

奥野プロジェクトワークショップ： 2025年(令和7年) 4月17日

核融合エネルギー実現に向けた 奥野プロジェクトへの期待

奥野プロジェクトアドバイザー委員

京都大学

大学院エネルギー科学研究科 名誉教授

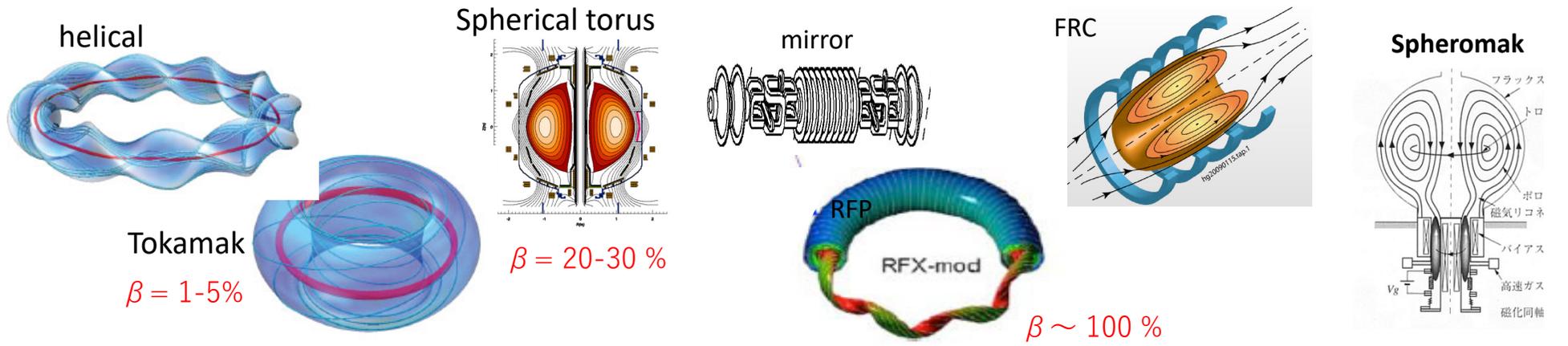
エネルギー理工学研究所 特任教授

kishimoto.yasuaki.84r@st.kyoto-u.ac.jp

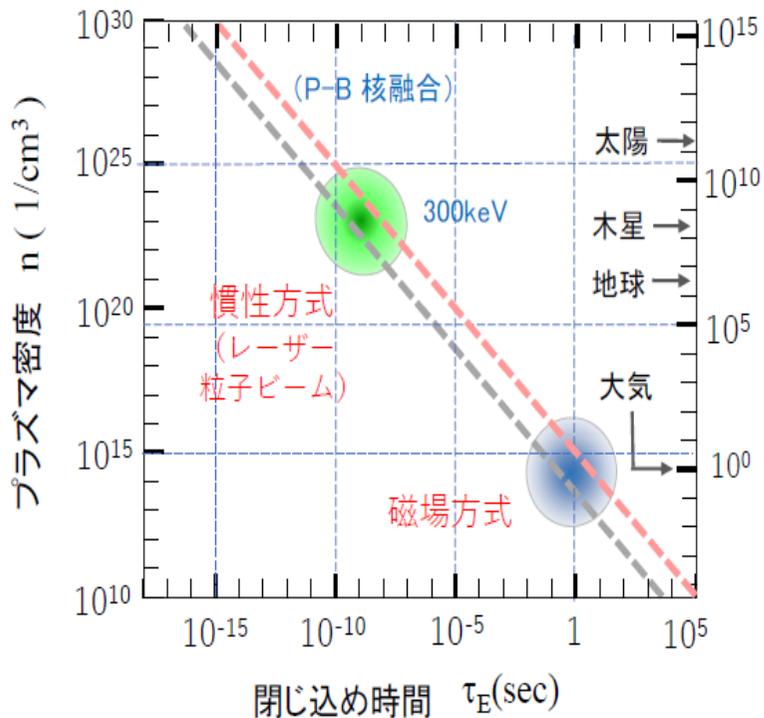
MS の背景にある理念(私見)

「概念」のイノベーションと「技術」のイノベーションの連携と相乗効果

様々なプラズマの閉じ込め装置



- プラズマベータ値
- 核融合パワー密度

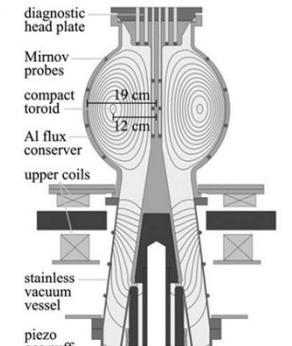
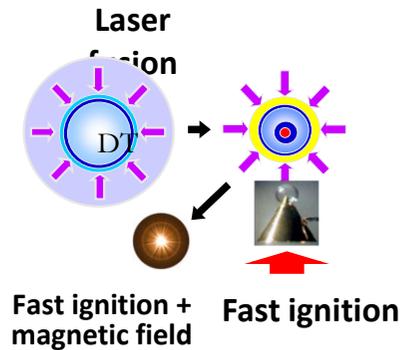
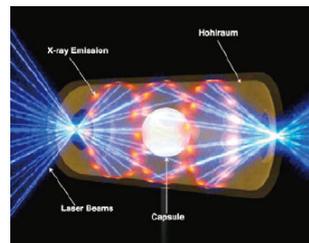


$$\beta = \frac{nk_B T}{B^2 / 2\mu_0} \sim n^2 \langle \sigma v \rangle \sim \left(\frac{\langle \sigma v \rangle}{T^2} B^4 \beta^2 \right)$$

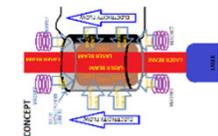
プラズマ圧力 P (bar)

Magnetically insulated laser fusion

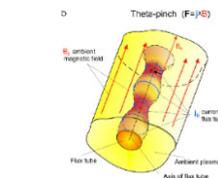
Laser fusion Indirect forum target



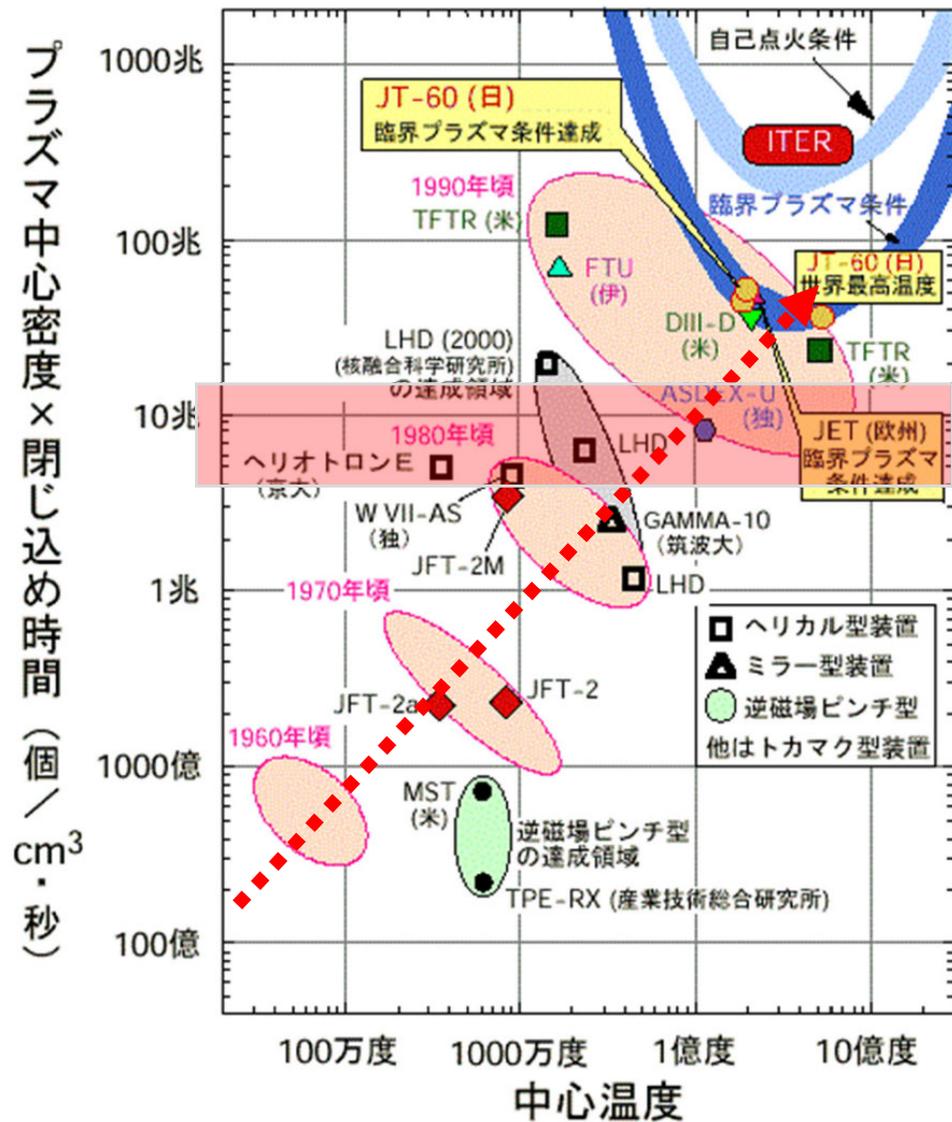
Z-pinch



theta-pinch



核融合実現のプラズマ検討と素過程の発見



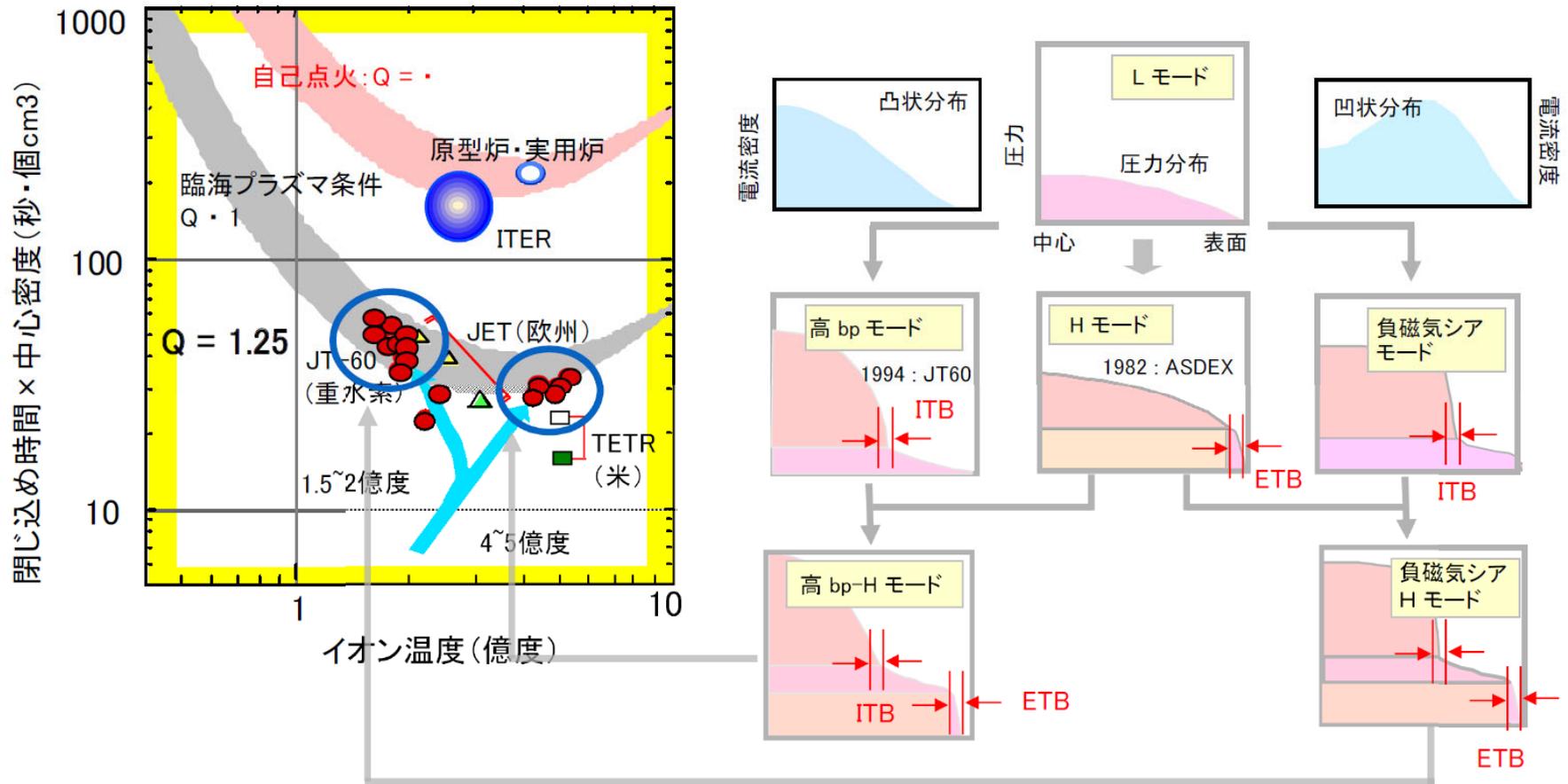
1980~1990

異常輸送で支配されるトカマクを核融合炉実現の皿に載せた鍵となる**プラズマの加熱技術**と同期した各種発見

- Hモードの発見 (ASDEX:トカマク)
F. Wagner et al.: PRL 49 (1982) 1408
- 内部輸送障壁の発見
Y. Koide et al.: PRL 72 (1994) 3662.
- 自発 (bootstrap) 電流の検証

加熱技術の向上による多様なプラズマ制御

臨界プラズマに向けた“経路の選択”と“分布の形成”



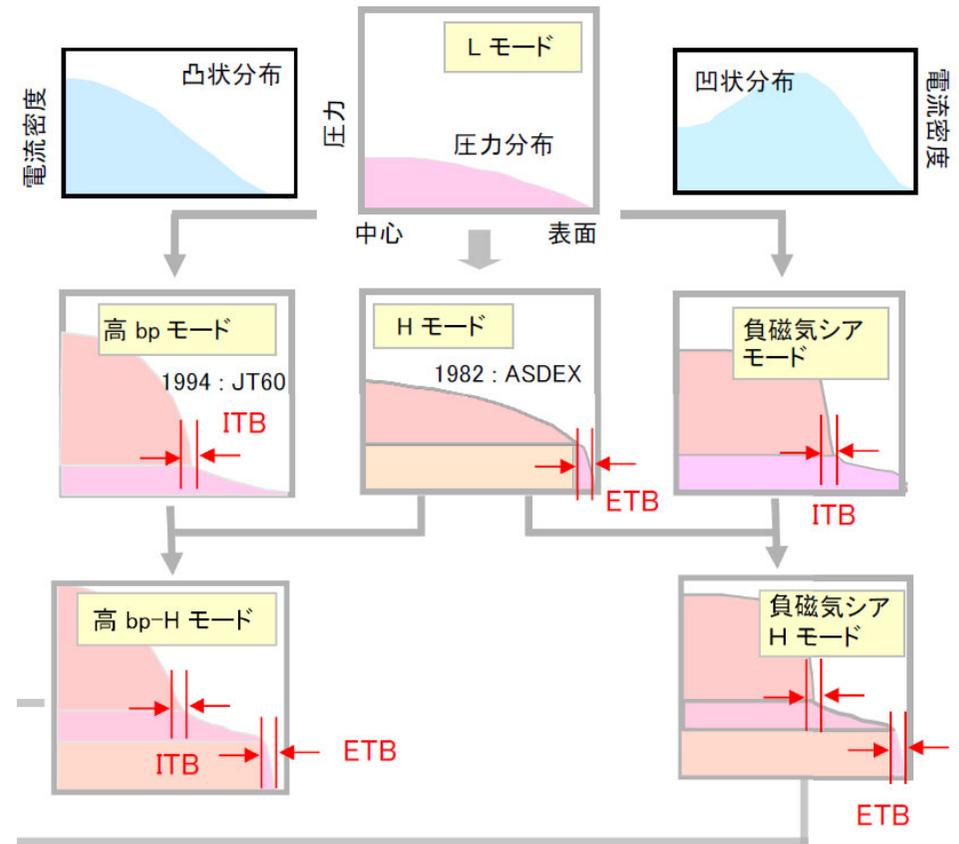
- ジュール加熱
- 中性(イオン)粒子ビーム入射
- 電子ビーム入射

- 電子サイクロトロン波加熱
- 低域混成波加熱
- イオンサイクロトロン波加熱
- アルフェン波加熱
- 走行時間磁気ポンプ加熱

高圧力状態における多様な動作モード

- **H-mode : ASTEX (1982)**
with ELM, W/O ELM
- CNTA-NBI mode
- Core H-mode
- D_{α} H-mode
- Reversed (Negative) Shear mode
- Enhanced Reversed Shear mode
- High Density H-mode
- Helical Electron ITB
- High β_p mode
- High β_p -H mode
- High li-mode
- **High Ti mode**
- I-mode
- Improved Ohmic Confinement mode
- Lower-Hybrid Heating mode
- Pellet mode
- Pellet Enhanced Performance H-mode
- Radiation Improved Mode
- Super shot
- VH-mode
- etc

- ジュール加熱
- 中性(イオン)粒子ビーム入射
- 電子ビーム入射

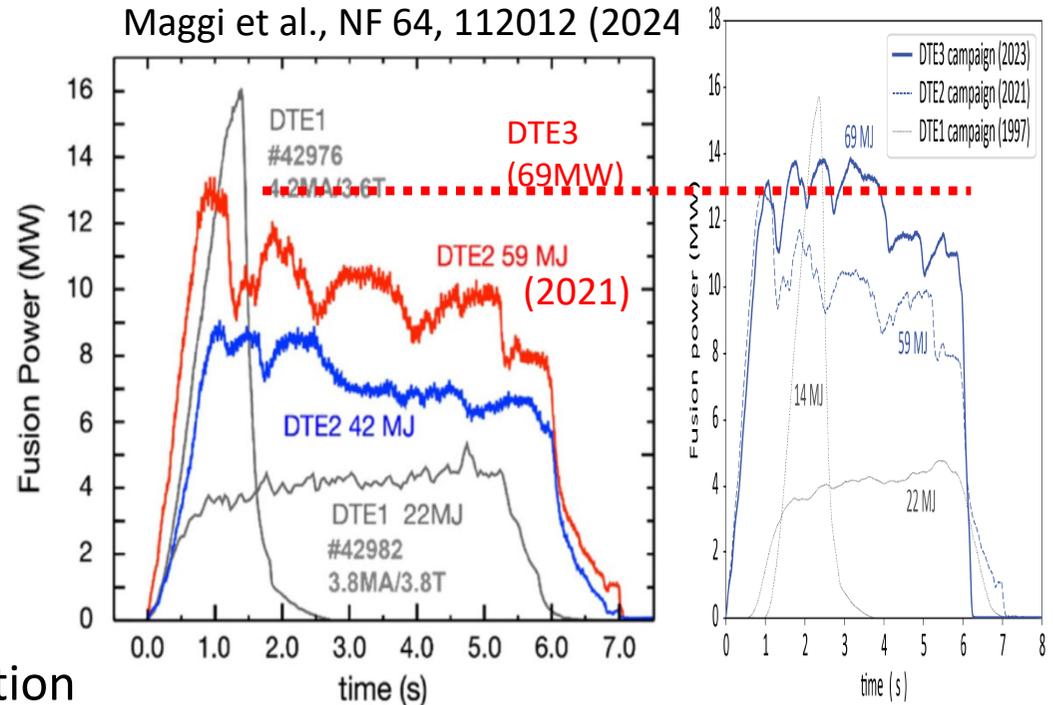


- 電子サイクロトロン波加熱
- 低域混成波加熱
- イオンサイクロトロン波加熱
- アルフェン波加熱
- 走行時間磁気ポンプ加熱

JET (ヨーロッパ連合) における核融合燃焼の実証



磁場閉じ込めの概念で核融合反応が
予定通り起きることを検証



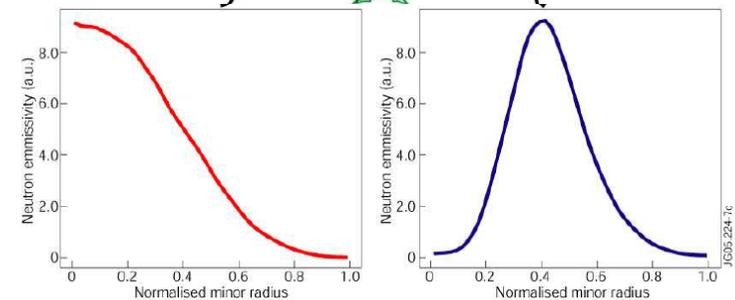
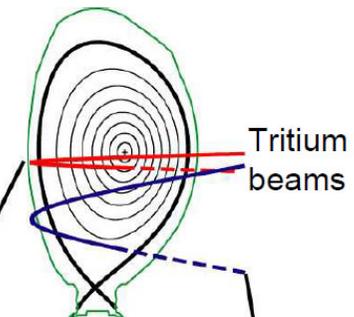
0) Preliminary Tritium Exp. (PTE), 1991,
tritium injected by NBI 10% concentration
hot-ion H-mode, $Q=0.12$

- 1) 1st major D-T exp. (DTE1), 1997 , hot ion. ELMy H-mode, $Q=0.27$
- 2) 2nd major D-T exp. (DTE2), 2021
- 3) 3rd major D-T exp. (DTE3), 2023

derxw6 #hp hv#p ruh#qhu#j |#z dv#qmfwg#wr #khdw#
wkh#solv#d#kdq#z dv#urgxfhg#T 3166,1

cf. NIF : 6148P M#r i#qhu#j |#urp #5138P M#
olvhu#qgsxw#h { fhhghg#euhdn0yhq, #

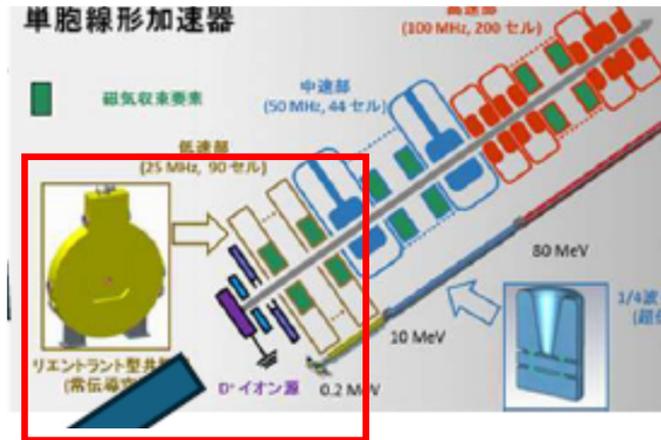
fi#Nkh wrwd#ixv#rq#rxwsxw#urp #k#lv#MHW#
h{shup hqw#z dv#ryhu#53#hp hv#p ruh#q#GWH6



Wulxp #QEI# ho#fruhowg#ixv#rq#hdfw#rq#

奥野プロジェクトにおける新しいビーム源の開発と期待 (1)

1A 重陽子線形高周波加速器



(A) 核融合燃料の生成

$$E_b \sim 400 \text{ MeV}, I_b \sim 1 \text{ A}$$

(B) IFMIFの10倍の中性子フラックスの生成

$$E_b \sim 40 \text{ MeV}, I_b \sim 1 \text{ A}$$

(C) 核融合プラズマのイオン系の加熱源

$$E_b \sim 2 \text{ MeV}, I_b \sim 5 \text{ A} \text{ (多孔式共振器)} \quad (E_{\parallel} \gg E_{\perp})$$

- 装置サイズの小型化や柔軟性・融通性

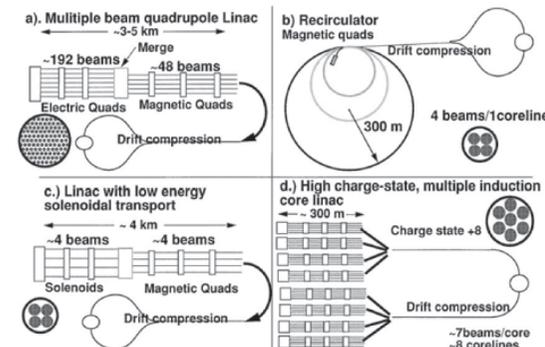
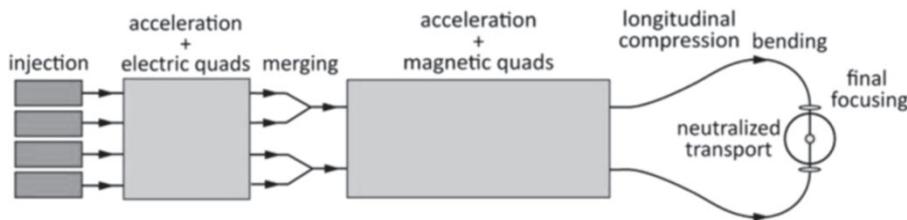
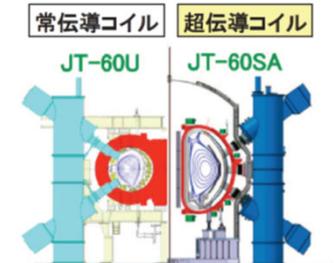
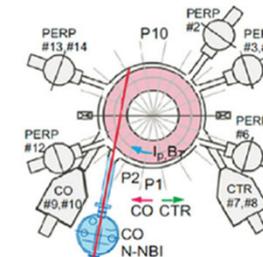
cf. ビームエネルギーや入射方向の実時間制御の可能性

- 長距離のビーム伝送によるトーラスと加熱系の分離

cf. ECH: 導波管による長距離伝送が可能

cf. 重イオン核融合用ビームにおけるマーキング・バンチング技術

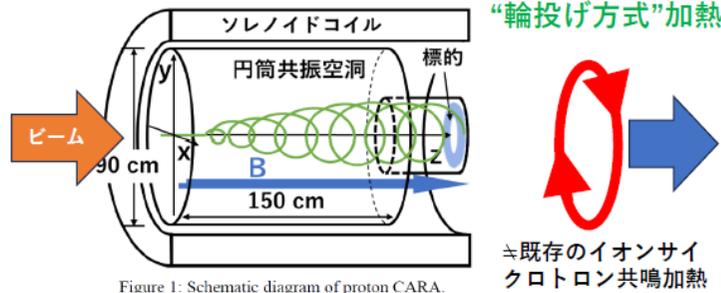
JT-60U



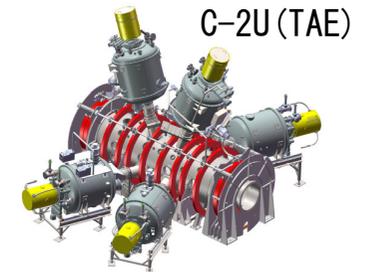
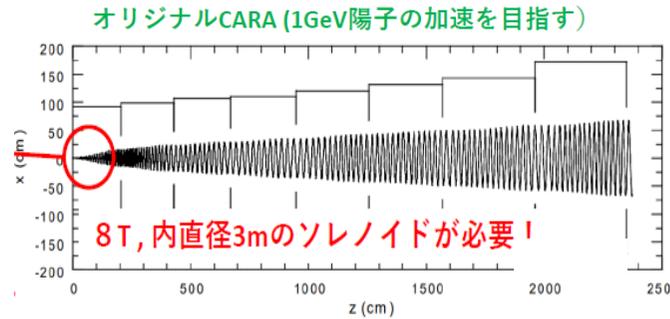
奥野プロジェクトにおける新しいビーム源の開発と期待 (2)

自動サイクロロン共鳴加速器 (CARA)

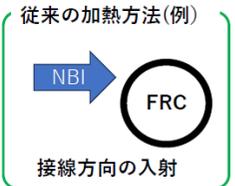
cf. Cyclotron Auto-Resonance Maser (CARM) の逆過程



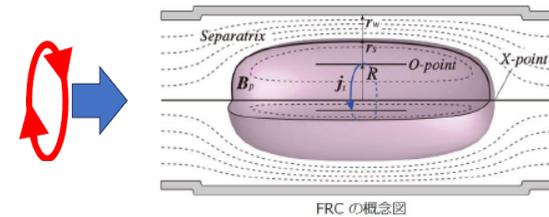
縦磁場中での加速・回転ビーム



謝辞: 郷田博士



謝辞: 浅井教授



(D) 核融合プラズマのイオン系の加熱源 $E_b \leq 2\text{MeV}$ (CARA方式) ($E_{\parallel} \ll E_{\perp}$)

- 電子系 (e-CARA) の例
(理論: 1970~実験実証: 1990~)

LaPointe et al. PRL 76, 2718 (1996)

90~100 kV / 2~3 MW 線形電子ビーム

→ 最大 6.6 MW (約 60 A?) に増幅

、RF からビームへの電力効率: 最大 96%

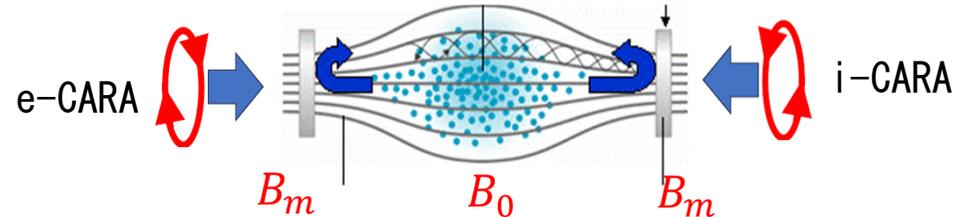
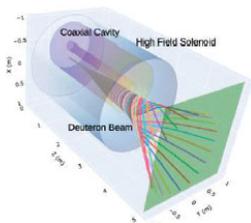
- イオン系 (i-CARA) への挑戦

High current deuteron acceleration
for neutron production

Jiang, Hirshfield et al. 15th IPAC

Cornell 大学 DOE grant 2005 report

FIREX project (field reversed ion rings
for magnetic fusion)



cf. SPARC/ARK (Commonwealth Fusion Systems)

超伝導技術による強磁場装置(装置の小型化)

$$R_m = \frac{B_m}{B_0} \longrightarrow \text{増大の可能性}$$

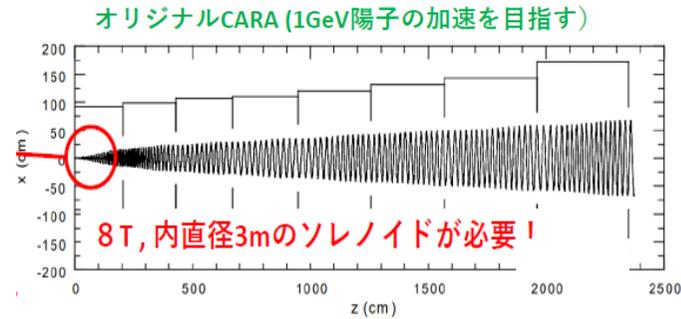
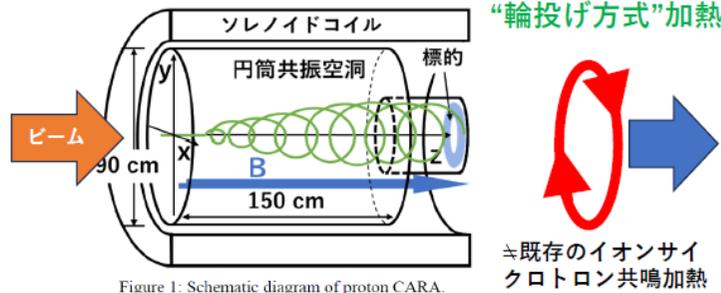
従来技術では想定していなかったパラメータ領域の
存在と核融合炉の皿に乗せる発見の可能性

- 回転ビームを直線ビームに変換するアイデア

奥野プロジェクトにおける新しいビーム源の開発と期待 (2)

自動サイクロtron共鳴加速器(CARA)

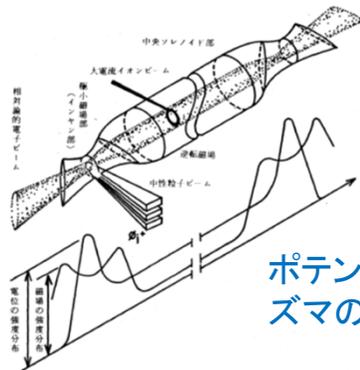
cf. Cyclotron Auto-Resonance Maser (CARM) の逆過程



縦磁場中での加速・回転ビーム

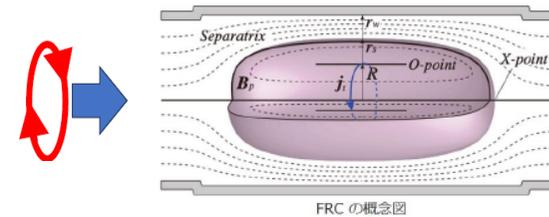
(D) 核融合プラズマのイオン系の加熱源
 $E_b \leq 2\text{MeV}$ (CARA方式) ($E_{\parallel} \ll E_{\perp}$)

石山・石塚他:「ミラープラズマへの電子ビーム入射」, 核融合研究 39, 130 (1978)

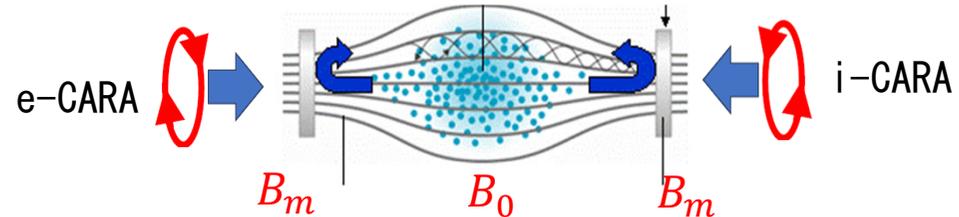


齋藤他, 「Proto-RTにおける電子入射によるプラズマバイアス実験」 2004, 物理学会59回 年次大会 (28aW H-2)

ECHによるプラズマの高性能化, 高速流の駆動



謝辞:
浅井教授



cf. SPARC/ARK (Commonwealth Fusion Systems)
 超伝導技術による強磁場装置(装置の小型化)

$$R_m = \frac{B_m}{B_0} \longrightarrow \text{増大の可能性}$$

従来技術では想定していなかったパラメータ領域の存在と核融合炉の皿に乗せる発見の可能性

多様な加熱の組み合わせによるプラズマ制御

- 加熱を通じた電子系とイオン系の制御
 - 電子分布とイオン分布の同時制御(フィードバック制御)するフレキシブルな複合的加熱技術

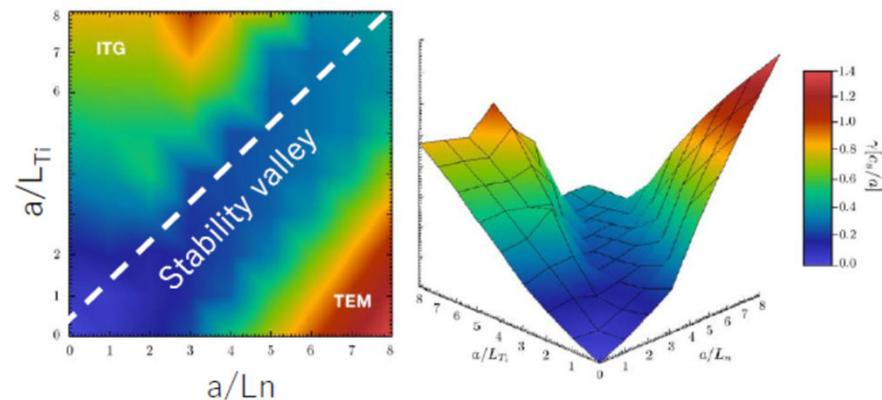
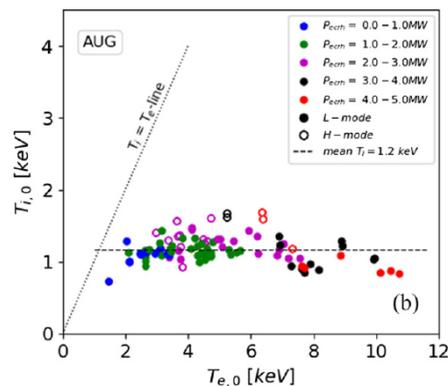
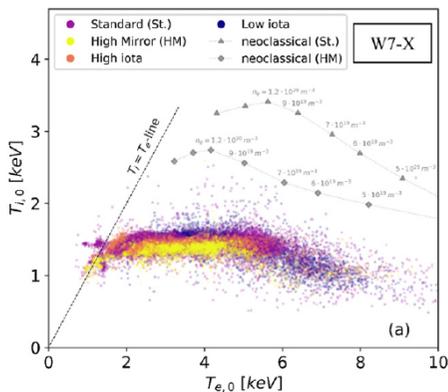
Beurskens et al., **Ion temperature clamping in Wendelstein 7-X electron cyclotron heated plasmas**, Nucl. Fusion 61, 116072 (2021) :

Beurskens et al., Nucl. Fusion 62, 016015 (2022) : **Confinement in electron heated plasmas in Wendelstein 7-X and ASDEX Upgrade; the necessity to control turbulent transport**

The absence of a strong *H*-mode temperature edge pedestal in stellarators, so far (which, like in tokamaks, could lift the clamped temperature-gradients in the core), puts a strong requirement on reliable and sustainable core turbulence suppression techniques in stellarators.

(ステラレータには強力な H モード温度エッジ ペDESTALが存在ため、ステラレータでは信頼性が高く持続可能なコア乱流抑制技術が強く求められます)

Alcusion et al., PPCF 62, 035005 (2020)



温度分布と密度分布の実時間フィードバック制御の必要性

まとめ(プラズマの観点から)

- 長い歴史を持つ核融合プラズマ加熱技術分野において、新たなアイデアに基づくビーム源に対する奥野提案は、大きなプラズマ制御の自由度をもたらすものであり、研究開発の進展に期待

cf. 将来の燃焼プラズマは自律的特性が一層高くなることから、複数の加熱方法の連携による最適化が求められる。

- 多様な「概念」のイノベーションと「技術」のイノベーションと連携したパラメータ領域拡大の可能性の時代にあり、トーラス系に限定しない多様な核融合プラズマ実現の方法論の開拓に期待。
- 星プロジェクト・木須プロジェクトとの密な連携のもと、多様な加熱過程における実験と理論・シミュレーションが密に連携したプラズマのダイナミクスを研究するプラットフォームになることを期待。