**100\_44\_64  
Bal. 2x930 kW  
8.5/1.6 T-I/s  
211 ms**



(a)

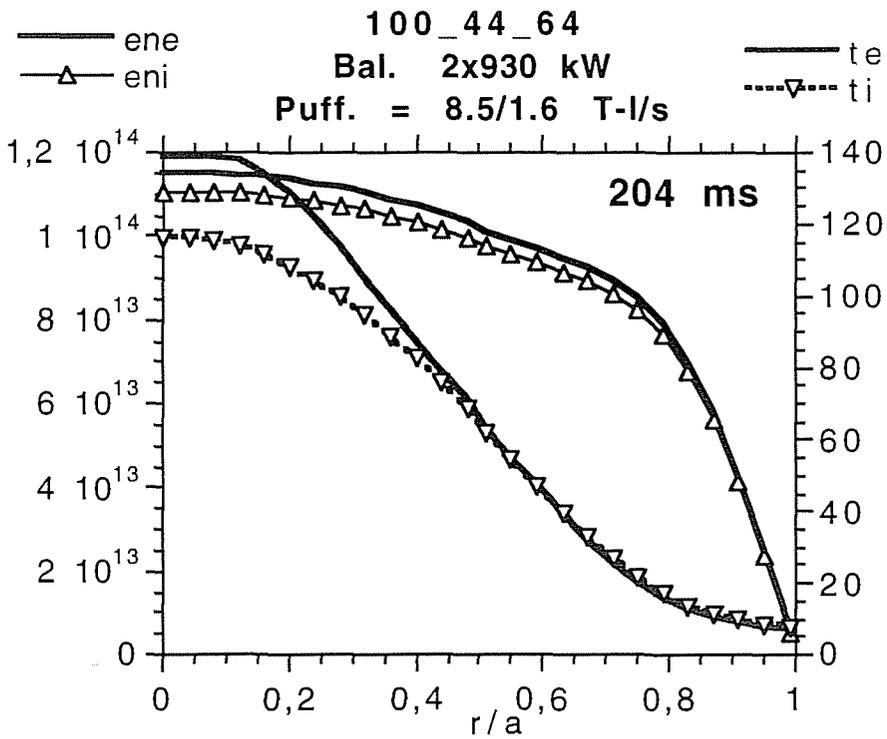
**Iron  
density**

**100\_44\_64  
Bal. 2x930 kW  
8.5/1.6 T-I/s  
211 ms**

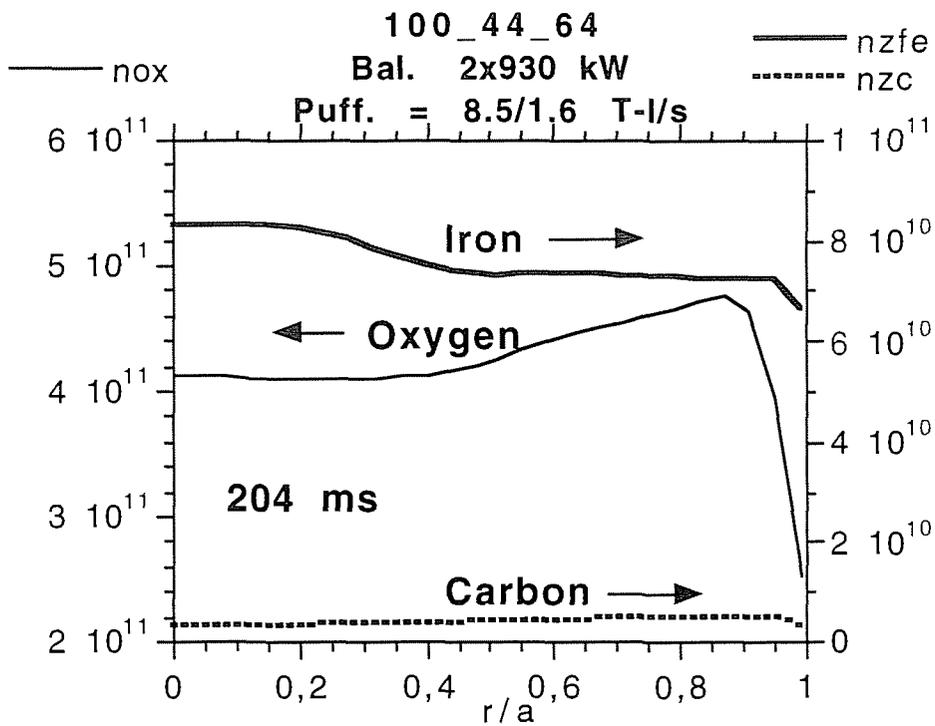


(b)

Fig.4.1.5



(a)



(b)

Fig.4.1.6

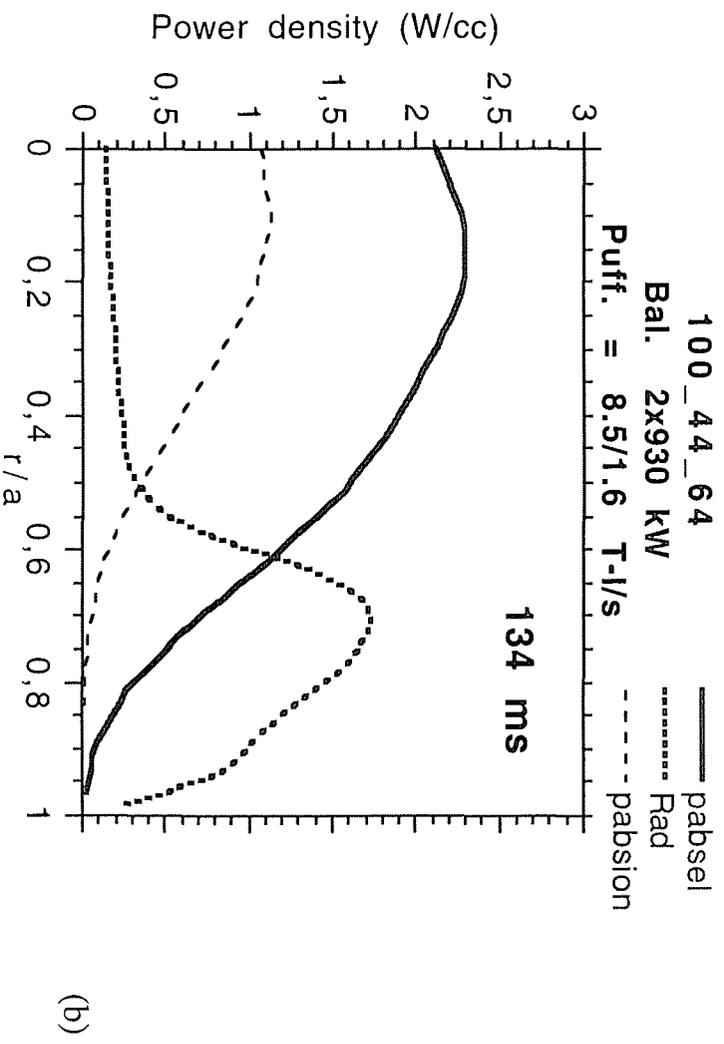
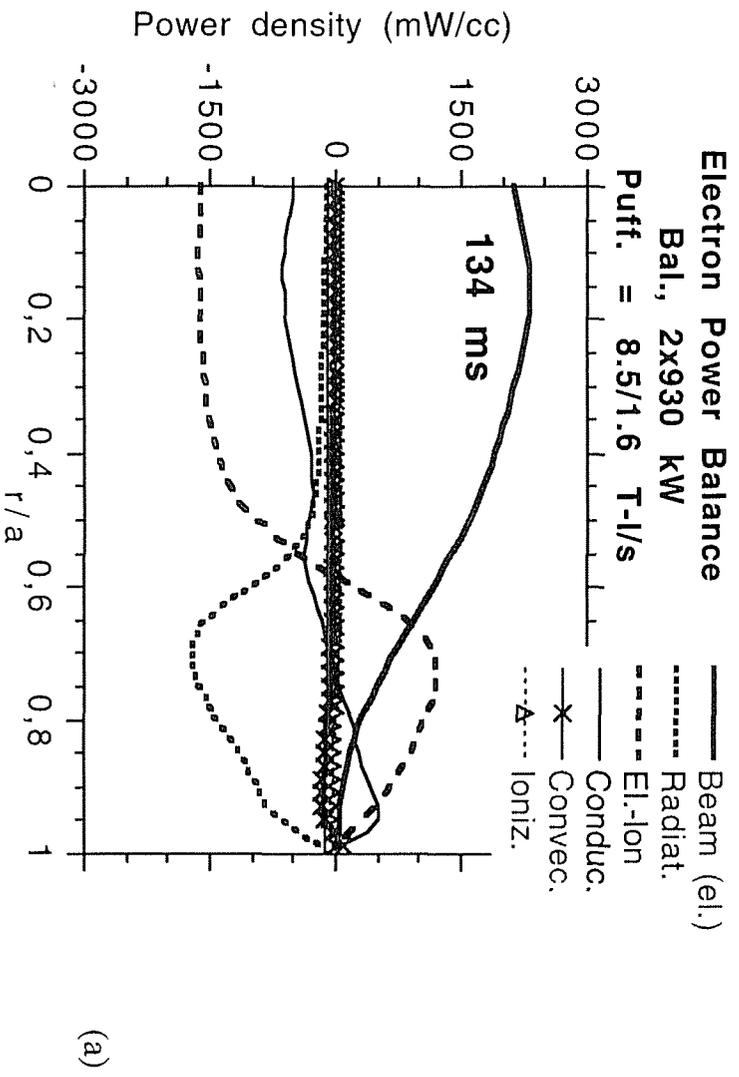


Fig.4.17

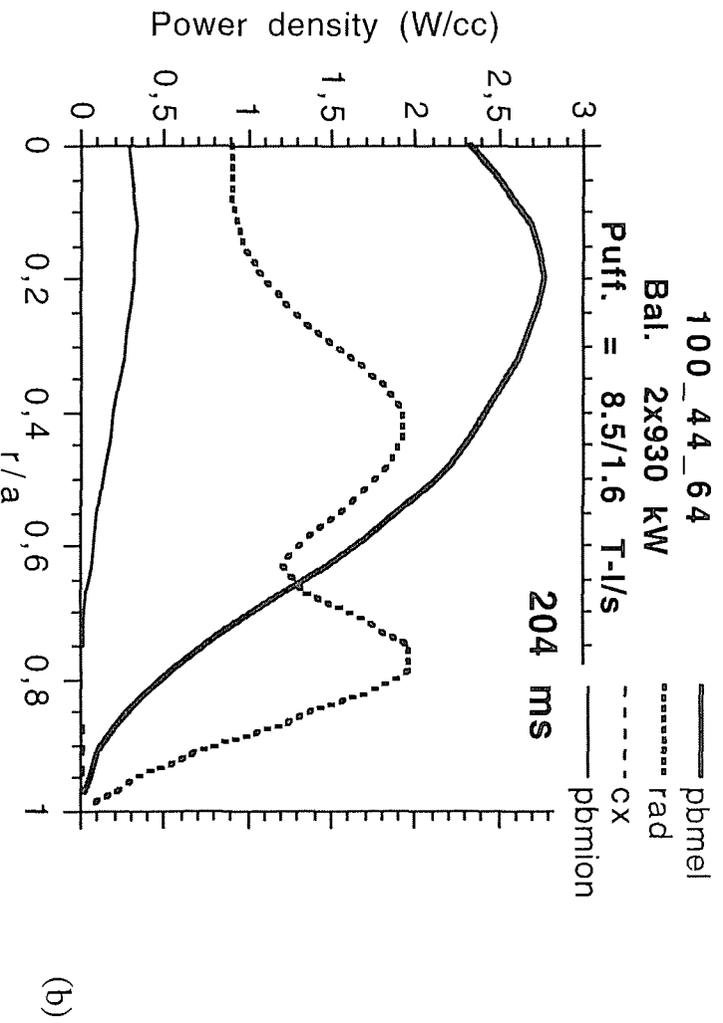
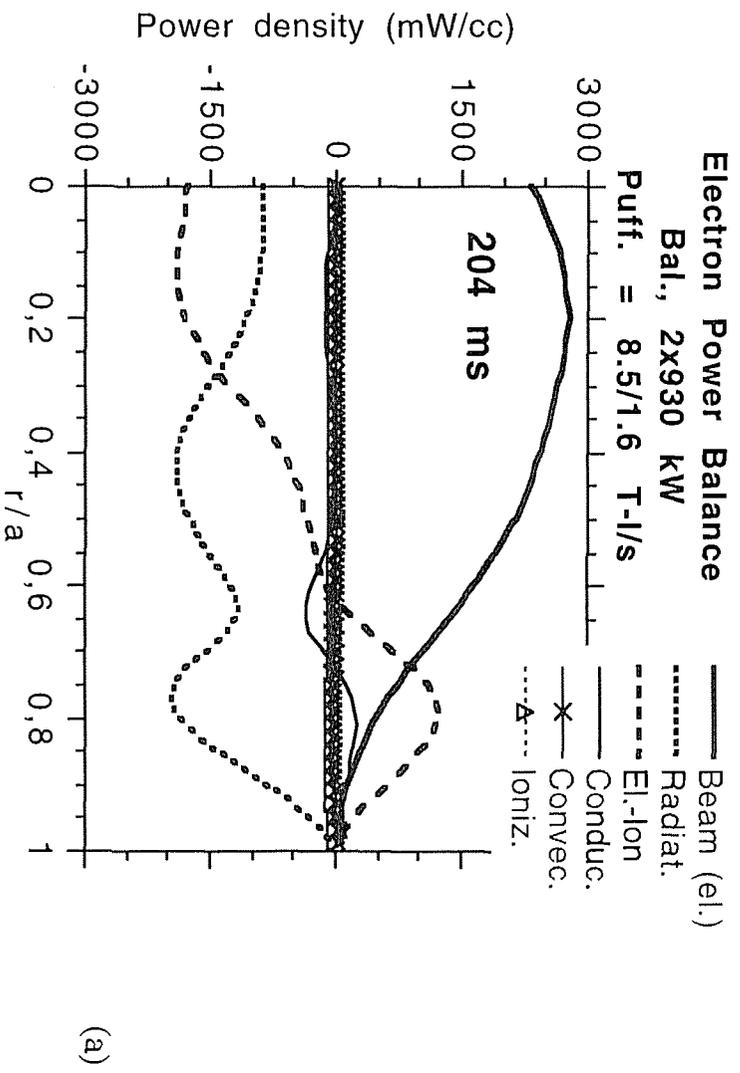
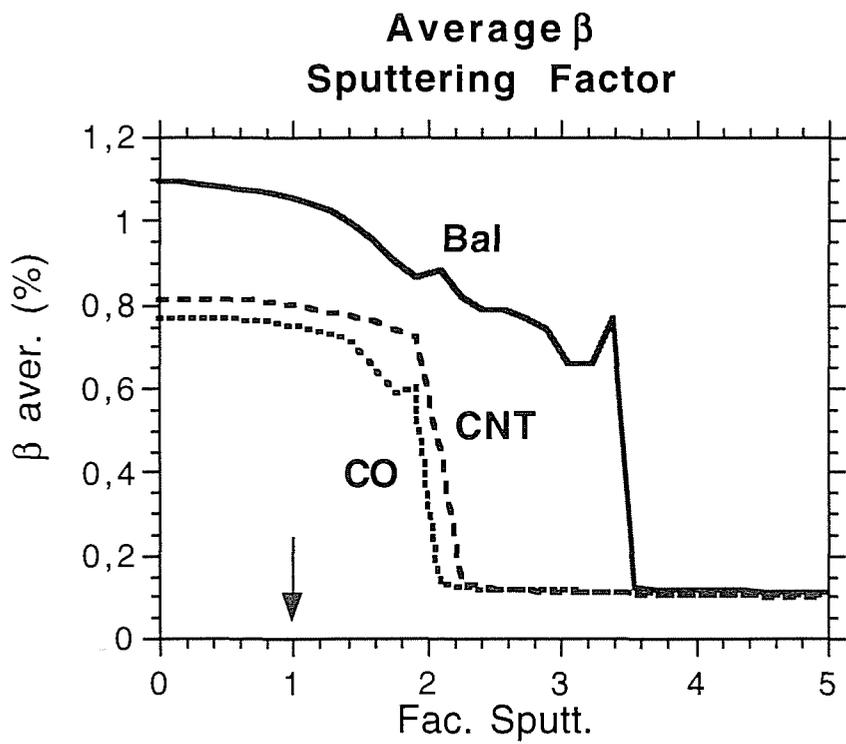
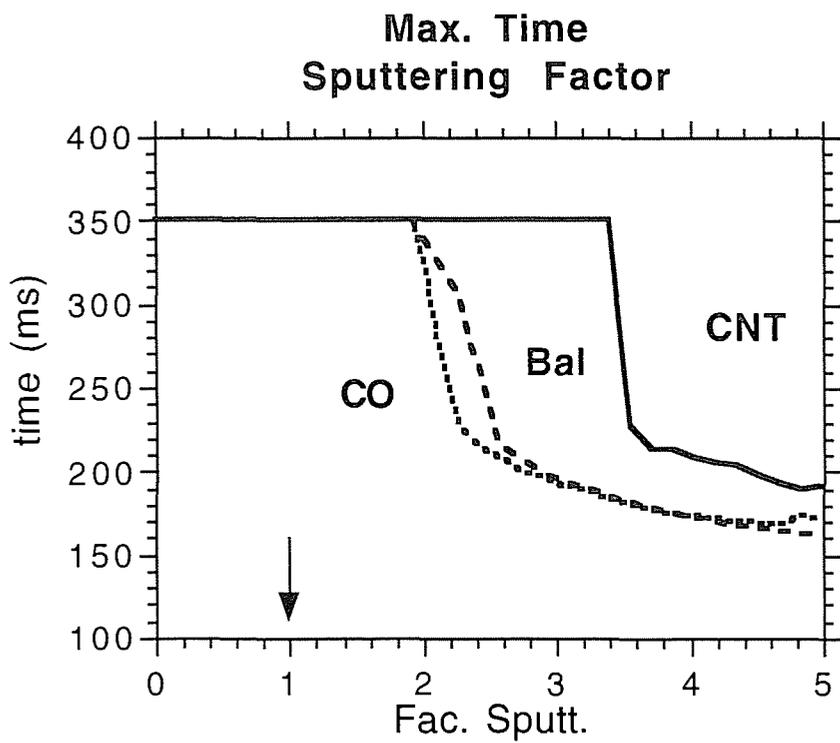


Fig.4.1.8



(a)



(b)

Fig.4.2.1

**Absorbed Power  
Sputtering Factor dependence  
CO, 930 kW**

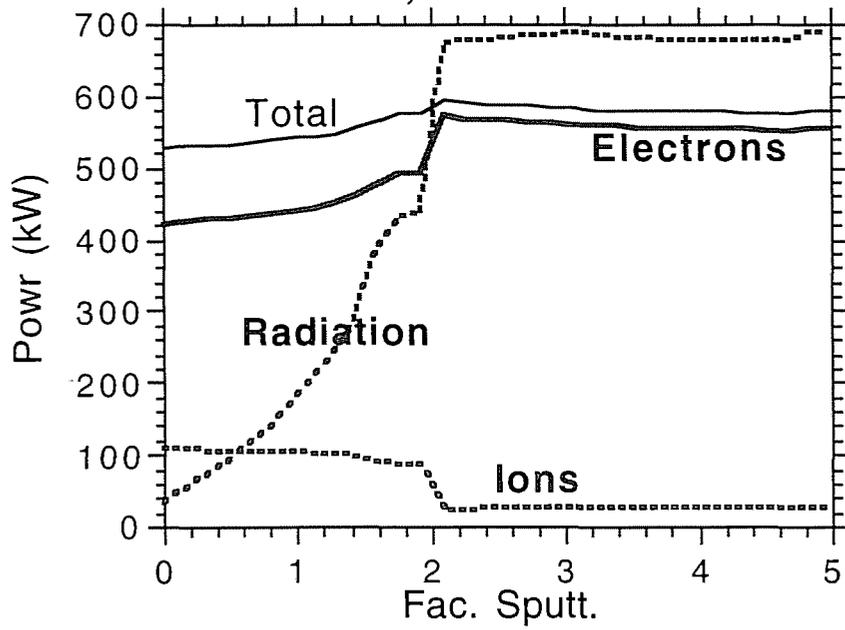
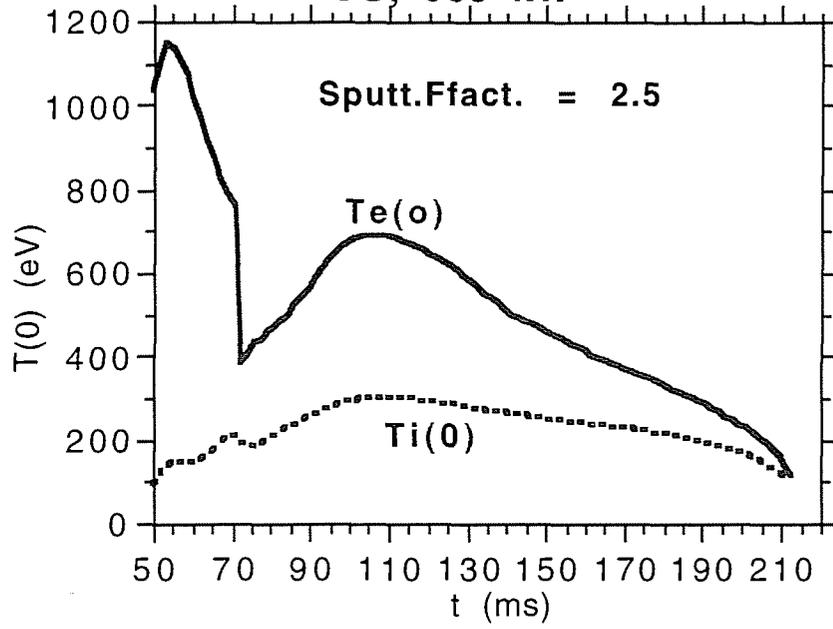


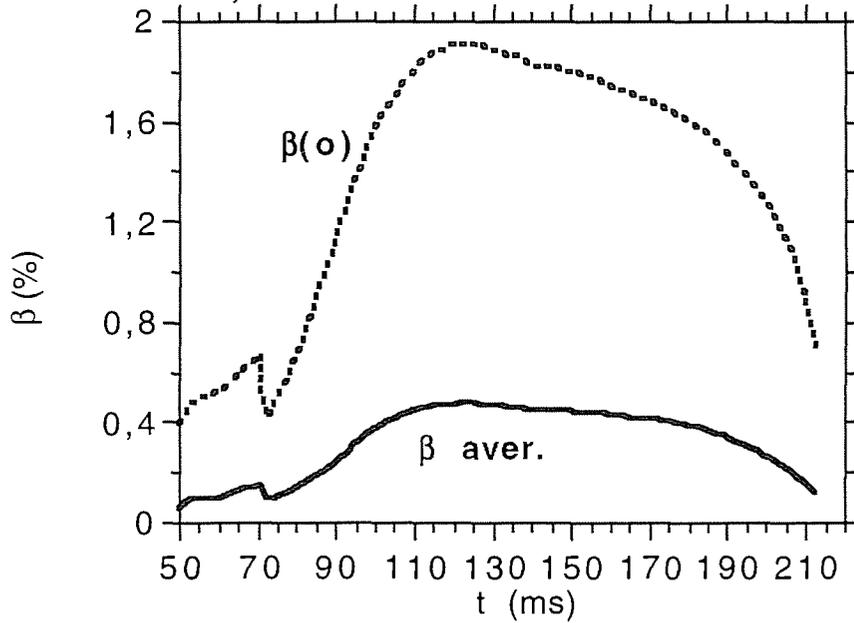
Fig.4.2.2

100\_44\_64  
Central Temperatures  
CO, 930 kW



(a)

100\_44\_64  
Plasma  $\beta$       Sputt.Ffact. = 2.5  
CO, 930 kW



(b)

Fig.4.2.3

100\_44\_64

Sputt.Ffact. = 2.5 Absorption (kW)

CO, 930 kW

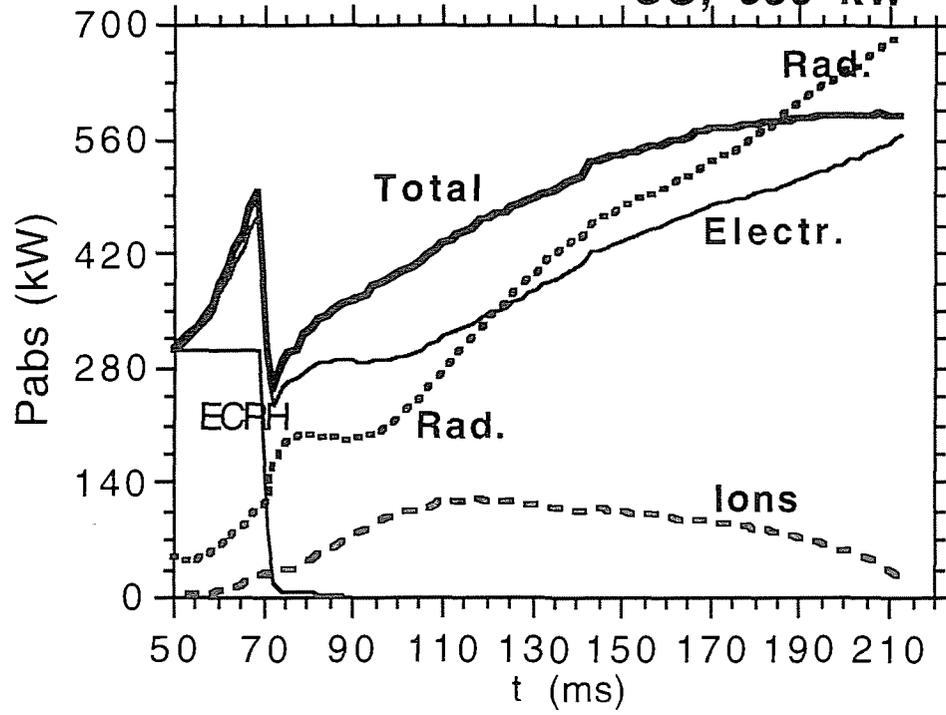


Fig.4.2.4

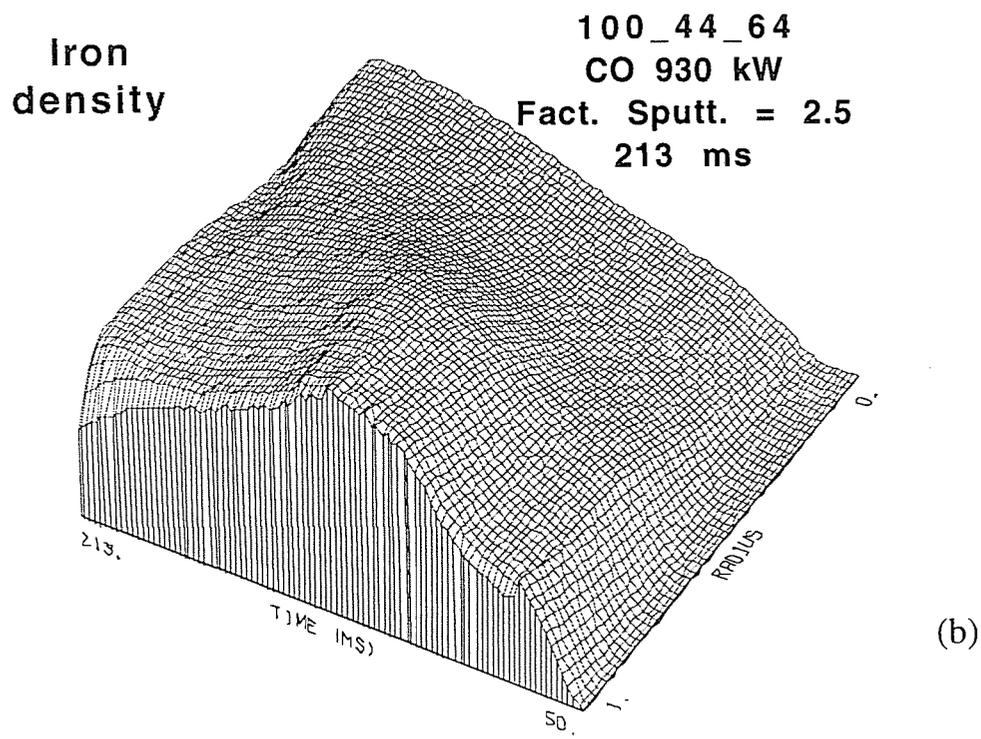
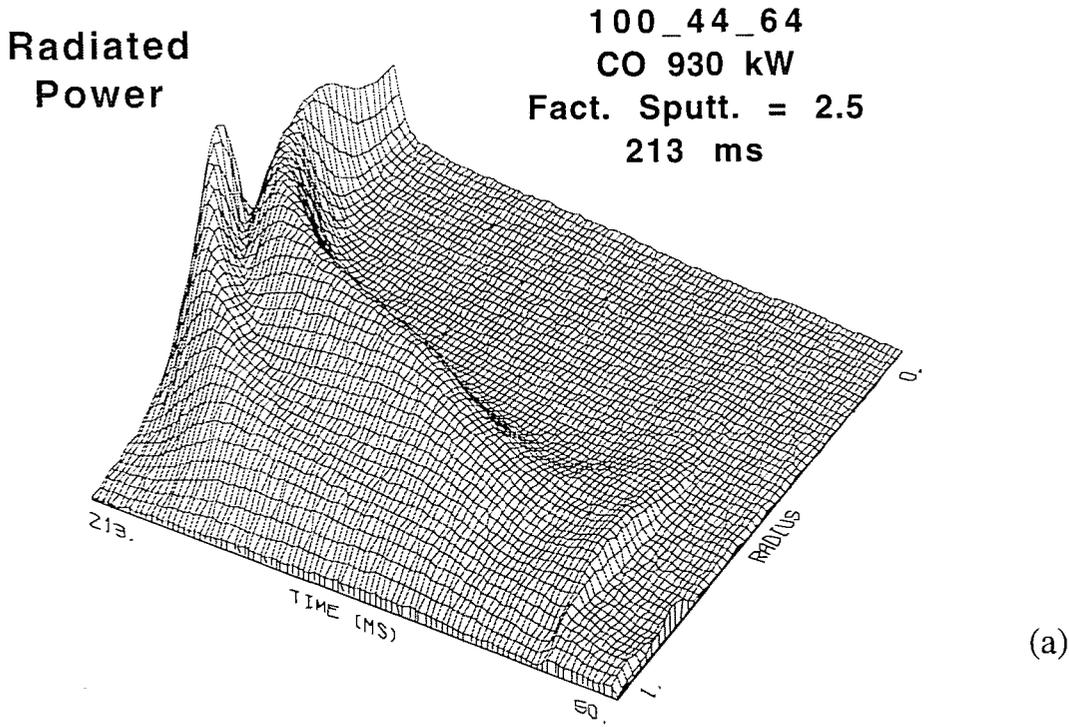
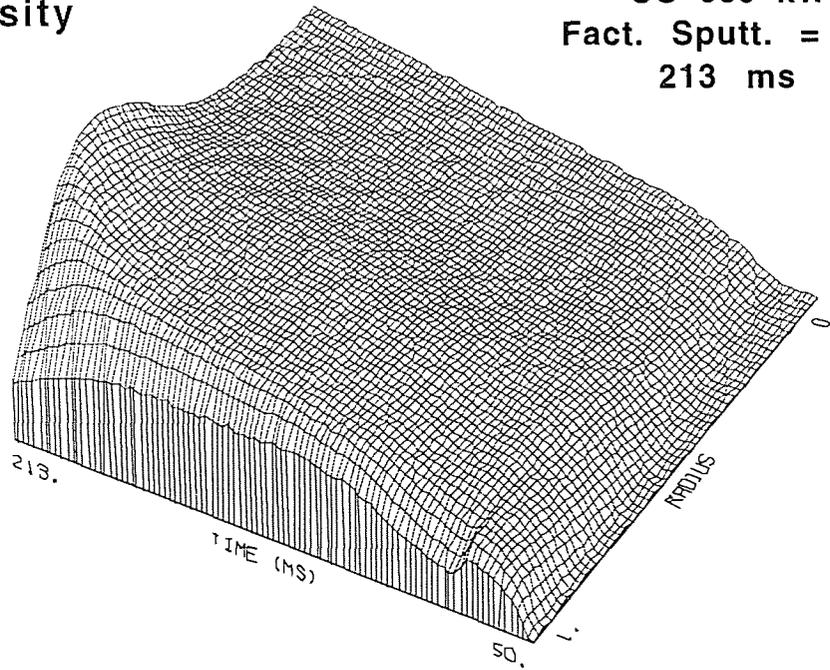


Fig.4.2.5

Carbon  
density

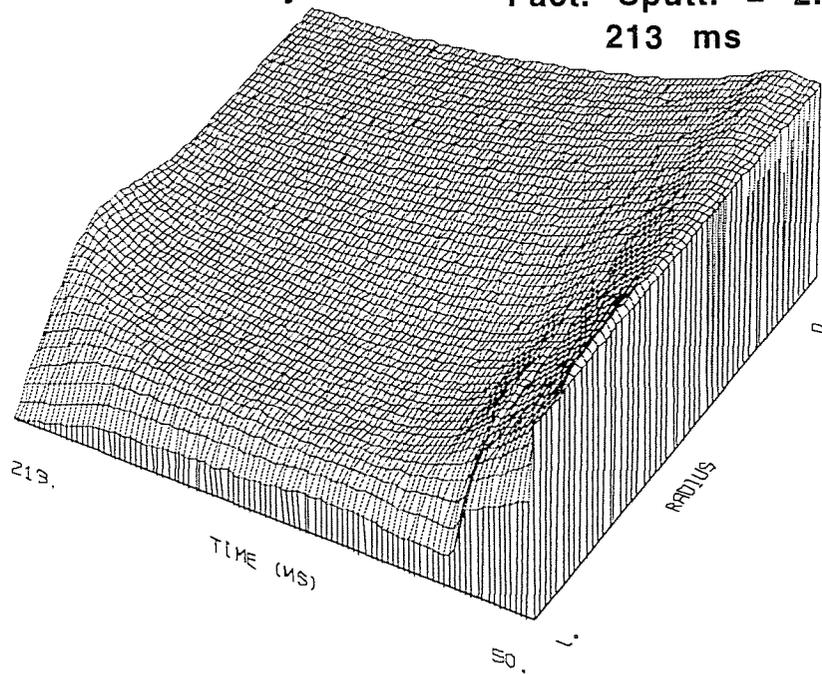
100\_44\_64  
CO 930 kW  
Fact. Sputt. = 2.5  
213 ms



(a)

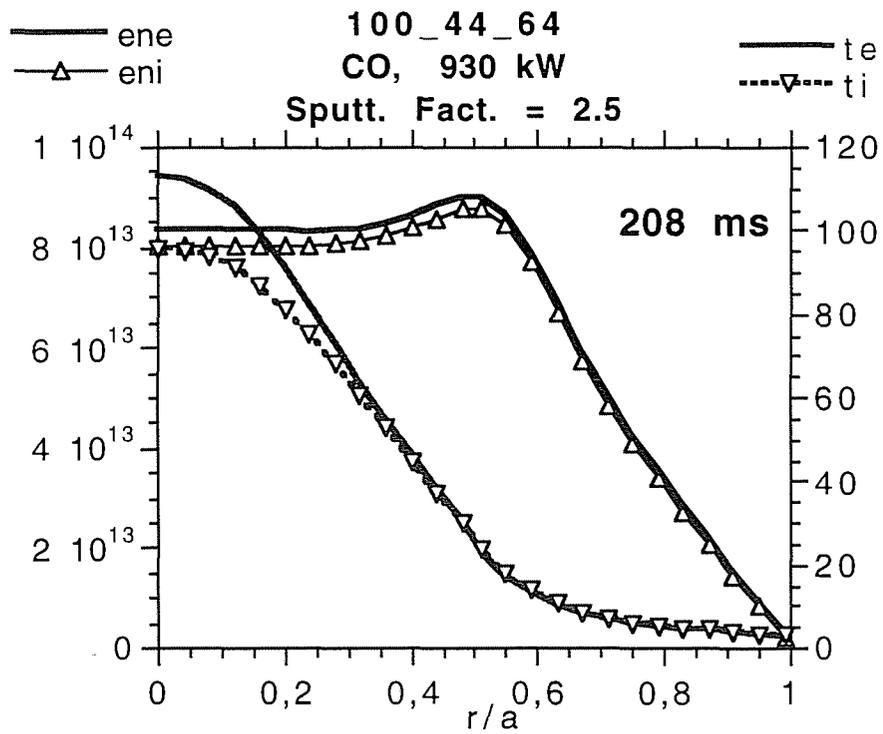
Oxygen  
density

100\_44\_64  
CO 930 kW  
Fact. Sputt. = 2.5  
213 ms

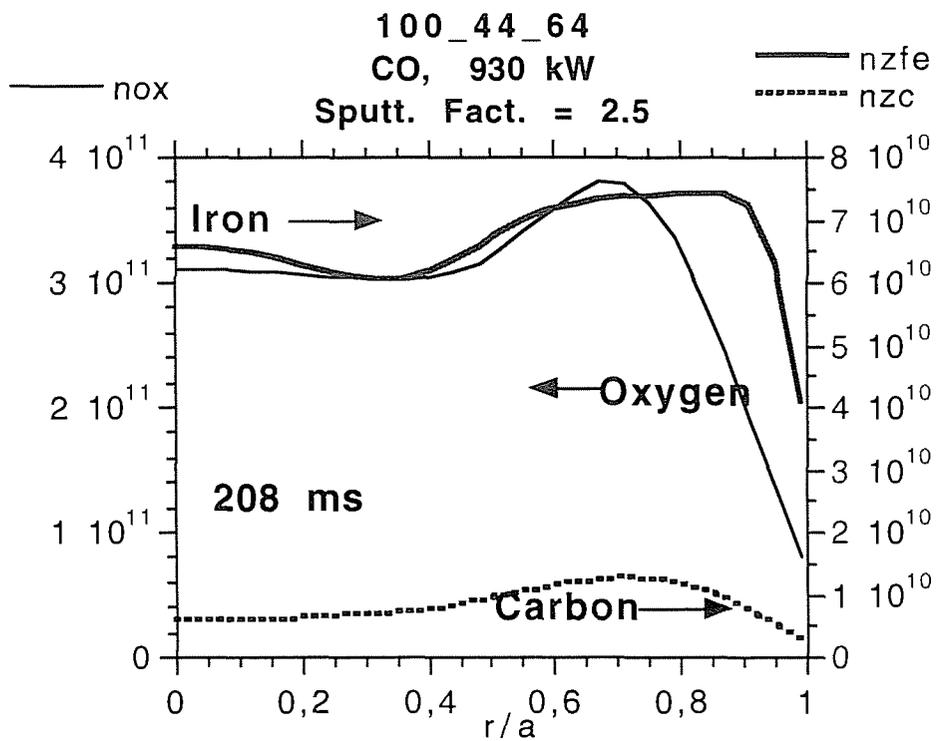


(b)

Fig.4.2.6

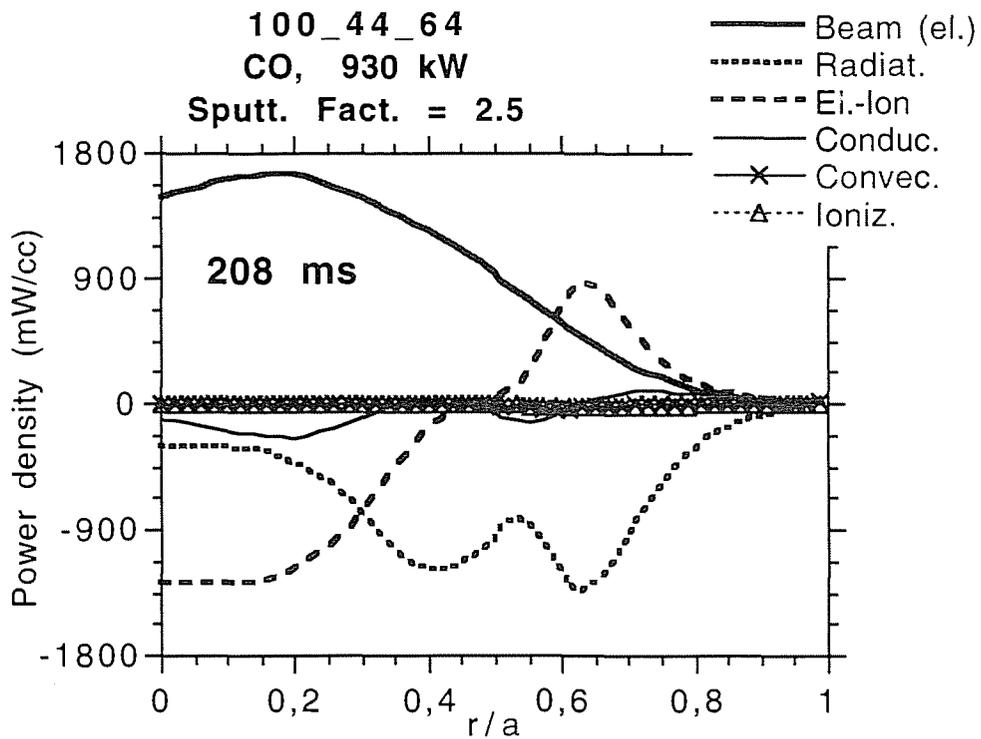


(a)

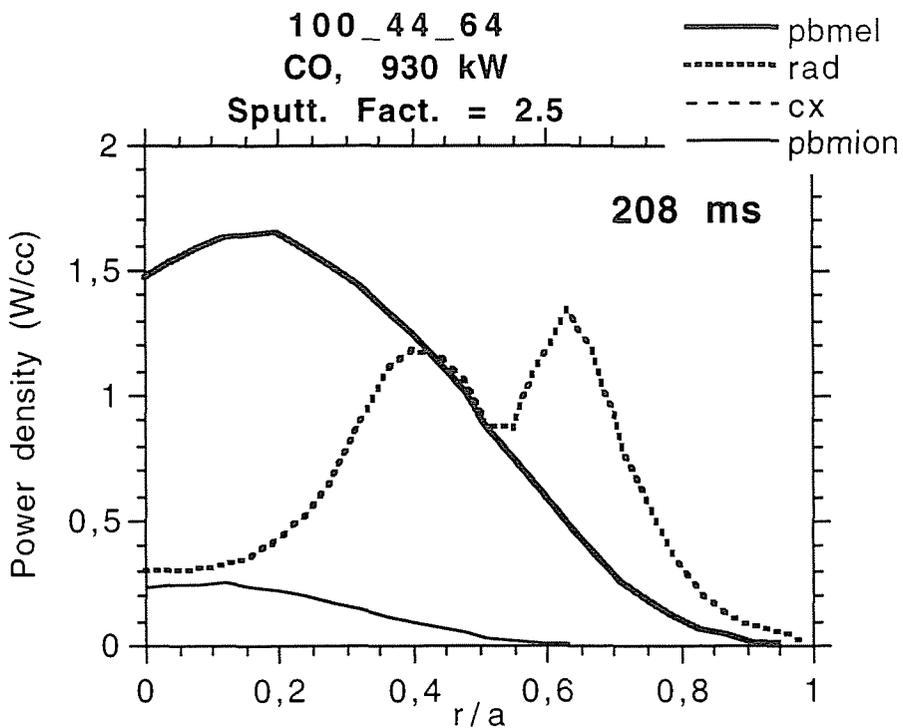


(b)

Fig.4.2.7

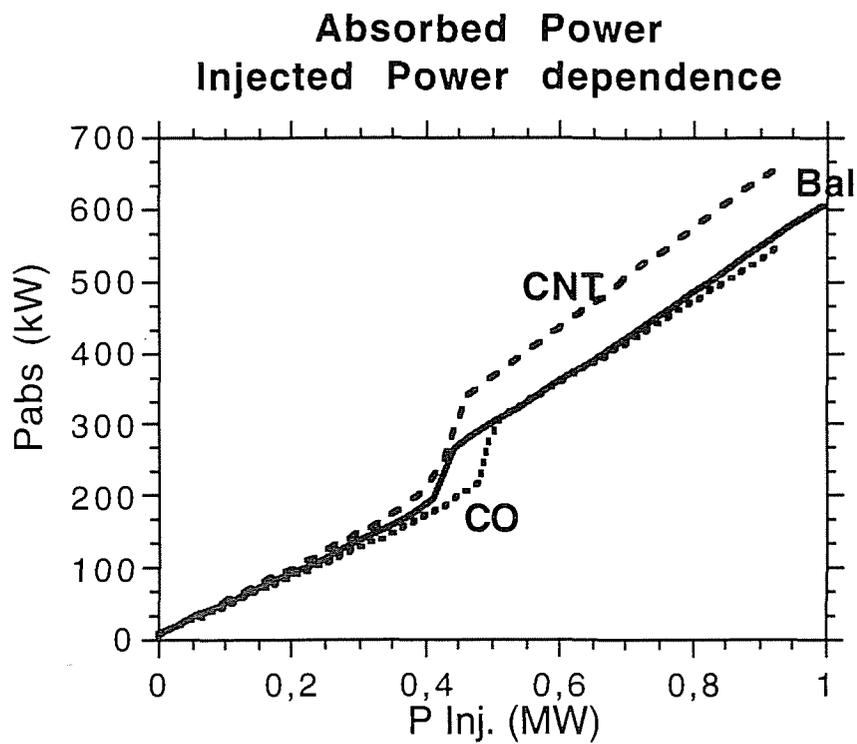


(a)

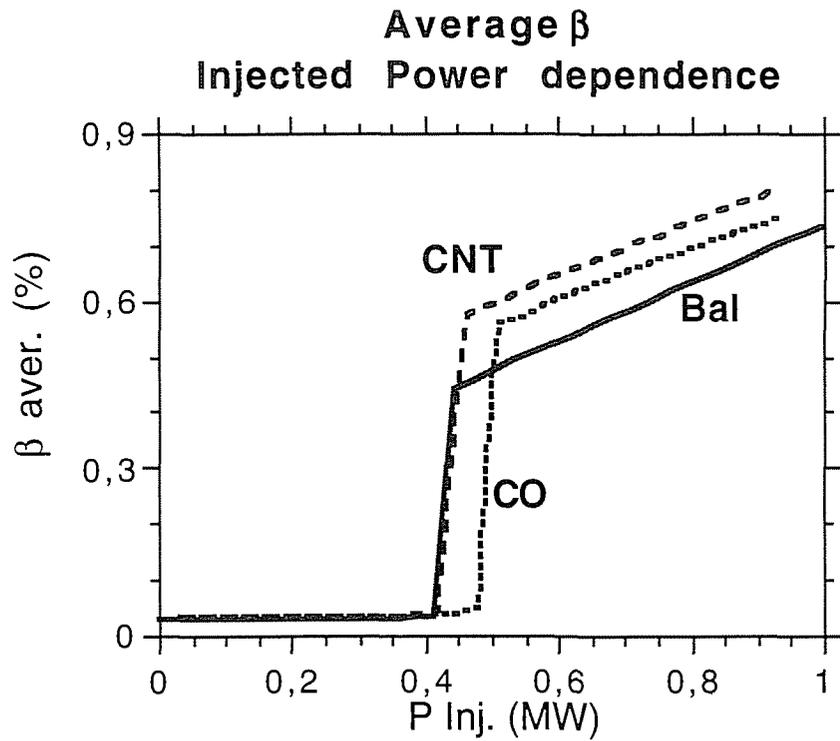


(b)

Fig.4.2.8

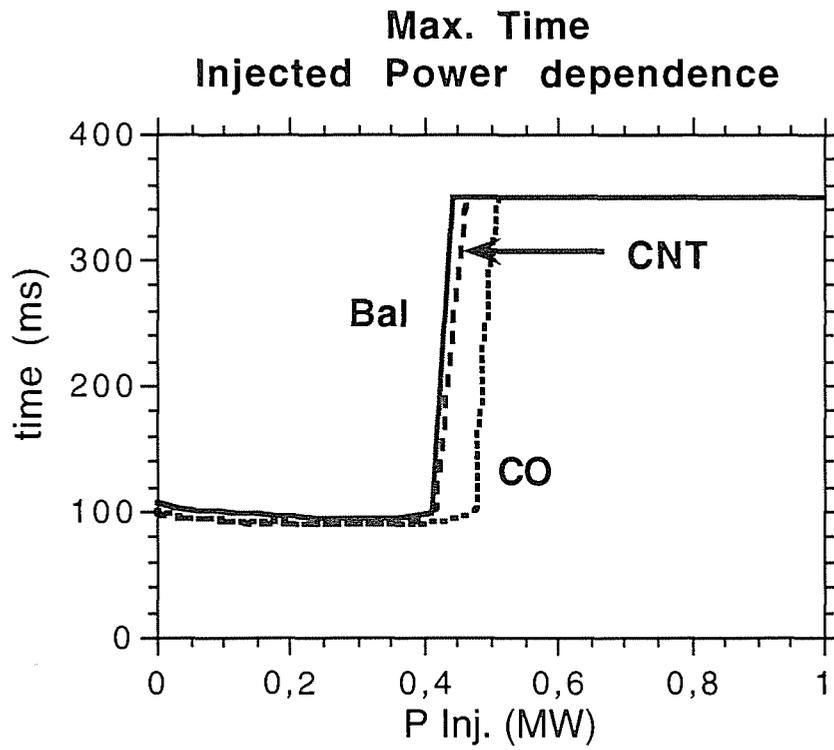


(a)

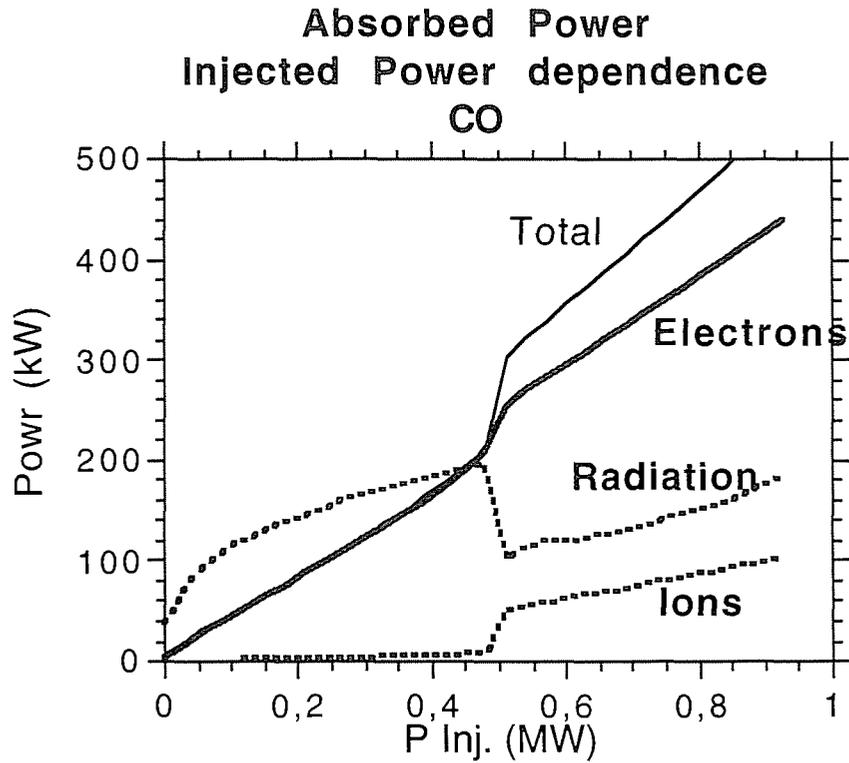


(b)

Fig.4.3.1



(a)



(b)

Fig.4.3.2

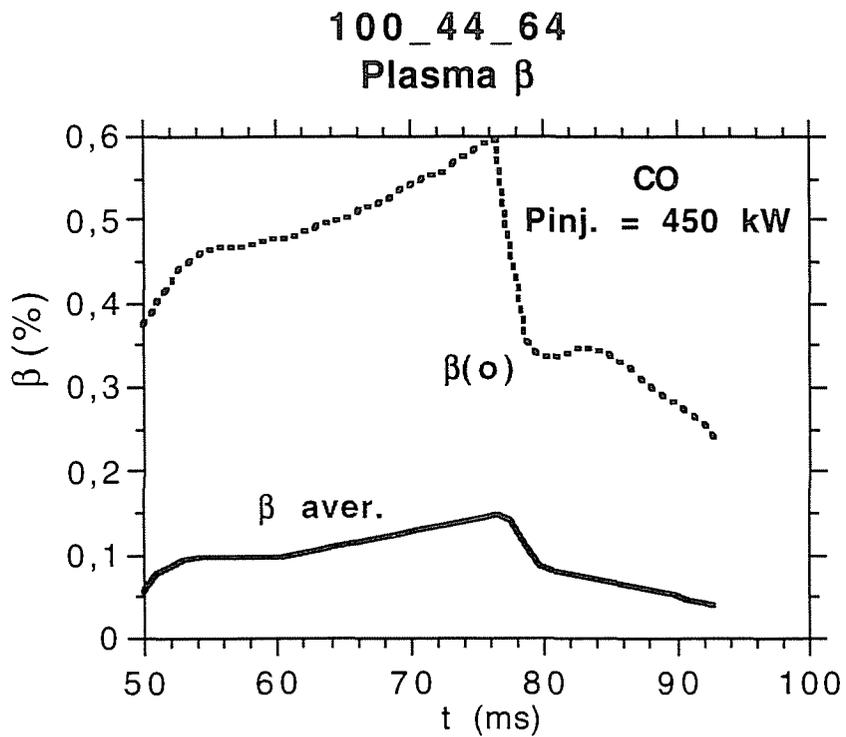
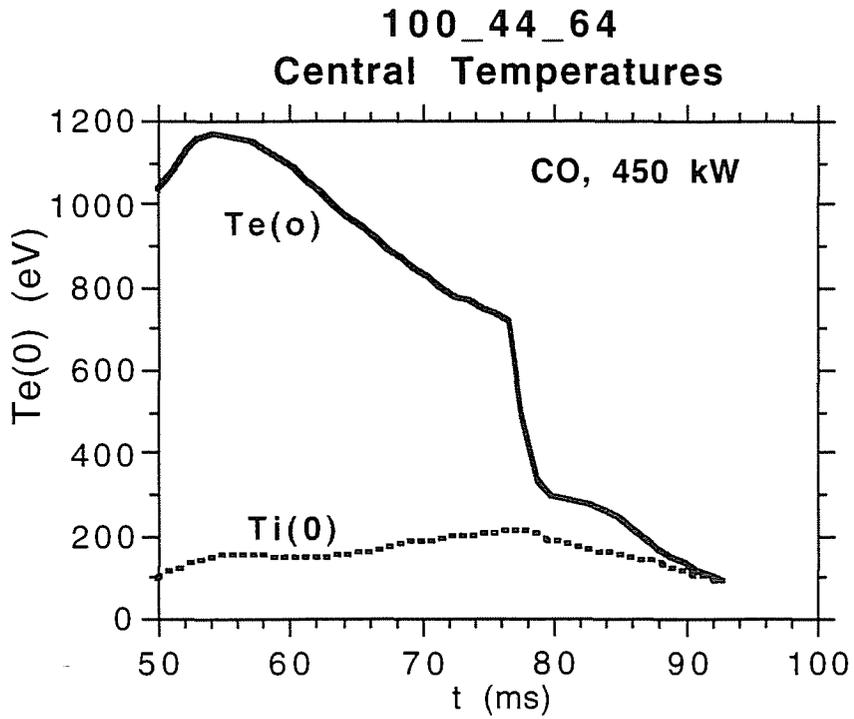


Fig.4.3.3

100\_44\_64

P. Inj. = 450 kW

Absorption (kW)

CO

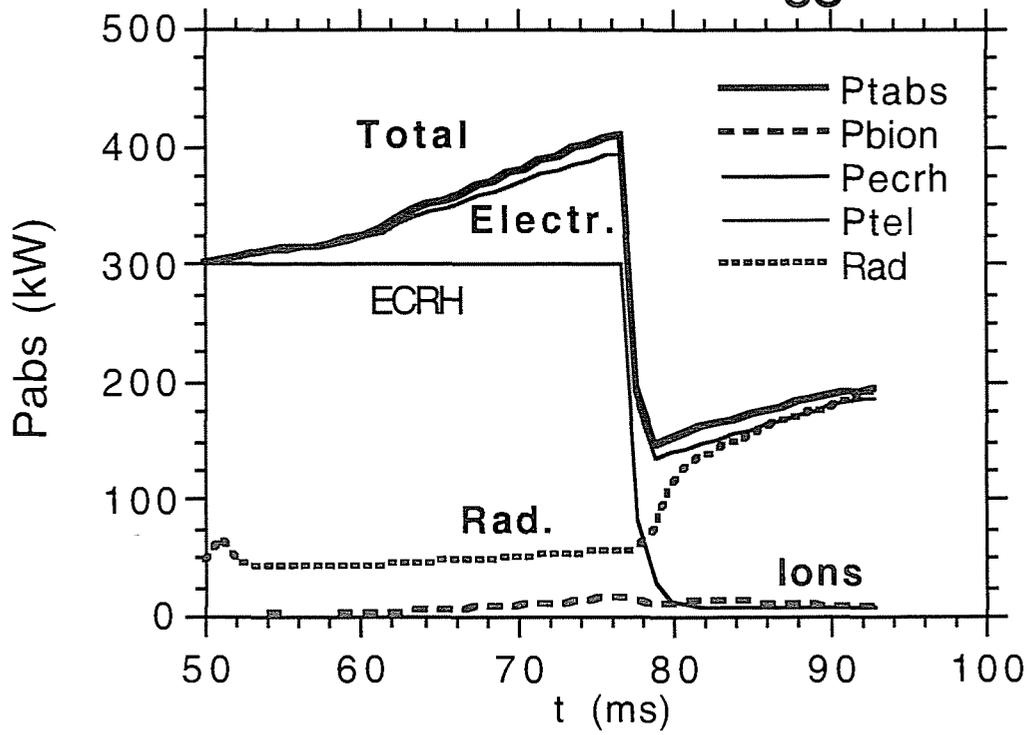


Fig.4.3.4

Radiated  
Power

100\_44\_64  
CO<sub>2</sub>, Pinj. = 450 kW  
93 ms

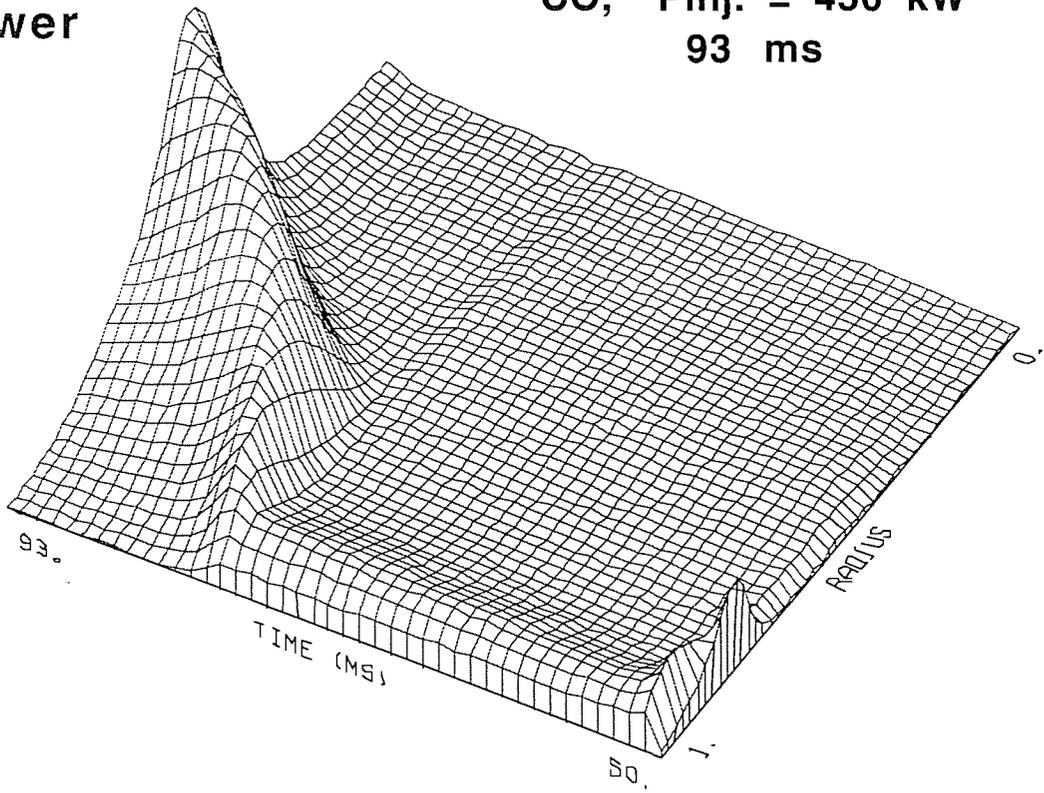
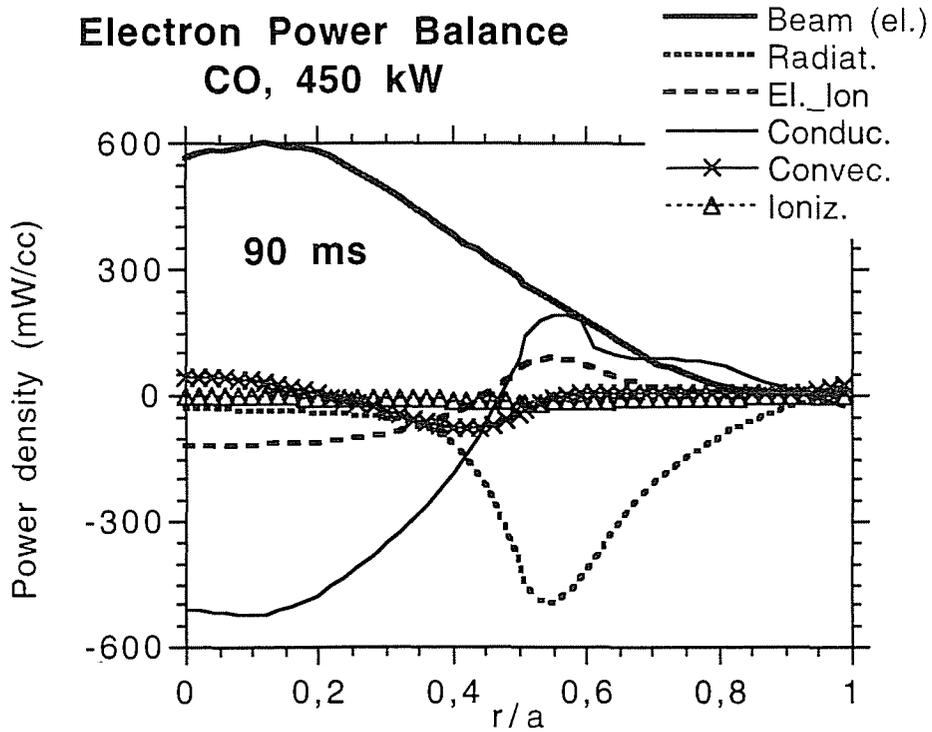
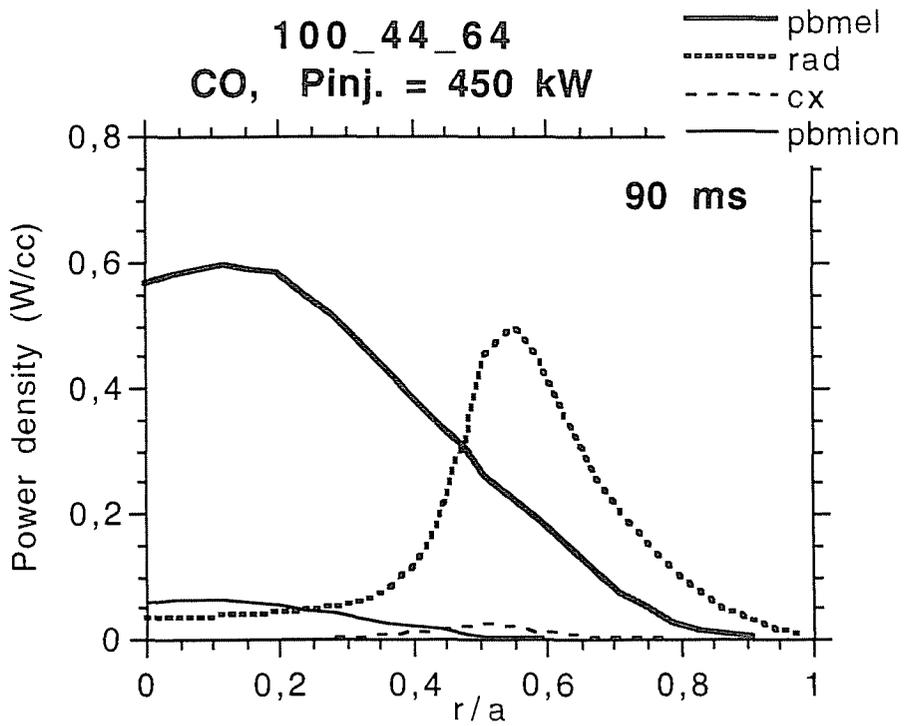


Fig.4.3.5



(a)



(b)

Fig.4.3.6

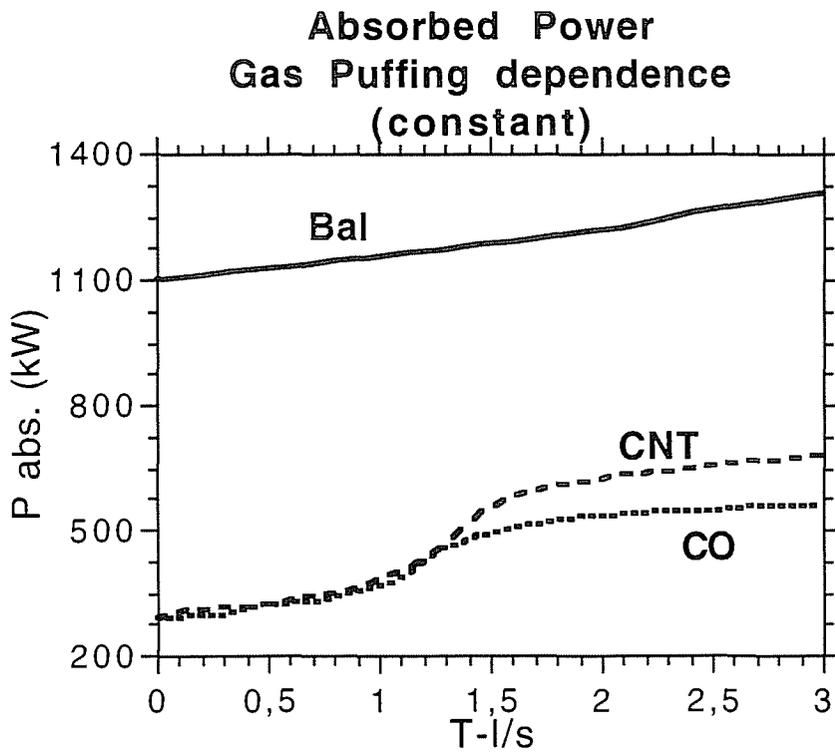
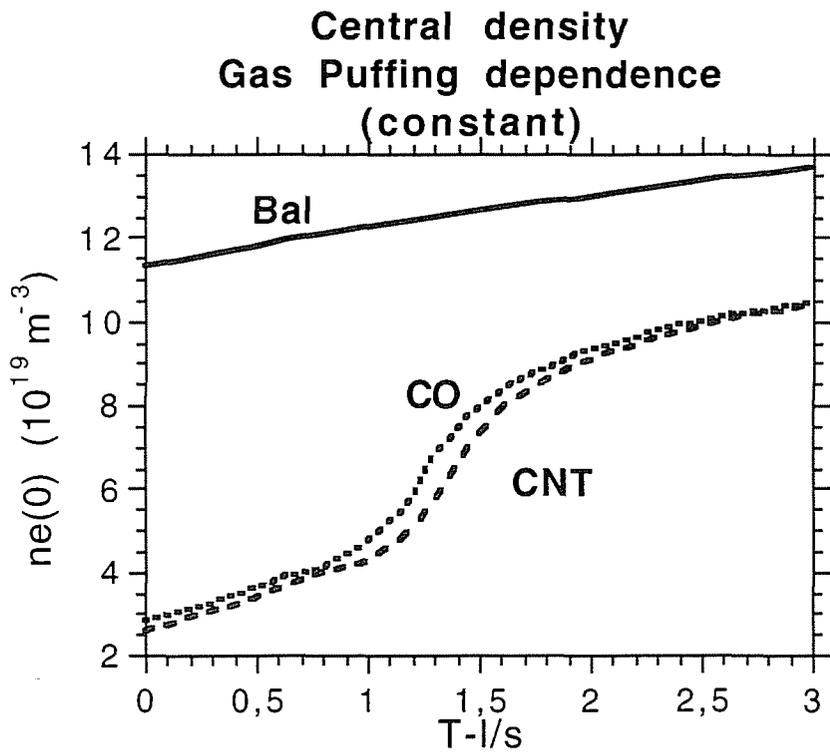
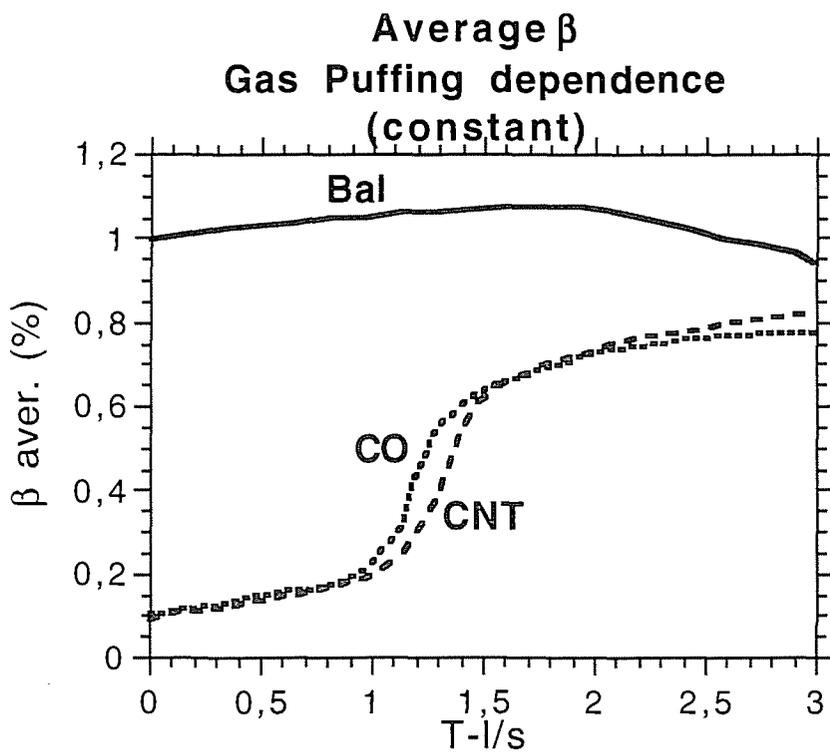
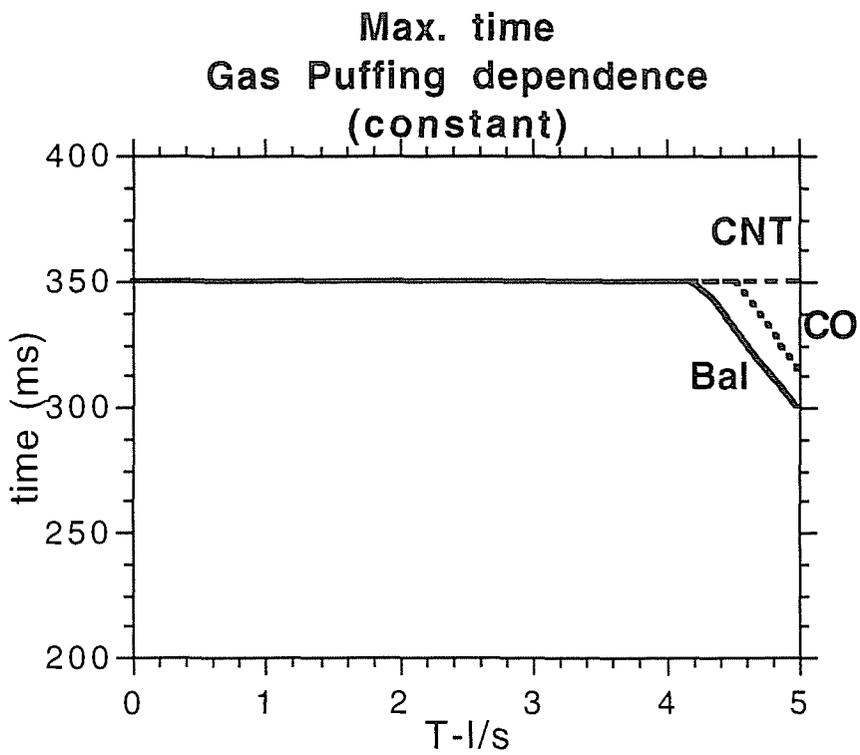


Fig.4.4.1

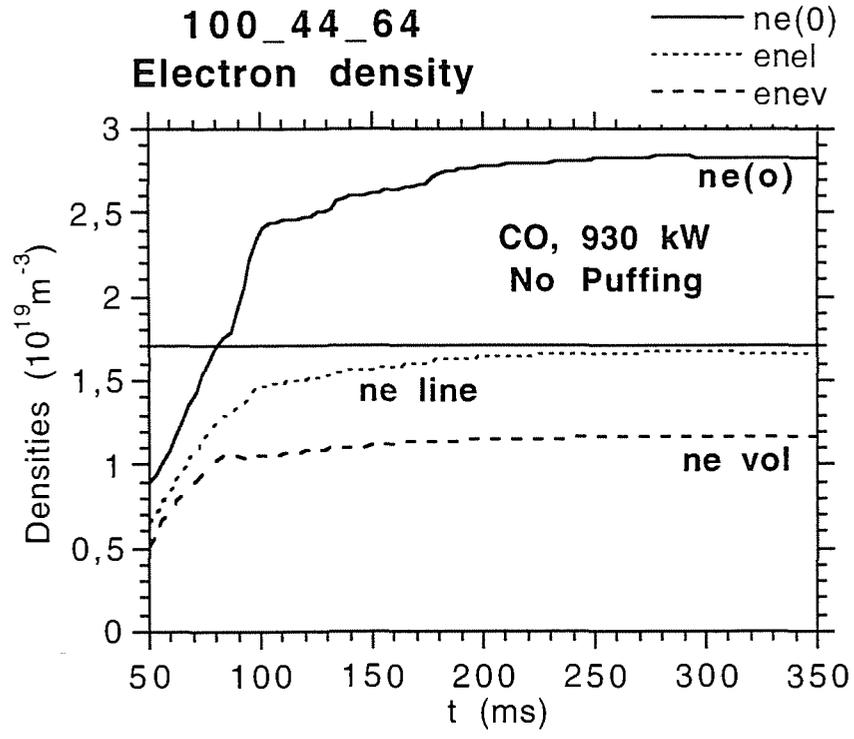


(a)

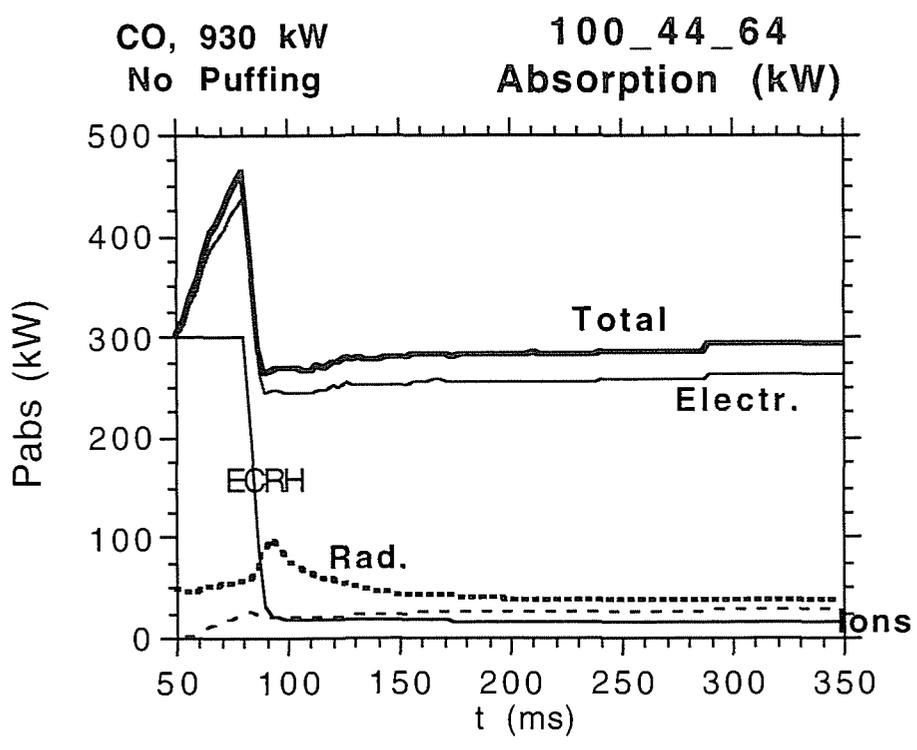


(b)

Fig.4.4.2



(a)



(b)

Fig.4.4.3



100\_44\_64  
Beam Induced Current

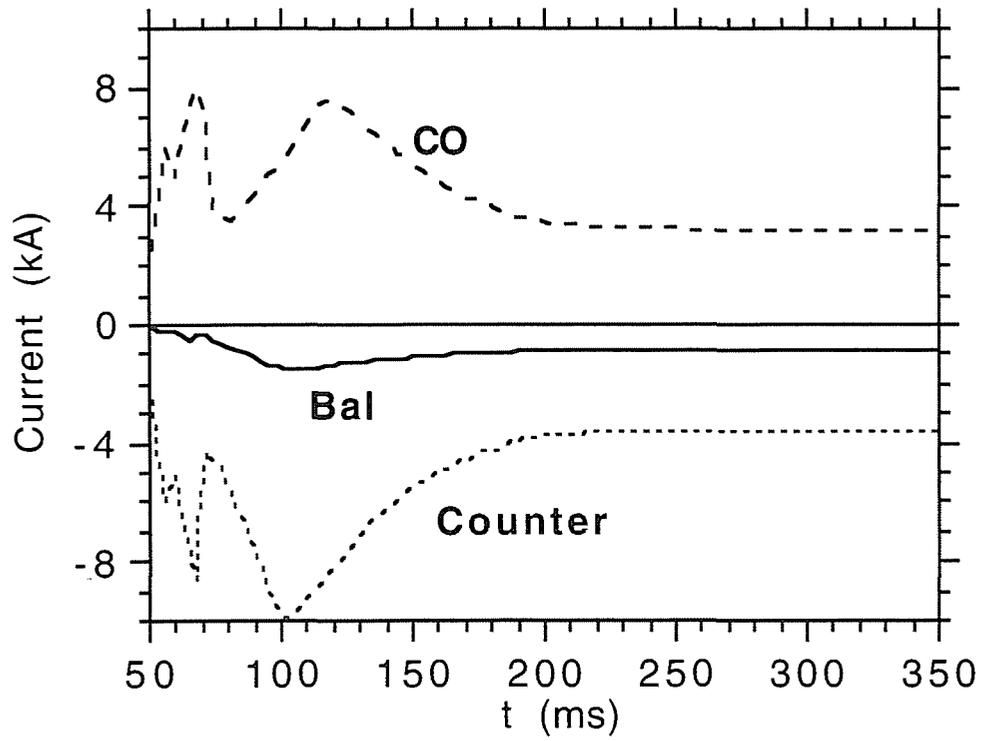


Fig.5.1

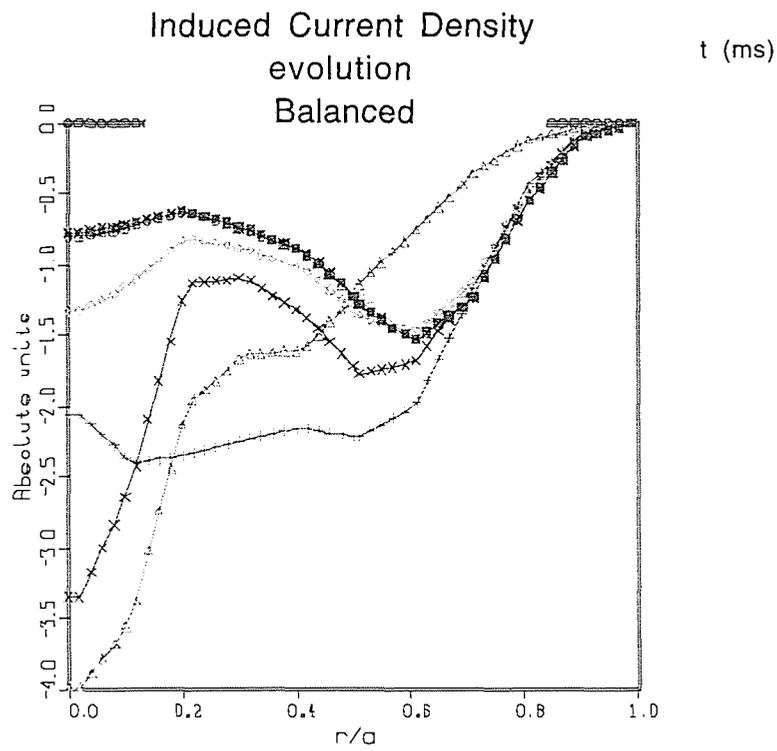
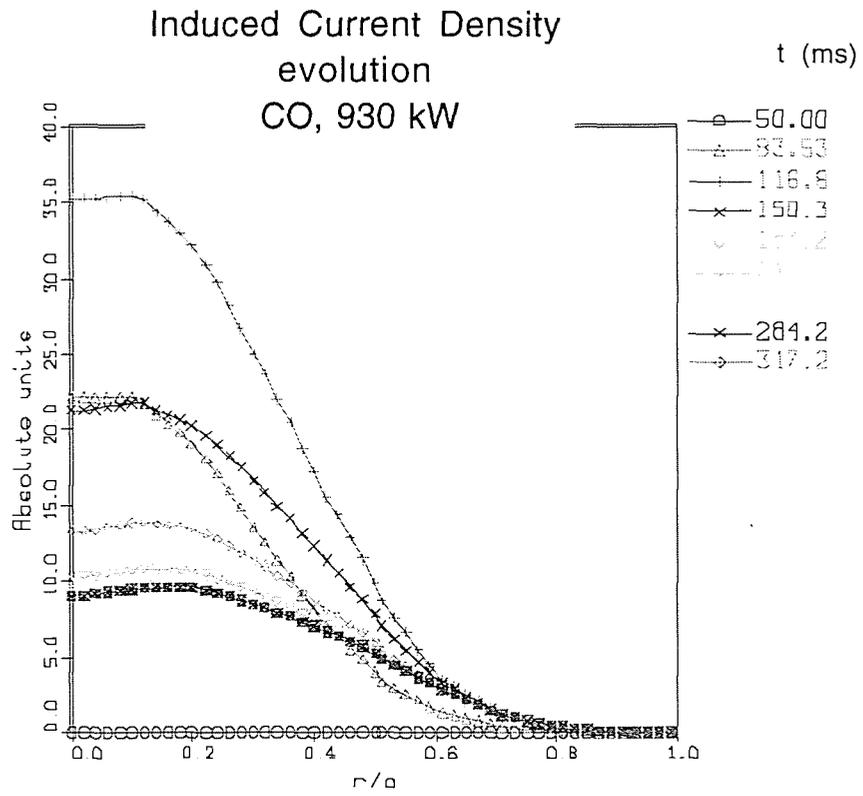


Fig.5.2

100\_44\_64  
Balanced 2x930 kW

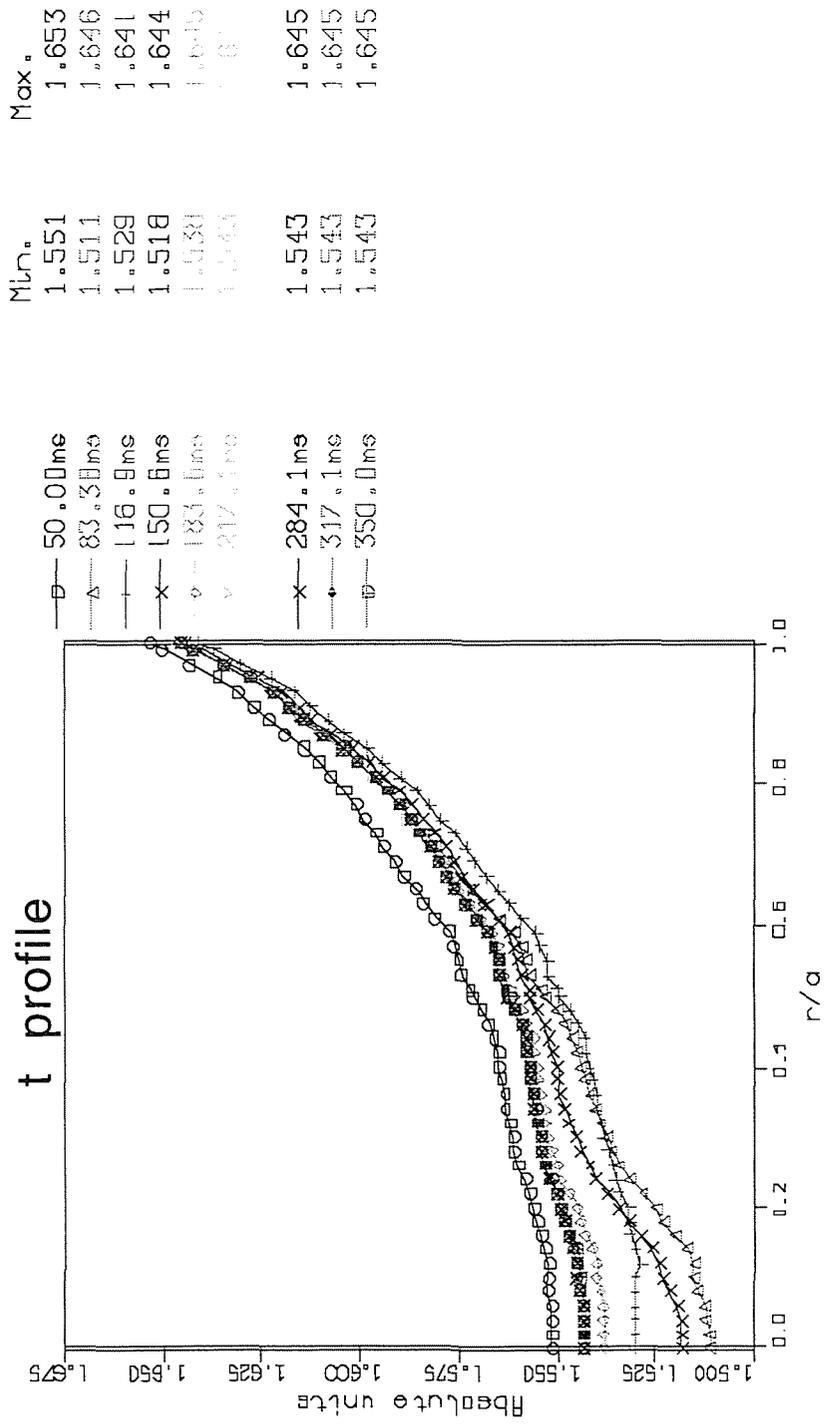


Fig.5.3

100\_44\_64  
CO 930 kW  
t profile

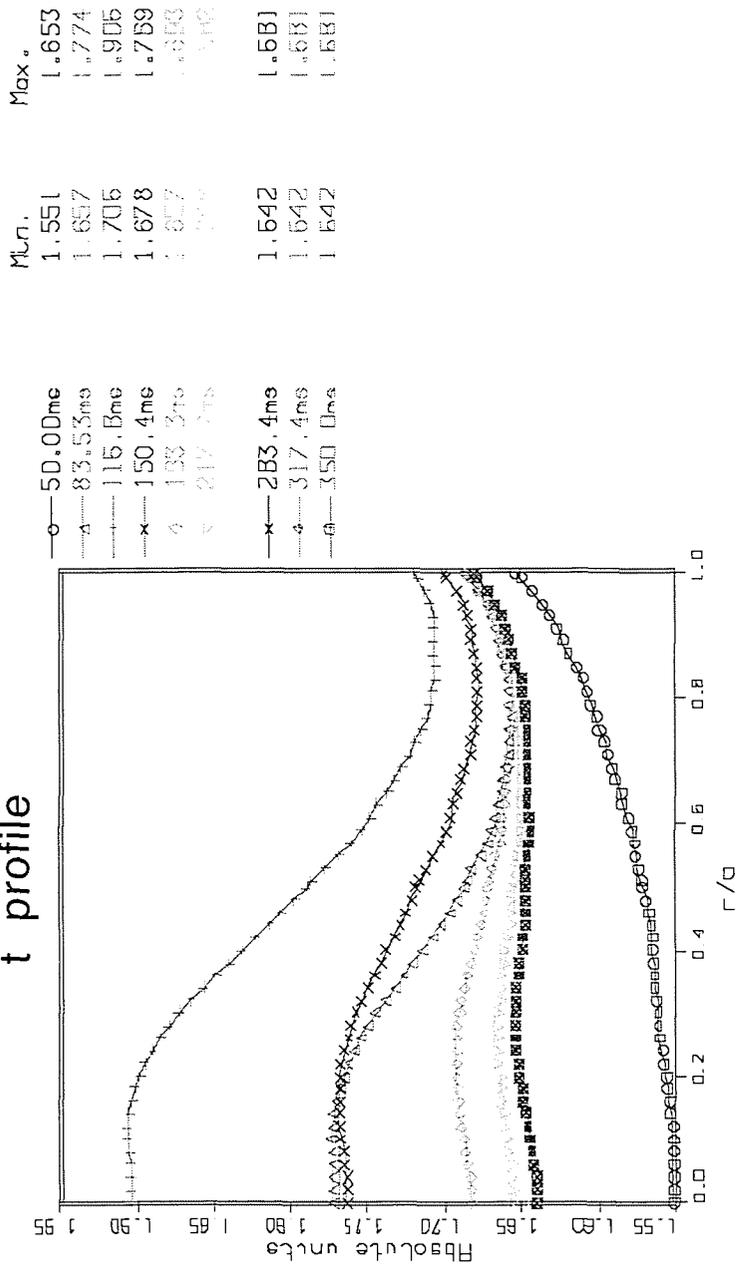


Fig.5.4

100\_44\_64  
CNT, 930 kW

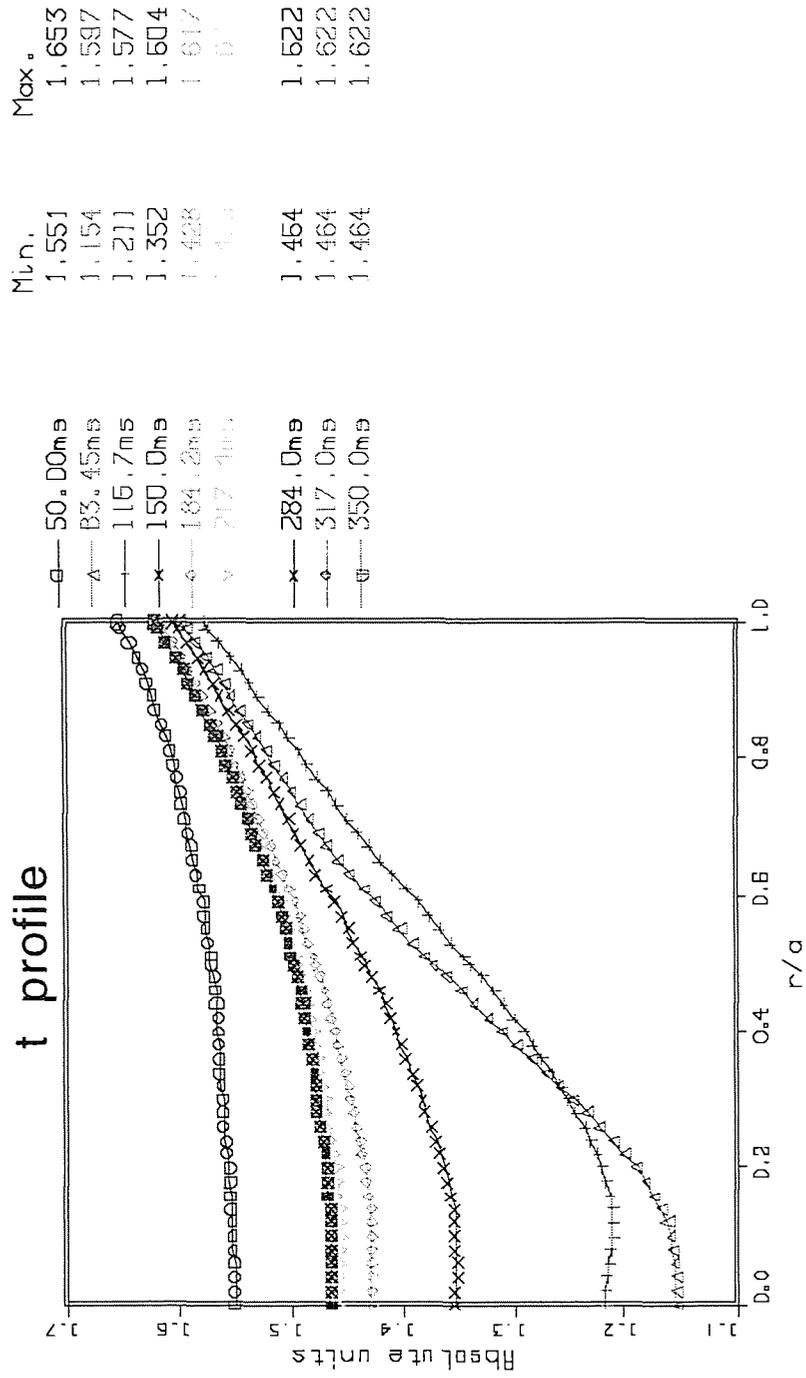


Fig.5.5

