

# ミラー型閉じ込め方式の研究開発の現状について

筑波大学プラズマ研究センター長  
玉野 輝男

平成9年2月19日

於

第122回原子力委員会核融合会議

## ミラー型閉じ込め方式の位置付け

昭和61年「大学における今後の核融合研究について」  
(学術審議会特定研究領域推進分科会核融合部会報告)

- ・ 基本的に重要な諸問題を先駆的研究成果を基に解決していくためにタンデムミラー等の各種方式の研究を推進する。
- ・ 開放端系（ミラー等）の環状磁場系と異なった原理と特徴を生かした先駆性のある研究成果を一層積み重ねる。

平成4年「第三段階核融合研究開発基本計画」  
(原子力委員会)

- ・ 今後の研究開発の成果によってはトカマク型を上回る閉じ込めを実現する可能性を有していること、トカマク型装置による研究開発への貢献が期待されること等から、ミラー型装置についても引き続き研究を進める。

## 最近のミラー型閉じ込め方式

### タンデムミラー方式

## タンデムミラー方式の特徴

- ・ 磁場と電位を併用した閉じ込め方式
- ・ 定常で、プラズマ電流に起因した不安定性がない閉じ込め方式
- ・ 開放端で熱・粒子流の処理や直接エネルギー変換の可能な系
- ・ 高ベータで、D-He3核融合の可能性が考えられる系

## 世界のタンデムミラー研究

日本が主体：

筑波大学プラズマ研究センター

GAMMA10

世界最大：全長 27 m、中央磁場 < 6 kG

京都大学工学部電子工学

HIEI

全長 14 m、中央磁場 < 1 kG

その他：

Budker Institute of Nuclear Physics

AMBAL-M

全長 27 m、タンデムミラーへ改造中

Korea Basic Science Institute

HANBIT

TARA(MIT)の再建、初期運転開始

Kurchatov Institute

理論、炉概念の研究

## 現在のタンデムミラー研究の目標

### タンデムミラー方式の原理の実証

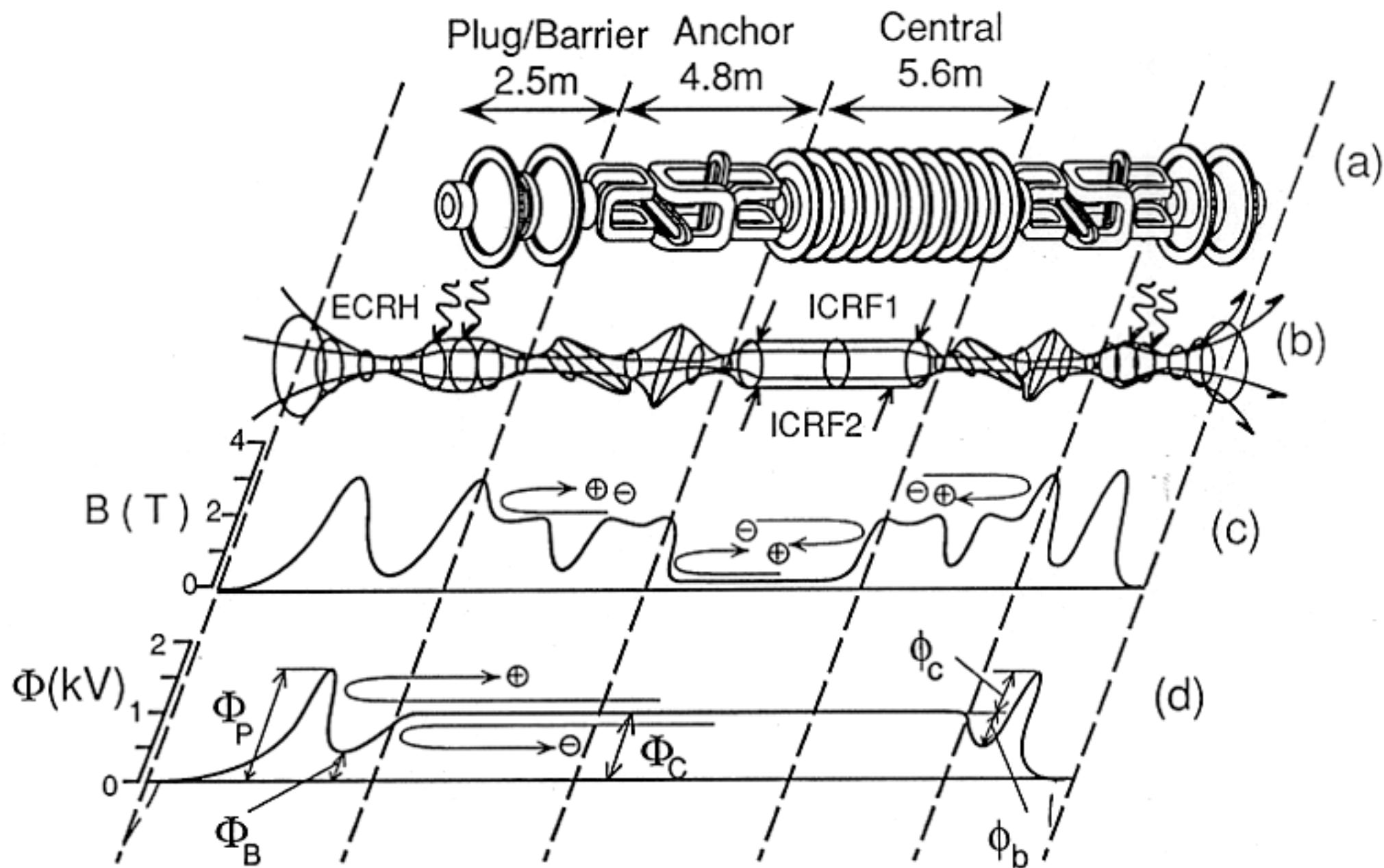
#### 主な成果：

- ・ 電位生成：マイクロ波加熱（ガンマ10） $\sim 2$  kV  
高周波加熱（HIEI）
- ・ 閉じ込め  
径方向：古典的電位閉じ込め  
軸方向：良好  
径方向電位に起因するプラズマシアー流によるプラズマ揺動抑制
- ・ 安定な非等方プラズマ閉じ込め（高イオンモード）  
イオン温度（磁場平衡方向） $\sim 0.5$  keV  
（磁場垂直方向） $\sim 10$  keV  
熱核融合反応による中性子観測
- ・ MHD安定性確認  
 $\beta$  値（プラズマ圧力／磁気圧）  
 $\sim 5\%$ （GAMMA10：平均極小磁場）  
 $\sim 14\%$ （HIEI：高周波動重力）

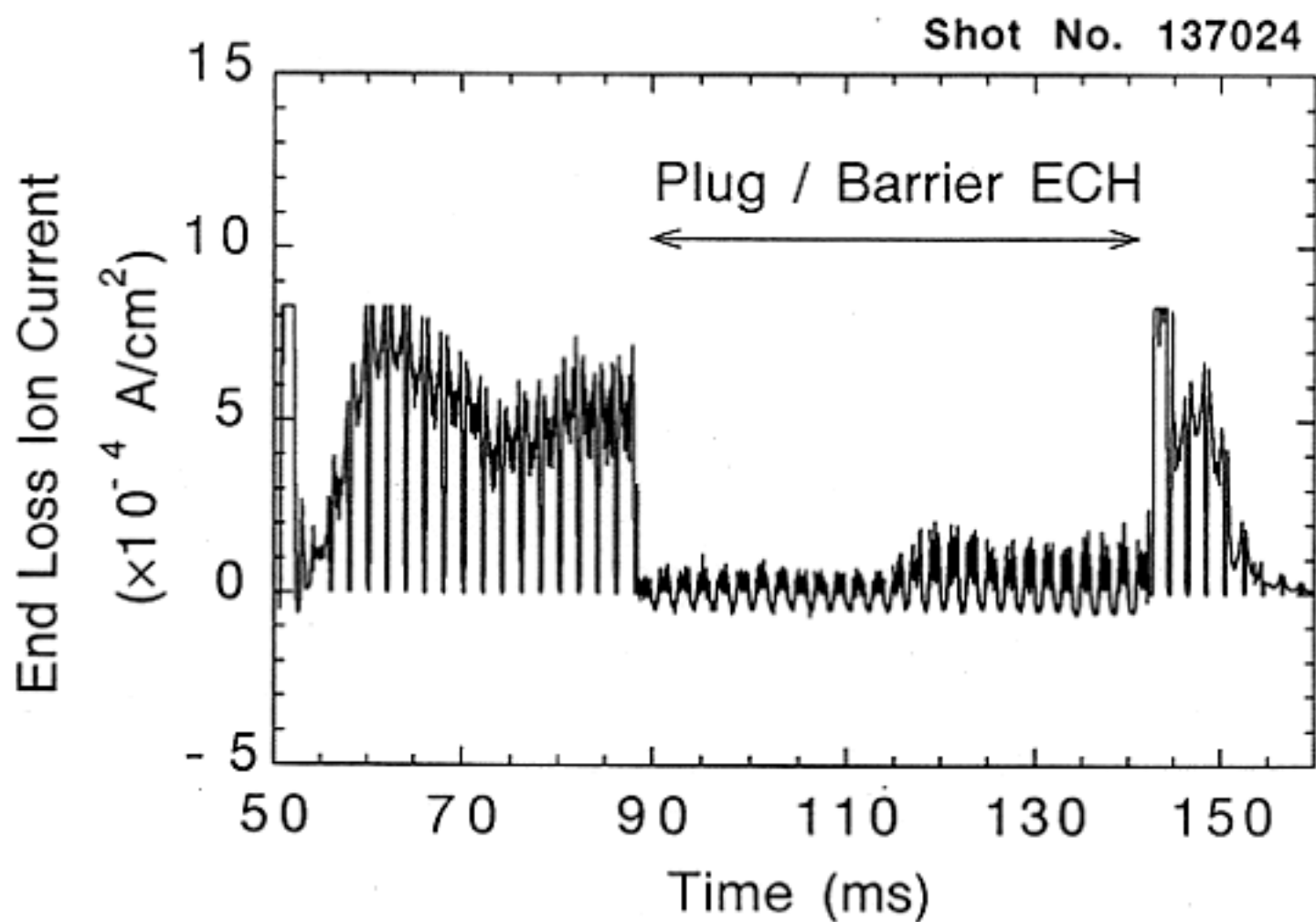
## まとめ

- ・ 現存の実験において、磁場と電位を用いた極めて良好な閉じ込めが得られ、タンデムミラー閉じ込め原理の実証と基礎データの蓄積が進行している。
- ・ 研究を更に進行させるために、  
「長時間放電のための加熱電源整備（小規模）」  
及び  
「高磁場化のためのコイル改造、電源増強（中規模）」  
が必要な段階に達している。  
このレベルまでは、大学規模でも研究推進が可能と考えられる。
- ・ 現時点で、  
「更に大規模なスケール・アップ」  
も過去の核融合開発経過に照らしてみると論外ではないが、大学の機構で行うのが妥当かどうか検討を要する。

# Schematics of GAMMA 10



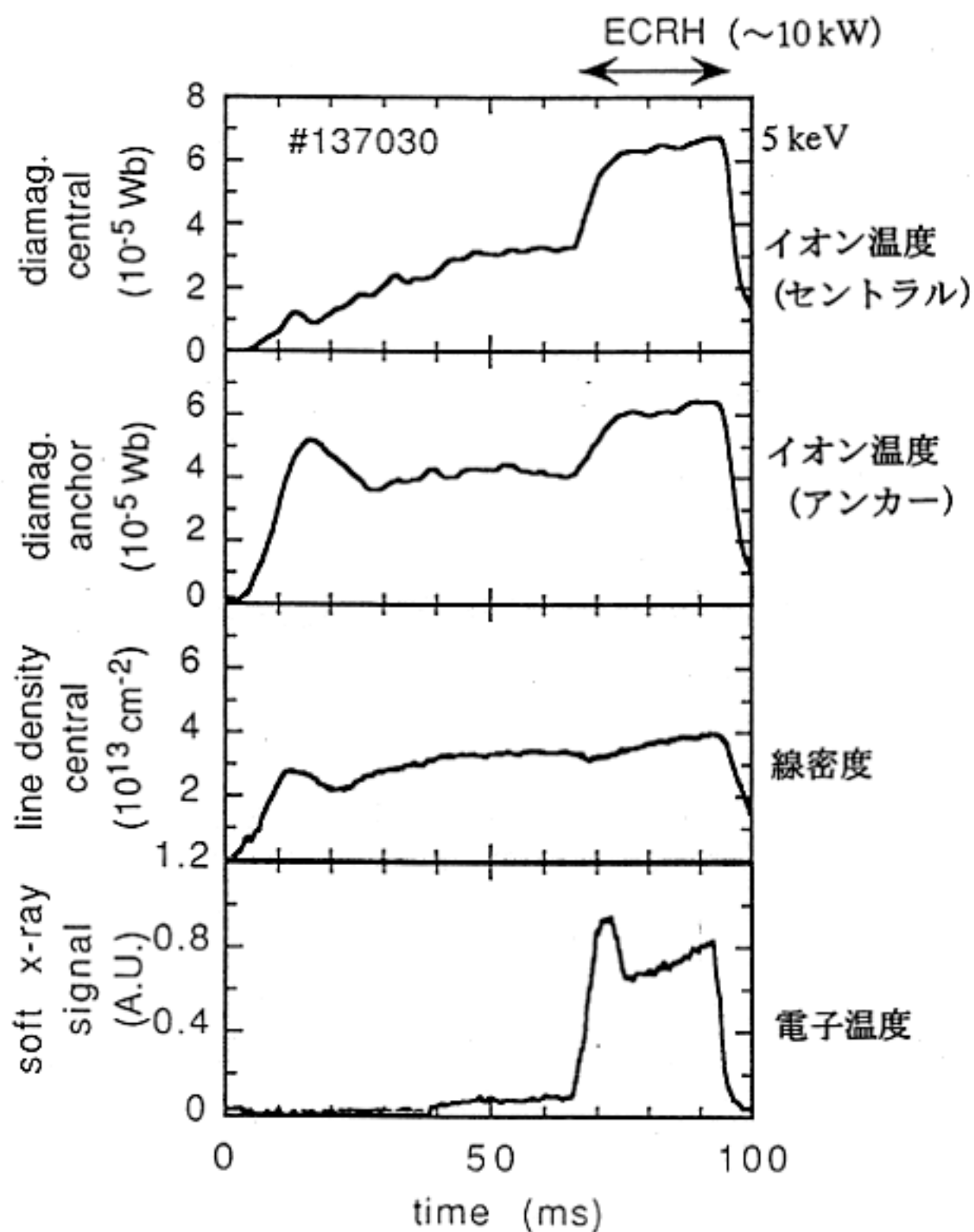
# 閉じ込め電位形成による端損失イオン軽減



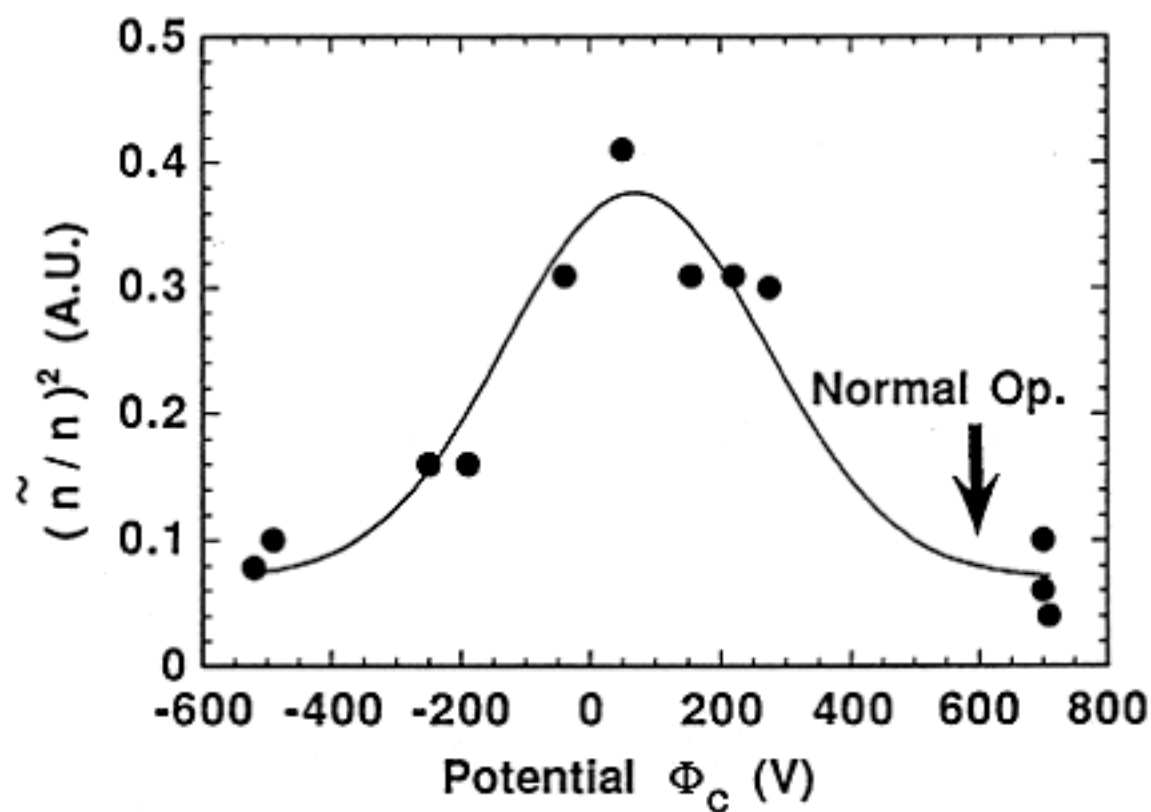


# ECRH in a Hot Ion Mode

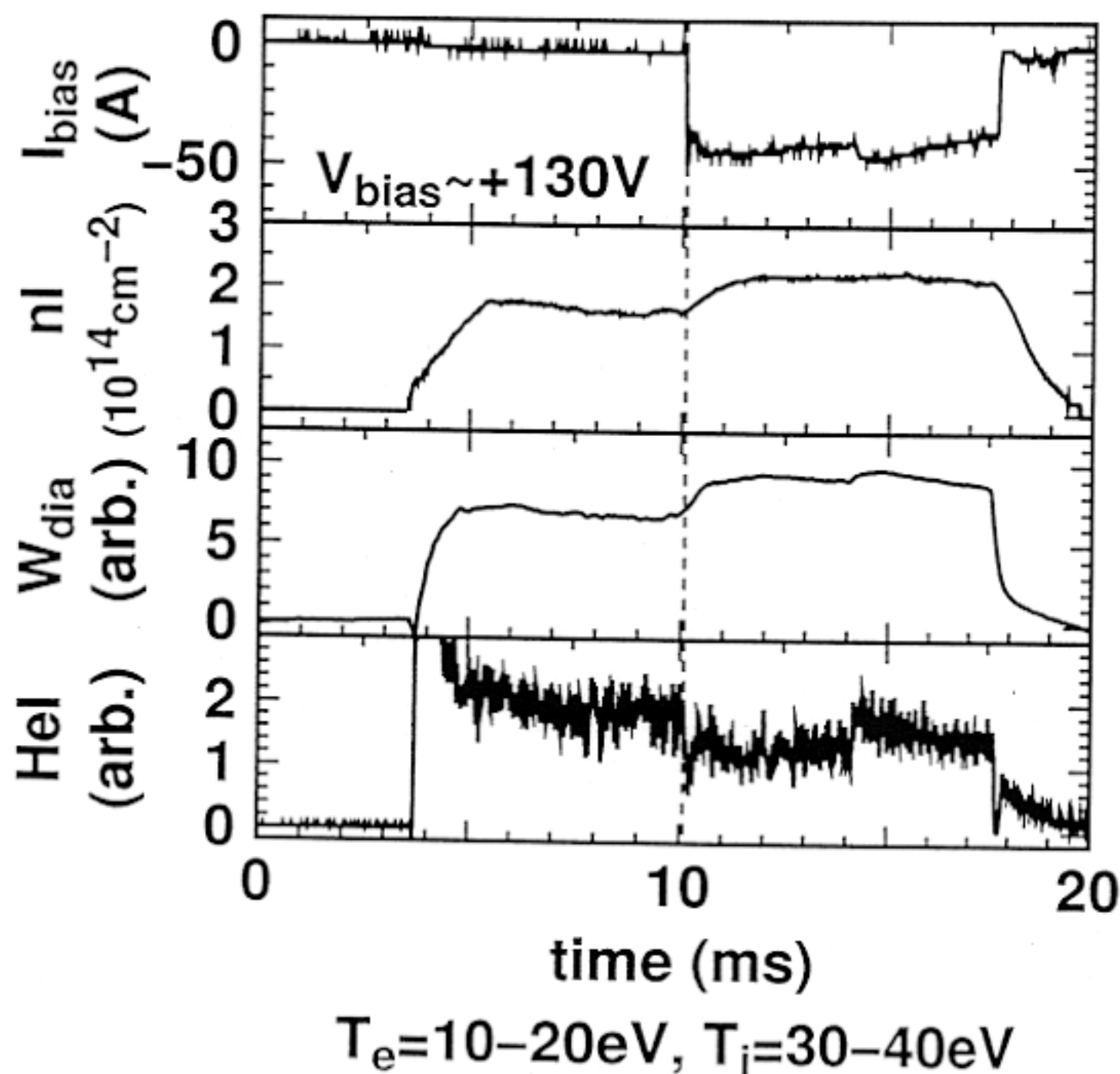
Wave forms of pertinent parameters



## Suppression of Drift Waves by Radial Electric Field



## High Radial Confinement Mode by Limiter Biasing



## プラズマ中の電位形成

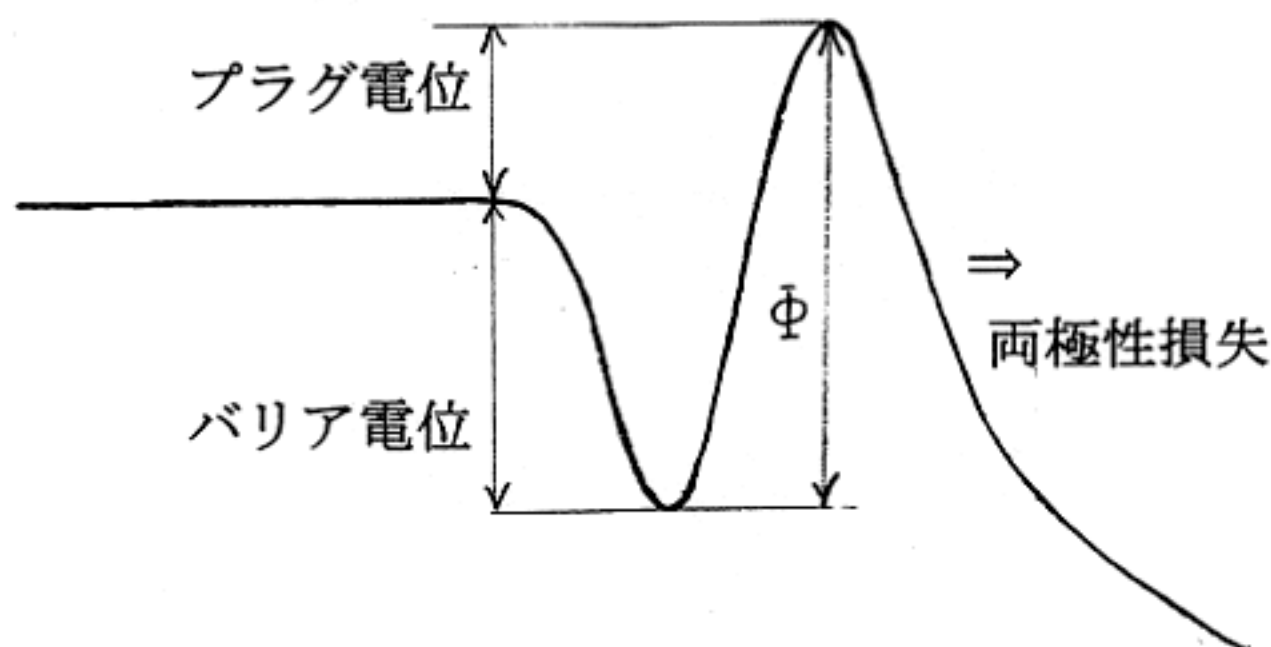
- ・ 電位スケーリング（実験・理論）：

電位  $\Phi$  = プラグ電位  $\Phi_p$  + (サーマル) バリア電位  $\Phi_b$   
(イオン閉じ込め) (電子閉じ込め)

電位  $\Phi \propto$  電子温度  $T_e$ 。

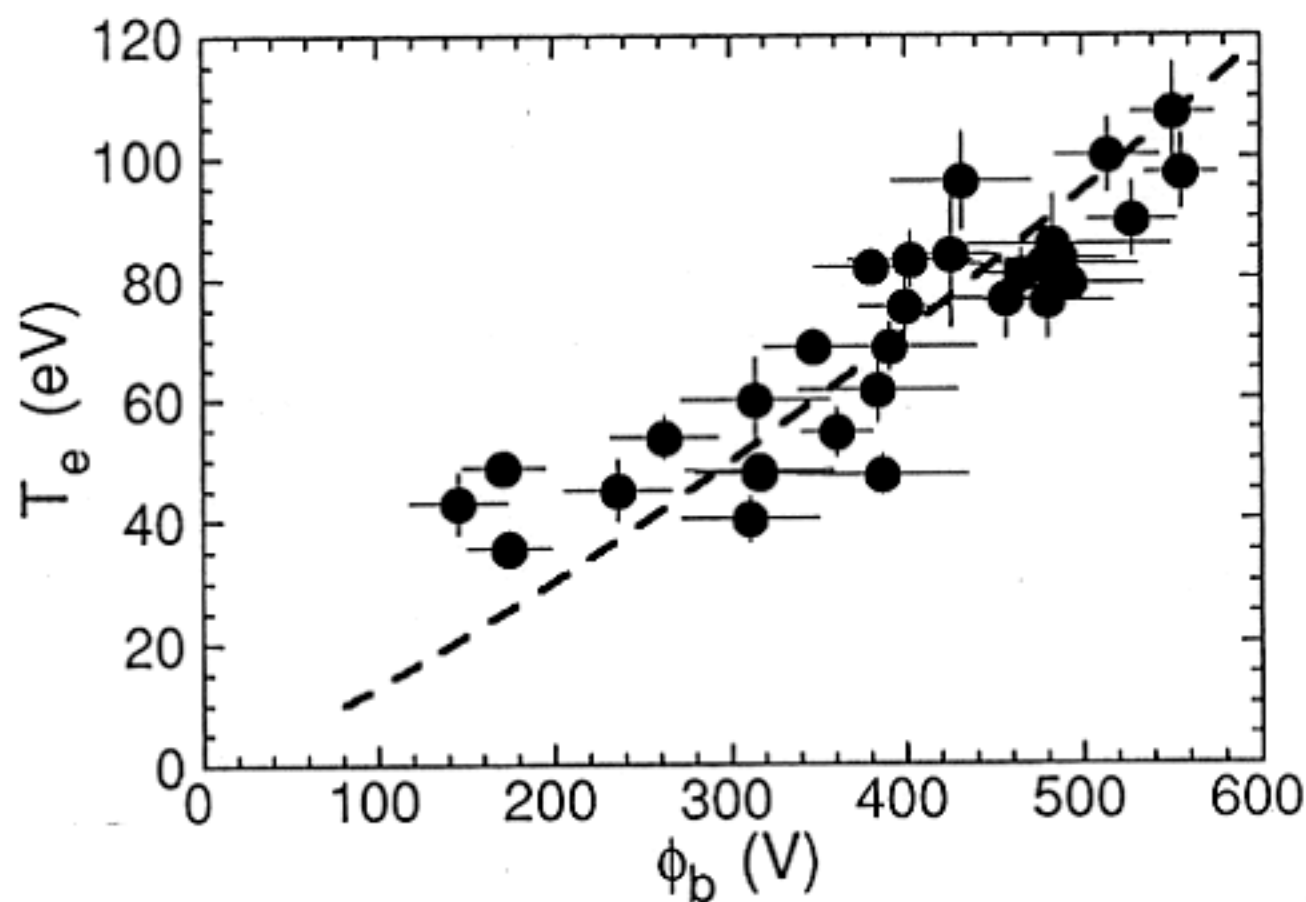
プラグ電位  $\Phi_p$  とバリア電位  $\Phi_b$  の比は端部に流れ出るイオン流と電子流が等しくなるように決まる（両極性損失）。

従って、低電子温度では電子損失流が大きいので、プラグ電位は比較的小さい。



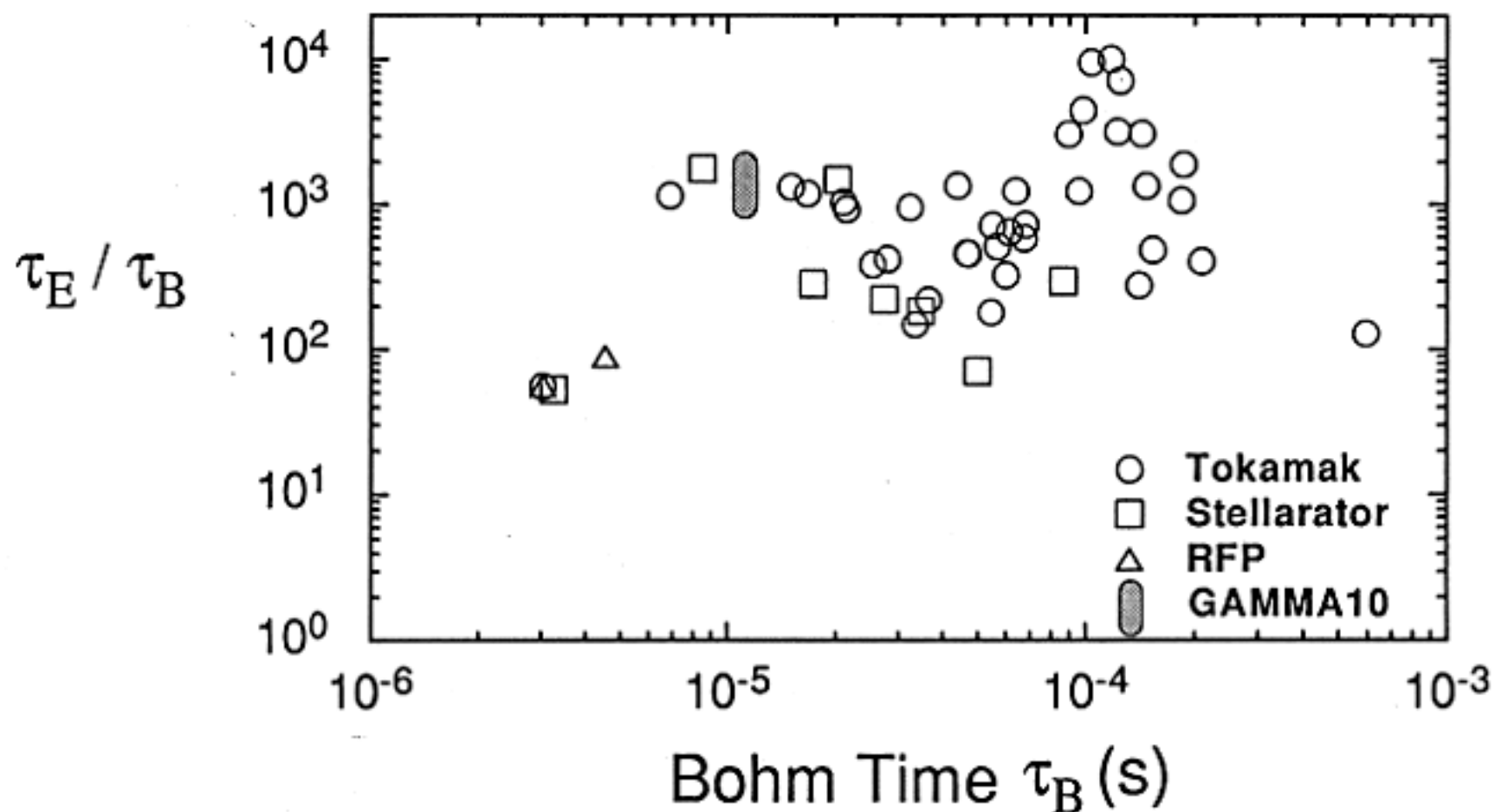
\* タンデムミラーの成否は電子閉じ込めの如何による。

## Electron Temperature as a Function of Barrier Potential



## Energy Confinement Time for Various Fusion Devices

(Note: Estimated lower limit for GAMMA 10)



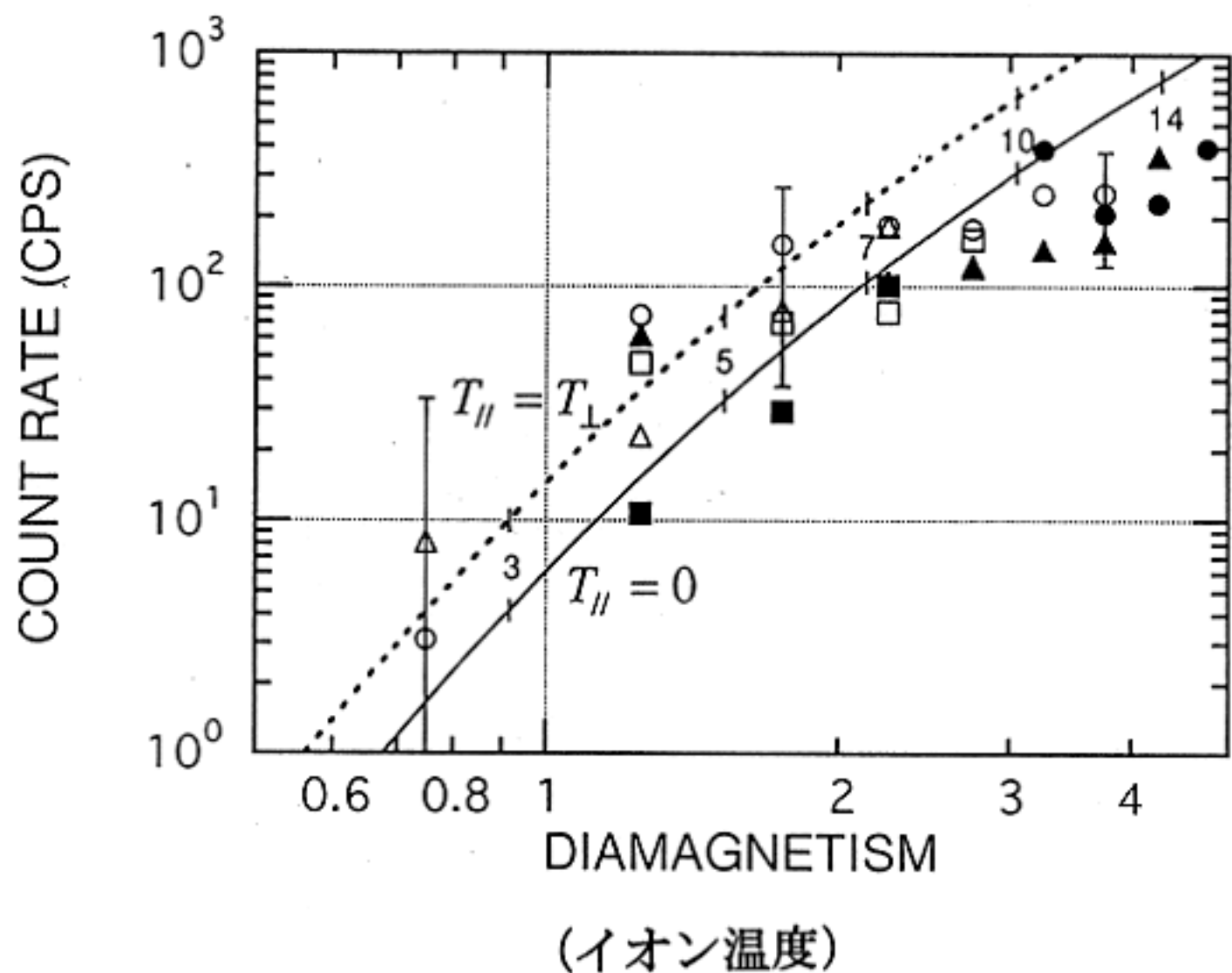
## 非等方プラズマ閉じ込め（高イオンモード）

電子温度  $\sim$  磁場に平行なイオン温度  
 $\ll$  磁場に垂直なイオン温度

特徴：

- ・ 非等方分だけエネルギーが高く核融合出力が大きい。
- ・ イオンを選択的に加熱出来る。（D-He3 核融合に適している。）

# タンデムミラーにおける熱核融合中性子検出





## 電位閉じ込めの展望

スケーリング：

電位  $\Phi \propto$  (電子温度  $T_e$ ) (形成パワー  $P_p$ ) / (密度  $n$ )

加熱パワー  $P_H \propto (n T_e) /$  (閉じ込め時間)

	加熱 パワー (MW)	電子 温度 (keV)	電子 密度 ( $10^{20} \text{m}^{-3}$ )	電位 電位 (kV)	形成 パワー (MW)	閉じ込め 時間 (s)
現在：	0.05	0.1	0.02	1	0.1	0.002
将来：	0.5	10	1	150	8	1

将来的には、電位閉じ込めが期待できる。むしろ、磁場を横切る径方向損失を評価する必要がある。

## タンデムミラー研究の課題

- ・ 定常電位維持の確認
- ・ 電位と形成パワーの関係の確認
- ・ 径方向プラズマ輸送の追及



長時間放電 (0.1 秒 → 1 秒)      {加熱電源整備}

- ・ 高密度化 (ペレット入射実験)



高磁場化 (0.5 T → 2 T)      {コイル改造、電源増強}

## その他

- ・  $\beta$  限界
- ・ 密度限界
- ・ 非等方性限界