

JAERI - M

86-143

カーボンブロック設置によるICRF
加熱時の金属不純物抑制

1986年10月

玉井 広史・小川 宏明・小川 俊英
松本 宏・小田島 和男

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

カーボンブロック設置による ICRF 加熱時の金属不純物抑制

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

玉井 広史・小川 宏明・小川 俊英

松本 宏・小田島和男

(1986年9月19日受理)

JFT-2Mトカマクにおいて、ICRF加熱時の不純物による輻射損失増大を抑えるためにアンテナ周囲をカーボンブロックで覆い低Z化を図ったところ、期待通りに輻射損失の低減を行うことができた。これは、特にアンテナ近傍からの鉄・チタン等の金属不純物発生が抑えられたためであり、ICRF加熱時にアンテナ近傍電場が金属不純物発生に主要な役割を果たしているという、不純物発生機構の理論的予測を強く裏付ける実験結果となっている。

Suppression of the Metal Impurity Release during ICRF Heating
by the Installation of Carbon Block

Hiroshi TAMAI, Hiroaki OGAWA, Toshihide OGAWA,
Hiroshi MATSUMOTO and Kazuo ODAJIMA

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 19, 1986)

The radiation loss during ICRF heating is reduced by the installation of carbon block around the antenna in JFT-2M Tokamak.

The reduction is resulted from the suppression of metal impurity release such as titanium and iron especially around the ICRF antenna.

This result intensively supports the theoretical prediction that the electric field near the antenna plays the dominant role to induce the metal impurity release during ICRF heating.

Keywords: JFT-2M Tokamak, ICRF Heating, Metal Impurity, Radiation Loss,
Carbon Installation, Mechanism of the Impurity Release,
Electric Field Near the Antenna

目 次

1. はじめに	1
2. カーボンブロック設置前の輻射損失のまとめ	1
2.1 位相調整による輻射損失抑制	1
2.2 金属不純物発生量と波数スペクトルとの相関	2
2.3 金属不純物発生機構についての理論的予測	3
3. カーボンブロック設置後の ICRF 加熱時の輻射損失の低減	4
4. まとめ	5
謝 辞	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Brief review of radiation loss before the installation of carbon block	1
2.1 Reduction of radiation loss by the phase control	1
2.2 Correlation between the metal impurity release and the wave spectrum	2
2.3 Theoretical prediction with the mechanism of metal impurity release	3
3. Reduction of radiation loss after the installation of carbon block	4
4. Summary	5
Acknowledgement	5
References	6

1. はじめに

イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱時の入力パワー増加に伴うプラズマ中への不純物混入は、輻射損失の増大を伴ってプラズマの閉じ込め特性を悪化させ、しばしばプラズマディスプレイを引き起こしている。このことは、ICRF 加熱入力増加を阻む要因の一つになっている。従って、プラズマ中への不純物の混入を抑制することは、より高入力の ICRF 加熱を達成して行く上で重要である。

JFT-2M トカマクにおいて、ICRF 加熱時の入力パワー増加に伴う不純物による輻射損失量増加を ICRF アンテナ系の位相を調整することによって低減し、最大 1.6 MW の加熱入力¹⁾が達成されている。また、この不純物放射量の内、特に鉄及びチタン等の金属不純物がアンテナ系から励起される波の波数スペクトルの $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波数強度に強い相関を示すことが観測されている²⁾。

そこで、加熱時の金属不純物の発生場所を明らかにし、それらの発生をより低減させる目的で、アンテナ周囲及びアンテナ間壁面をカーボンブロックで覆った。カーボンブロック設置による効果を調べるために ICRF 加熱時の輻射損失量の比較や、この時の位相調整と輻射損失量の相関、及び最大加熱入力の比較を行った。

本報告は、不純物発生に関する問題点を洗い出しカーボンブロック設置に至る経緯を明らかにする必要性から、先ずカーボンブロック設置前の位相調整による輻射損失の低減、及びその機構の可能性についてまとめる。次にカーボンブロック設置後の輻射損失の変化について述べ、設置の効果について検討し、これらの結果から加熱時の不純物発生機構について考察する。

2. カーボンブロック設置前の輻射損失のまとめ

2.1 位相調整による輻射損失抑制

ICRF 波 (15.2 - 15.4 MHz) は、JFT-2M トカマクのトーラス内側壁面に設置された三本のループアンテナによってプラズマに加えられる。この三本のアンテナの位相をほぼ揃えた場合 (以後、同相と称する) と、真中のアンテナの位相を約 180 度ずらした場合 (以後、逆相と称する) の二つの励振条件の下で ICRF パワーをプラズマに加え、この時の輻射損失量、及び不純物スペクトルの発光強度を比較した。代表的な不純物スペクトルとして炭素、酸素、チタン、及び鉄を選んだ。炭素はリミッター材であり、チタンは ICRF アンテナのフェラディシールドに用いられている他、チタンゲッターにも用いられている。鉄は真空容器の壁材であるステンレス中に含まれ、又、酸素は容器内の各構造物の表面に多岐に渡って付着していると考えられる。

(図 1) に輻射損失量の加熱時の増加量を ICRF 入力パワーに対してプロットした。同相の時、

1. はじめに

イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱時の入力パワー増加に伴うプラズマ中への不純物混入は、輻射損失の増大を伴ってプラズマの閉じ込め特性を悪化させ、しばしばプラズマディスプレイを引き起こしている。このことは、ICRF 加熱入力¹⁾の増加を阻む要因の一つになっている。従って、プラズマ中への不純物の混入を抑制することは、より高入力の ICRF 加熱を達成して行く上で重要である。

JFT-2M トカマクにおいて、ICRF 加熱時の入力パワー増加に伴う不純物による輻射損失量増加を ICRF アンテナ系の位相を調整することによって低減し、最大 1.6 MW の加熱入力¹⁾が達成されている。また、この不純物放射量の内、特に鉄及びチタン等の金属不純物がアンテナ系から励起される波の波数スペクトルの $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波数強度に強い相関を示すことが観測されている²⁾。

そこで、加熱時の金属不純物の発生場所を明らかにし、それらの発生をより低減させる目的で、アンテナ周囲及びアンテナ間壁面をカーボンブロックで覆った。カーボンブロック設置による効果を調べるために ICRF 加熱時の輻射損失量の比較や、この時の位相調整と輻射損失量の相関、及び最大加熱入力の比較を行った。

本報告は、不純物発生に関する問題点を洗い出しカーボンブロック設置に至る経緯を明らかにする必要性から、先ずカーボンブロック設置前の位相調整による輻射損失の低減、及びその機構の可能性についてまとめる。次にカーボンブロック設置後の輻射損失の変化について述べ、設置の効果について検討し、これらの結果から加熱時の不純物発生機構について考察する。

2. カーボンブロック設置前の輻射損失のまとめ

2.1 位相調整による輻射損失抑制

ICRF 波 (15.2 - 15.4 MHz) は、JFT-2M トカマクのトーラス内側壁面に設置された三本のループアンテナによってプラズマに加えられる。この三本のアンテナの位相をほぼ揃えた場合 (以後、同相と称する) と、真中のアンテナの位相を約 180 度ずらした場合 (以後、逆相と称する) の二つの励振条件の下で ICRF パワーをプラズマに加え、この時の輻射損失量、及び不純物スペクトルの発光強度を比較した。代表的な不純物スペクトルとして炭素、酸素、チタン、及び鉄を選んだ。炭素はリミッター材であり、チタンは ICRF アンテナのフェラディシールドに用いられている他、チタンゲッターにも用いられている。鉄は真空容器の壁材であるステンレス中に含まれ、又、酸素は容器内の各構造物の表面に多岐に渡って付着していると考えられる。

(図 1) に輻射損失量の加熱時の増加量を ICRF 入力パワーに対してプロットした。同相の時、

輻射損失の増加する割合はかなり大きく、プラズマがMHDによるディスラプションを起こしてしまう為、400 kW以上のICRFパワーを加えることはできなかった。これに対し、逆相では輻射損失の増加する割合が同相時の約半分に抑えられ、ICRFパワーも約1.6 MWを入力することができた。パワーの上限はICRF伝送系での絶縁破壊等の回路的原因で決定されているので、これらの絶縁耐圧を改善することにより更にパワーアップが可能であることが予想され、実際に条件を整えることにより最大2.4 MWのプラズマへの入力達成されている。

(図2)には不純物発光スペクトル強度の加熱時の増加量を、ICRF入力パワーに対してプロットした。この不純物発光スペクトル強度は、近似的に不純物の流入量と見なせる³⁾。チタン・鉄の金属不純物は輻射損失量と同様に逆相時に同相時より明らかに減少しているが、炭素・酸素の軽元素不純物では、はっきりとした差が出ていない。これより、逆相によるプラズマへのICRF入力には、金属不純物発生を低減させる何らかの働きがあることが示唆される。

2.2 金属不純物発生量と波数スペクトルとの相関

位相調整による金属不純物発生低減の原因を検討する為に、アンテナから放射されるICRF波の波数スペクトルの比較を同一放射パワーの同相と逆相について行った。波数スペクトルは、二次元アンテナ電流と一次元プラズマモデルにおいて計算した⁴⁾。結果を(図3)に示す。この図で、同相と逆相との顕著な差は $k_{\parallel} = 0$ 近傍の強度の違いであり、ICRF加熱時の輻射損失増加量の大きい同相の方が $k_{\parallel} = 0$ 近傍の強度も大きくなっている。そこで本実験結果について、この $k_{\parallel} = 0$ 近傍の強度と不純物及び輻射損失量との相関を調べてみた。実際の実験ではアンテナの位相が必ずしもぴったり同相あるいは逆相とはならず、ICRFパワーやプラズマとの結合低抗によって変化しており、 $k_{\parallel} = 0$ 近傍の強度は、(式1)に示すように、各アンテナからの寄与を線型的にたし合わせることで求めた。

$$P_0(k_{\parallel} = 0) = (1/T) \int |\sum I_i \exp[j(\omega t + \phi_i)]|^2 dt. \quad (式1)$$

但し、 I_i : i 番目のアンテナに流れる高周波電流の絶対値、 ϕ_i : i 番目のアンテナの位相。

これから求めた P_0 で、 $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波数強度を代表させた。(図1)の輻射損失量の各実測値について P_0 を計算し、これを横軸に取り輻射損失量の増分を縦軸に取った結果を(図4)に示す。これによると、輻射損失の増加量 ΔP_{rad} は同相・逆相の別に関係なく、アンテナから放射される $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波数強度に比例している。従って、(図1)に見られる同相と逆相との ΔP_{rad} の差は P_0 の強度の差によると考えられる。

P_0 に対するプロットを不純物の発光スペクトルについても行った結果を(図5)に示す。チタン・鉄の金属不純物の増加量が、同相・逆相に関わらず P_0 と比例関係にあり、これは輻射損失の増加量と同じ傾向を示す。これに対し、炭素・酸素の軽元素の増加量は同相と逆相とで異なり、 P_0 に一義には比例していない。

以上の結果により、位相調整による不純物の低減について定性的に次のような因果関係を見出せる。

① 逆相により、 $k_{\parallel} = 0$ 近傍の成分が減少。



② 金属不純物（鉄・チタン等）量の減少。



③ 輻射損失量の増加割合の減少。

2.3 金属不純物発生機構についての理論的予測

ICRF加熱時の不純物発生機構について予測されている可能性は、

- (1) 同軸モードの伝播によるプラズマ・表面相互作用による不純物発生⁵⁾、
- (2) アンテナ近傍電場を通じたイオンのスパッタリングによる不純物発生⁶⁾、

がある。(1)はプラズマを芯線、真空容器を外皮とする同軸構造の中を $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波が伝播して行く時に、この波を介したプラズマ・表面相互作用によって不純物が発生するというモデルであるが、どのような機構で不純物の放出が助長されるのかは明らかにされていない。

(2)はICRF加熱時の金属不純物発生を説明するために考えられたモデルで、アンテナ近傍の誘導電場で加速されたイオンによるスパッタリングで不純物が発生するというものである。この理論では、JFT-2Mトカマクのアンテナでは40 kW以上のICRFパワーがあれば、スパッタリングを起こすに十分なエネルギーを持ったイオンの加速が行われると評価している⁶⁾。

この近傍電場は三本のアンテナそれぞれから独自に誘起されるので、それからの寄与を総合したものが実質的にイオン加速に効くと考えられる。そこで(図1)の $P_{\text{net}} \sim 400$ kWでの実測された高周波電流値と位相を用いて、三本のアンテナからの寄与を重ね合わせて計算した近傍電場強度を(図6)に示す。横軸はトロイダル方向の位置、縦軸は真空容器壁面での電場強度をそれぞれ示し、実線が逆相、破線が同相である。図より、電場強度は逆相では隣り合うアンテナ同士の位相差によって相殺され減少しているのに対し、同相では和になって増大していることがわかる。

この近傍電場強度と前節で議論した $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波数強度との関係について考える。位置の異なる三本のアンテナそれぞれからの寄与をアンテナ近傍の任意の場所で見ただけの場合、波数 k_{\parallel} の比較的大きい成分は互いに相殺され k_{\parallel} の小さい成分のみが残るので、近傍電場の大きさは、 $k_{\parallel} = 0$ 近傍の波数強度にほぼ比例すると考えられる。従って、輻射損失および金属不純物量は、近傍電場強度に比例していると言えることができる。

そこで、ICRF加熱時に金属不純物の増大をもたらしている領域が、アンテナ近傍に局在しているかどうかを調べることによって、誘導電場によるイオン加速という不純物放出機構の可能性を検証でき、更に積極的に金属不純物放出の抑制が行えると考え、アンテナ近傍をカーボンで覆い、低Z化を図ることにした。

3. カーボンブロック設置後のICRF加熱時の輻射損失の低減

グロー放電やスパッター等を用いた真空容器内壁面のカーボン化、及びアンテナ側面へのカーボンタイル設置による低Z化はJET, TEXTOR, AXDEX等で行われている。また、JFT-2Mトカマクにおいては、初期の頃から固定リミッターをカーボン化しており、金属不純物放射量及び輻射損失の低減等でその効果が確認されている。今回は、2章で述べたようにICRF加熱時の不純物の発生場所並びに発生機構を明らかにし、その発生を抑制する必要性から、アンテナ近傍にカーボンブロックを設置した。

(図7)に示すように、三本のアンテナの側面及びアンテナ間の真空容器壁面をカーボンブロックで覆った。使用したカーボンブロックの材質は(株)東洋カーボン製高純度処理品AX-650K(不純物含有量20 ppm以下)である。その際、高周波の表皮効果を考慮して、アンテナ側面用のブロックにはファラデーシールドと互い違いになったスリットを設け、ICRF波が効率良く透過するようにした。また、プラズマによる熱負荷を少なくするために、カーボンブロック自体がリミッターとならないよう、突起部の壁面よりの高さは最大60 mmとし、内側固定リミッター高の65 mmを越えないようにした。

(図8)に、ICRFパワーを逆相でプラズマに加えた場合の入射パワーに対する輻射損失の増加量を、カーボンブロック設置前(△)と設置後(●)のそれぞれについて示した。カーボンブロックを設置したことによって輻射損失は明らかに減少しており、同一パワーでは設置前のほぼ1/2となっている。このことから、カーボンブロック設置はICRF加熱時の輻射損失の減少にも大きな効果があることが確認される。

(図9)にはカーボンブロック設置後における各位相での輻射損失の比較を示す。(図1)のカーボンブロック設置前の輻射損失と比べて顕著なことは、同相(○)と逆相(●)で輻射損失の差が甚だ小さいということと、同相においてもICRF入射パワーの増加が可能となり、逆相と同様ほぼ2MWまで達成できたことである。このとき、ジュール加熱時のベースを加えた全輻射損失量は、どちらの位相の場合においても全入射パワーの約30%に減少した。

チタン・鉄の金属不純物の混入量を、同相と逆相について比較した結果を(図10)に示す。チタン・鉄不純物とも位相による明確な違いは見られない。この結果はカーボンブロック設置前の結果と大きく異なる。これは、2章で考察した不純物発生の定性的因果関係からも予測された通り、金属不純物発生の低減により輻射損失の減少が得られたことを示している。カーボンブロック設置前後では、アンテナ周囲にカーボンブロックを張り巡らした以外は実験条件は変わっていないので、特にアンテナ周囲からの金属不純物発生が抑えられたためであると考えられる。

また、輻射損失及び金属不純物放射の何れも位相調整による差がないということは、生ずる近傍電場はカーボンブロック設置前と同様、同相と逆相とで大きな違いがあるものの、カーボンブロック設置で発生源を抑え込んだことにより金属不純物発生が減少したためと考えられる。アンテナ近傍は、JFT-2M全体の表面積から見ればごく狭い領域であるが、これをカーボンで覆うことにより輻射損失を約半分まで減らすことができたという劇的効果により、ICRF加熱によ

て増加する不純物の大部分がアンテナ近傍から発生しているということが示唆される。この実験結果は、理論的に予測された近傍電場加速による金属不純物発生というメカニズムを強く裏付けている。

4. ま と め

アンテナ近傍壁面のみをカーボンブロックで覆うことによって、ICRF加熱時の輻射損失の低減を行うことができた。その時の輻射損失の増大は、アンテナの位相にあまり依存しない。このことは、ICRF加熱時の輻射損失の増大は、アンテナ近傍の鉄・チタンの混入によることを示している。そして、ICRF加熱時の輻射損失を抑制するためにはアンテナの位相調整と同様、アンテナ近傍のみをカーボンで覆うことが有効であることを示している。また、この結果は、アンテナ近傍電場で加速されたイオンによるスパッタリングがICRF加熱時の主要な不純物発生機構である、とする理論的予測を実験的に強く裏付けている。

謝 辞

本実験遂行にあたって終始御協力を頂き、また実験結果について有益な議論を展開して頂いたプラズマ実験研究室の皆様へ感謝致します。

JFT-2Mの運転等に関し御尽力を戴いた装置技術管理室の皆様へ感謝致します。

アンテナから放射されるICRF波の波数スペクトルの計算コードを提供して頂き、その結果について議論をして頂いた木村晴行研究員へ感謝致します。

アンテナ近傍電場に関して有益な議論を提供して戴いた、伊藤公孝博士（現京都大学ヘリオトロセンタール助教授）へ感謝致します。

また、本研究に対し常に御鞭達を賜りました、核融合研究部田中正俊部長、同プラズマ実験研究室田中裕二前室長（現核融合計画室室長）、同プラズマ実験研究室船橋昭昌室長、森茂理事に謝意を表す次第であります。

て増加する不純物の大部分がアンテナ近傍から発生しているということが示唆される。この実験結果は、理論的に予測された近傍電場加速による金属不純物発生というメカニズムを強く裏付けている。

4. ま と め

アンテナ近傍壁面のみをカーボンブロックで覆うことによって、ICRF加熱時の輻射損失の低減を行うことができた。その時の輻射損失の増大は、アンテナの位相にあまり依存しない。このことは、ICRF加熱時の輻射損失の増大は、アンテナ近傍の鉄・チタンの混入によることを示している。そして、ICRF加熱時の輻射損失を抑制するためにはアンテナの位相調整と同様、アンテナ近傍のみをカーボンで覆うことが有効であることを示している。また、この結果は、アンテナ近傍電場で加速されたイオンによるスパッタリングがICRF加熱時の主要な不純物発生機構である、とする理論的予測を実験的に強く裏付けている。

謝 辞

本実験遂行にあたって終始御協力を頂き、また実験結果について有益な議論を展開して頂いたプラズマ実験研究室の皆様に感謝致します。

JFT-2Mの運転等に関し御尽力を戴いた装置技術管理室の皆様に感謝致します。

アンテナから放射されるICRF波の波数スペクトルの計算コードを提供して頂き、その結果について議論をして頂いた木村晴行研究員に感謝致します。

アンテナ近傍電場に関して有益な議論を提供して戴いた、伊藤公孝博士（現京都大学ヘリオトロセンター助教授）に感謝致します。

また、本研究に対し常に御鞭達を賜りました、核融合研究部田中正俊部長、同プラズマ実験研究室田中裕二前室長（現核融合計画室室長）、同プラズマ実験研究室船橋昭昌室長、森茂理事に謝意を表する次第であります。

て増加する不純物の大部分がアンテナ近傍から発生しているということが示唆される。この実験結果は、理論的に予測された近傍電場加速による金属不純物発生というメカニズムを強く裏付けている。

4. ま と め

アンテナ近傍壁面のみをカーボンブロックで覆うことによって、ICRF加熱時の輻射損失の低減を行うことができた。その時の輻射損失の増大は、アンテナの位相にあまり依存しない。このことは、ICRF加熱時の輻射損失の増大は、アンテナ近傍の鉄・チタンの混入によることを示している。そして、ICRF加熱時の輻射損失を抑制するためにはアンテナの位相調整と同様、アンテナ近傍のみをカーボンで覆うことが有効であることを示している。また、この結果は、アンテナ近傍電場で加速されたイオンによるスパッタリングがICRF加熱時の主要な不純物発生機構である、とする理論的予測を実験的に強く裏付けている。

謝 辞

本実験遂行にあたって終始御協力を頂き、また実験結果について有益な議論を展開して頂いたプラズマ実験研究室の皆様へ感謝致します。

JFT-2Mの運転等に関し御尽力を戴いた装置技術管理室の皆様へ感謝致します。

アンテナから放射されるICRF波の波数スペクトルの計算コードを提供して頂き、その結果について議論をして頂いた木村晴行研究員へ感謝致します。

アンテナ近傍電場に関して有益な議論を提供して戴いた、伊藤公孝博士（現京都大学ヘリオトロフセンター助教授）へ感謝致します。

また、本研究に対し常に御鞭達を賜りました、核融合研究部田中正俊部長、同プラズマ実験研究室田中裕二前室長（現核融合計画室室長）、同プラズマ実験研究室船橋昭昌室長、森茂理事に謝意を表す次第であります。

References

- 1) M. Mori et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1984 (Proc. 10th Int. Conf. London, 1984), Vol.1, IAEA, Vienna (1985) 445.
- 2) H. Tamai et al., Nuclear Fusion 26 (1986) 365.
- 3) H. Ogawa et al., Journal of Nucl. Mater. 128/129 (1984) 298.
- 4) H. Kimura et al., in Heating in Toroidal Plasmas (Proc. 4th Int. Symp. Rome, 1984), Vol.2 (1984) 1128.
- 5) R.R. Waynants, *ibid.* Vol.1, p.211.
- 6) K. Itoh et al., Hiroshima Univ. Research Rep. HIFT-93 (1984)
(submitted to Plasma Physics and Controlled Fusion).

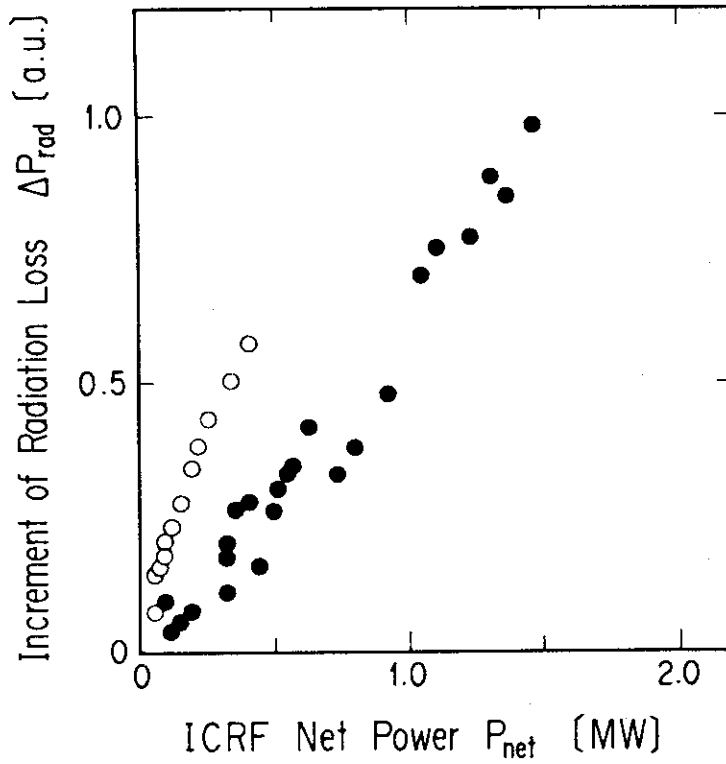


図1 カーボンブロック設置前の ICRF 加熱時の入射パワーに対する輻射損失増加量
アンテナの位相関係は、同相 (○), 逆相 (●) をそれぞれ示している。

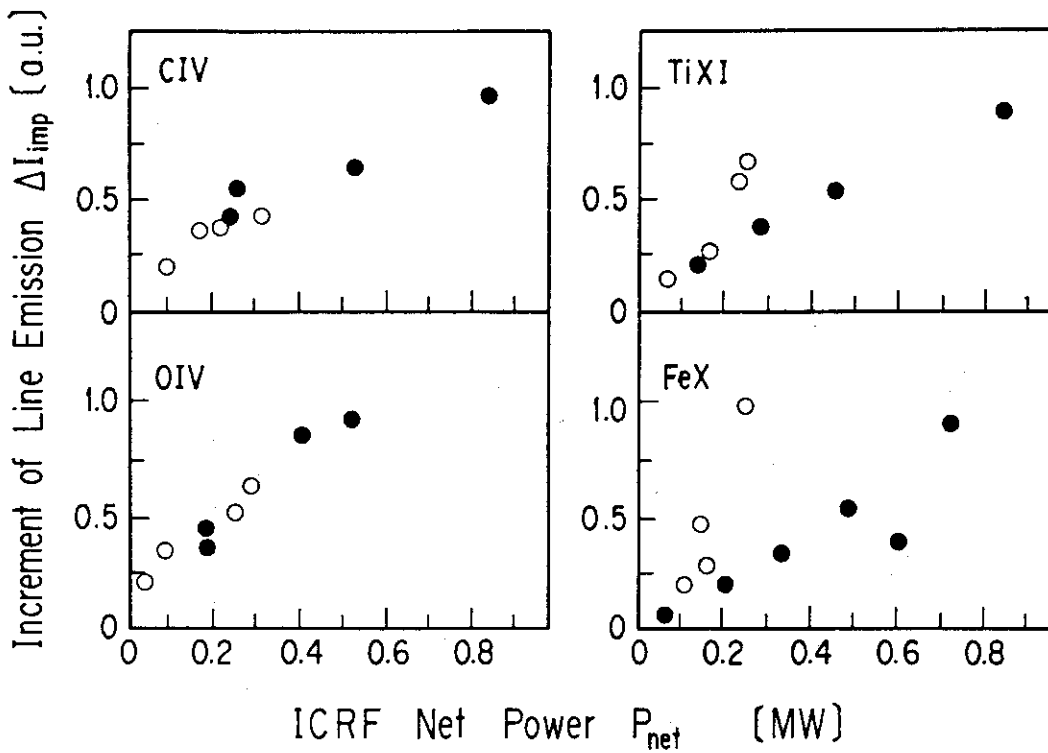


図2 カーボンブロック設置前の ICRF 加熱時の代表的な不純物放射の増加量。
それぞれ同相 (○), 逆相 (●) を示す。

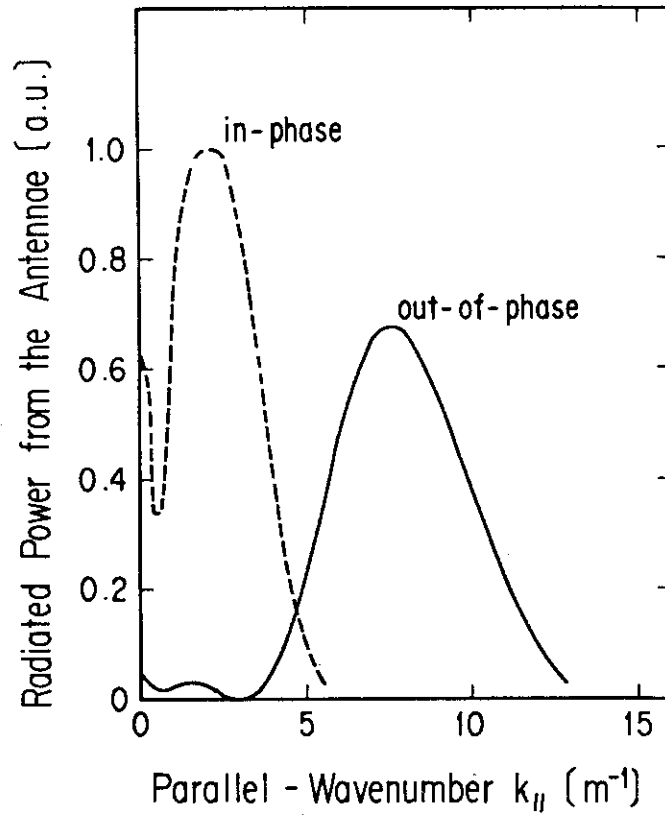


図3 アンテナから放射される ICRF 波の波数スペクトル。
位相関係は、実線が逆相、破線が同相で、同一放射パワーで比較している。

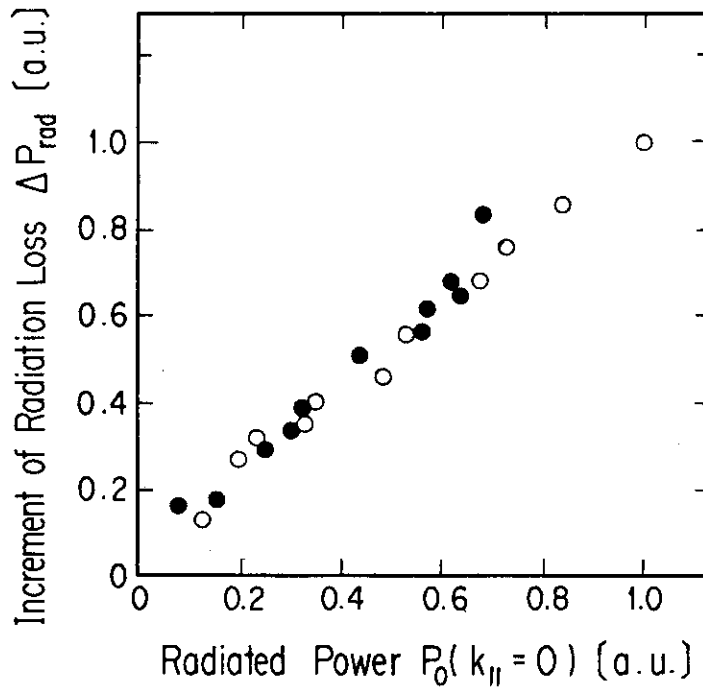


図4 カーボンブロック設置前の ICRF 加熱時における輻射損失増加量と $k_{||} = 0$ 近傍の波数強度との相関。それぞれ同相 (○), 逆相 (●) を示す。

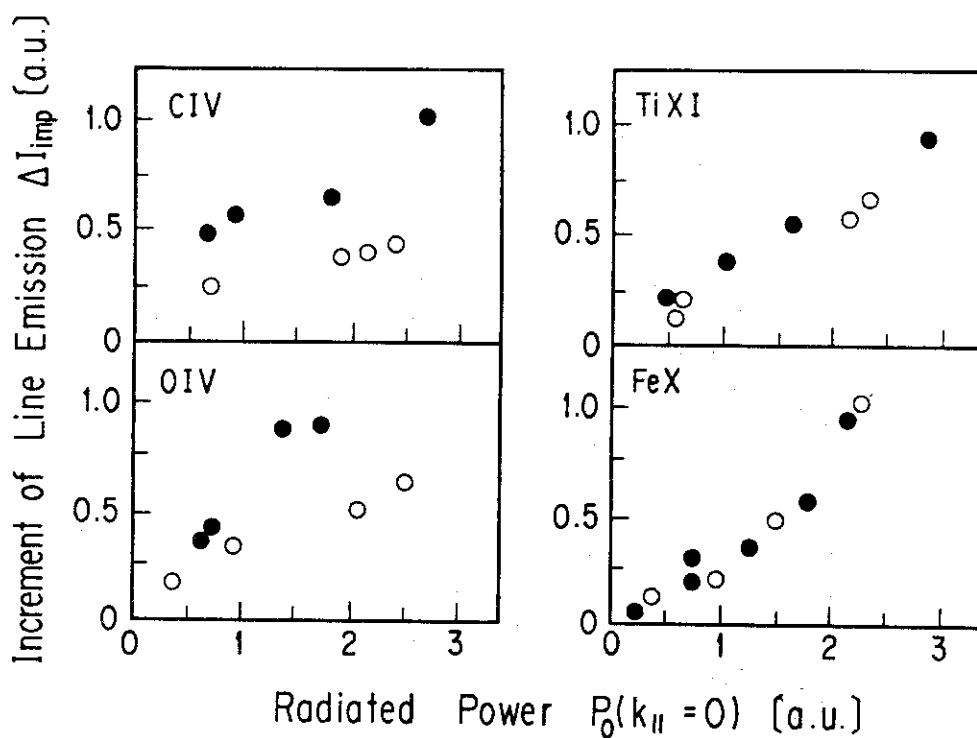


図5 カーボンブロック設置前のICRF加熱時における不純物放射量と $k_{||}=0$ 近傍の波数強度との相関。それぞれ同相(○), 逆相(●)を示す。

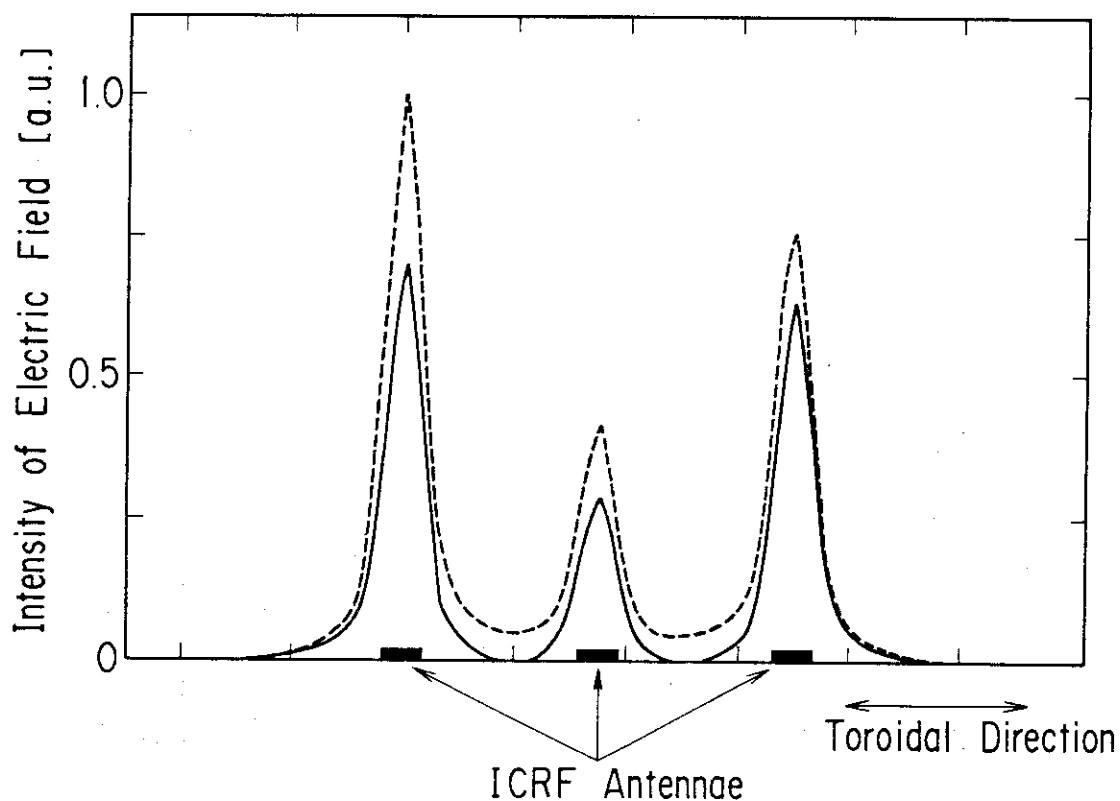


図6 アンテナ近傍電場強度。三本のアンテナからの合計の入射パワーは $P_{net} \sim 400$ kW。実線は逆相, 破線は同相を示す。

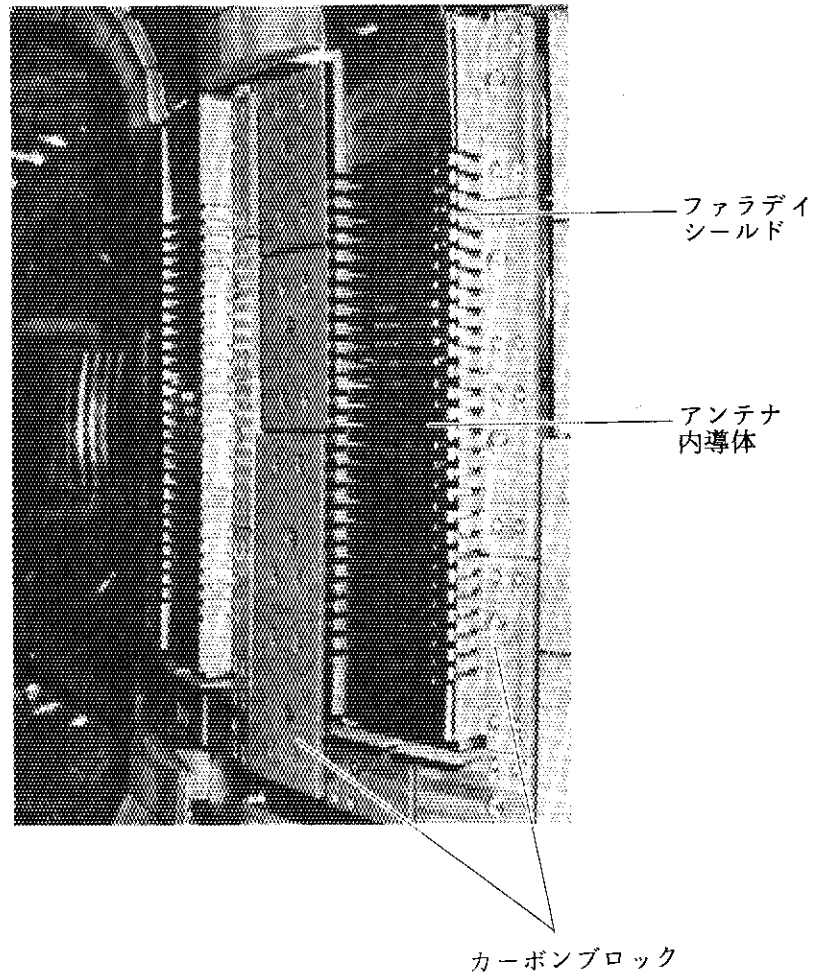
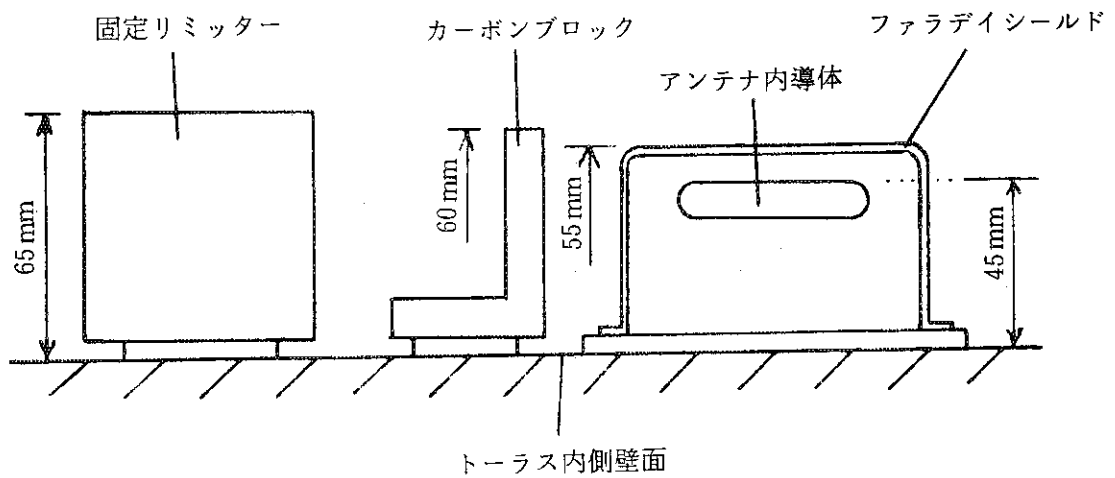


図7 (a) アンテナ周囲へのカーボンブロック設置の様子



(b) 各構造物の真空容器壁面からの高さについての位置関係。

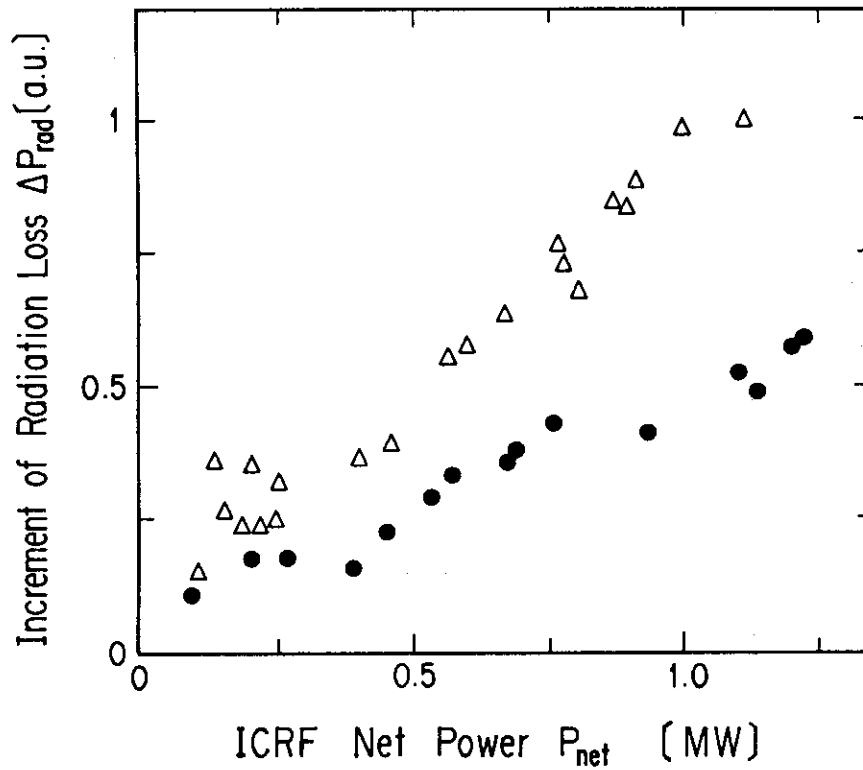


図8 カーボンブロック設置前後のICRF加熱時における輻射損失の比較。アンテナの位相は逆相で加えた。カーボンブロック設置前 (Δ), 設置後 (\bullet) をそれぞれ示す。

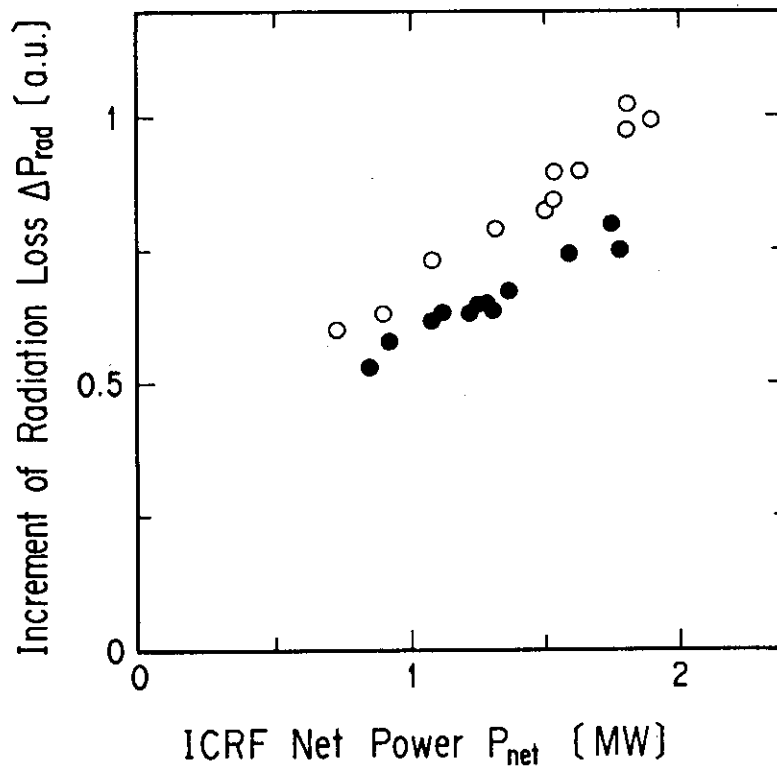


図9 カーボンブロック設置後のICRF加熱時における輻射損失増加量。それぞれ同相 (\circ), 逆相 (\bullet) を示す。

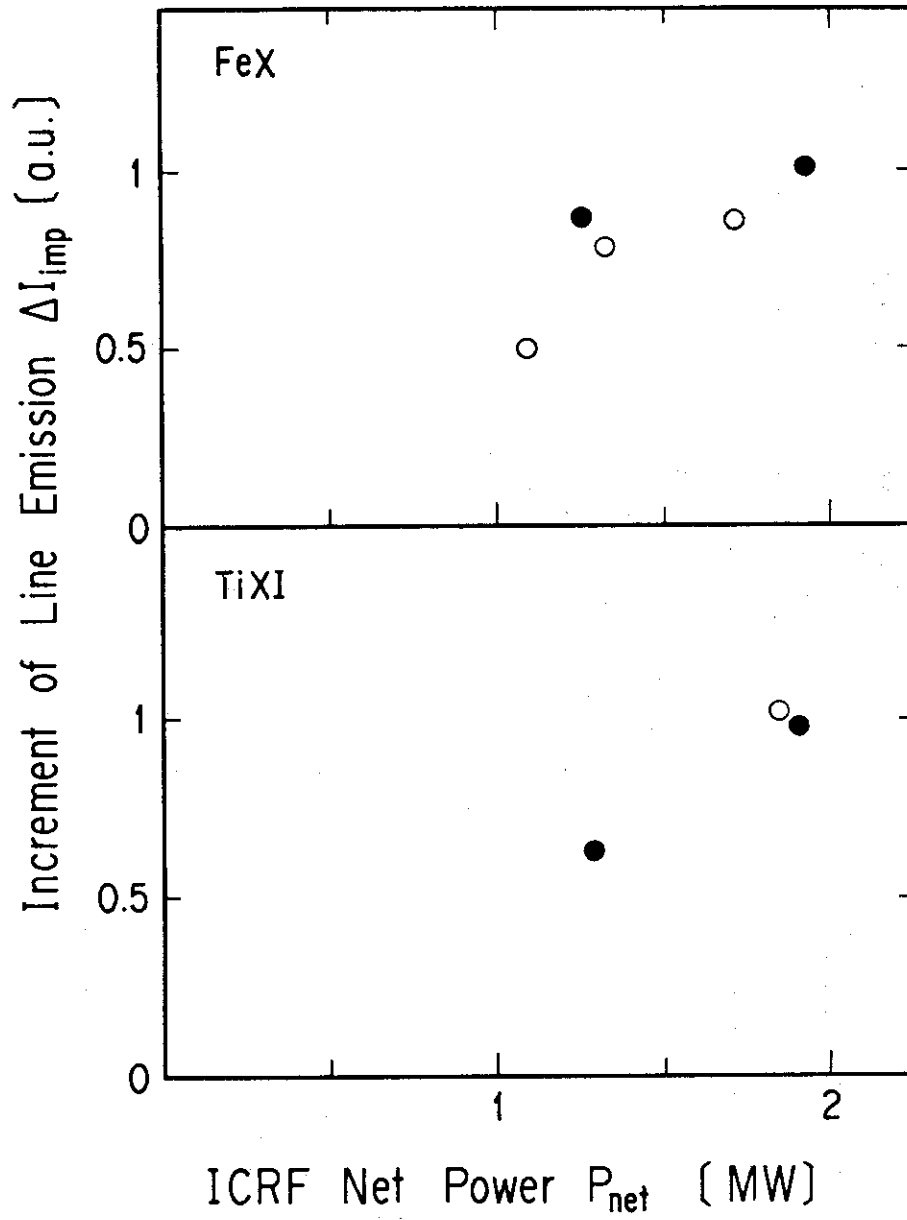


図10 カーボンブロック設置後のICRF加熱時における金属不純物放射増加量。それぞれ同相(○), 逆相(●)を示す。