

プラズマ加熱電流駆動の時代に生きて

渡利徹夫 最終講義

2008年3月17日

核融合科学研究所

研究略歴

1967~1969 :

東京大学大学院原子力工学科、プラズマ物性工学講座

修士課程: 指導教官 一丸節夫

名古屋大学プラズマ研究所

1969~1980(動的制御実験)

TPD-II 装置にて実験: 博士課程: 指導教官 佐藤照幸

1974~1975: TPD-III建設 及び実験

1974~RFC-XX建設及び実験

1977~1992(R計画準備研究:トカマクの大電力加熱、)

イオンバーンスタイン波加熱実験、速波電流駆動実験)

JIPP-TII 実験(1982 Baltimore)

JIPP-TII U 実験 (Kyoto, Washington, Wurzburg)

核融合科学研究所発足

1991~1995 CHS実験(Seville)

1991~2000 LHD R&D (Yokohama)

2000~ LHD 実験(Sorrento)

2005~2008 連携研究推進センター (国際連携研究部門)にて

ゾーナルフローの理論的研究

一丸節夫研究室と(私の物理への影響)

当時の一丸研究室学生:

谷林衛(D2)、中野徹(D1)、山田雅章(M2)、(松下貢;金子研M2)、渡利徹夫(M1)

助手:二瓶仁

応答関数を中心としたプラズマ物理の統計力学的理解

Random Phase Approximation & dressed test particle

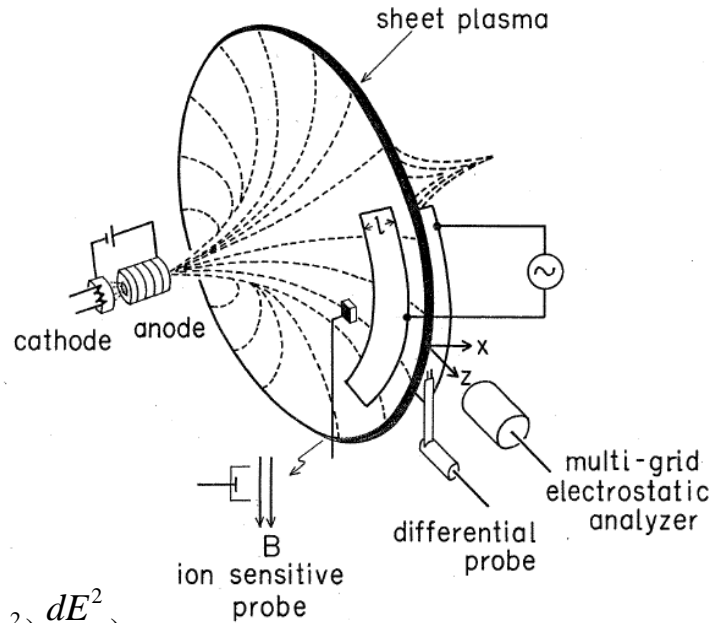
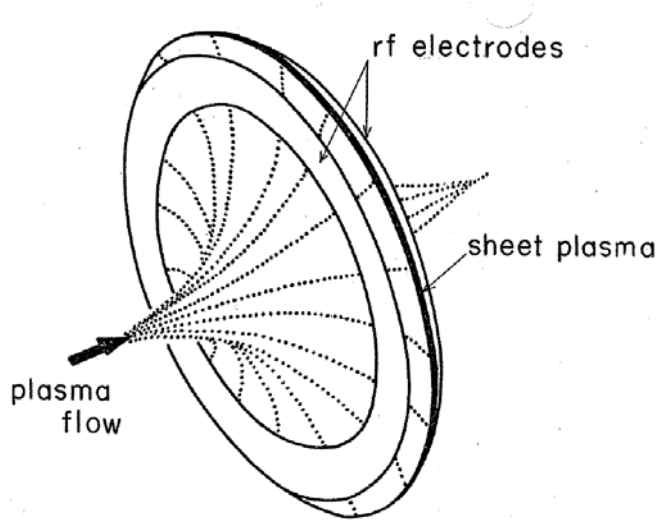
+トポロジカルな思考による簡約化

~「やわらかい物理学」

Key words:

Dynamic Formfactor \Rightarrow *specific heat, fluctuation, stopping power, scattering cross-section, collision term, critical fluctuation*

カスププラズマの端損失軽減に高周波を使う(TPD-II) (ponderomotive force)



$$F_z = \frac{d}{dz} \psi_{pf} = \frac{q^2}{4m} \frac{E^2}{(\omega^2 - \omega_c^2)^2} \left(2\omega_c \frac{d\omega_c}{dz} + \frac{1}{E^2} (\omega^2 - \omega_c^2) \frac{dE^2}{dz} \right)$$

$$\psi_{pf} = \frac{q^2}{4m} \frac{E^2}{(\omega^2 - \omega_c^2)}$$

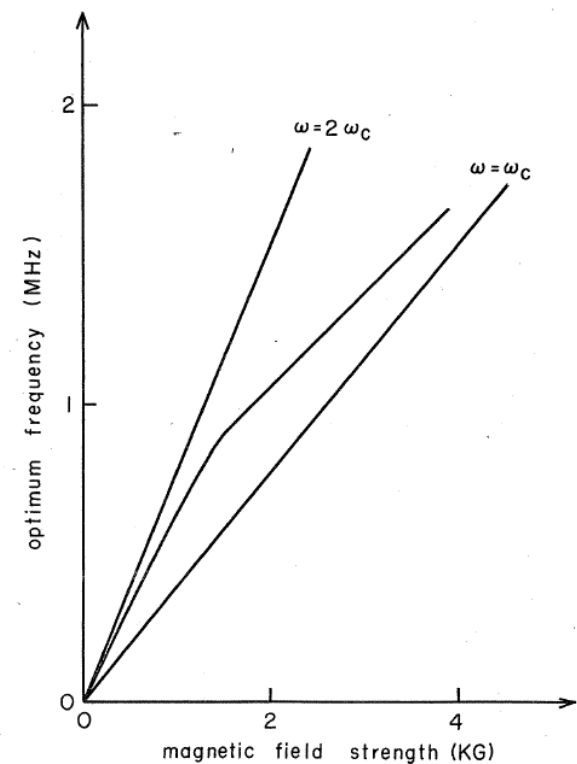
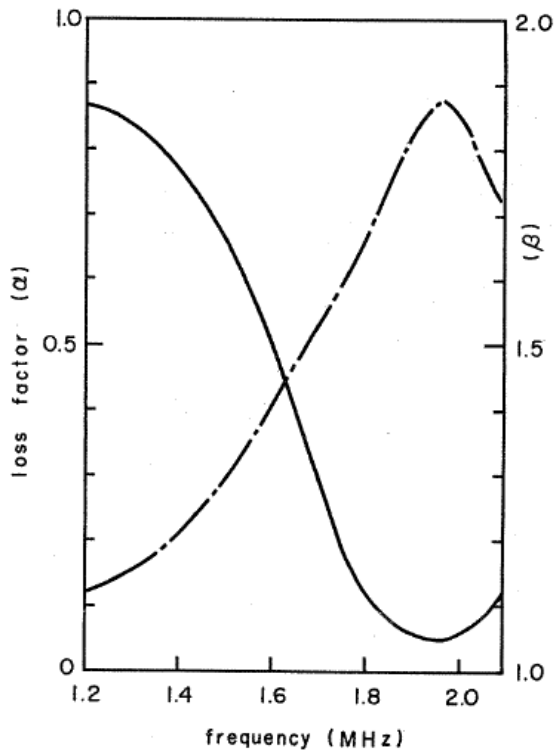
$$F_{pf,B} = -\frac{1}{4} \frac{(eE)^2}{m} \frac{\omega^2 + \omega_c^2}{(\omega^2 - \omega_c^2)^2} \frac{dB_z}{dz}$$

理論面を支えた研究者：
羽鳥尹承、渡辺二太、佐貫平二
大林治夫

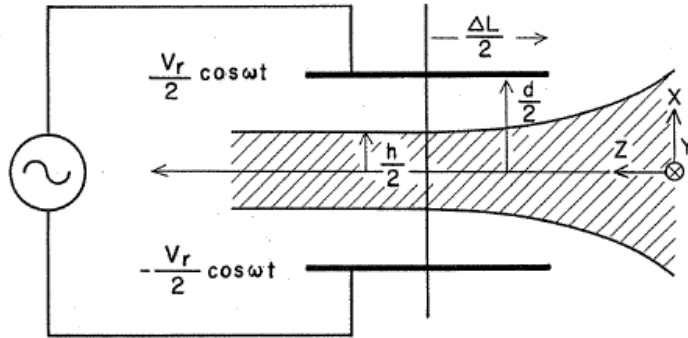
端損失軽減の最適周波数はサイクロトロン周波数ではない (イオンバーンスタイン波との出会い)

最適周波数はイオンサイクロトロン周波数と一致しない。(高い方にズレル)

イオンバーンスタイン波の分散式がこれをよく説明する。



プラズマによる高周波電場の遮蔽効果で説明



逆説を楽しむ： 相互作用が強い
サイクロトロン周波数では
電場がシールドされるので、
ponderomotive force は
小さい。

Dressed test particle

C.F. Balescu – Lenard collision term

$$\frac{\partial f(\vec{v})}{\partial t} \Big|_c = \frac{\pi \omega_p^4}{n} \sum_{\vec{k}} \frac{\vec{k}}{k^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{v}}$$

$$\int d\vec{v}' \frac{\vec{k}}{k^2} \cdot \left[\left(\frac{\partial}{\partial \vec{v}} - \frac{\partial}{\partial \vec{v}'} \right) f(\vec{v}) f(\vec{v}') \right] \frac{\delta(\vec{k} \cdot \vec{v} - \vec{k} \cdot \vec{v}')}{|\varepsilon(\vec{k}, \vec{k} \cdot \vec{v})|^2}$$

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}_{ind} = \frac{\vec{E}_{ext}}{\varepsilon(\vec{k}, \omega)}$$

高周波電場は誘電率 $|\varepsilon(\vec{k}, \omega)| \propto \omega_p^2 \propto n$ によって遮蔽される。

ただし、 $|\varepsilon(\vec{k}, \omega)| = 0$ のときは固有モードの存在により電場が増大する (Ion Bernstein Wave)。

よって、 次の置き換えを行う。

$$\vec{E}_{ext} \Rightarrow \frac{\vec{E}_{ext}}{\varepsilon(\vec{k}, \omega)}$$

TPD-III 装置の実験

(静電的結合から磁氣的結合へ)

TPD-II 低密度 \Rightarrow イオンバーンスタイン波

$$\vec{E}_{total} = -\frac{i\vec{k}}{k^2} \frac{4\pi\rho_{ext}}{\varepsilon(k, \omega)}$$

TPD-III 高密度 \Rightarrow 振れアルフベン波

$$\vec{E}_{total} = \frac{4\pi}{i\omega} \vec{D}^{-1} \cdot \vec{j}_{ext} \quad \vec{D}^{-1} \propto \frac{1}{\det \vec{D}}$$

高密度プラズマでは $\det \vec{D} = 0$ は振れアルフベン波を与える。

TPD-III において試験された各種コイル

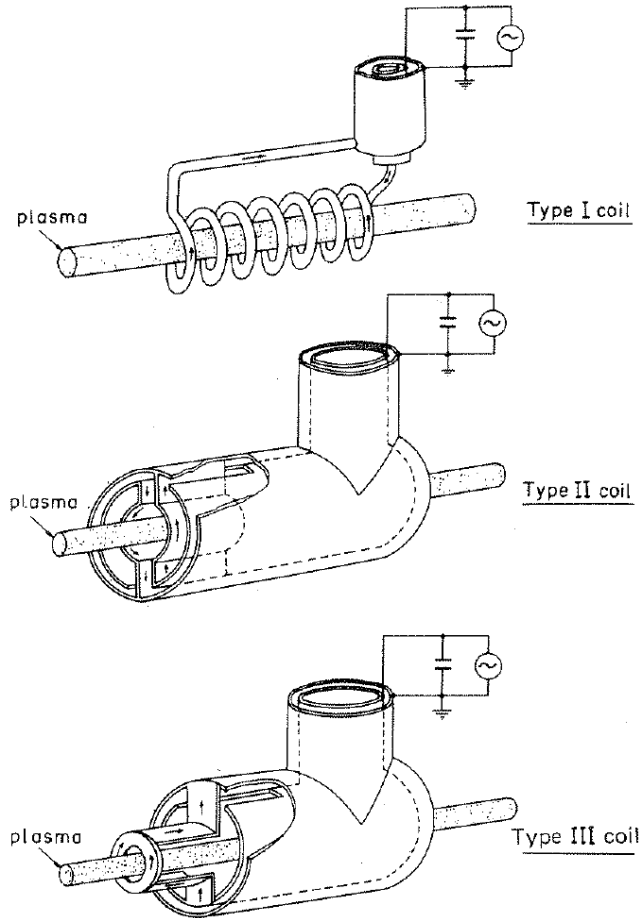
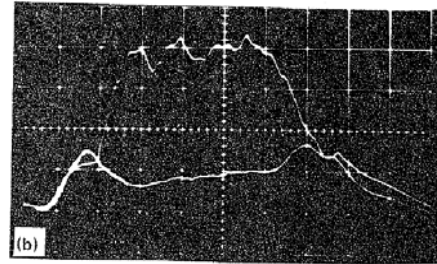
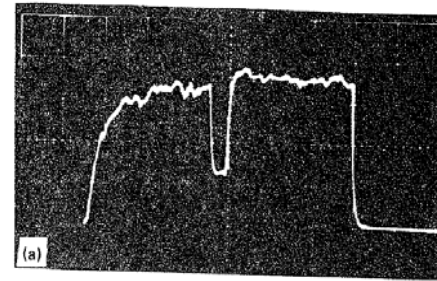


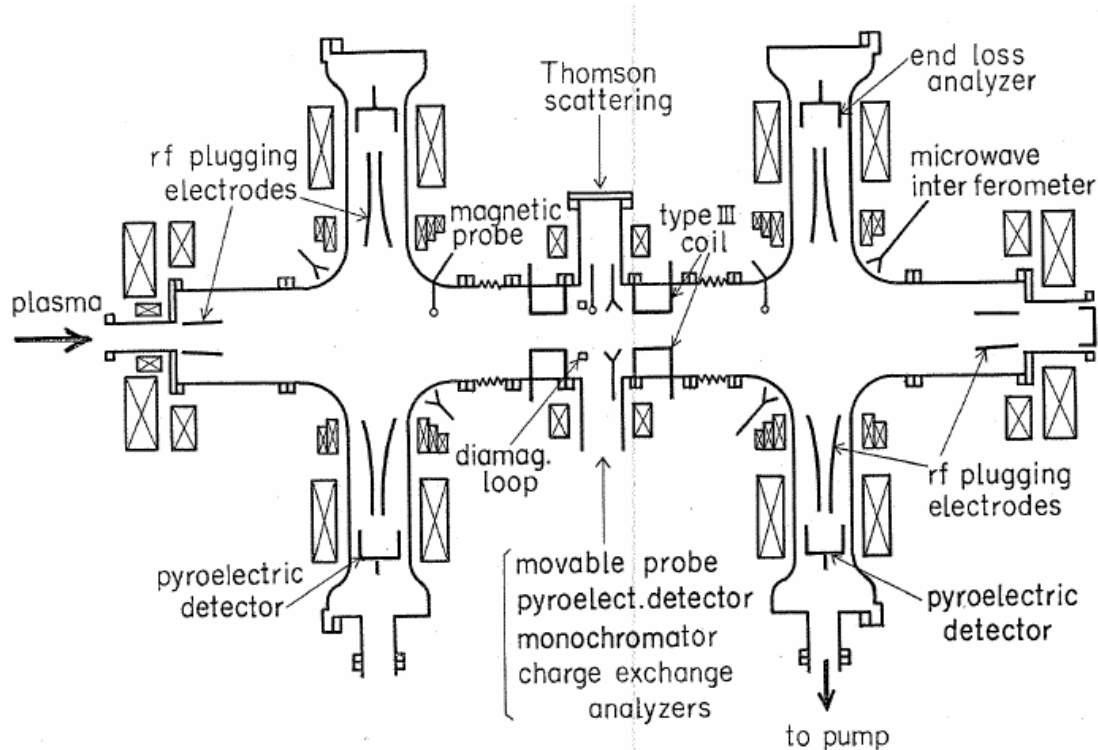
FIG. 3. Schematic diagram of rf coils.



高密度プラズマに対して
良い性能を示したType-IIIコイルは
Nagoya-Type-III coilとして世界的に知られ
各方面に使われた

RFC-XX装置の建設

最初の課題： 大型化したラインカスプ（直径～2m）
電極にuniformな高周波電位を与えること（周波～30MHz）。
Type-III コイル はRFC-XXにおいても発展的に採用された。
セントラルセルを有し加熱の研究も始まった。



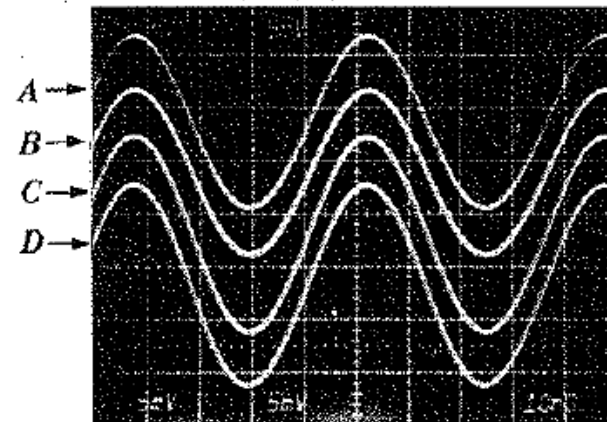
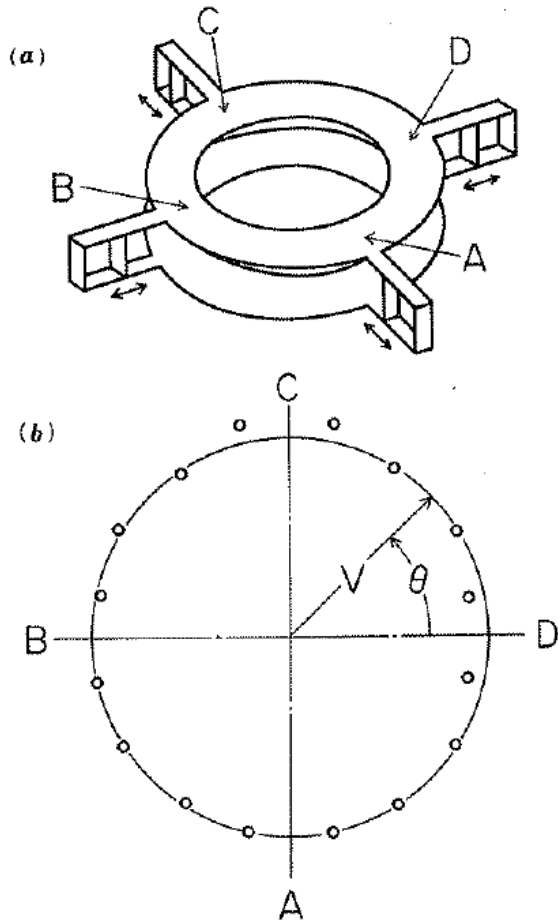
ラインカस्प用大型高周波電極

如何にして均一な電場分布を作り出すか？

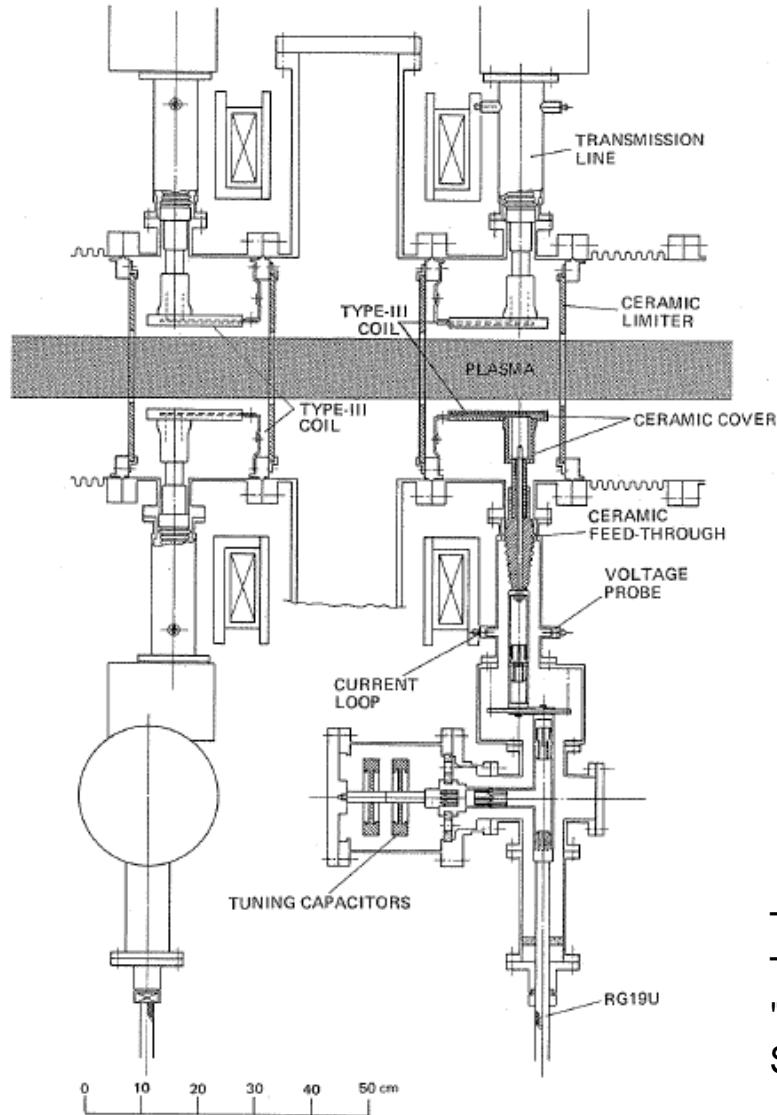
装置サイズの大型化
磁場強度増大

高周波波長は装置サイズに接近

高周波の考え方は集中定数回路から分布定数回路へ



RFC-XX セントラルセル部の加熱

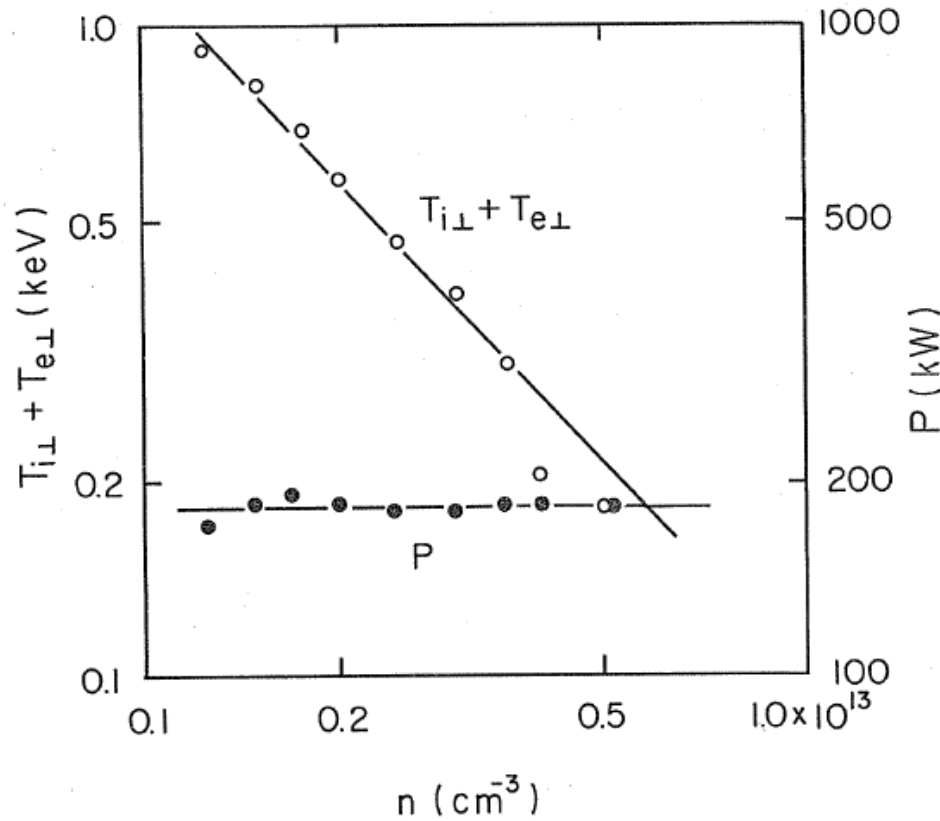


RFC-XXの Type-III コイル
はセラミックカバー付き。

合計8本のアンテナは
「位相制御アンテナ」の考え方を
育てた。

T. Aoki, et al., (proc. Tenth Symp. on Fusion
Technology, Padova, 1978), vol. 1, p-277
"Megawatt Quasi-Steady Wide Band RF
Systems for Cusp End Plugging"

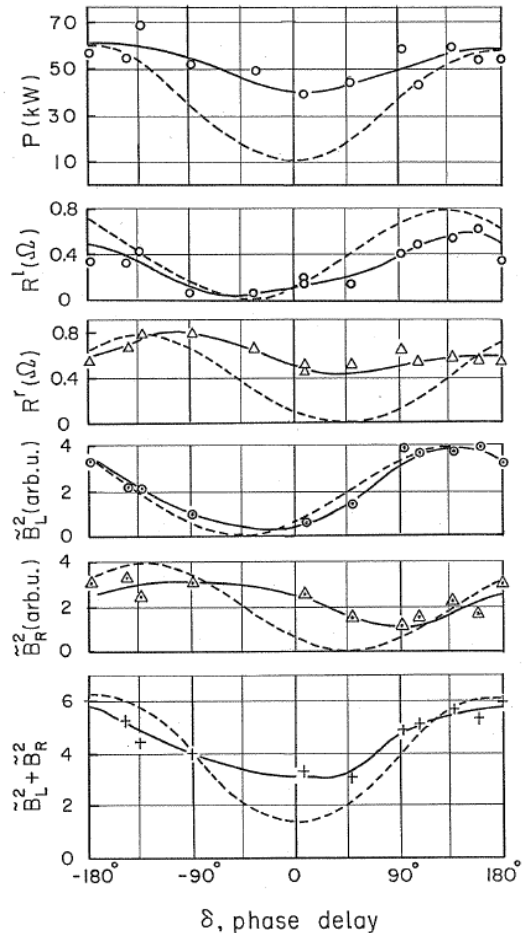
シアアルフベン波加熱の成功



低密度領域では
Shear Alfvén Wave
の加熱特性は良好。

RFC-XXMではミラー部が
設けられ、更に高い温度と
スロッシングイオン分布が
観測された。
(R.kumazawa, et al.,)

軸方向の位相制御



$$\phi_L^l = \phi_0 \exp\{ ik_z(z - d) - i\omega t + i\delta \}$$

$$\phi_L^r = \phi_0 \exp\{ ik_z z - i\omega t \}$$

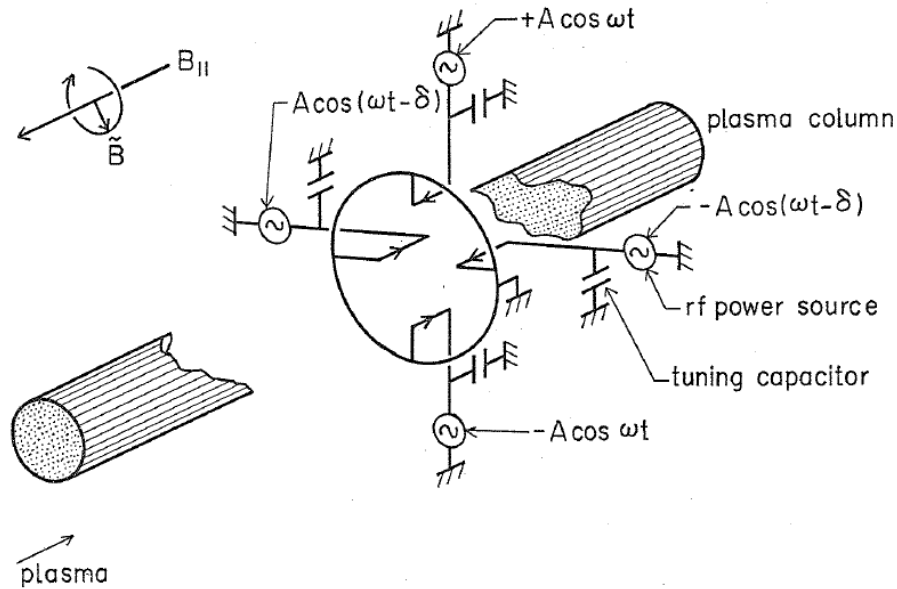
$$\phi_R^l = \phi_0 \exp\{ -ik_z(z - d) - i\omega t + i\delta \}$$

$$\phi_R^r = \phi_0 \exp\{ -ik_z z - i\omega t \}.$$

$$P_L/P_0 = \frac{1}{2} |\phi_L|^2 / |\phi_0|^2 = 1 + \cos(\delta - k_z d),$$

$$P_R/P_0 = \frac{1}{2} |\phi_R|^2 / |\phi_0|^2 = 1 + \cos(\delta + k_z d),$$

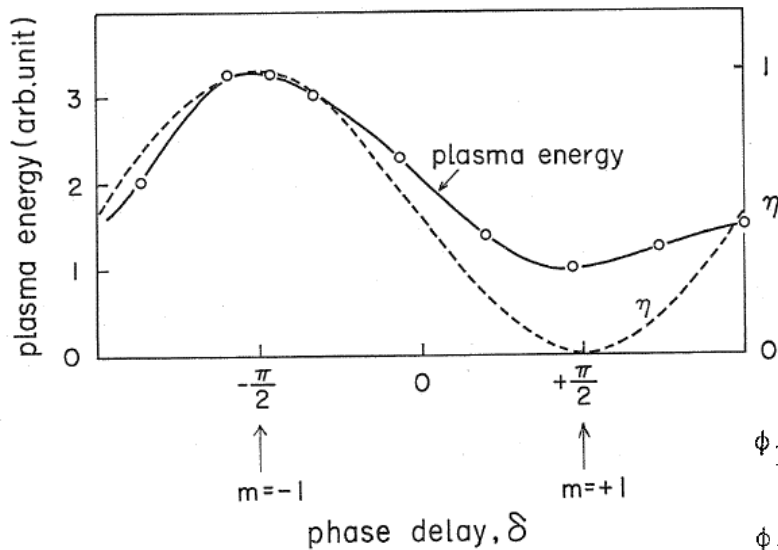
Rotating Type-III antenna (回転角方向の位相制御)



$m=-1$

回転電磁界は
プラズマ軸上で左回り
円偏波を持つ

Optimization of heating efficiency by azimuthally phasing



$$\eta = P_{m=-1}/P = \frac{1}{2} (1 - \sin\delta).$$

$$\phi_1 = \phi_{0m} \exp\{im\theta - i\omega t + ik_z z\}.$$

$$\phi_2 = \phi_{0m} \exp\{im(\theta - \frac{\pi}{2}) - i(\omega t - \delta) + ik_z z\},$$

$$\phi_3 = -\phi_{0m} \exp\{im(\theta - \pi) - i\omega t + ik_z z\},$$

$$\phi_4 = -\phi_{0m} \exp\{im(\theta - \frac{3}{2}\pi) - i(\omega t - \delta) + ik_z z\}.$$

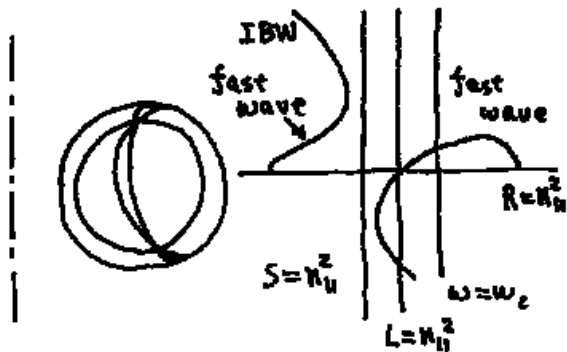
アンテナの位相制御は
かく定式化され、以後の研究をへてさらに進化した。

トカマクにおけるICRF加熱実験 (R-計画の中で)

R-計画の準備研究: Urgent task: 信頼できる加熱手段の確立

JIPP T-II 大電力加熱の予備的試行

JIPP T II-U 大電力加熱の問題点の理解と開発



トカマクプラズマの高密度化にともない、
加熱の主流は遅波から速波に変わった。

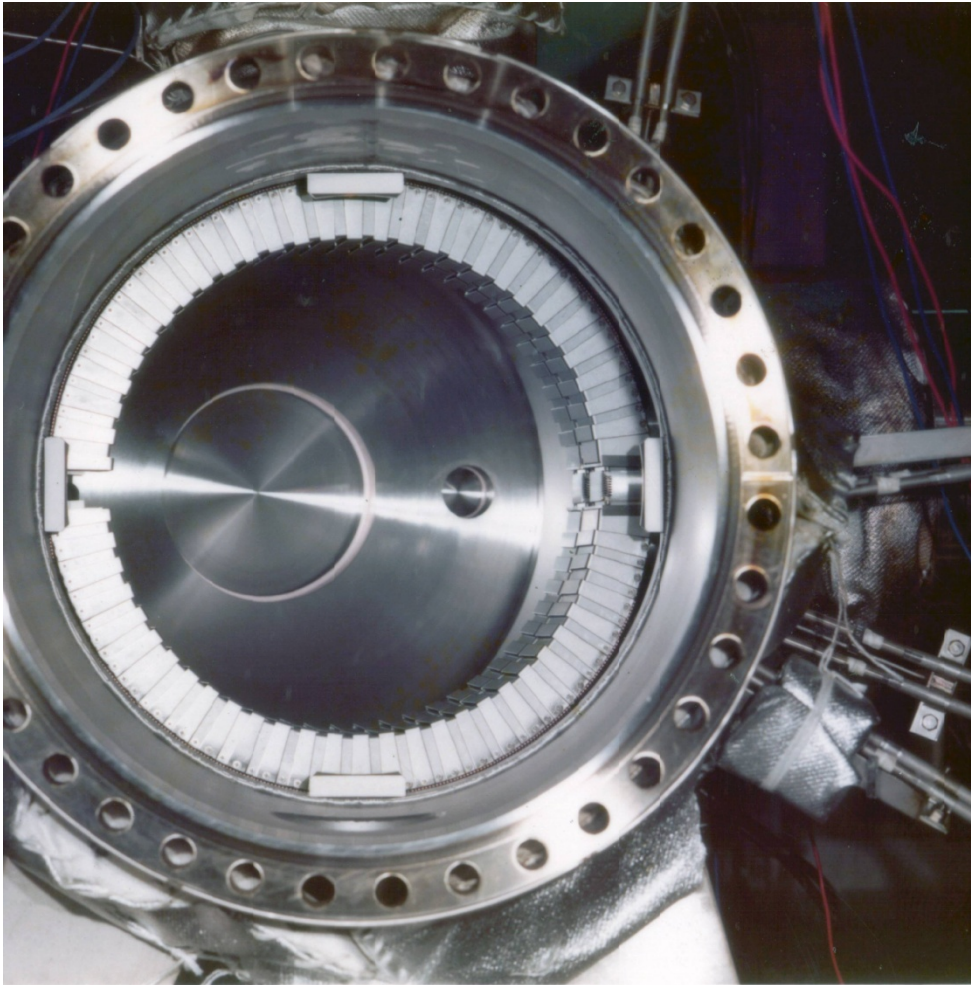
再会する逆説の喜び:
サイクロトロン周波数においては
吸収が強いが、電場の左回り成分が小さい。

マイノリティーイオン加熱の考え方。

イオンサイクロトロン加熱なのに
電子加熱とは！！

二つの代表的加熱領域:
弱磁場側励起(イオン加熱)か
強磁場側励起(電子加熱)か。

JIPP T II のICRFアンテナ試験



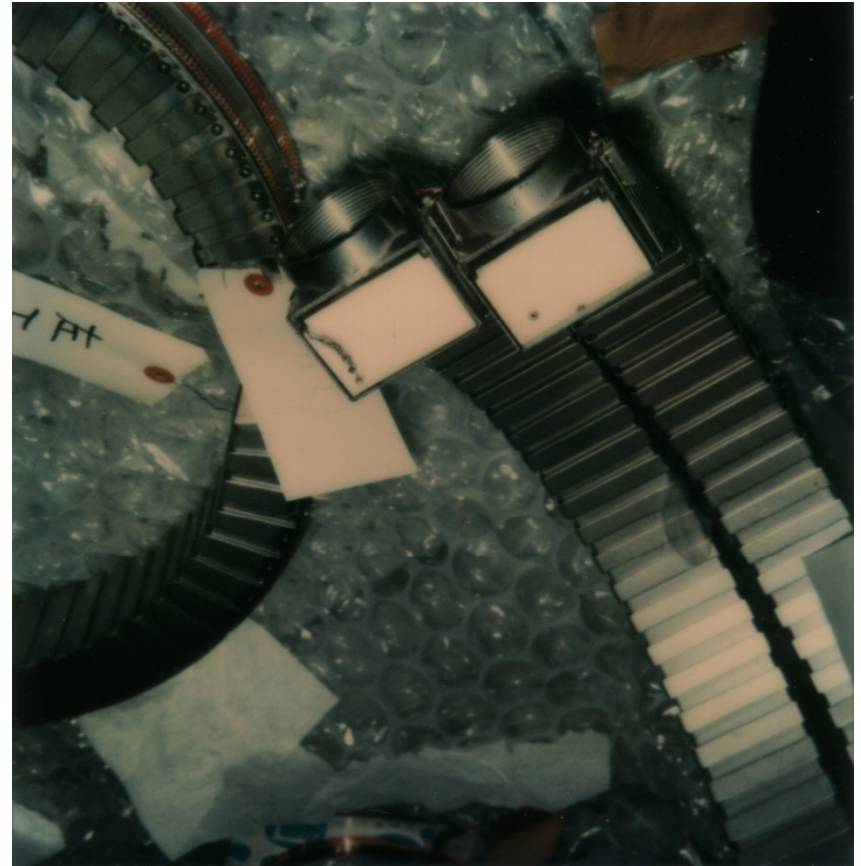
高真空の重要性が認識されて、事前の真空チェックをおこなう時代となった。

定理2: 接触すべきところは確実に接触すること

多分ここまで嚴重にやる必要は無い

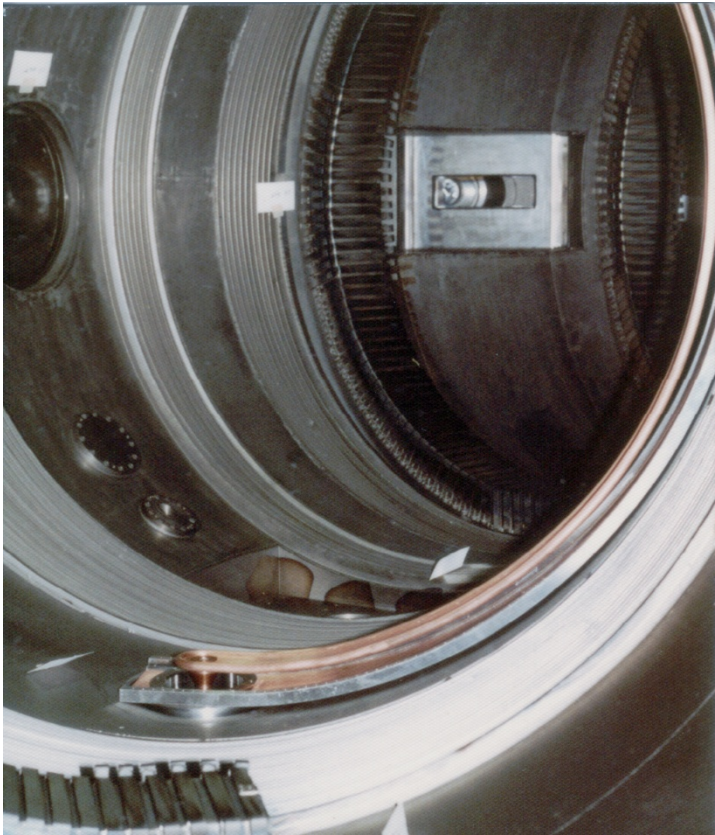
当時の技術担当:
加古、青木、市村、渡利

セラミック絶縁物



定理3: ほろ苦い思い出: セラミック絶縁物は優れているが一度breakdownが起こると復帰しない。

参考: PLT トカマクのイオンサイクロトロン加熱アンテナ



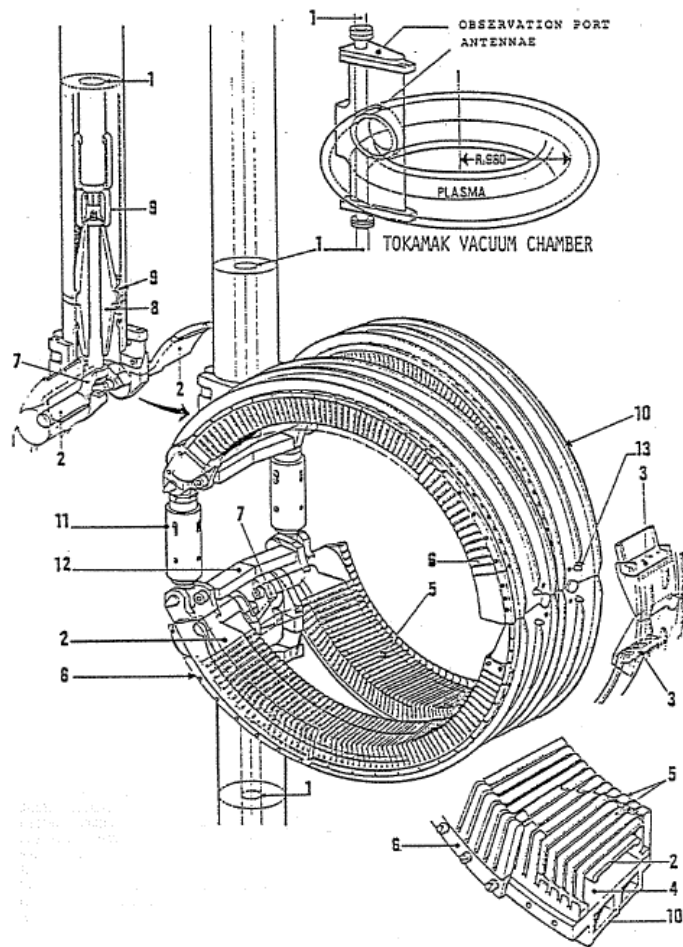
金属ファラデーシールド
+ ceramicの絶縁物

低磁場側の波動励起

少数イオン加熱によるイオン加熱
を狙い成功を収めた。

今となっては、この写真は貴重かもしれ
ない。

参考：TFRのイオンサイクロトロン加熱アンテナ



全金属アンテナの採用

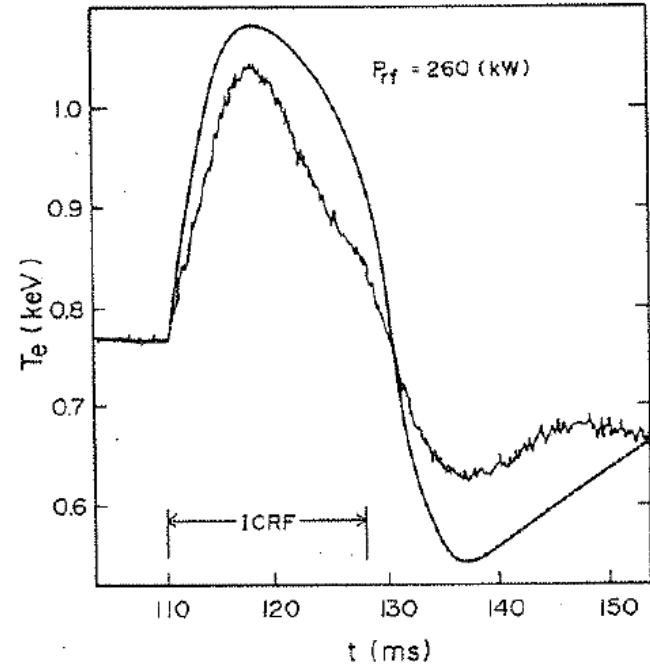
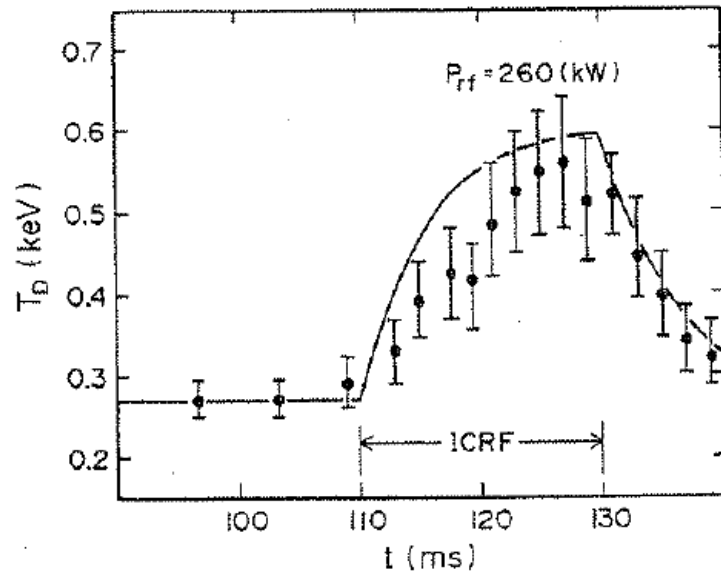
電子加熱

強磁場側励起

上下部でサイクロトロン層がアンテナを切る。

当時フランスのTFRトカマクではイオンバーンスタイン波へのモード変換を利用した電子加熱により良好な加熱を実現した。

JIPP T-II におけるICRF加熱実験



M.Ichimura et al, Nuclear Fusion,24(1984)304

イオン及び電子温度の上昇を確認: 速波による温度
上昇を確認できて大いに喜んだ。

しかし不純物の蓄積により電子温度がさがり始める。

基本的な加熱のエネルギー収支

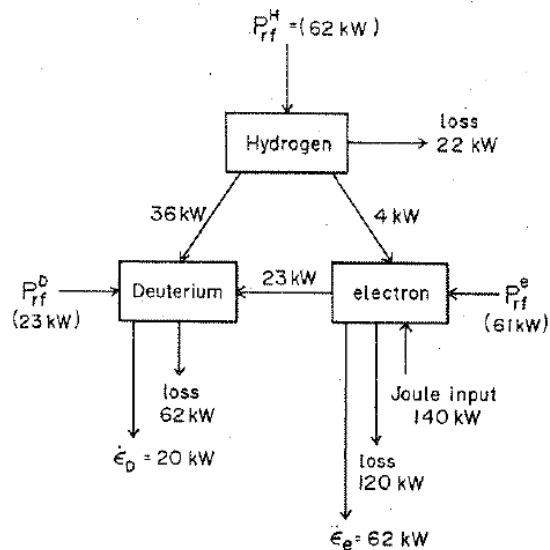


FIG.4. Power balance diagram for 4% H. $\dot{\epsilon}_e$ and $\dot{\epsilon}_D$ denote the time derivatives of electron and deuterium thermal energy. All quantities are evaluated at 6 ms after RF pulse turn-on. Sum of RF powers absorbed by respective species is 146 kW, while $P_{net} = 260 \text{ kW}$.

JIPP T-II から JIPP T-IIU へ

JIPP T-II 実験の結論:

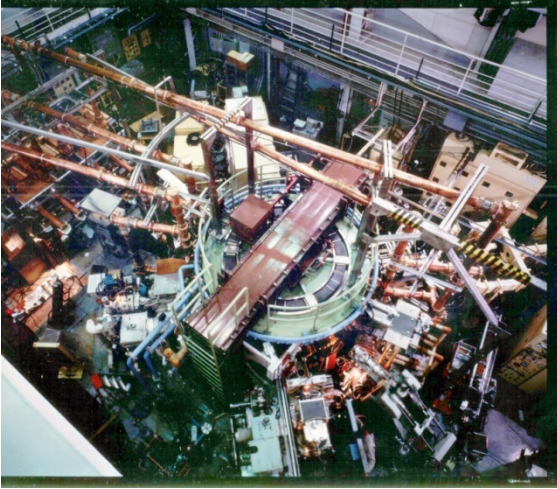
加熱により発生した高エネルギー粒子を閉じ込めるためには
プラズマ電流を大きくしなければならない。
(Fokker Planck 方程式の解析による)
(トカマクの高エネルギー粒子閉じ込めは I_p により決まる)

JIPP T-IIU 改造

真空容器の改造により
プラズマ小半径増大—プラズマ電流増加
(参考: クルスカル—シャフラノフ 限界)

高磁場側アンテナの採用
イオン加熱から電子加熱へ

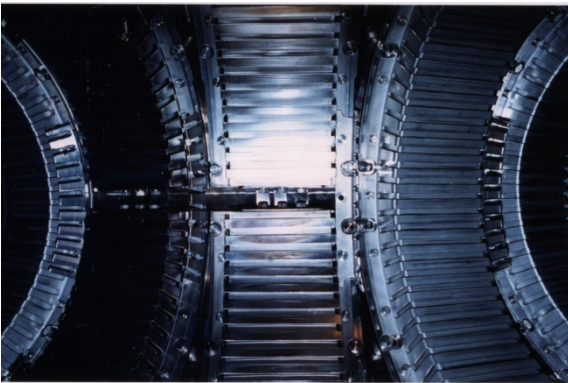
ICRF Heating in JIPP T-II U



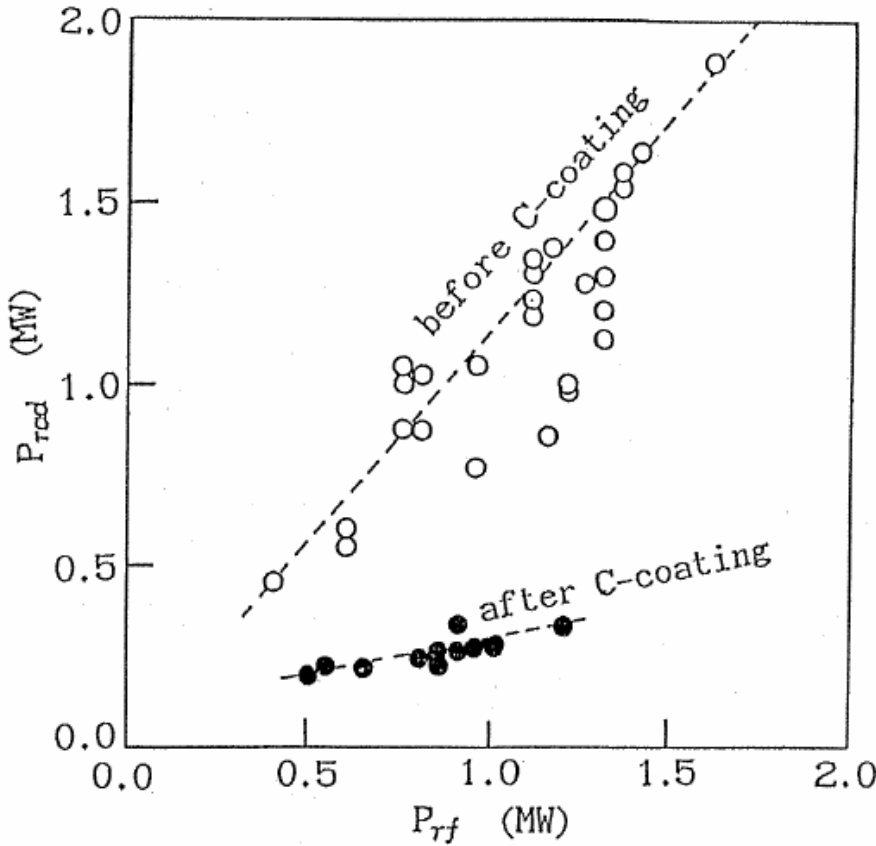
真空容器改造
プラズマ電流の増大
アンテナ数の増大

リミター材料の比較実験

モリブデンリミター
から
ステンレススチールリミター
を経て炭素リミターへ



カーボニゼーションによる不純物問題の解決



Total radiation power as a function of the rf power.

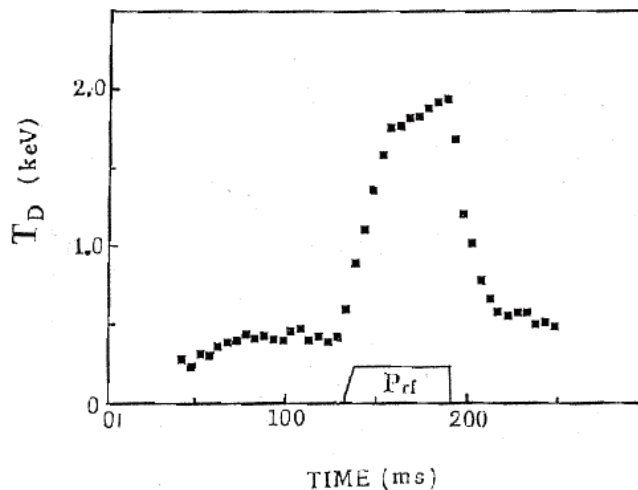
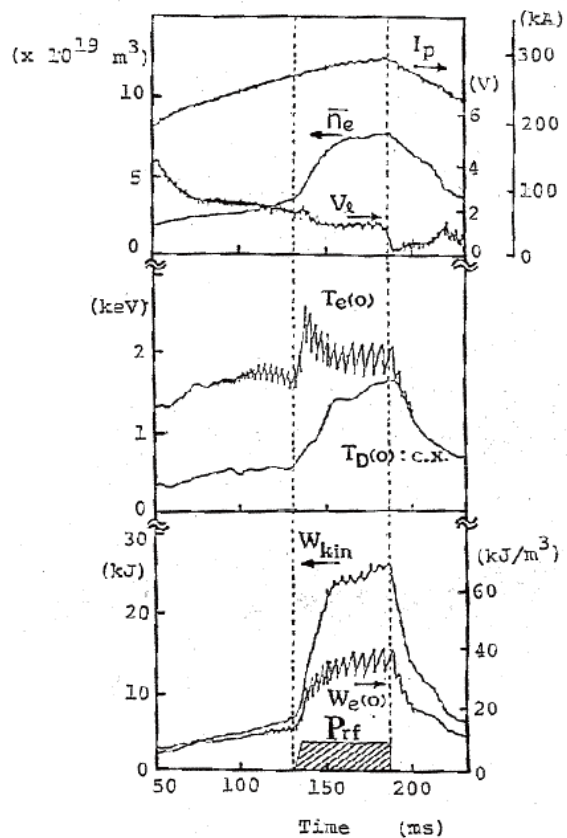
炭素リミターにより不純物問題は
ほぼ解決。

野田信明TEXTOR実験に参加

チタンゲッター：
カーボニゼーション

+電子過熱の採用

健全なICRF加熱の達成



信頼できる計測に支えられる。

Ne, Te (ECE): 川端、岡島

Te (Thomson): 成原

イオン温度: 森田繁、居田克己、

分光 佐藤国憲

Magnetics: 東井、山田、佐藤(浩)、坂本(瑞樹)

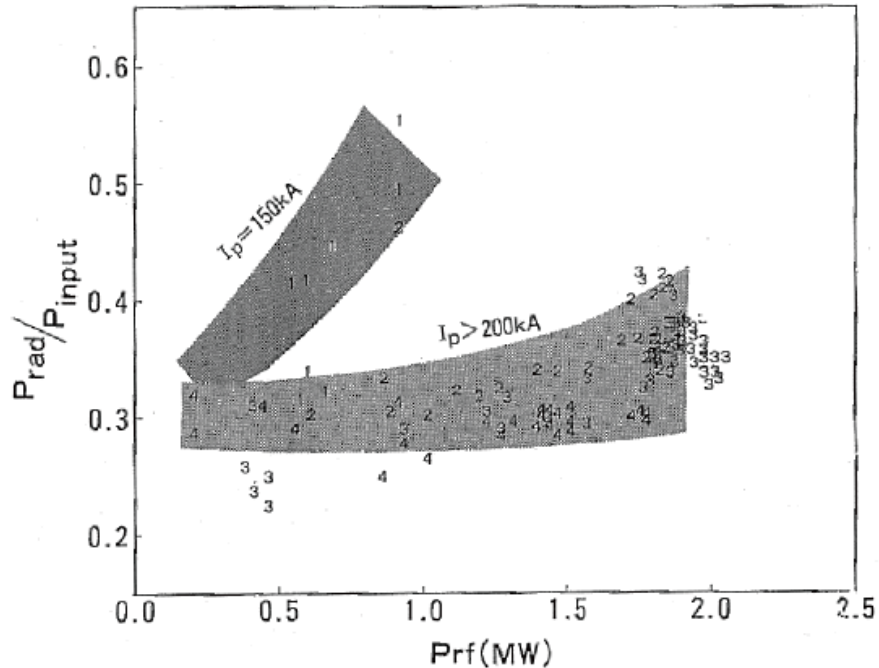
FNA: 川澄、市村, Neutron 笹尾:

Soft-X-ray 東井、政井(邦昭)

プラズマ生成: 棚橋、谷口、都築、広倉

データ処理: 秀熊、中西、小島

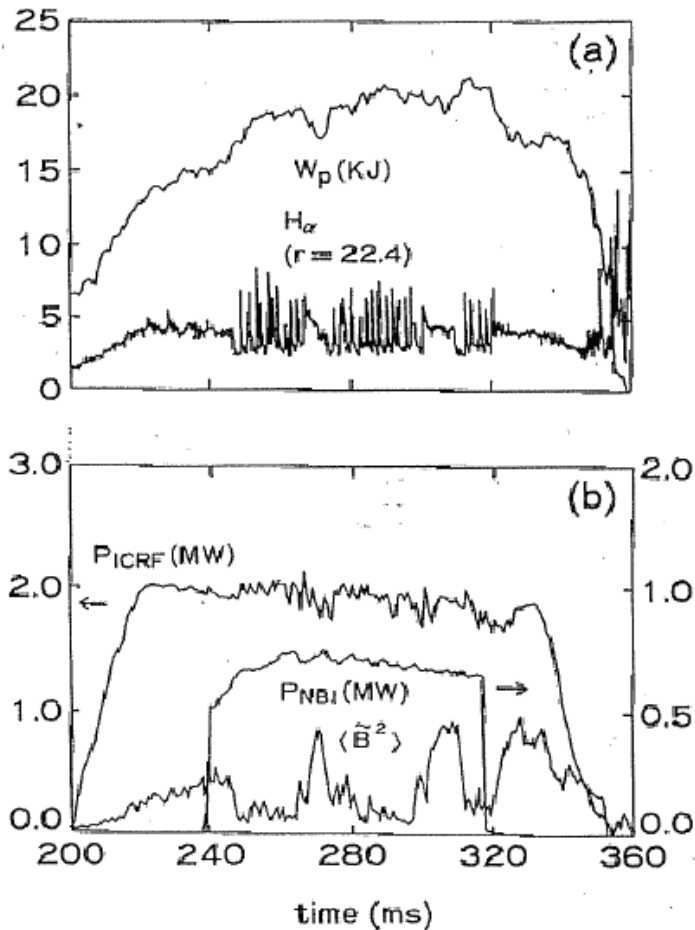
カーボニゼーション後輻射損失は減少



高エネルギー粒子閉じ込めの重要性を再確認

最低必要電流
 $I_p > 200\text{kA}$

H-mode達成に必要な閾値(2~MW)を越える。



Limiter H-mode

の実現。

大電力加熱プラズマの閉じ込め特性に関して幾つかの重要な論文が生まれた。

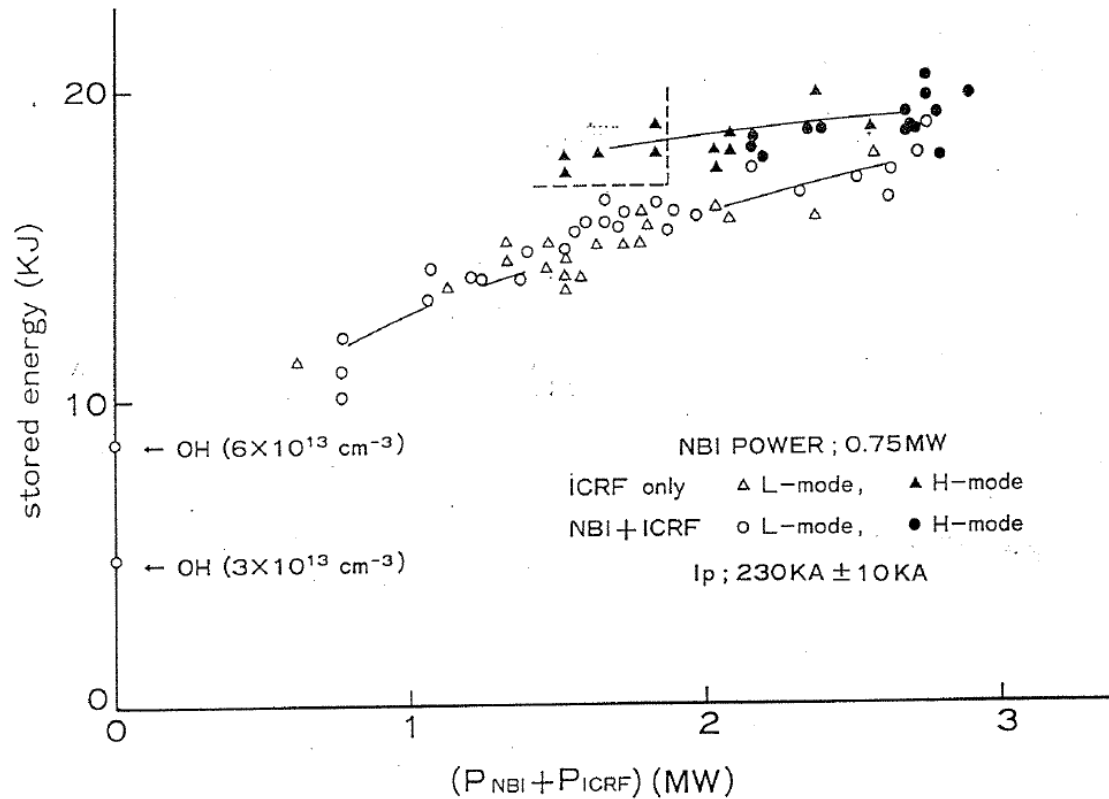
K. Ida, et al,

Y. Ogawa, et al

K. Toi, et al,

S. Morita, et al

リミター H-mode のエネルギー閉じ込め改善

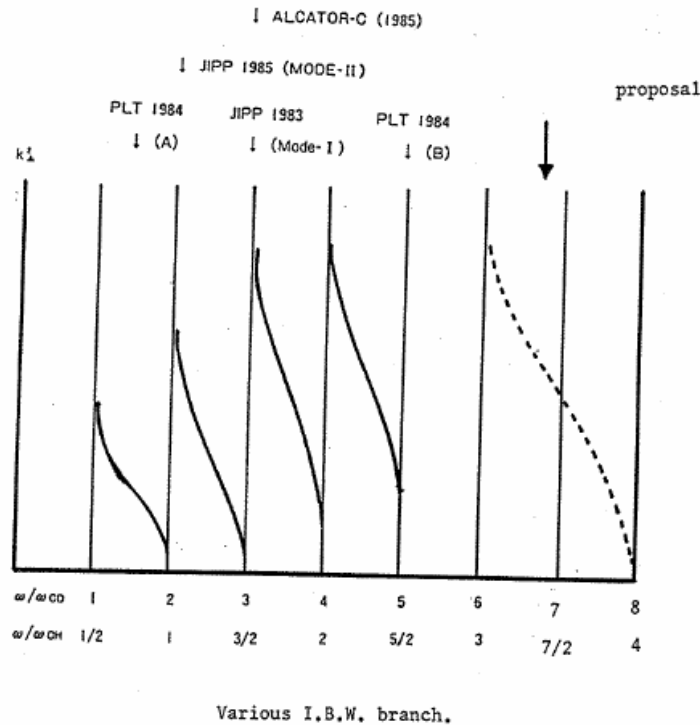


電力の閾値には履歴現象がある。

参考: 私が若い頃
カタストロフィーの理論
が話題を呼んだ時期が
あった。

イオンバーンスタイン波加熱実験(異色の実験)

プリンストンPPPLの小野氏との共同研究で行われた)

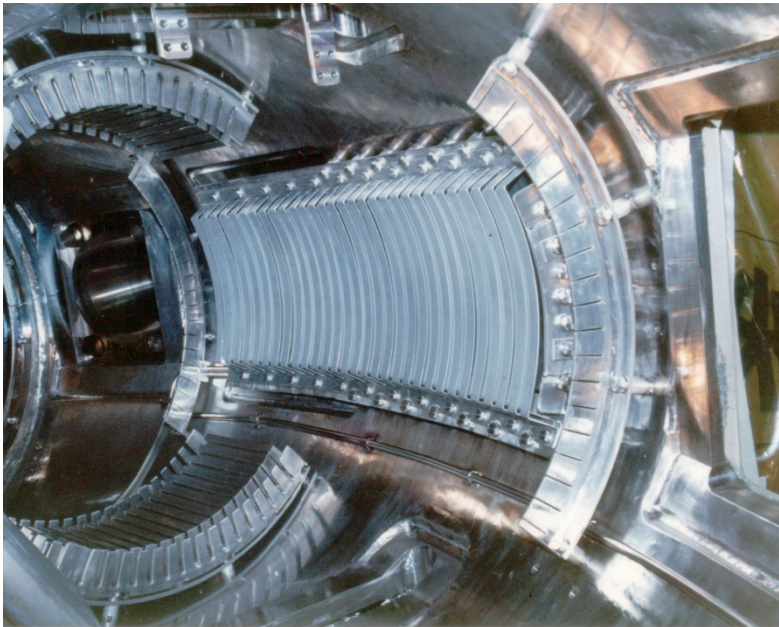


イオンバーンスタイン波は静電波に属する。

磁場平行方向の波数を適切に選べば適切な減衰が得られる。

プラズマ周辺領域での静電イオンサイクロトロン波の共鳴を超えてモード変換する必要がある。

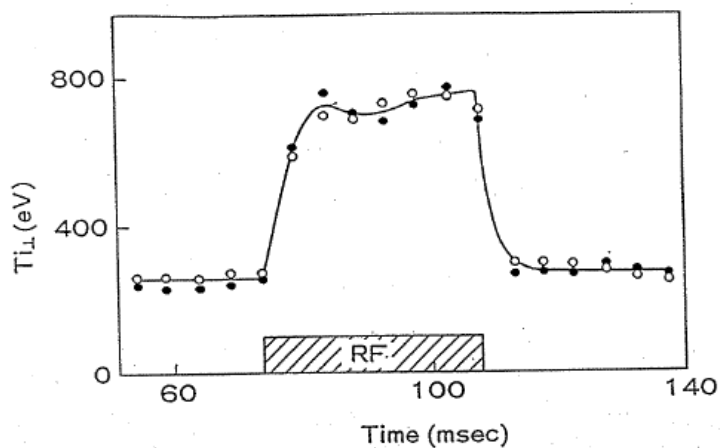
Type-III antenna



Type-IIIアンテナは元来
シアアルフベン波の励起に
使われたが
イオンバーンスタイン波の励起にも
適している

参考：
小野氏はCDX装置での予備実験で
静電結合による波動励起を用いていた。

イオンバーンスタイン波の加熱特性(実験結果)

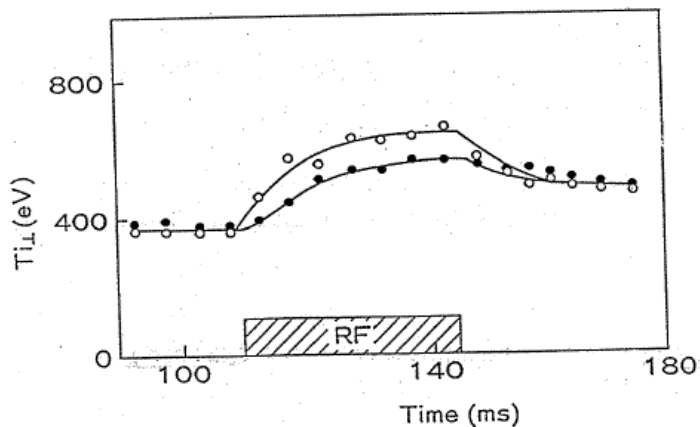


Mode-I

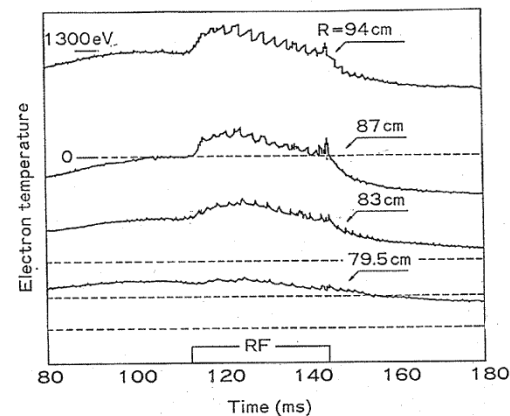
IBWはイオン温度の加熱効率が高いことで注目された。

○ : T_H
● : T_D

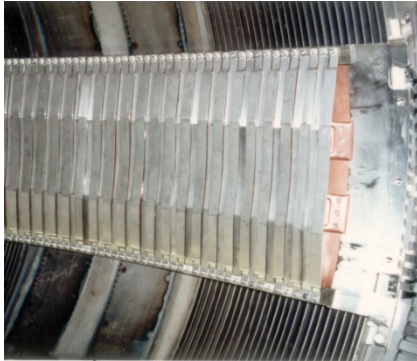
IBWはいくつかのブランチを持つがMode-IIと呼ばれるブランチでは電子加熱が起きた。



Mode-II



PLT-IBW antenna



小野氏と PLT IBW antenna

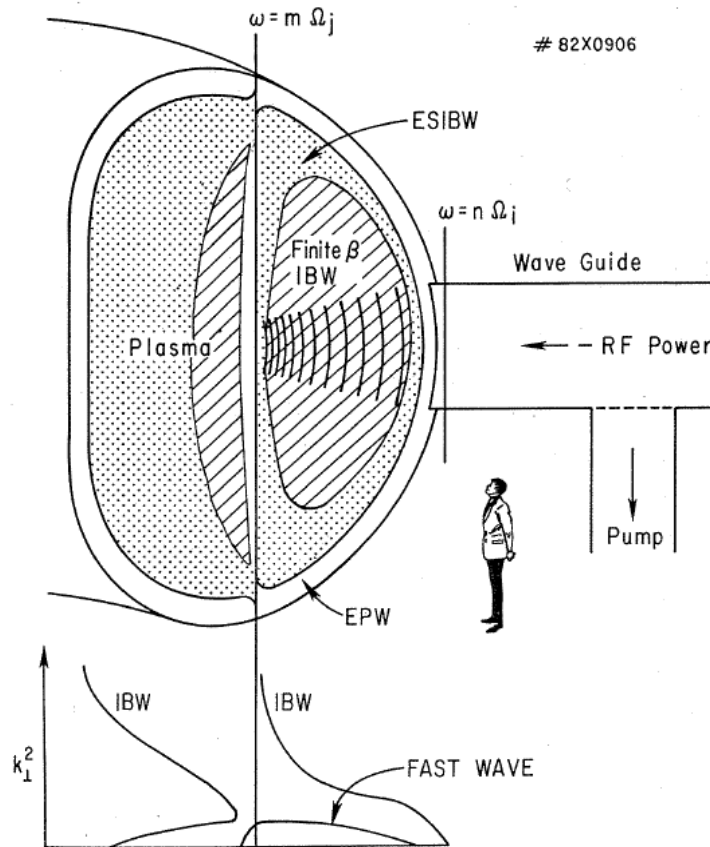
名古屋Type-IIIコイル → Btheta loop → IBW antenna



その後、IBWHは世界各地で試験された。
PLT, Alcator, TNT, FT-U, JFT-2M,
D-III D, HT-7

HT-7のIBW アンテナ日中協力

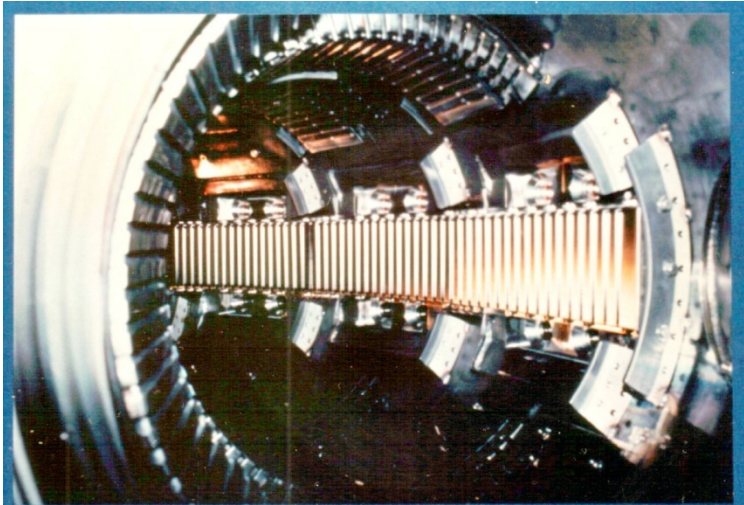
小野氏(Princeton)の夢 Wave guide excitation of IBW



縦長の導波管アンテナ
はIBWの偏波面と整合

コンパクトな導波管アンテナ
を可能にする。

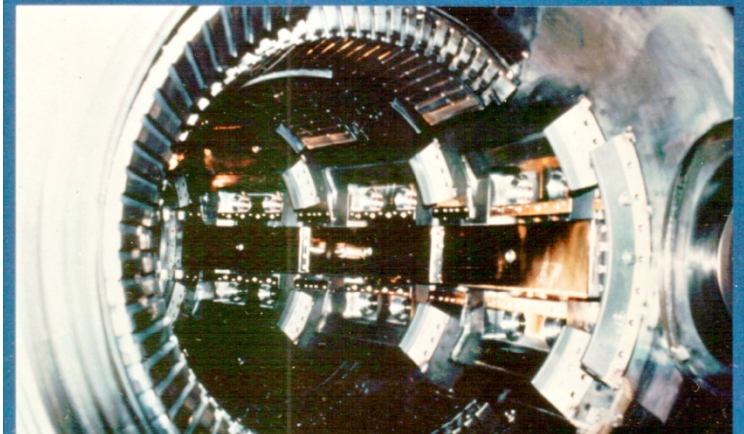
第2次 IBW 加熱実験 at higher frequency (130MHz)



不純物の抑制のため高い周波数(130MHz)を用いる:

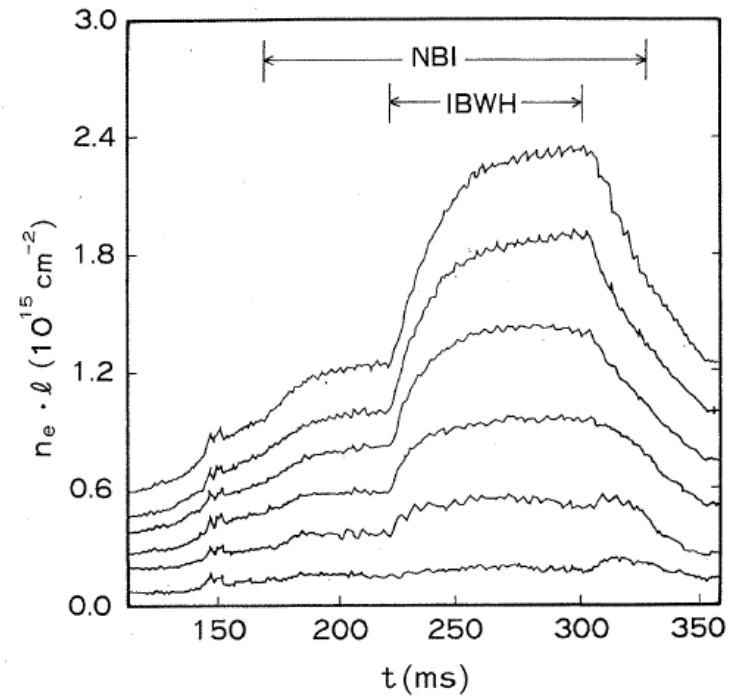
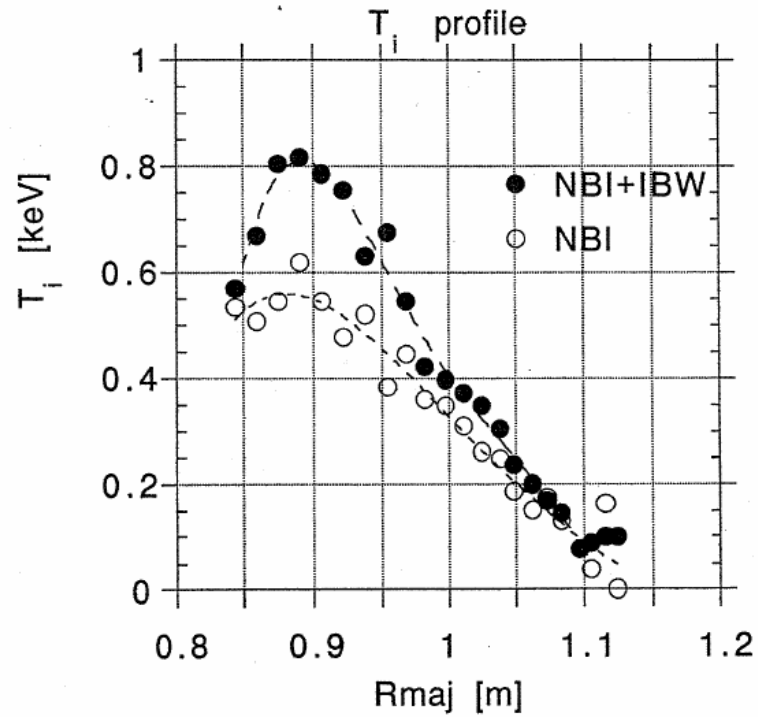
T字型アンテナを用いて
磁場平行方向の波数を制御:

磁氣的結合による静電波の励起: モデル



W.N.C.Sy et al., Nuclear
Fusion,235(1986)795

Peaked profile on IBW



Model: 電場シアによる輸送改善

$$\frac{\partial \langle v_\theta \rangle}{\partial t} = \frac{d \langle S \rangle}{dr} - \mu_{neo} \langle v_\theta \rangle$$
$$\langle S \rangle = v_A^2 \langle \tilde{B}_r \tilde{B}_\theta / B_0^2 \rangle - \langle v_r v_\theta \rangle$$
$$\langle v_\theta \rangle = \frac{1}{\mu_{neo}} \frac{d}{dr} \langle v_r v_\theta \rangle$$

Radio-Frequency Power in Plasmas
9th. Top. Conf. Charleston, SC, 1991

当時電場(プラズマ回転)のシアによる乱流輸送の抑制が中心話題として浮上していたので、同じメカニズムとして注目された

Flow Shear Suppression of Turbulence Using Externally Driven Ion Bernstein and Alfvén Waves

H. Biglari,[†] M. Ono,[†] P. H. Diamond,^{*} and G. G. Craddock[‡]

[†]Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ 08543

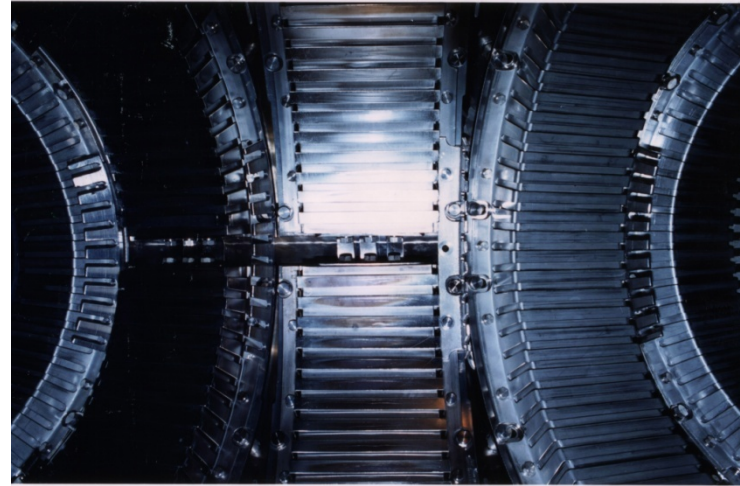
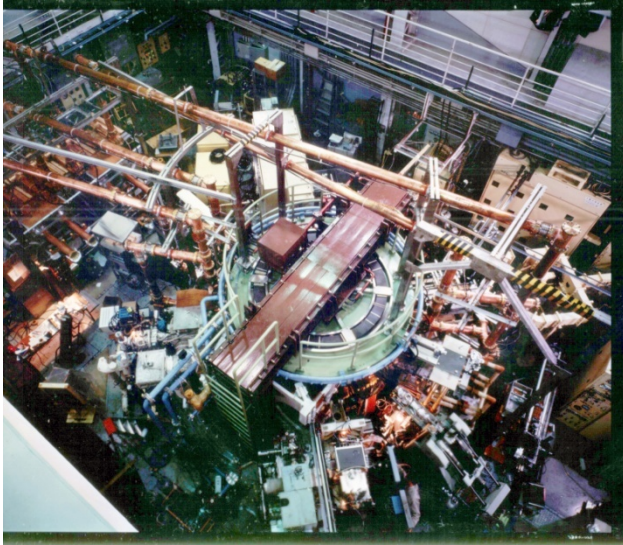
^{*}Department of Physics, UC San Diego, La Jolla, CA 92093

[‡]Science Applications International Corporation, San Diego, CA 92121

位相制御と速波電流駆動

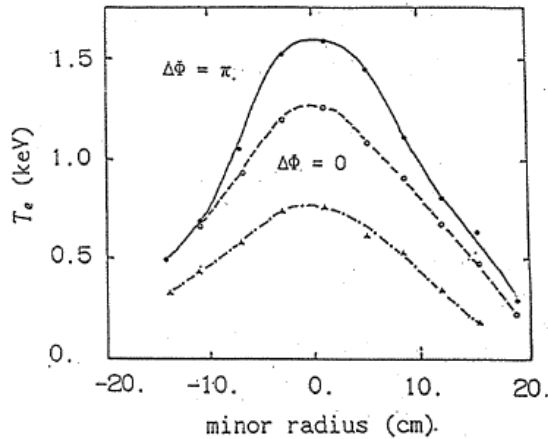
- 1) Profile consistency のチェックへの位相制御の応用
- 1) モードコンバージョン電流駆動
- 2) 高次高調波電流駆動
- 3) 130MHz 電流駆動
- 4) イオンと電子の競合
- 5) 電流駆動効率の理解

位相制御アンテナの利用→速波電流駆動



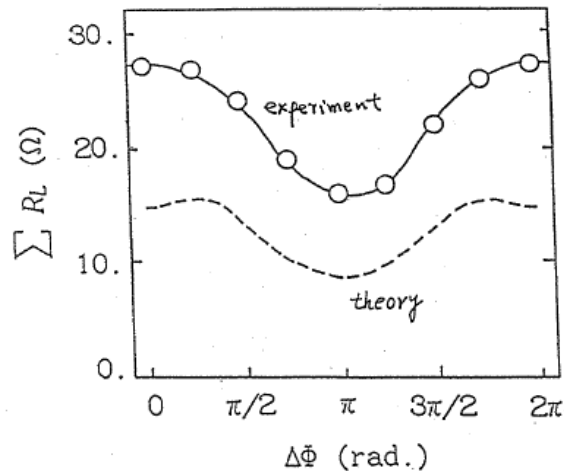
大電力加熱(密度)を目指したために、JIPP T-II U では多数のアンテナが設置されアンテナの位相制御という観点からは理想的な状態となった。

1) Profile consistencyとアンテナ位相制御



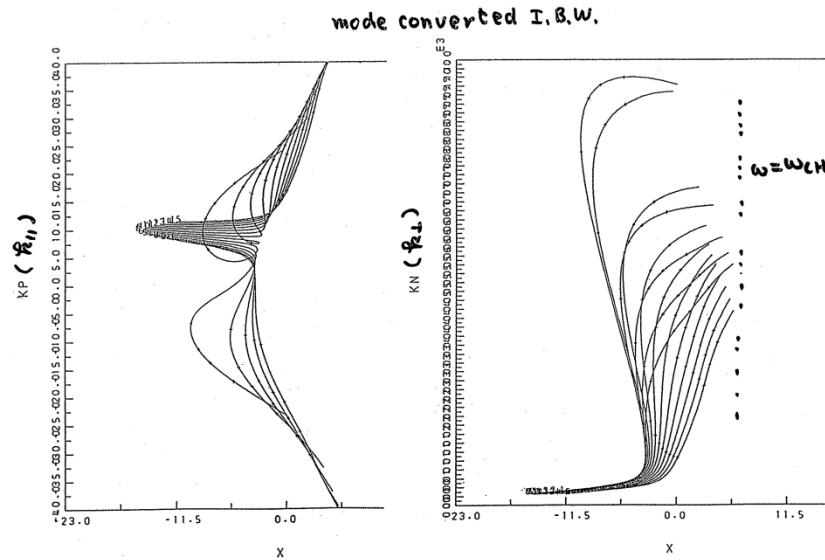
JIPP T-II U のICRF位相制御を利用して
多様な先駆的実験がおこなわれた。

左図はprofile consistencyに関する実験。
位相制御は加熱電力分布をかえるために
に応用された。



世界的には π -phasingのすぐれた性能が
話題をよんだが、
アンテナの大電力特性に関していえば
 0 -phasingの方が優れているではないか。

2) モード変換イオンバーンスタイン波による電流駆動の可能性



IBW へのモード変換を利用した JIPP T-II Uの加熱では、電子を加熱がおこる。

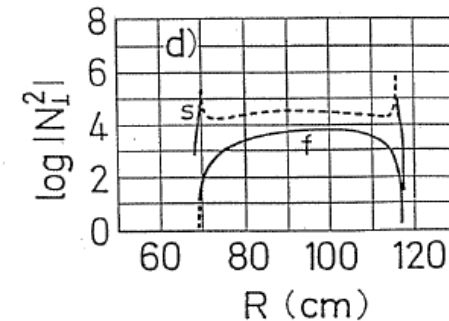
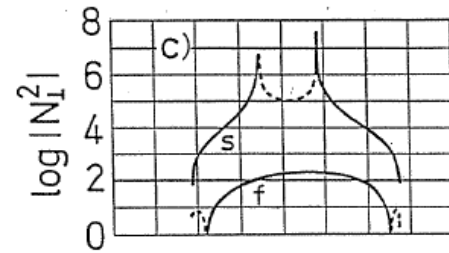
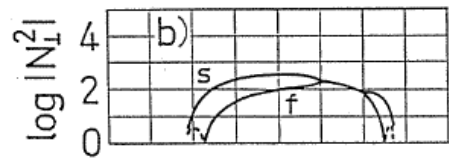
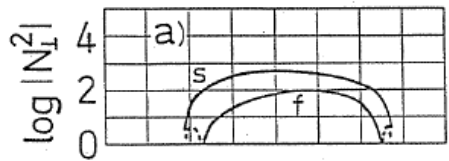
暖めた秘策： 位相制御により電流駆動が可能ではないか？

実験では、電流駆動効果を明確に示すことができなかった。

ここにも愛すべき逆説が！

HHFWCD

3) 高次高調波速波による電流駆動(40MHz) $B_t \sim 0.3T$



遅波へのモード変換を避け、イオンによる吸収を避ける周波数帯。

$$\omega \sim 13\omega_{c,i}$$

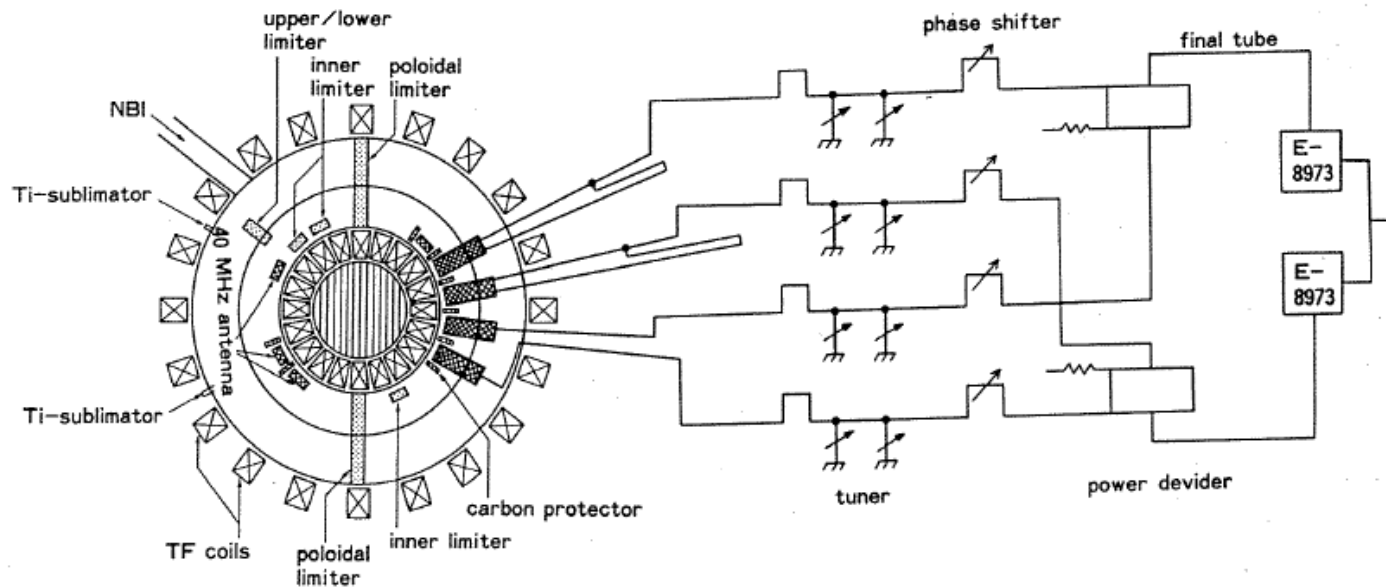
R. Ando, et al, ICRF current drive experiment on JIPP T-II U
Nuclear Fusion, 26(1986)1619

HHFWはその後、球状トカマクの主要な加熱手段となった。

(NSTX-小野雅之述懐)

4) 130MHz 速波電流駆動(中間周波数帯)

日米協力にて 高瀬雄一氏(当時MIT)との共同研究



JIPP T-II U 130MHz RF System

中間周波数帯(低次高調波イオンサイクロトロン周波数帯)速 波電流駆動



Y.Takase, et al.,
Nuclear Fusion,30,(1990)1585

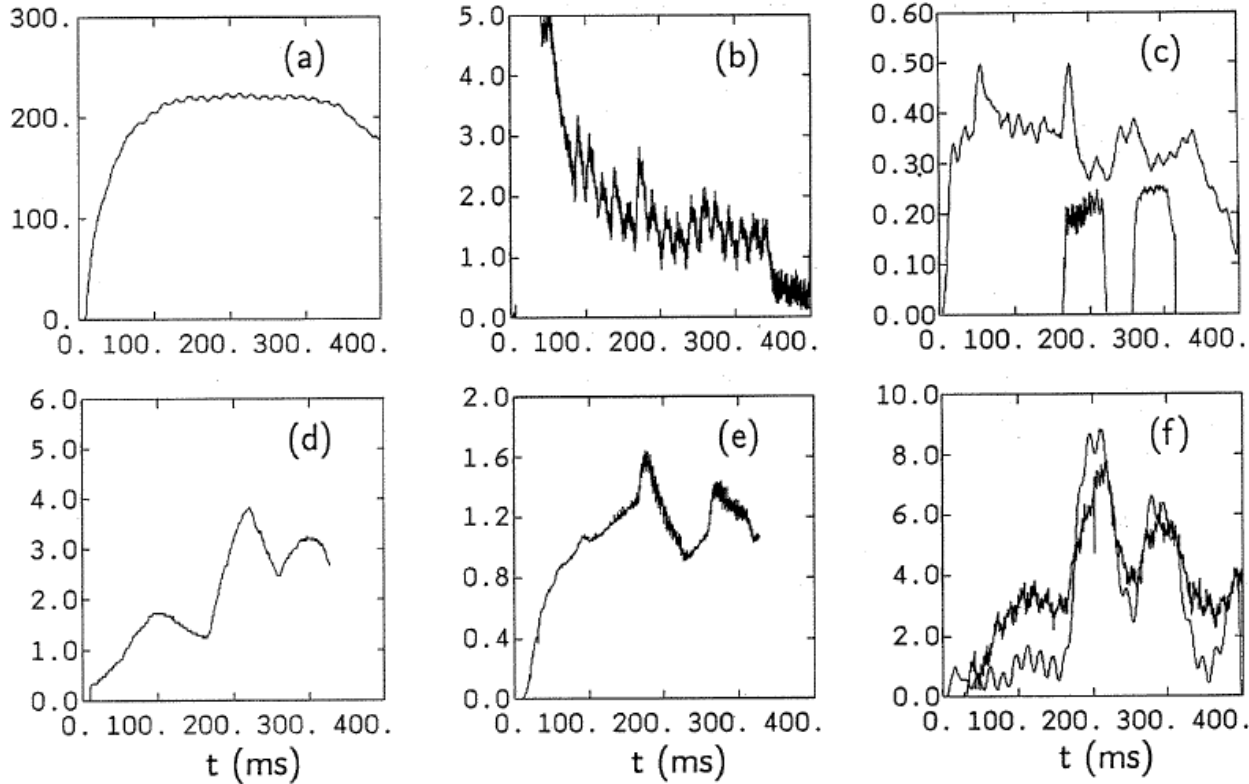
“Fast Wave heating at intermediate
ion cyclotron harmonics
on the JIPP T-II U tokamak”

T.Seki, et al.,
Nuclear Fusion, 31(1991)1369

“Application of Intermediate
frequency range fast
wave to the JIPP T-II U plasma”

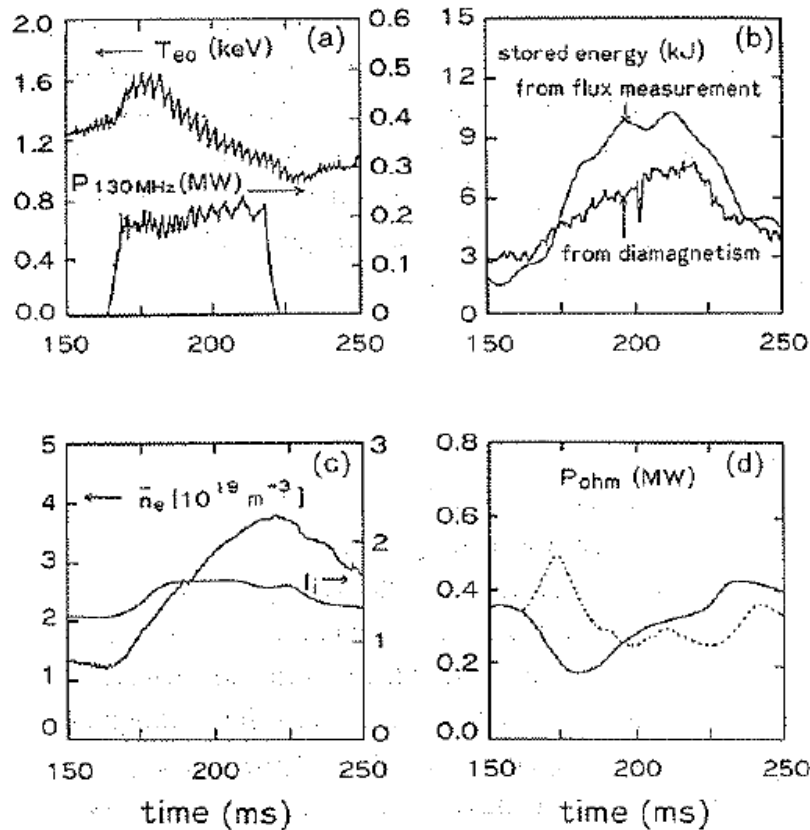
電流駆動実験にはアンテナ間の位相差を
適正にセットするための位相調整回路が
必要となる。

速波による電子加熱が確認された。



速波は電場成分が小さいのでランダウ減衰が小さい。
電子加熱(相互作用)が確認されたのは 一つの寄与
である。

データから電流駆動効率を導くことは難しい

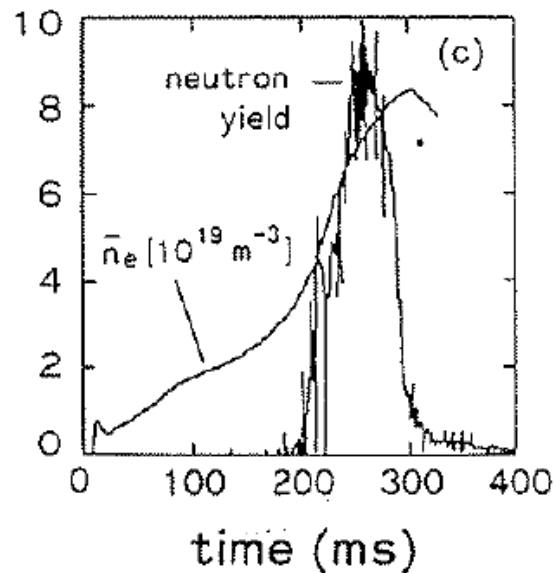
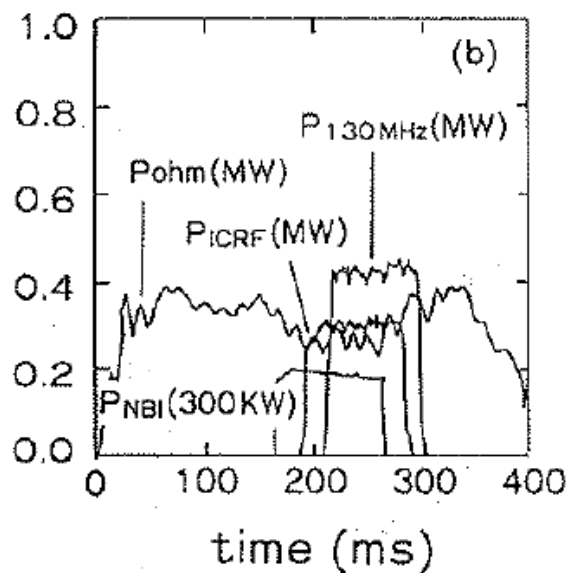


問題点：
 密度上昇
 内部インダクタンスの変化
 磁場の拡散時間
 電流駆動効率をループ電圧の
 変化より判断。

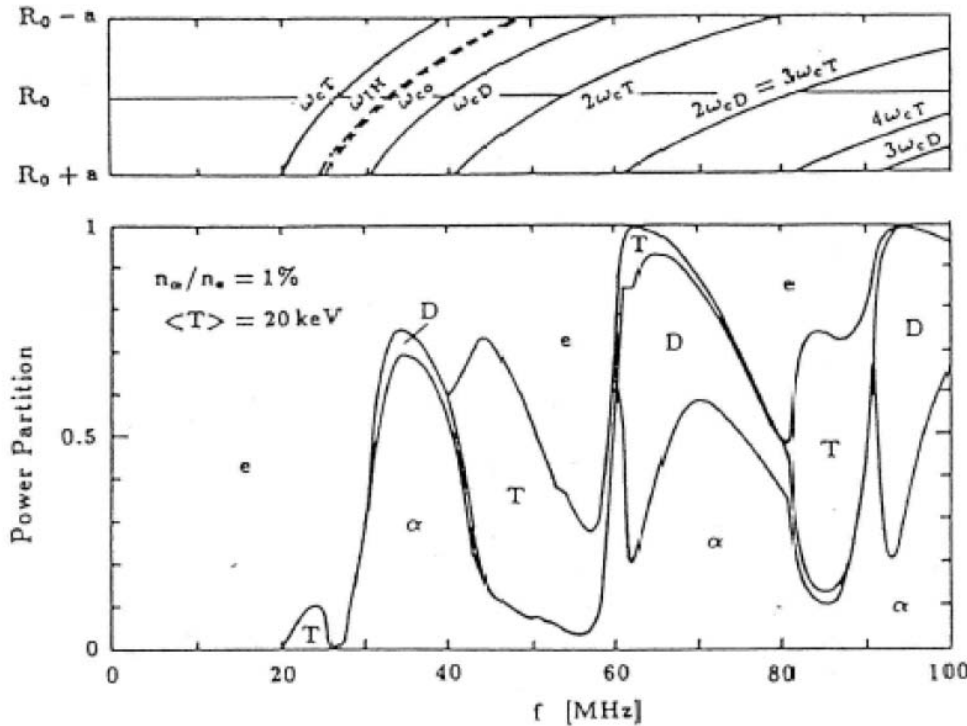
D-III Dの実験では
 MSEによるプラズマ電流の
 直接的計測がなされ、
 速波電流駆動は世界的に
 認められた。

FIG. 2. Time history of a typical shot: (a) ECE signal of the central chord and 130 MHz RF power, (b) stored energy obtained from the diamagnetic signal and from flux measurements, (c) plasma density and internal inductance l_i , (d) Ohmic power (broken line: without correction of $d l_i / dt$; solid line: with full correction).

5) 高密度ではイオン加熱が起こった。
(3次高調波イオンサイクロトロン加熱の実証)



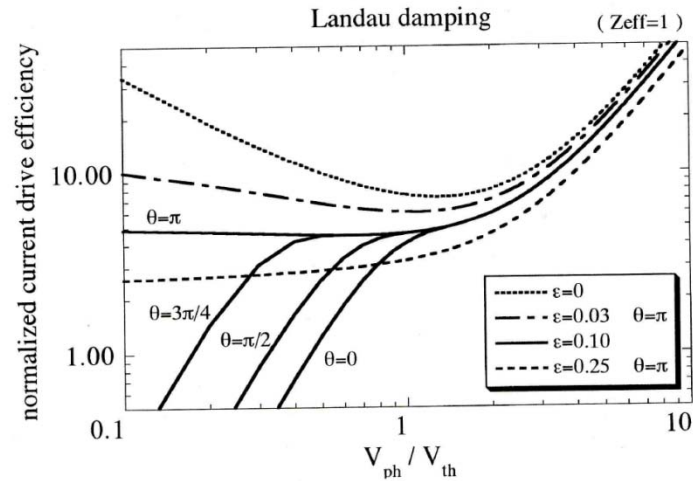
参考：速波電流駆動の周波数窓



福山の計算による。

福山コードによる電力吸収の分配比
核融合炉では、重水素、三重水素、電子以外に、 α -particleの存在も考慮しなければならない。

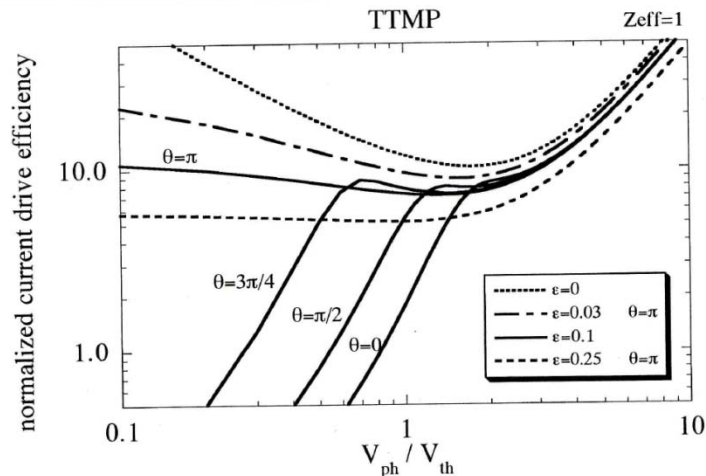
電流駆動のモデル化の完成



電流駆動の理論的定式化は N.J.Fish et al.,によって行われた。

電流駆動効率^①は波動の位相速度による。横軸は位相速度:

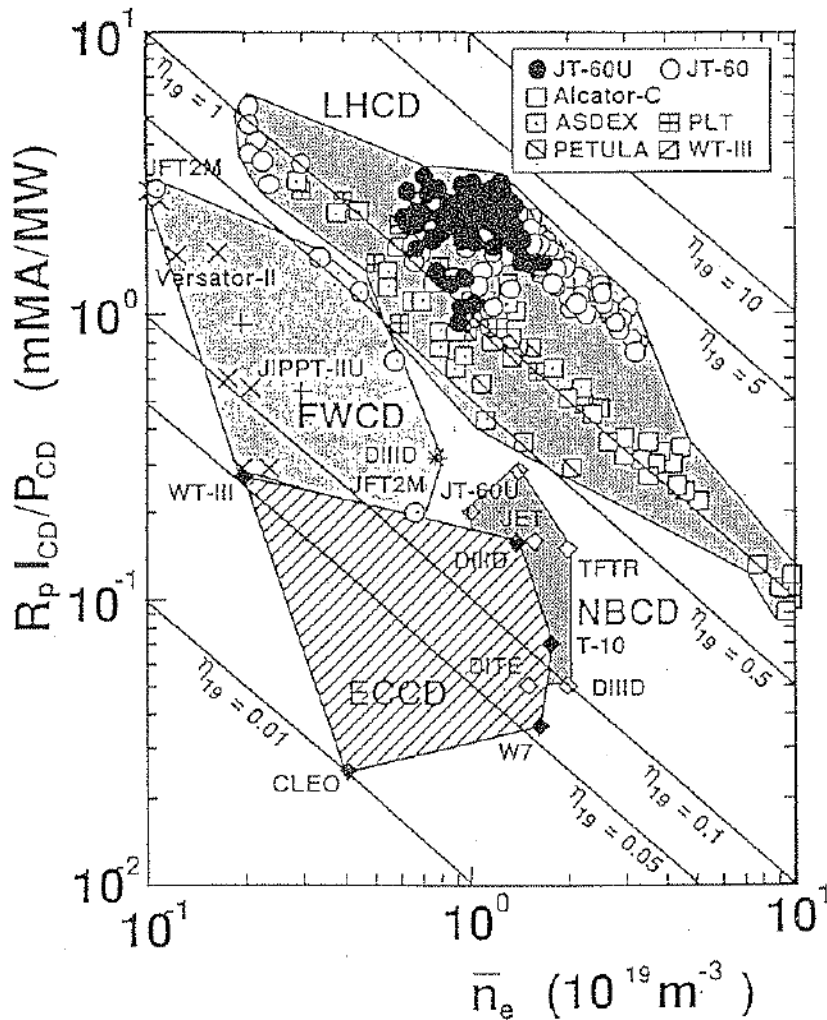
例:
 Syncromac の実験は左方
 JIPP T-IIU (大久保)の実験は右方



実験的には電流駆動効率は電子温度に比例している。何故?

各種電流駆動の効率

(mental exercise: 違いをいかに説明するか?)



LHCD, FWCD:

$$\frac{\tilde{j}}{\tilde{p}} = \frac{4w^2}{5+Z_i} \quad w = \frac{v_{\parallel}}{v_{th,e}}$$

スペクトルギャップを埋める問題と関係している。

$$v_{\parallel} = \frac{\omega}{k_{\parallel}}$$

LHCDの場合には吸収が強いので、モード結合により k_{\parallel} が少し上昇すればよい。

FWCDの場合には吸収が小さいために、励起波の段階で k_{\parallel} を大きくとる必要がある。

ECCD:

$$\frac{\tilde{j}}{\tilde{p}} = \frac{3w^2}{5+Z_i} \quad w = \frac{v_{\parallel}}{v_{th,e}} \quad \omega - \omega_{ce}(r) = k_{\parallel} v_{th,e}$$

$$v_{\parallel} = \alpha(\omega/k_{\parallel}) \quad \alpha = \left(1 - \frac{\omega_{ce}(r)}{\omega}\right) < 1$$

電流駆動の了解

ITER: のコンセンサス

定常核融合炉では電流の~70%をブートストラップ電流に頼る。

電流駆動の役割分担。

プラズマ中心部の電流駆動: 速波電流駆動、中世粒子ビーム電流
駆動

周辺領域の電流分布制御: 低域混成波電流駆動

新古典ティアリングモードの安定化: 電子サイクロトロン電流駆動

一定の限界の把握と将来への目算が得られて、
その後、速波電流駆動研究は一段落した。

当時の国内の研究前線

田中茂利先生を中心とした加熱の国内協力体制があった。
 (今日は:イオンサイクロトロン加熱に関してのみ言及)

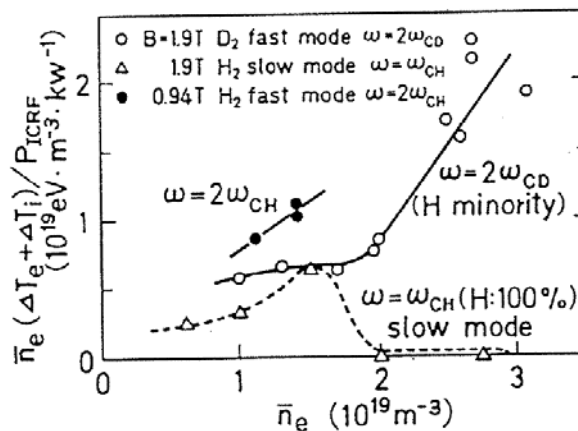
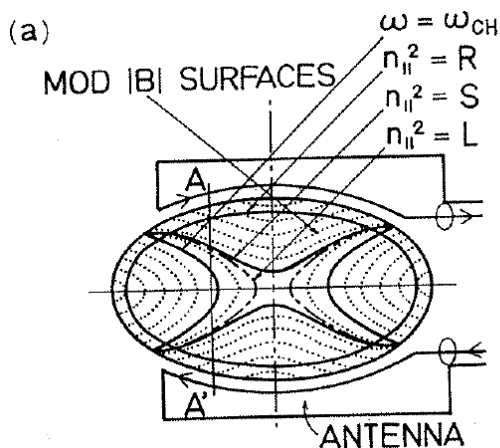
原研:小田島和夫、今井功、木村晴行、松本宏、上杉吉彦、
 小川、玉井広史、三枝、藤井

京都:八坂保能、

東大:篠原俊二郎、 筑波大学:市村真、犬竹

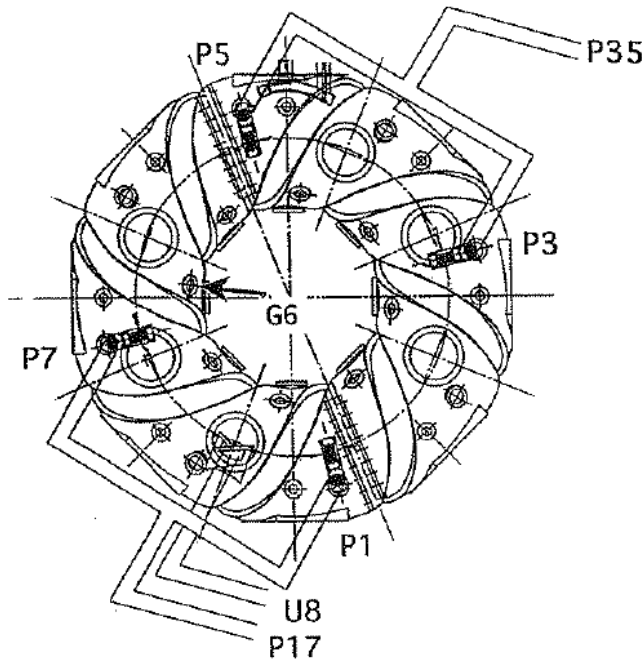
京都:武藤敬、岡田浩之

トカマクと平行してヘリカル系Heliotron-Eでも 速波への移行が進んでいた。



ヘリカル系のイオンサイクロトロン加熱 CHS 実験 & LHD実験

トポロジカルにはヘリカル系の加熱とトカマクの加熱は同相である。
CMAダイアグラムもパラメーター空間のトポロジカルな分類を目指したことに注意。



当時 ヘリカル系の
イオンサイクロトロン加熱はより
困難な不純物問題をかかえていた。

トカマク: 電流崩壊
ヘリカル系: 熱的崩壊がおこる。

参考: 設計部会の議論では、当初
第一期計画のなかには
イオンサイクロトロン加熱はなかった。

CHS実験構成メンバー

K. Nishimura, R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Watari, T. Seki, A. Ando, S. Masuda, F. Shinpo, S. Murakami, S. Okamura, H. Yamada, K. Matsuoka, S. Morita, T. Ozaki, K. Ida, H. Iguchi, I. Yamada, A. Ejiri, H. Idei, S. Muto, K. Tanaka, J. Xu, R. Akiyama, H. Arimoto, M. Isobe, M. Iwase, O. Kaneko, S. Kubo, T. Kawamoto, A. Lazaros, T. Morisaki, S. Sakakibara, Y. Takita, C. Takahashi, K. Tsumori
"ICRF Heating in CHS"
proc. 15th IAEA conference on Plasma Physics and
Controlled Nuclear Fusion Research, Seville, 1994, vol.1, p-783

S. Masuda, R. Kumazawa, K. Nishimura, T. Mutoh, T. Watari, D. A. Rasmussen, F. Simbo, T. Seki, T. Ido, R. Akiyama, A. Ando, A. Ejiri, D. J. Hoffman, H. Idei, K. Ida, H. Iguchi, M. Isobe, M. Iwase, E. F. Jaeger, S. Kubo, J. F. Lyon, K. Matsuoka, T. Morisaki, S. Morita, S. Mutoh, M. Murakami, S. Murakami, S. Okamura, T. Ozaki, S. Sakakibara, M. Sasao, C. Takahashi, T. Kawamoto, K. Tanaka, J. Xu, H. Yamada, I. Yamada, J. B. Wilgen
"Strong Electron Heating in CHS ICRF Heating Experiments"
NUCLEAR FUSION, 37(1997)53

CHS のイオンサイクロトロン加熱アンテナ

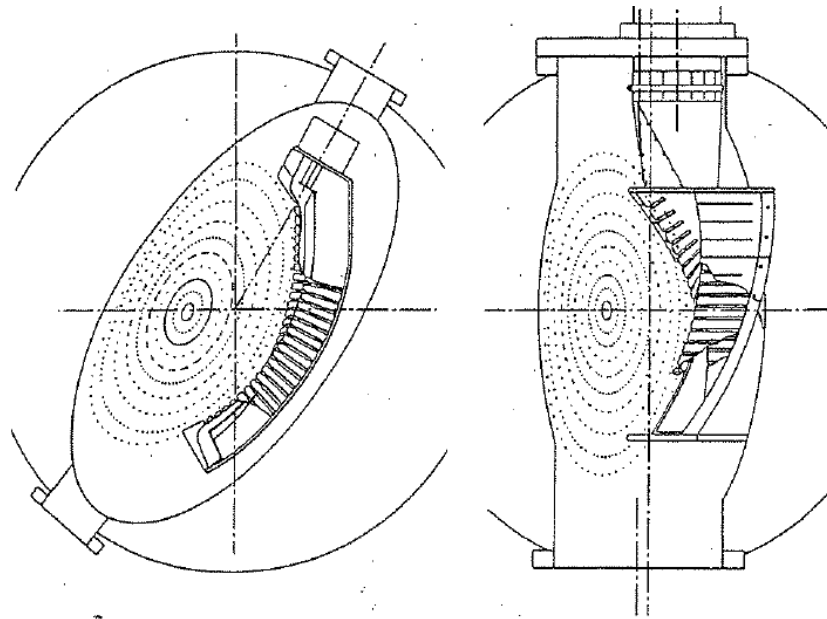


Fig. 1 Cross section of single strap antennas installed at (a); P port, and (b); U port in CHS. The current strap of the P-antenna is 4 cm wide and 40 cm long. The current strap of the U-antenna is 16 cm wide and 40 cm long.

注:

当時建設されたヘリカル系装置

l: トロイダルピッチ数

m: ポロイダルピッチ数

Heliotron-E: $l=2, m=19$

ATF : $l=2, m=12$

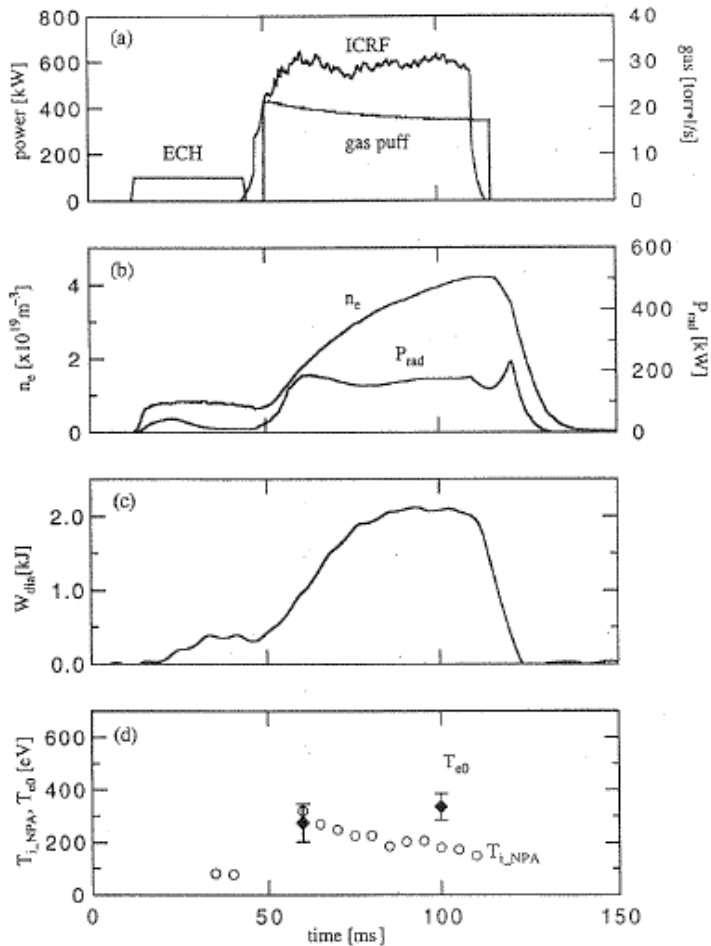
CHS : $l=2, m=8$

LHD ; $l=2, m=10$

トロイダルモード数 m が小さいとヘリシティー混合が起こる。

これは、粒子軌道に悪い条件を与え、波動の伝播領域の対称性にも影響
CHS and LHD では何が起きる？

ボロニゼーション後にプラズマの自己維持 (stand alone mode)に成功



(stand alone mode = 自己維持モード)は(部分的に)不純物問題の克服を意味する。

自己維持プラズマの達成はヘリカル系のイオンサイクロロン加熱を大いに勇気付ける事となった。

その後、Wendelstein-ASの実験結果が続いた。

混合ヘリシティー 何の加熱領域を使うべきか？

CHS ICRF

加熱の共鳴層・遮断層

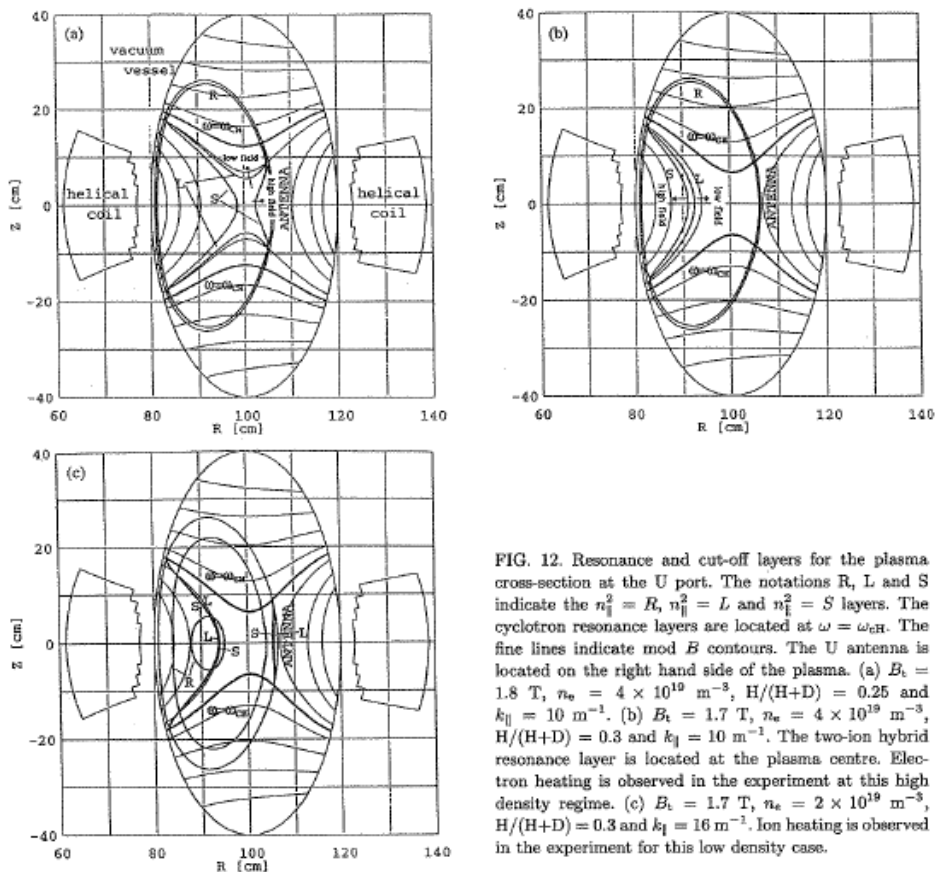


FIG. 12. Resonance and cut-off layers for the plasma cross-section at the U port. The notations R, L and S indicate the $n_{\perp}^2 = R$, $n_{\parallel}^2 = L$ and $n_{\perp}^2 = S$ layers. The cyclotron resonance layers are located at $\omega = \omega_{cH}$. The fine lines indicate mod B contours. The U antenna is located on the right hand side of the plasma. (a) $B_t = 1.8$ T, $n_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $H/(H+D) = 0.25$ and $k_{\parallel} = 10 \text{ m}^{-1}$. (b) $B_t = 1.7$ T, $n_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $H/(H+D) = 0.3$ and $k_{\parallel} = 10 \text{ m}^{-1}$. The two-ion hybrid resonance layer is located at the plasma centre. Electron heating is observed in the experiment at this high density regime. (c) $B_t = 1.7$ T, $n_e = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $H/(H+D) = 0.3$ and $k_{\parallel} = 16 \text{ m}^{-1}$. Ion heating is observed in the experiment for this low density case.

アンテナサイズを考慮すると
「トポロジカルにはヘリカル系の加熱とトカマクの加熱は同相である」と言えない場合もある。

トロイダルモード数 m が小さくなると
ヘリカル対称性が損なわれる

波動伝播特性にも大きく影響

CHSイオンサイクロトロン加熱実験の結論

CHS の自己維持モードはボロニゼーションによる適切な壁処理のもとに電子加熱の条件のもとに得られた。

S. Masuda, et al.,

"Strong Electron Heating in CHS ICRF Heating Experiments"

NUCLEAR FUSION, 37(1997)53

電子加熱のメカニズムに関しては参考：

R. Majeski, C.K. Philips, and J.R. Wilson, Phys. Rev. Letters, 73(2204)1994

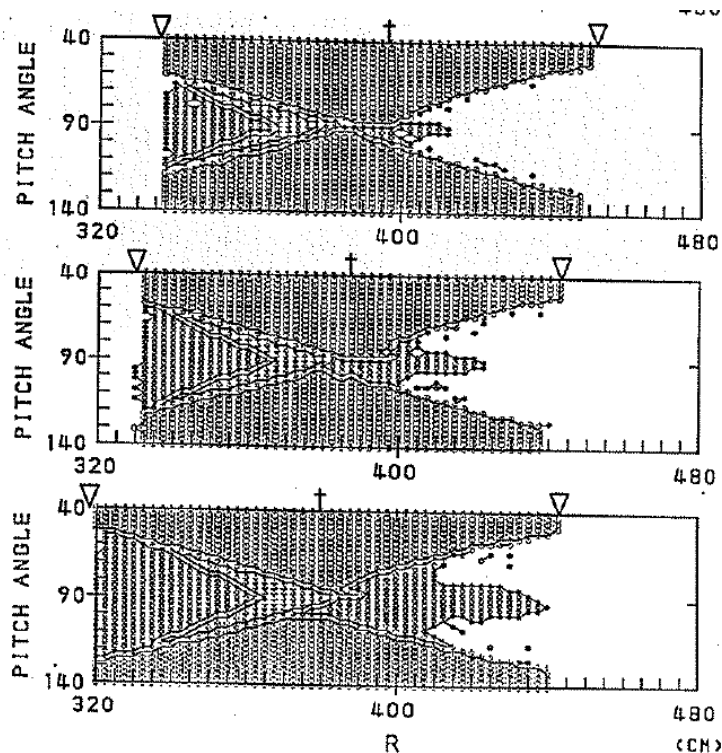
CHSの実験はヘリカル系の加熱を大いに、勇気付けるものであったが高エネルギーイオンの発生に関しては解決を与えたわけではない。

しかし、磁気軸シフトにより閉じ込めが改善され、安定性への悪影響は無いことがCHSで実験的に確立されていた。

装置の大型化もエネルギー緩和を助けるであろう。

ここに希望をつないでLHD実験に突入：

頭を悩ませたLHDの粒子軌道

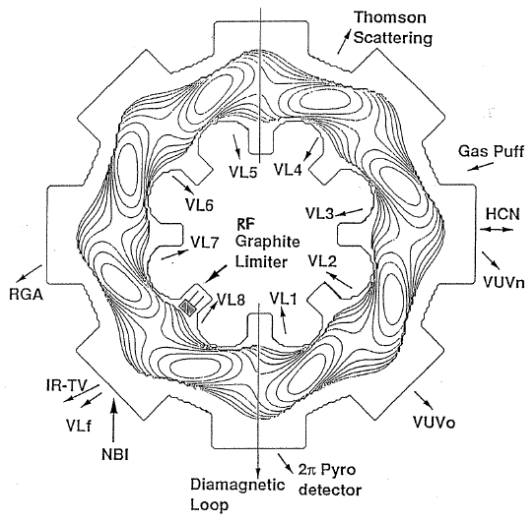


左図はLHD装置設計部会において示された、損失粒子の境界。上村、花谷、佐貫、等々力磁気軸シフトを行わない場合は閉じ込めは非常に悪い。

heliotron-E: $l=2, m=19$
ATF: $l=2, m=12$
CHS: $l=2, m=8$
LHD: $l=2, m=10$

この結果は主半径を4mとして設計していた時代のものです。

ヘリカル系加熱の難渋は粒子軌道にあった。
 LHDイオンサイクロトロン加熱にむけて
 (粒子軌道の問題を考える。)



$$\vec{v}_g = \frac{m}{eB^2} \vec{B} \times (\vec{k}v_{\parallel}^2 + (\mu/m)\vec{\nabla}B)$$

$$\vec{k} = \frac{1}{2} B^{-2} \vec{\nabla}_{\perp} (8\pi p + B^2)$$

$$\vec{k} \approx B^{-1} \vec{\nabla}_{\perp} B$$

$$\vec{v}_g = \frac{m}{eB^2} (v_{\parallel}^2 + \frac{v_{\perp}^2}{2}) \vec{B} \times \vec{\nabla}B$$

自分に課す問題: 上記の式と図を見て、粒子軌道を分類せよ(理解せよ)。

- 1) Transit particle, 2) Localized particle, 3) Blocked particle,
- 4) Localized-blocked transition particle

LHD実験の始まり

当時~現在のイオンサイクロトロン加熱メンバー

LHD加熱実験: T.Mutoh, R.Kumazawa, T.Seki, K.Saito, H.Kasahara, T.Watari
技術部: F.Shimpo, G.Nomura, H.Yokota, A.Kato, C.Takahashi

実験はヘリカル研究部全体の協力によって行われた。

共同研究者: Y.Takase、M.Ichimura、H. Higaki, H.Kasahara

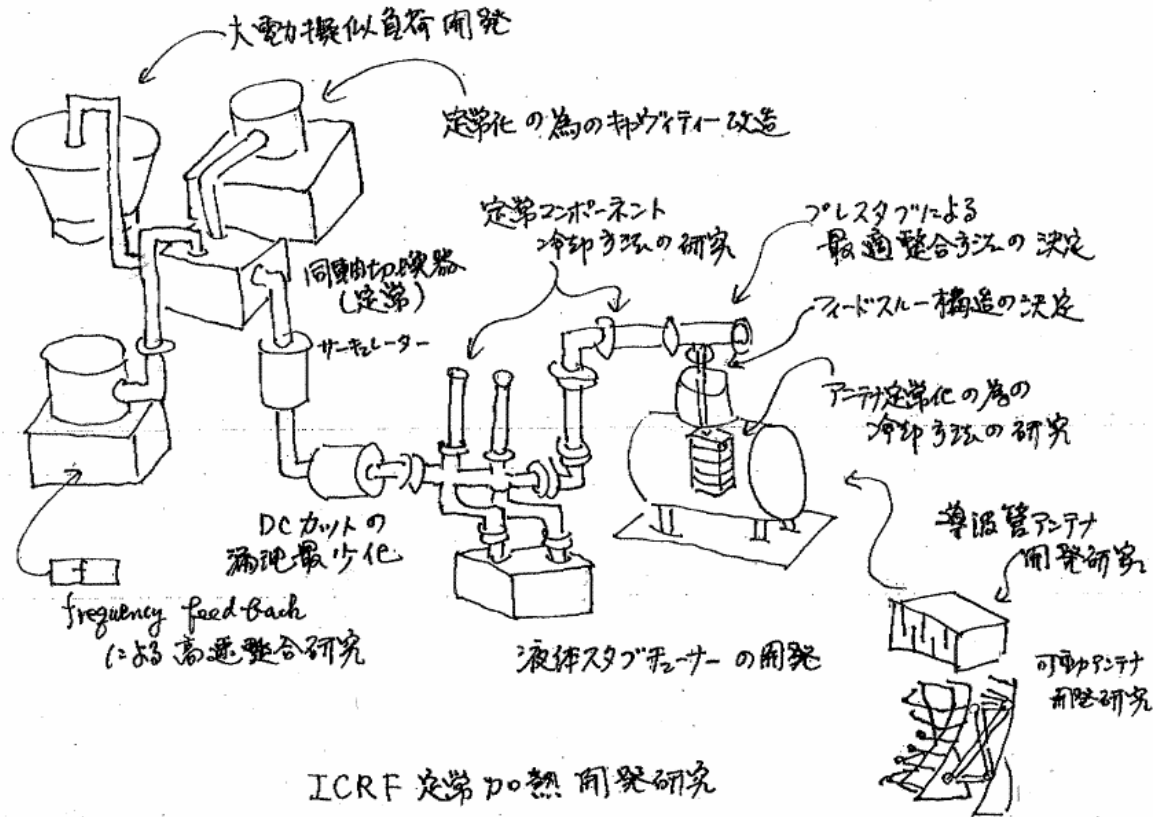
名大エネルギー工学専攻学生: K.Saito, T.Yamamoto, Y.Torii, N.Takeuchi

Side work R&D:

Folded wave guide antenna: Y. Torii +加熱グループメンバー

Comb line antenna: Y.Takase+N.Takeuchi +加熱グループメンバー

LHD実験の始まり。 LHD実験のための準備研究期間があった。



この図は、実験が始まる前のH-7年イオンサイクロトロングループの打ち合わせに使われた内部資料である。

ICRF アンテナと加熱手法の開発

カーボンダイバーター板、チタン壁コーティング、磁気軸シフトにより
存外早く(第3サイクル)加熱に成功



Fig.1 The ICRF antenna used in the experiment. The antenna is located in the toroidal section where the cross section is vertically elongated

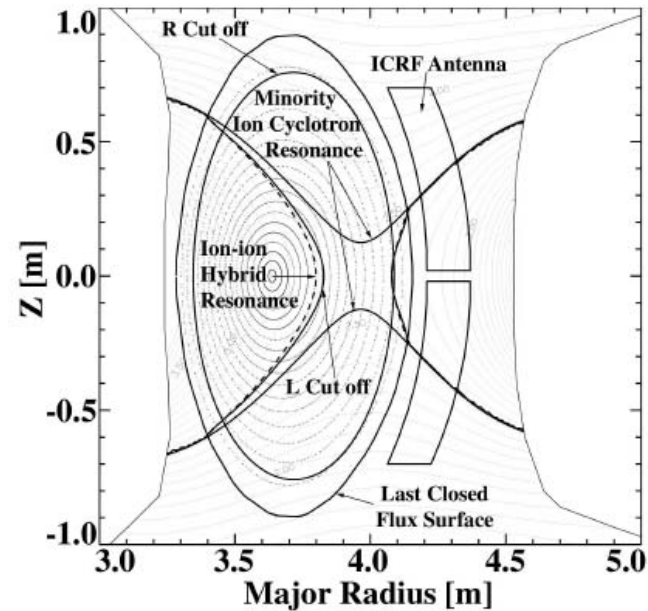


Fig.2 The location of the cyclotron-, two-ion-hybrid-, and cutoff- layers in the optimized heating regime in LHD.

粒子軌道の問題とアンテナ設計に関する制約は同じ根源
「ヘリシティー混合」に根ざしている。
(サイクロトロン共鳴層がアンテナを切る問題は後で)

イオン加熱によるLHD加熱に成功

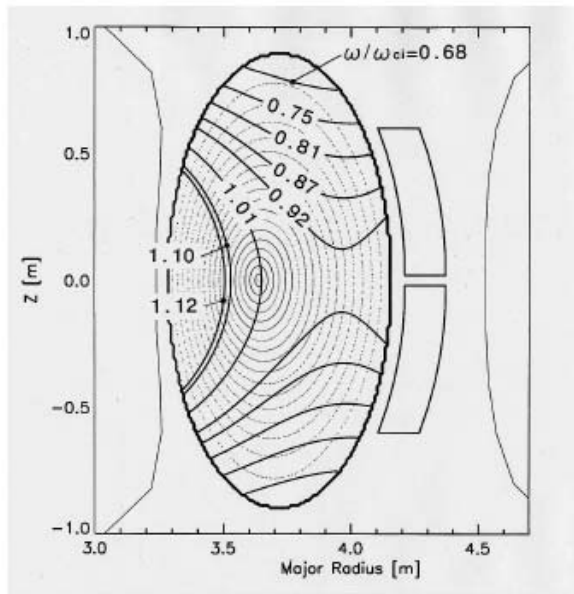


Fig.5 The location of the cyclotron layers: it moves with the magnetic field intensity

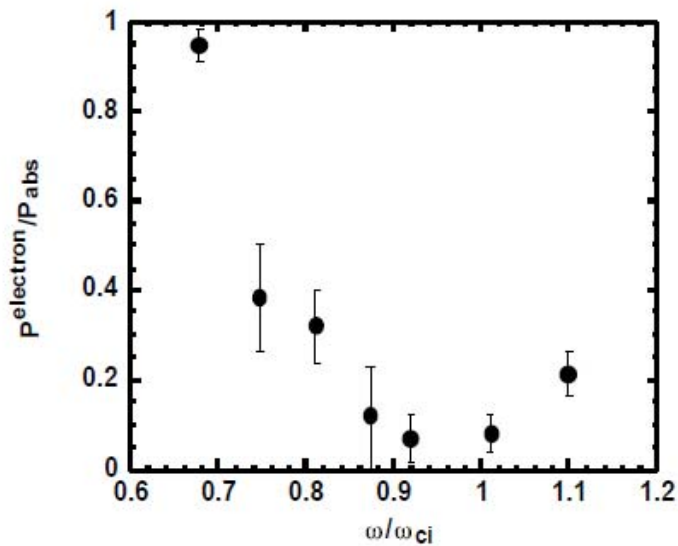


Fig.6 The fraction of the power absorbed by electrons.

詳細な研究により加熱機構も明らかにされた
e.g., Saito et al., Nuclear fusion,41(2001)1021

典型的放電と1分放電

(presented at Sorrento IAEA Conf.)

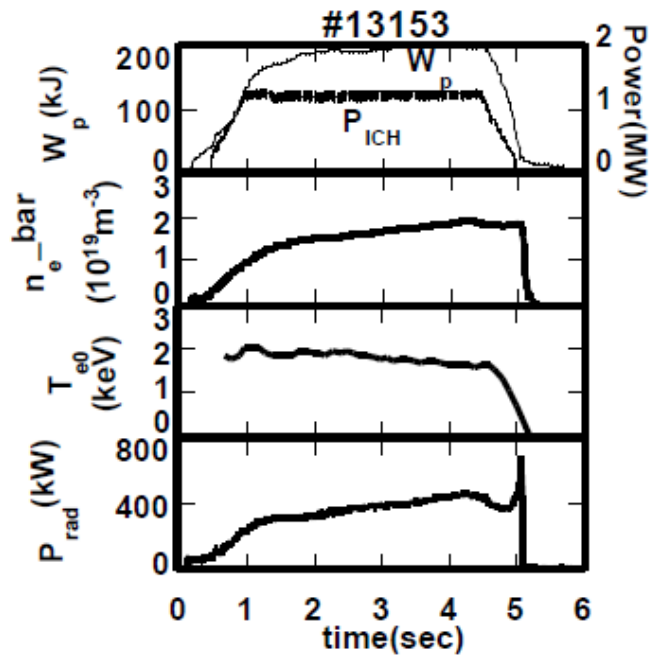


Fig.7 Time evolutions of the plasma sustained by ICRF only.

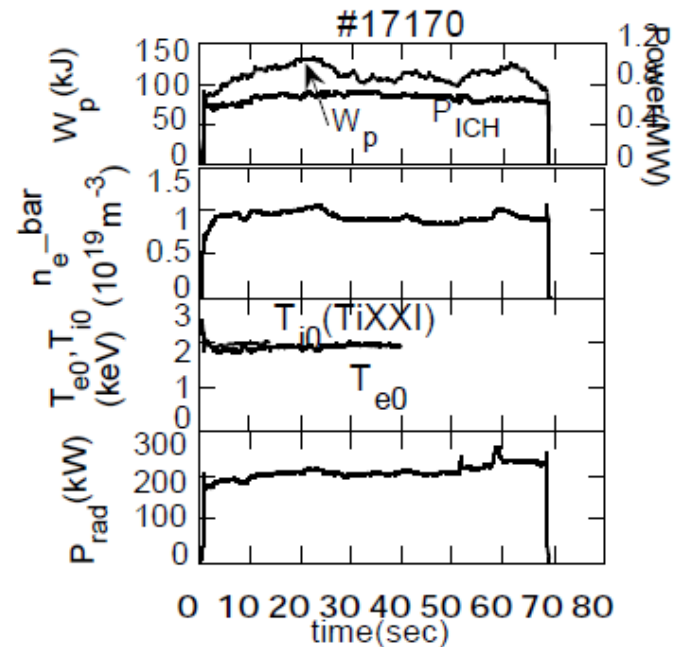


Fig.8 Time behavior of ICRF sustained longest pulse shot

他の加熱手法に劣らぬ加熱効率

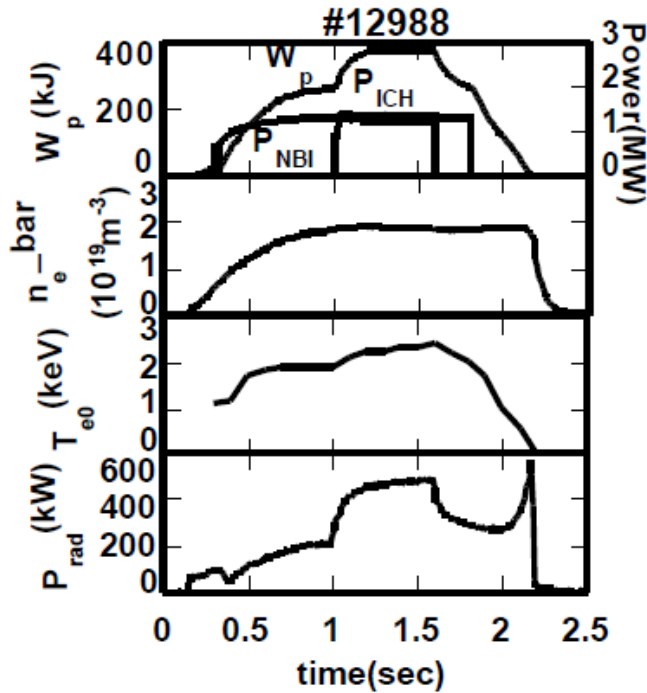


Fig.9 ICRF Heating superposed on NBI target plasma

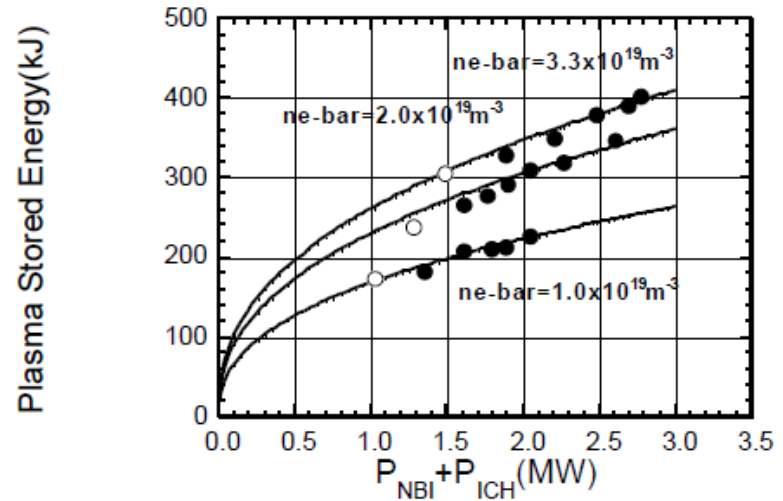


Fig.10. Power dependence of the stored energy. Open circles represent NBI shots and filled ones represent NBI plus ICRF shots

LHDでのイオン加熱の成功は磁気軸シフトによるイオン粒子軌道の改善による。

高エネルギー粒子の閉じ込めは重要な要素

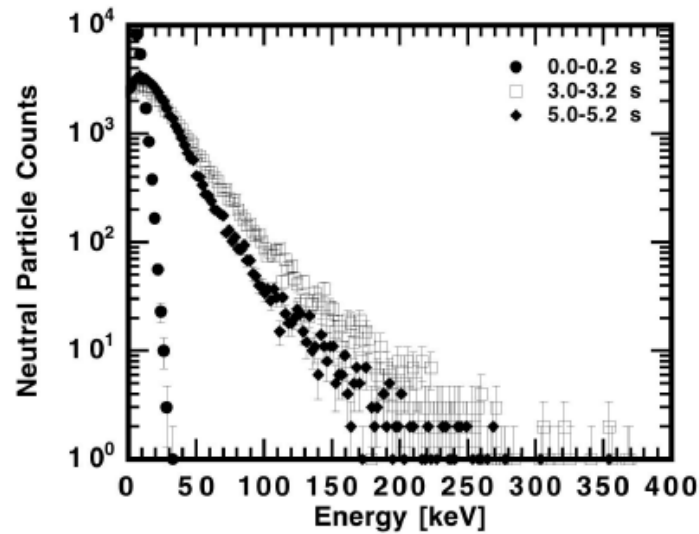


Fig.11 Spectrum of high energy ions. The symbols designate the time after the RF is turned on.

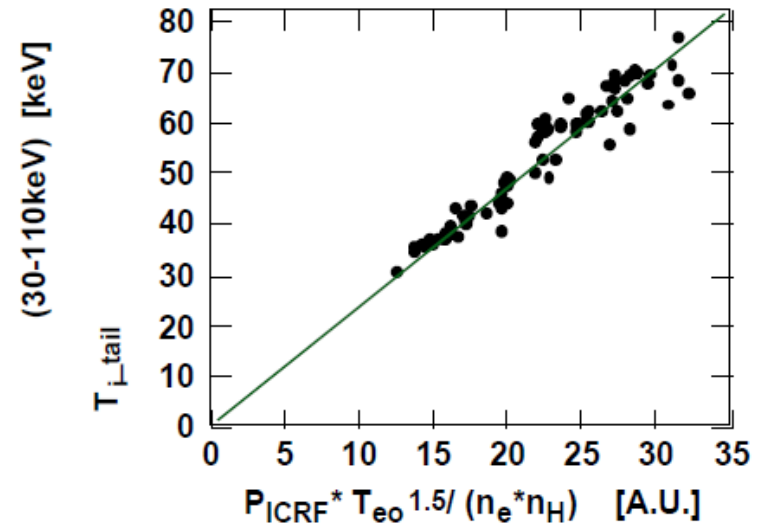


Fig.12 The power dependence of effective temperature of minority ions

高エネルギー粒子が閉じ込められていることも確認された。

磁気軸シフトによる粒子起動の改善 momoko コードによる計算例

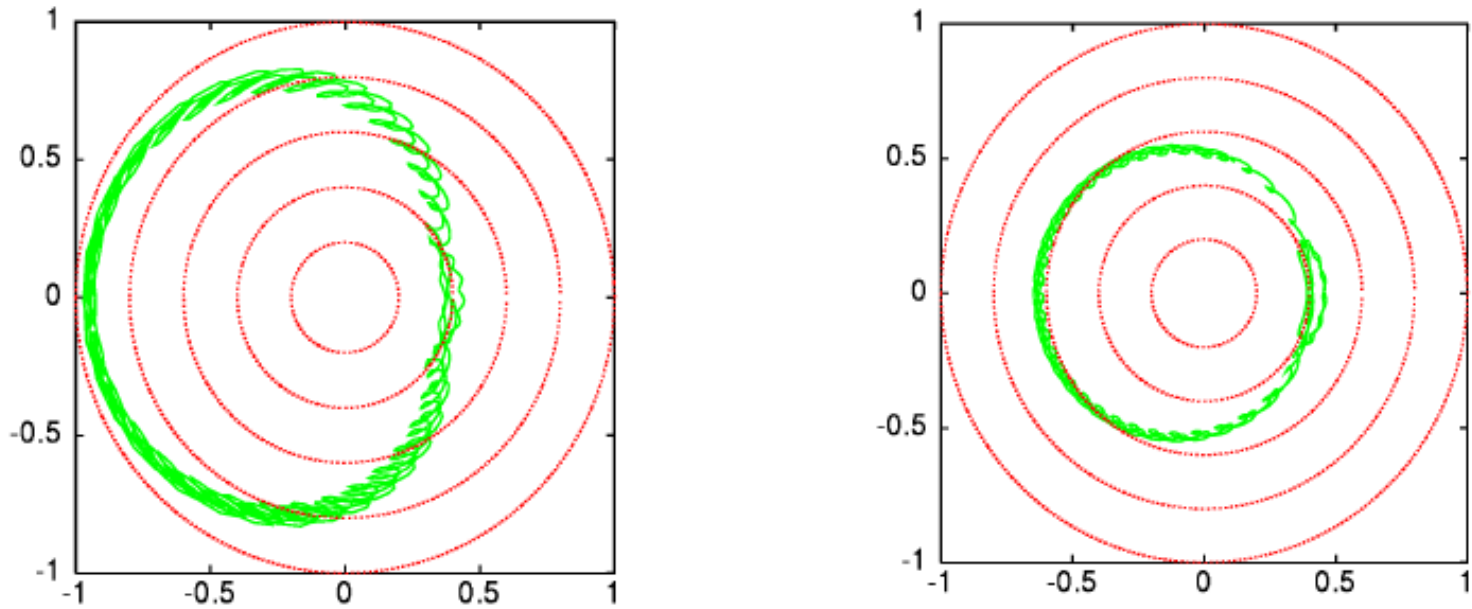
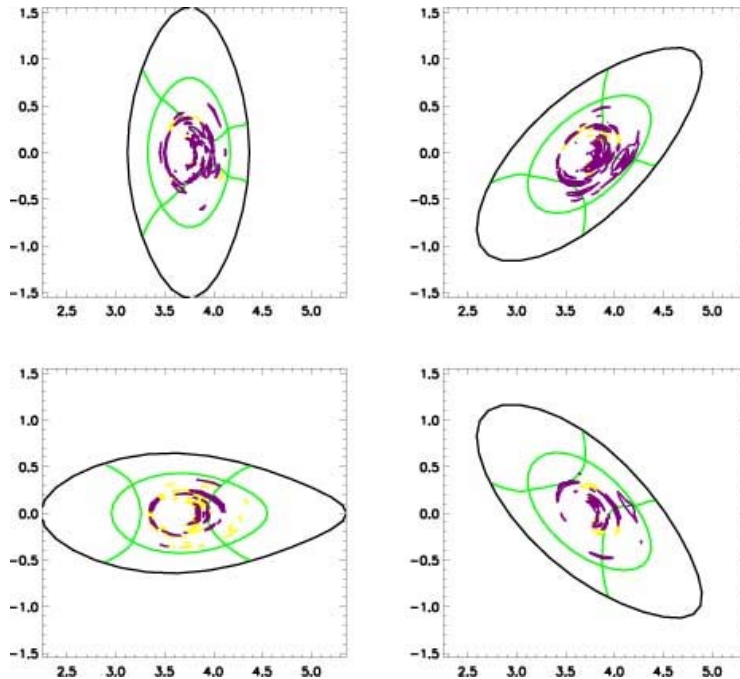


Fig.13. The drift surface of a trapped particle in the case of; (a); $R=3.75$ m and (b); $R=3.6$ m

TASK/WM(福山淳コード)のLHD計算例



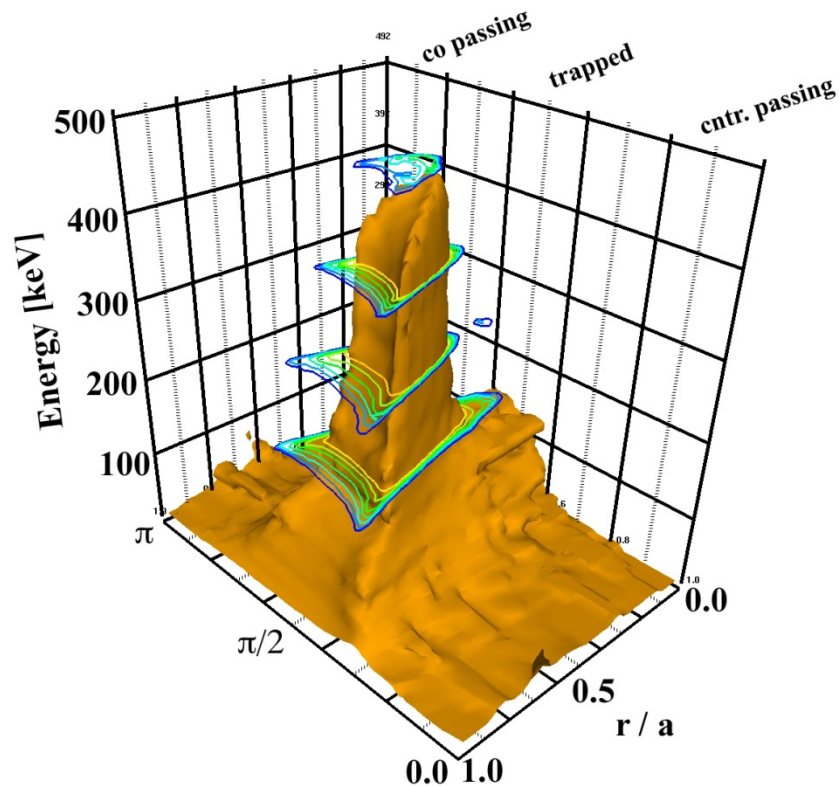
38.47MH, 2.75Tをシミュレートした
ものです。

H:10%、He:90%です。
ポロイダル断面でのHイオンへの吸
収分布です。
紫色の所が波からイオンへ吸収さ
れたパワー。
黄色の所はその逆のイオンから波
へのパワーです。
強度分布ではなく、吸収が正か負
のみの表示になっています。

福山先生提供
関哲夫の計算による。

トラス波動物理の面白さは、モード結合にある。

ヘリカル系加熱における速度分布関数 (GNET)



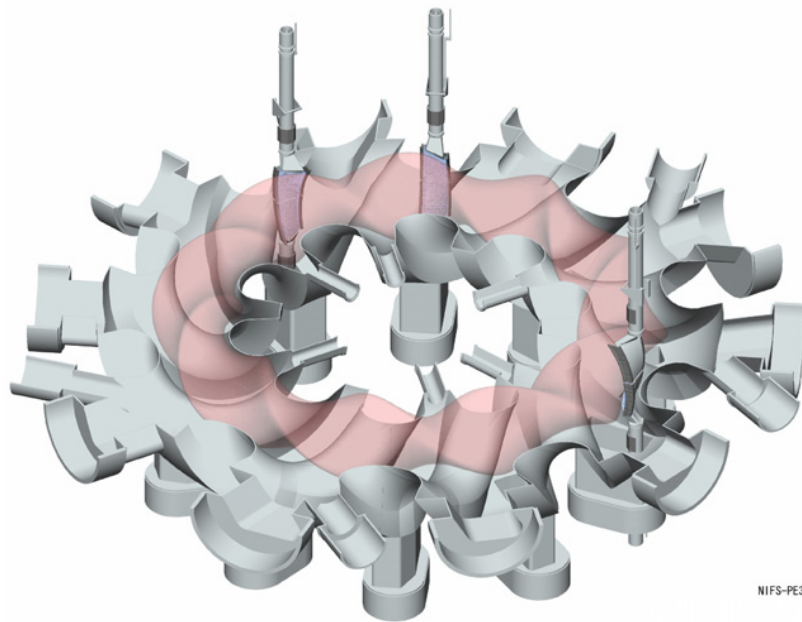
加熱項を加えた運動論的方程式を解くコードは村上定義によって完成した。

村上定義先生提供

より長く(定常加熱)より高く(高電力) 新時代の加熱

3.5U&L antenna

4.5U&L antenna



NIFS-PE391

7.5U&L antenna

アンテナ及び高周波源の増力
により3MWの加熱を達成

アンテナの増設は定常実験にも
役立った。

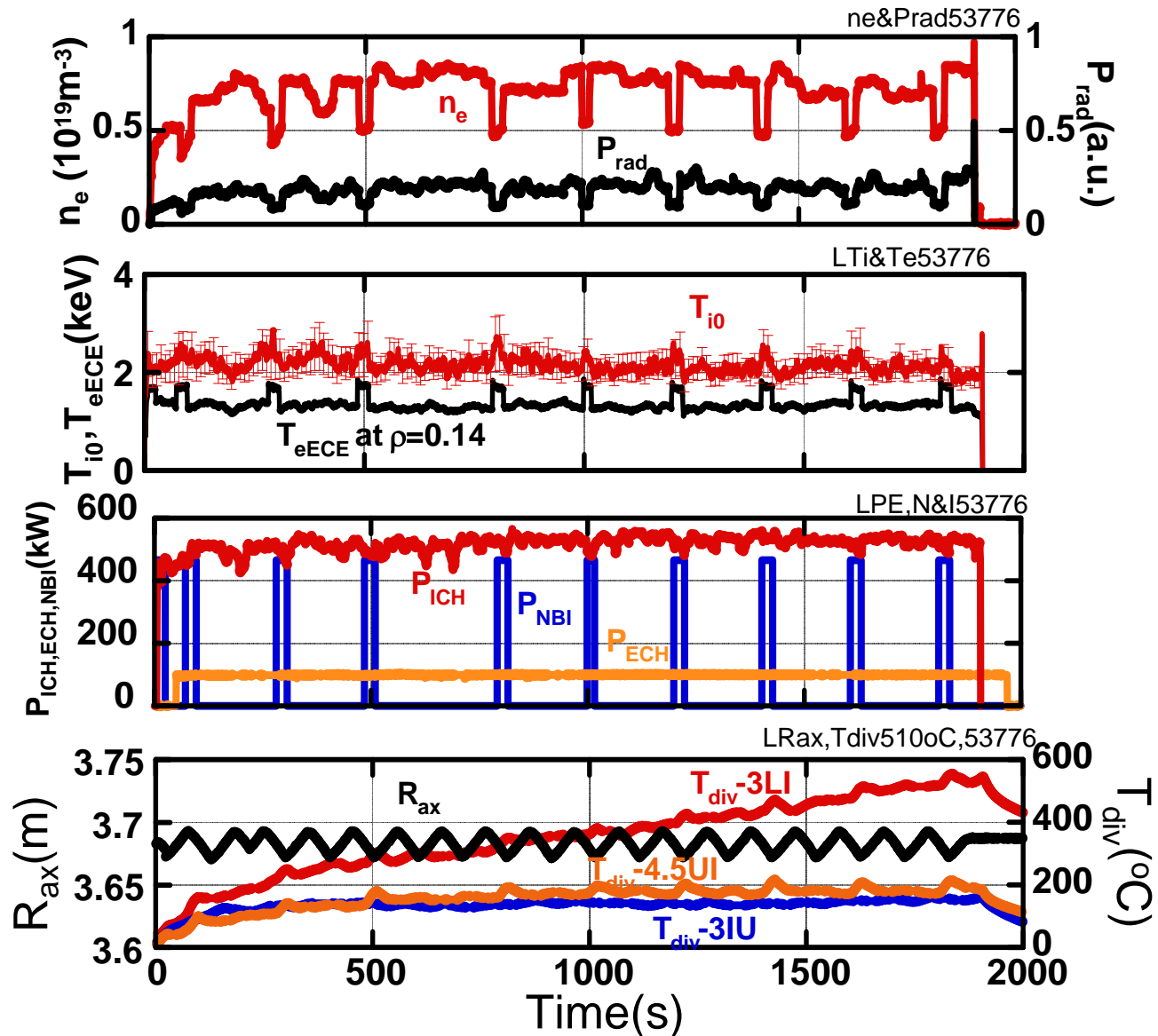
Duration time:
31m. 45s=1905s

Heating power:
 $P_{\text{tot}}=0.68\text{MW}$
 $P_{\text{ICH}}=0.52\text{MW}$
 $P_{\text{ECH}}=0.1\text{MW}$
 $P_{\text{NBI}}=0.063\text{MW}$

Input heating
energy:
 $W_h=1.29\text{GJ}$

Magnetic axis
swing:
 $3.67\text{m} < R_{\text{ax}} < 3.7\text{m}$
every 105s.

Plasma:
 $n_e \sim 0.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$
 $T_{i0} \sim 2.0 \text{keV}$



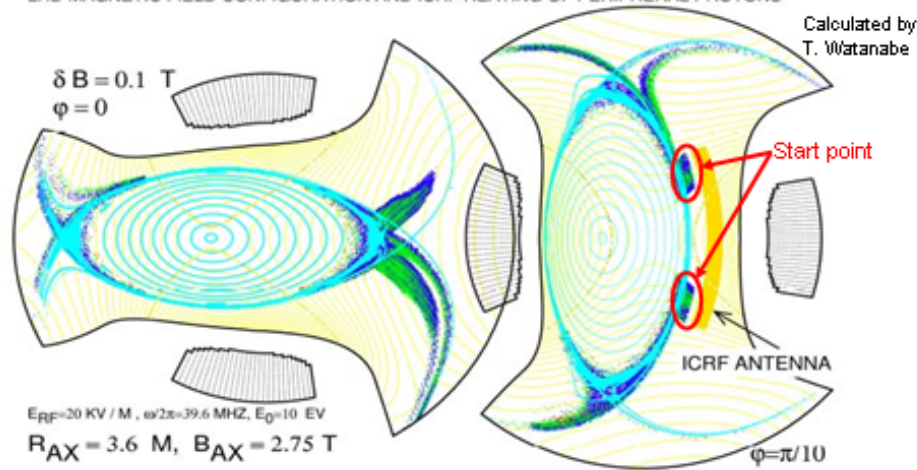
磁力線がアンテナを切る問題



High-energy ions accelerated by near RF electric field in front of antenna outside go to divertor plates



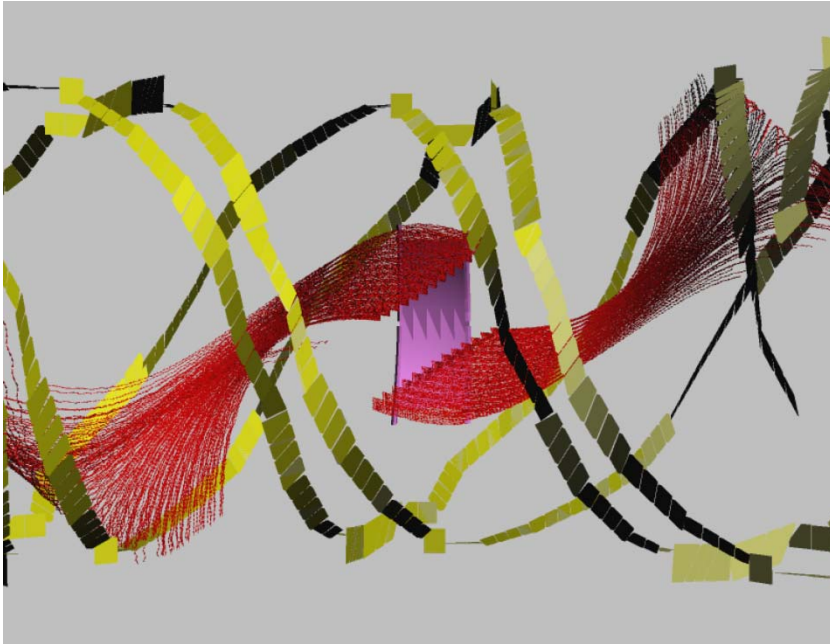
LHD MAGNETIC FIELD CONFIGURATION AND ICRF HEATING OF PERIPHERAL PROTONS



- Ions can be accelerated at cyclotron resonance layer at front of ICRF antenna
- These particles may cause sparks and iron influx

ダイバーター摺動面の掃引が定常加熱に大きな効果があった。中村幸男
液体整合器の実時間帰還制御。熊澤隆平
ダイバーターの冷却強化 LHD 本体グループ

定常加熱の成功には精緻な計算器コードが不可欠であった。



渡辺二太先生：提供

図は、p-3.5アンテナを切る
サクロトン共鳴面から出発した
粒子が上下のダイバーター版を
打つ様子を示す。

3つ目の山を越えた感懐：

トカマク ヘリカルに関するプラズマ加熱を統一的に理解し、
粒子軌道の問題を当面克服し、ヘリカル系の長所を生かした
定常(超パルス)実験において核融合に寄与することができた。

連携研究推進センターにて

国際連携研究部門： 松岡啓介、須藤滋、佐藤元泰

ゾーナルフロー・ドリフト波・乱流などの基礎的理解をもとめて

T.Watari, Y.Hamada, A. Fujisawa, K.Toi, and K.Itoh, Phys. Plasmas **12**, 062304-1-8 (2005)
"Extension of geodesic acoustic mode theory to helical plasmas",

T.Watari, Y.Hamada, T.Notake, N.Takeuchi, and K.Itoh,
"Geodesic acoustic Mode oscillation in the low frequency Range", Physics of Plasmas, 13(2006)062504-1~13

T.Watari, Y.Hamada, A.Nishizawa, T.Notake, N.Takeuchi, Plasma Science and Technology, 8(2006)105~109
"Zonal flow and geodesic acoustic mode oscillations in tokamaks and helical systems"

T.Watari, Y.Hamada, A.Nishizawa, and J.Todoroki, Phys. Plasmas, vol.14, No-112512, (2007),
"Unified linear response function for zonal flows with full finite orbit effects"

伊藤公孝先生紹介の以下の論文を座右に、池魚思故淵。

"zonal flows in plasma- a review"

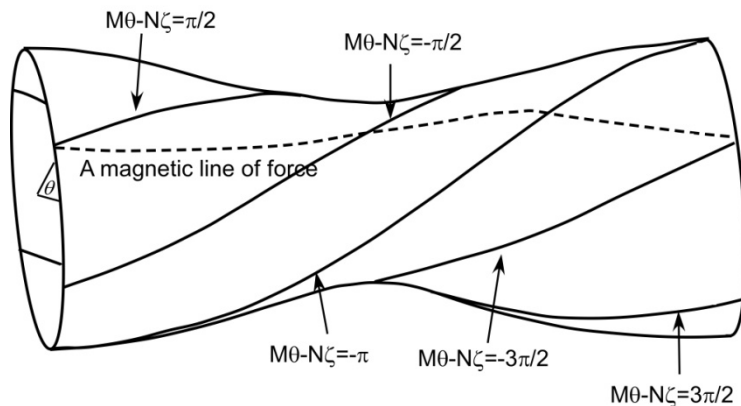
P.H.Diamond, S-I. Itoh, K. Itoh, and T.S.Hahm, P.P.C.F, 47(2005)R35-R161

測地線振動は磁力線の測地線曲率によって起こる。

藤沢、濱田、井戸 らの実験データに刺激され、

T.Watari, Y.Hamada, A. Fujisawa, K.Toi, and K.Itoh, Phys. Plasmas **12**,
062304-1-8 (2005)

"Extension of geodesic acoustic mode theory to helical plasmas",



ヘリカル系粒子軌道の考察が
非常に役にたった。

○ヘリカル系にも測地線振動があり得る(物理描像)。

○ $T_e/T_i > 1$ のプラズマでは減衰が小さい。

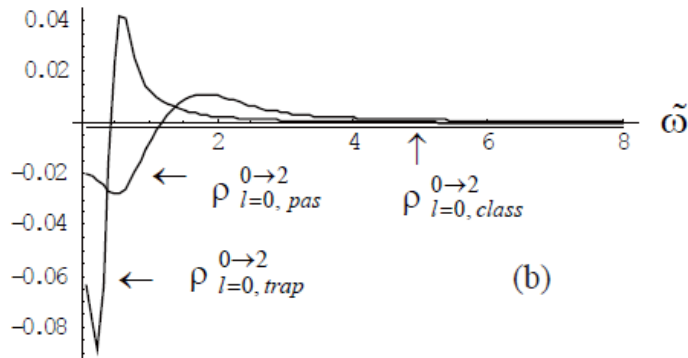
トロイダルモード数が高いと(結合長が短いので)ヘリカル型の測地線振動は起こりにくい。

応答関数からみたゾーナルフロー

T.Watari, Y.Hamada, A.Nishizawa, and J.Todoroki, Phys. Plasmas, vol.14, No-112512, (2007),

"Unified linear response function for zonal flows with full finite orbit effects"

$$\phi_{l=0}(\omega, k_r) = \sum_{l'} \frac{\rho_{ext}(\omega, k_r)}{D(\omega, k_r)}, \quad D(\omega, k_r) \propto (a - b(\omega))k_r^2 + c(\omega)k_r^4$$



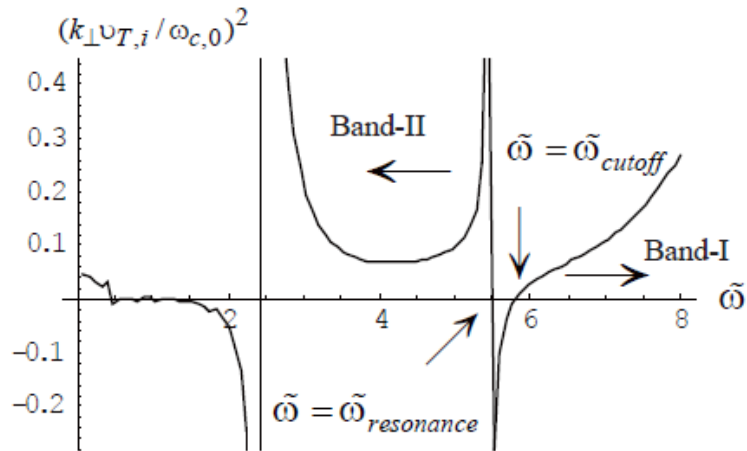
dressed test particleと 同構造、
実は強制振動の一般形

C.F. Balescu – Lenard collision term

$$\frac{\partial f(\vec{v})}{\partial t} \Big|_c = \frac{\pi \omega_p^4}{n} \sum_{\vec{k}} \frac{\vec{k}}{k^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{v}}$$

$$\int d\vec{v}' \frac{\vec{k}}{k^2} \cdot \left[\left(\frac{\partial}{\partial \vec{v}} - \frac{\partial}{\partial \vec{v}'} \right) f(\vec{v}) f(\vec{v}') \right] \frac{\delta(\vec{k} \cdot \vec{v} - \vec{k} \cdot \vec{v}')}{|\varepsilon(\vec{k}, \vec{k} \cdot \vec{v})|^2}$$

測地線振動の伝播構造



有限ラーマー半径効果
～古典分極電流

有限軌道半径効果
～新古典分極電流

軌道に沿う積分の観点からみれば、有限ラーマー半径効果と有限軌道効果は同じ構造をしている。
イオンバーンスタイン波の連想。二つ(複数)の伝播領域の存在。

参考：この論文のタイトルは？

“Unified Theory of Relaxation in Plasmas, I. Basic Theorem”
, Kihara Taro, & Aono Osamu, JSPS,
に因む。

違和感のない(懐かしい)発想

"zonal flows in plasma- a review"

P.H.Diamond, S-I. Itoh, K. Itoh, and T.S.Hahm,

P.P.C.F,

47(2005)R35-R161

Random Shearing:

$$\rho_{ext} = -\frac{1}{i\omega} \vec{\nabla} \cdot \frac{1}{B^2} [nm_i (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}\vec{V})] \times \vec{B} \approx -\frac{1}{i\omega} \left\langle \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{B^2} f_{\theta} B_{\phi} \right) \right\rangle$$
$$\propto \tilde{\phi}'_{ZF} \left| \tilde{\phi}_{drift\ wave} \right|^2$$

(Diamond, Rosenbluth et al., Phys.Rev.Letters,84(2000)4842)

Winsor Hallatschek mechanism

K.Itoh, K.Hallatschek, S-I, Itoh, p.p.c.f, 47(2005)451

dressed test particle から dressed test modeへと進化していた。

加熱電流駆動の理解とactionの保存:

加熱の一般的ルール:

プラズマ波動を使って波動のエネルギー及び運動量を輸送しその散逸を利用して加熱電流駆動する。

このとき、周辺plasmaでの散逸はエネルギー・運動量の輸送を妨げる。

ray tracing analysis

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \vec{k}} \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial \vec{r}} \quad I = I_0 \exp(-i \int \gamma dt)$$

wave kinetic equationはこれと同等

wave kinetic equation

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{v}_g \cdot \vec{\nabla} N + \frac{d\vec{k}}{dt} \cdot \vec{\nabla} N = -i(\vec{E}^* \cdot \vec{D}_a \cdot \vec{E}) / 4\pi$$

加熱・電流駆動を越えた高周波への応用:

小特集

高周波による核融合プラズマ制御の進展

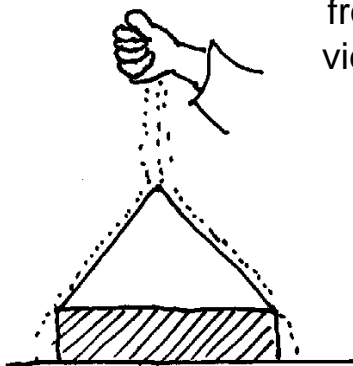
- | | |
|--|--------------|
| 1. 高周波を用いたプラズマ制御とは - 最新の研究動向をふまえて - | 渡利 徹夫, 高瀬 雄一 |
| 2. 電子サイクロトロン波による局所加熱・電流駆動を利用した分布制御 | 池田 佳隆, 久保 伸 |
| 3. 低域混成波を用いた電流分布制御と先進トカマク/定常プラズマ運転への応用 | 井手 俊介 |
| 4. イオンサイクロトロン周波数帯加熱によるプラズマ制御 | 熊沢 隆平 |
| 5. ITERにおける高周波加熱・電流駆動の計画と展望 | 今井 剛 |

同じ概念が高周波を使った
プラズマ制御に利用できる。

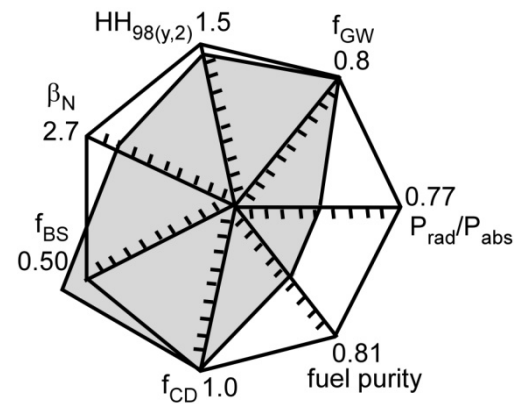
$$\rho_{ext} \propto |\phi_{wave}|^2, \quad \rho_{ext} \propto |\phi_{TAE}|^2 \quad e.t.c.$$

Fig.5. The sand pile model.

In dense high temperature plasmas, the realized plasmas are already subject to a kind of self-regulation mechanism, both from MHD- and micro- instability points of views. How can we control plasmas under such conditions?



Integration を目指した研究では
Factor 2 の改善が全体設計に
マージンをあたえる。



最後に謝辞

最後に:

国際核融合実験装置ITER(トカマク)が出発し、LHDもヘリカル系に希望を与えた。

国際化した核融合研究のなかで研究は新しい形態を必要とするであろう、

そのなかで、日本の研究者は誇りをもって生きてください。

国際的に通用する誇りとは、研究者個体の実存の意識であろう。

A dressed particle is still an individual particle.

私の研究生活は真に楽しいものでした。

一重に皆様の、ご協力ご指導の賜物です。

1. 研究所内の研究者、技術部、事務部の皆様ありがとうございました。

2. 国内の大学の研究者、原子力研究所の皆様有難うございました。

3. 名古屋大学の学生の皆様有難うございました。

4. 日米共同研究で付き合った研究者の皆様

5. 日中共同研究で付き合った研究者皆様
みんな有難う。