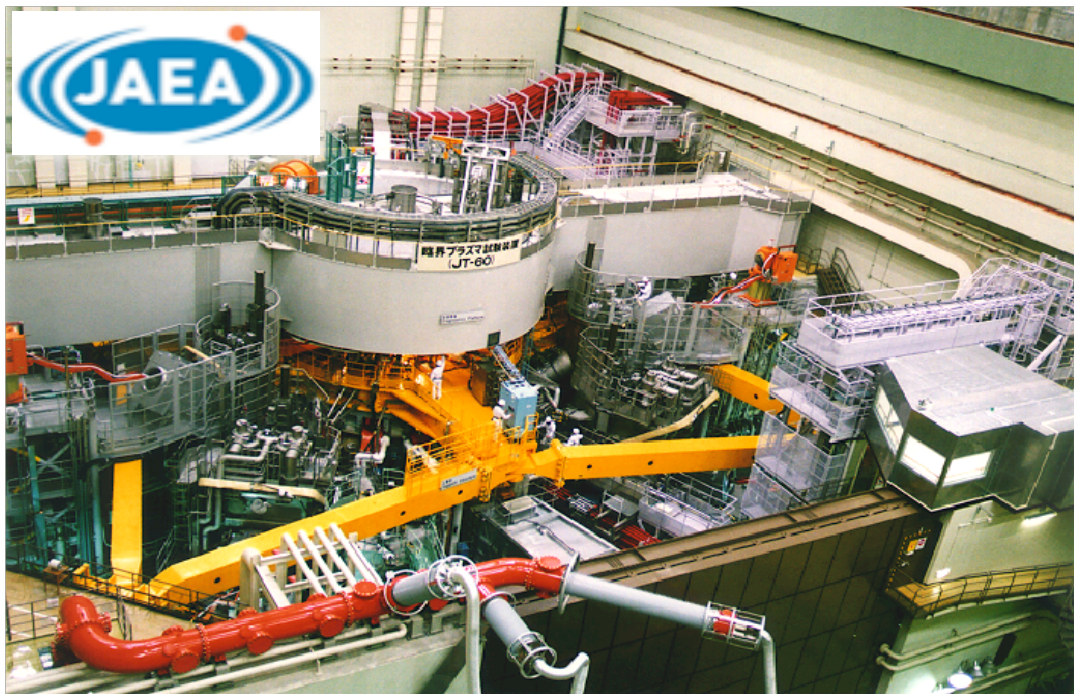


JT-60における炉心プラズマの解析 と燃焼プラズマの解明に向けて

小関 隆久
核融合研究開発部門

第12回 若手研究者によるプラズマ研究会
原子力機構、那珂研 平成21年3月16-18日

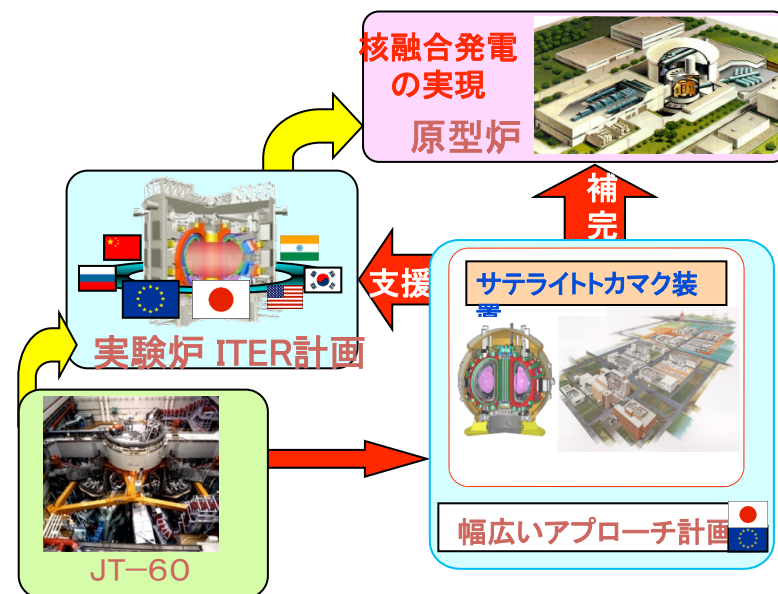
23年4ヶ月のJT-60実験の完遂



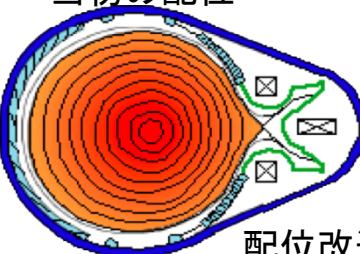
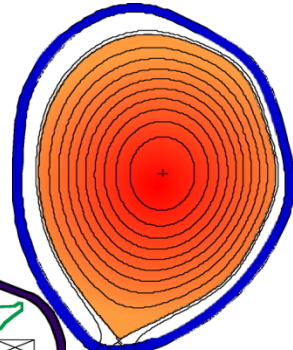
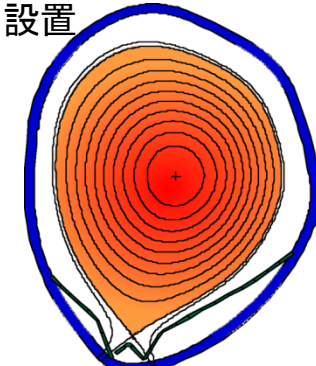
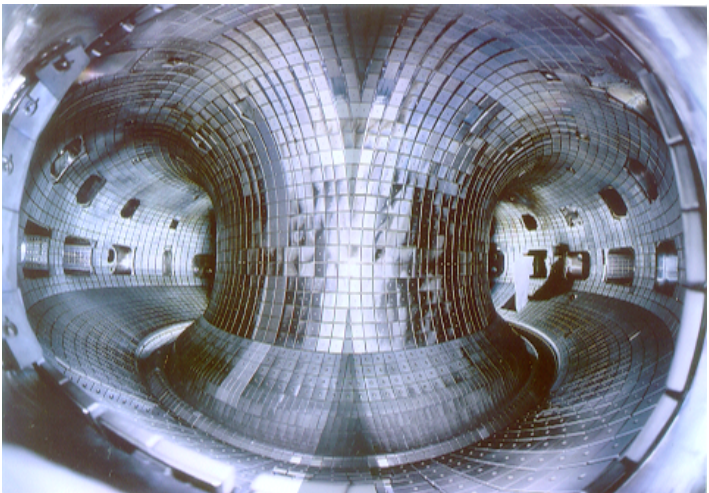
PARAMETERS:

$R_p = 3.3 \text{ m}$
 $V_{ol} \leq 100 \text{ m}^3$
 $I_p \leq 5.0 \text{ MA}$
 $B_t \leq 4.2 \text{ T}$
 $\Phi = 61 \text{ Vs}$
 $T_{dis} \leq 65 \text{ s}$
 $P_{PNB} \leq 40 \text{ MW}$
 $P_{NNB} \sim 5 \text{ MW}$
 $P_{IC} \leq 4 \text{ MW}$
 $P_{LH} \leq 7 \text{ MW}$
 $P_{EC} \leq 3 \text{ MW}$

- 平成20年8月29日、23年4ヶ月間のJT-60の実験を完遂。
- 第22回IAEA主催核融合エネルギー会議（ジュネーブ）のJT-60全体講演発表後、会議参加者全員により起立・拍手。

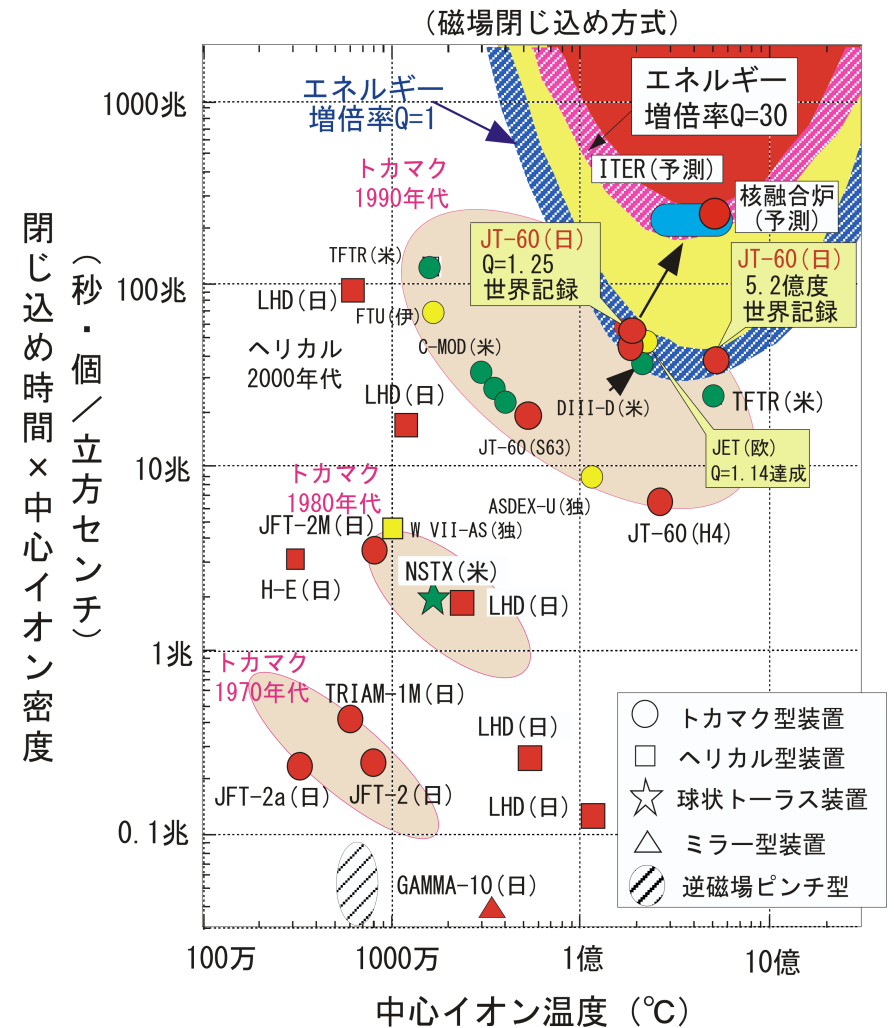
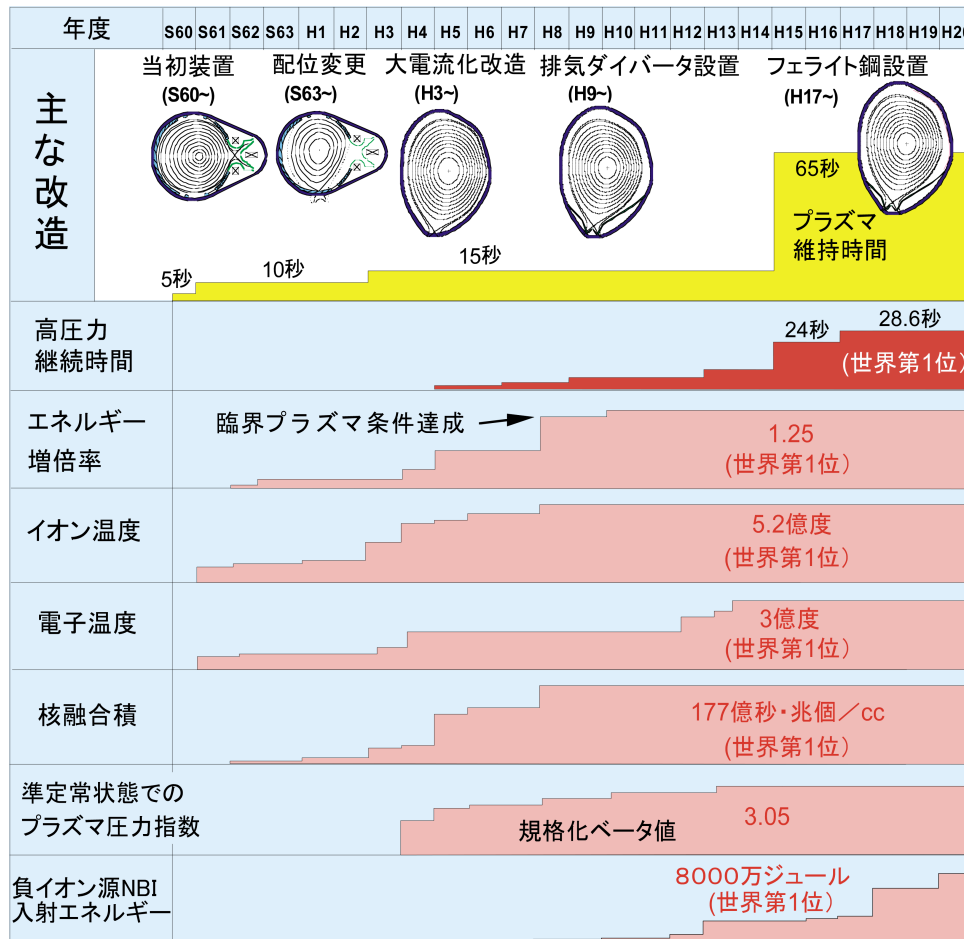


JT-60研究の進捗

年	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
フェーズ	水素実験フェーズ					改造	プラズマ高性能化フェーズ										定常高ベータ化フェーズ								
主な目的	原子力委員会目標領域への到達						先進トカマク研究 ・プラズマ性能の向上と高プラズマ性能の維持 ・高総合性能の達成										定常高ベータ化								
主な改造	<ul style="list-style-type: none"> ・配位改造 ・Mo材からC材への変更 ・ペレット入射装置 						<ul style="list-style-type: none"> ・排気付W型ダイバータ設置 ・負イオン源NB入射装置 										<ul style="list-style-type: none"> ・放電・加熱時間の長時間化 ・フェライト鋼導入によるリップロス低減 								
プラズマ配位	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>当初の配位</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>大電流化改造</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>排気付W型ダイバータ設置</p>  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>																								

JT-60 プラズマ性能の進展

世界一の炉心プラズマの性能を実現



主要な研究課題と解析

実験	現象／装置	物理課題	解析コード／モデリング
電流駆動・加熱	高周波電流駆動 NBI加熱・電流駆動	電流駆動理論、 ブートストラップ電流	EC, LH, ICコード、NBI コード、 Matrix inversion 法
高ベータ	磁気揺動、内部崩壊、 ディスラプション	MHD平衡、安定性	理想MHD安定性コー ド、抵抗性・非線形安 定性コード
高閉じ込め	コアプラズマ熱・粒子 輸送、密度・温度・流 れ分布	Hモード、内部輸送障 壁ITB、密度揺動 乱流、帯状流	輸送コード、輸送モ デル(GLF23、MMM、 CDBM、etc)、乱流 コード
ダイバータ	熱・粒子輸送／損失	ダイバータプラズマ、 不純物、中性粒子、 壁相互作用、A&M	ダイバータコード SONIC、B2-Eirene, etc
高エネルギー粒子	磁場揺動、高エネル ギー粒子損失	アルフェン固有(AE) モード、リップル損失、 逃走電子	AEモード安定性コー ド、OFMCコード

電流駆動・加熱：ブートストラップ電流の実証

JT-60での高ベータ定常化研究の出発点

Tokamak :
confinement is good
Research issue :
Steady-state operation

80% bootstrap fraction in JT-60
is a **break-through toward**
steady-state operation.

To resolve pulsed nature of Tokamak system, use of bootstrap current and active current drive is essential.

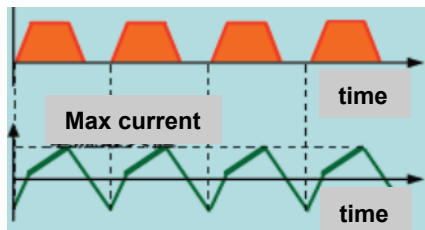
Tokamak System



JT-60 Japan Atomic Energy Research Institute



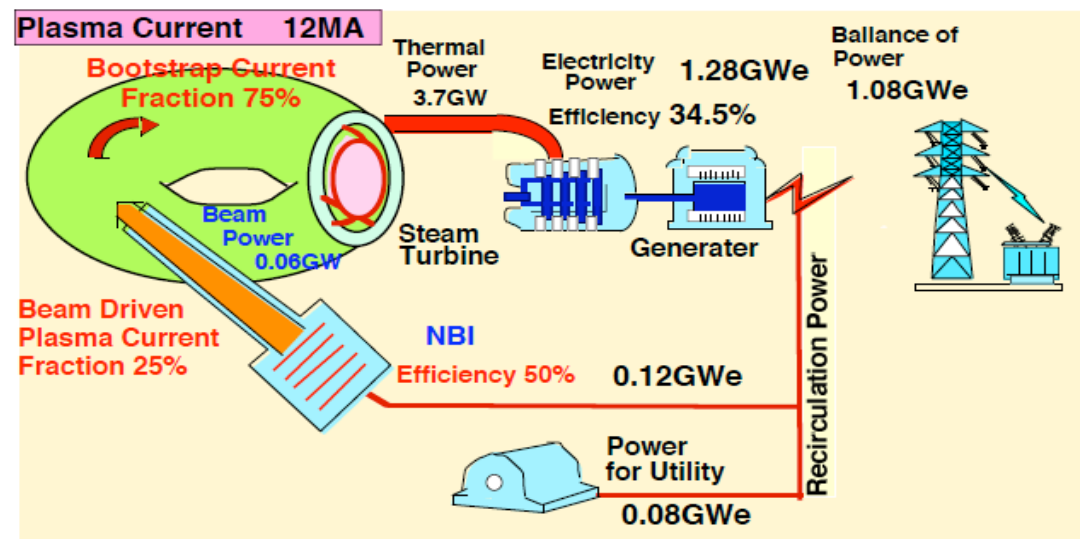
Plasma current



Primary current

Principle of SSTR

A low I_p with a large Bootstrap Current fraction allows reduction of re-circulation power.

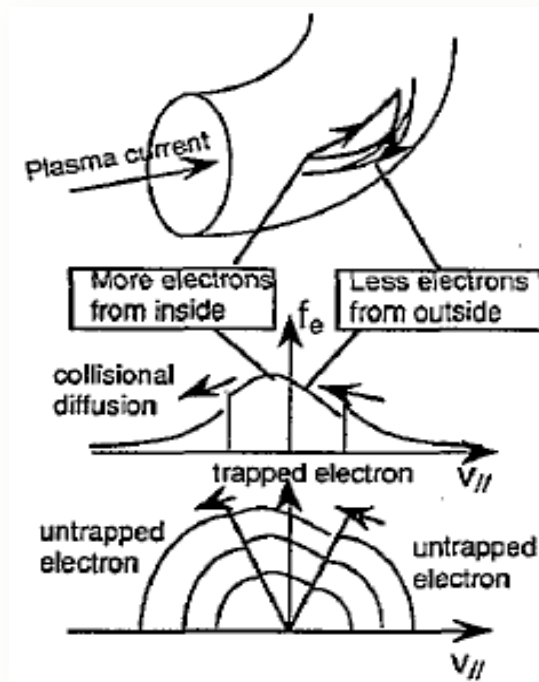


ブートストラップ電流とは

In toroidal magnetic confinement system, particles with small $v_{||}$ are trapped by the magnetic mirror (trapped particles) and have larger radial excursion with their “banana orbit”.

This radial excursion produces shift of e. velocity distribution counter to plasma current.

Then, collisional diffusion across the trapped-untrapped boundary produces particle flow to untrapped region. This current can be a large fraction of plasma current, say 75% in SSTR.



Mechanism of bootstrap current generation

Parallel momentum and heat momentum equations

$$0 = B \cdot (e_a n_a (E + v_a \times B) - \nabla P_a - \nabla \cdot \hat{\Pi}_a + F_{a1} + M_a)$$

$$0 = B \cdot \left(\frac{e_a}{T_a} q_a \times B - \frac{5}{2} n_a \nabla T_a - \nabla \cdot \hat{\Theta}_a + F_{a2} + Q_a \right)$$

Generalized Ohm's Law

$$\langle J \cdot B \rangle = -R B_t n_e \sum_a \frac{T_a}{|Z_a|} \left[L_{31}^a \frac{\partial \ln P_a}{\partial \psi} + L_{32}^a \frac{\partial \ln T_a}{\partial \psi} \right] + \langle B \cdot J_{||}^{NBCD, RFCD} \rangle + \sigma_I^{NC} \langle B \cdot E \rangle.$$

Bootstrap Current Fraction

$$J_{bs} \sim dP/dr/B_p$$

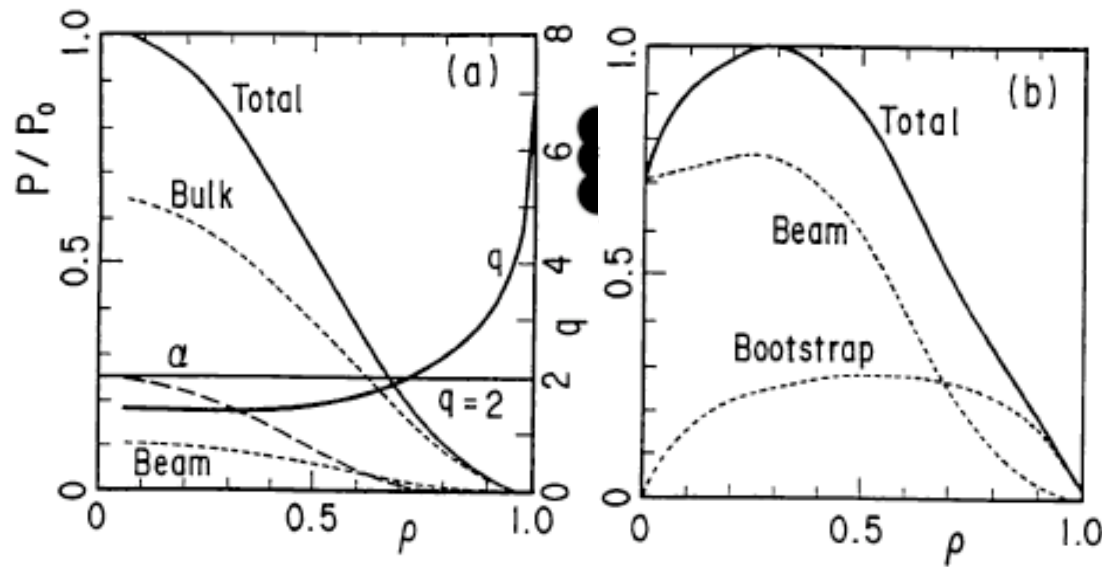
$$I_{bs}/I_p \sim 0.67 \epsilon^{0.5} \beta_p$$

$$\beta_p = 2\mu_0 \langle P \rangle / B_p^2$$

M. Kikuchi, M. Azumi, PPCF 37(1995)1215

高ブーツストラップ電流プラズマの解析

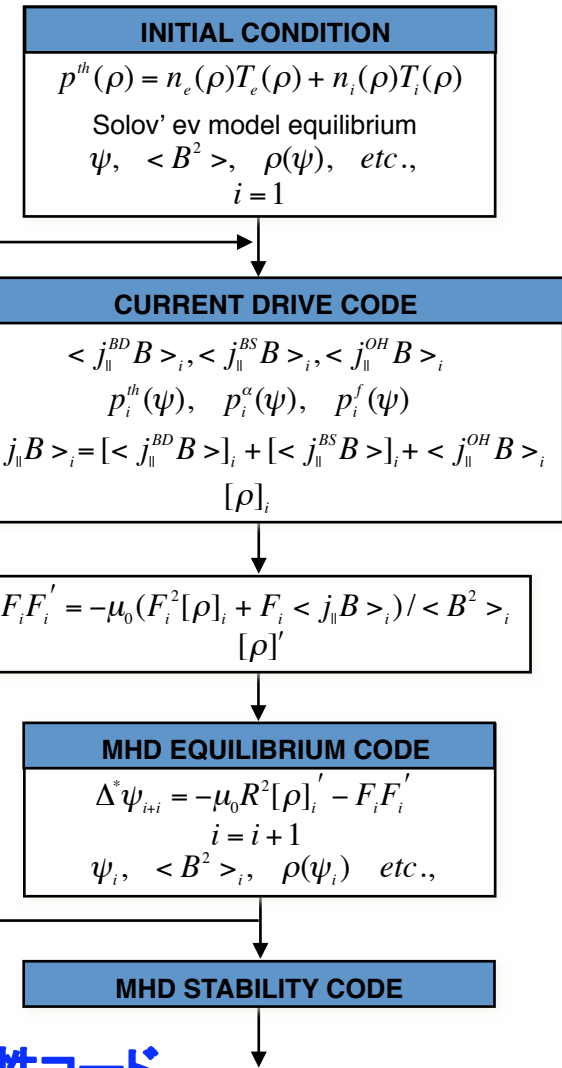
- 高ブーツストラップ電流プラズマでは圧力分布と電流分布の結合が発生
- 圧力分布と電流分布の矛盾無い解析が必要
- 平衡コードと電流駆動コードの統合 (ACCOMME)、安定性コードへ結合
- 統合化の始まり



電流駆動コード

平衡コード

安定性コード

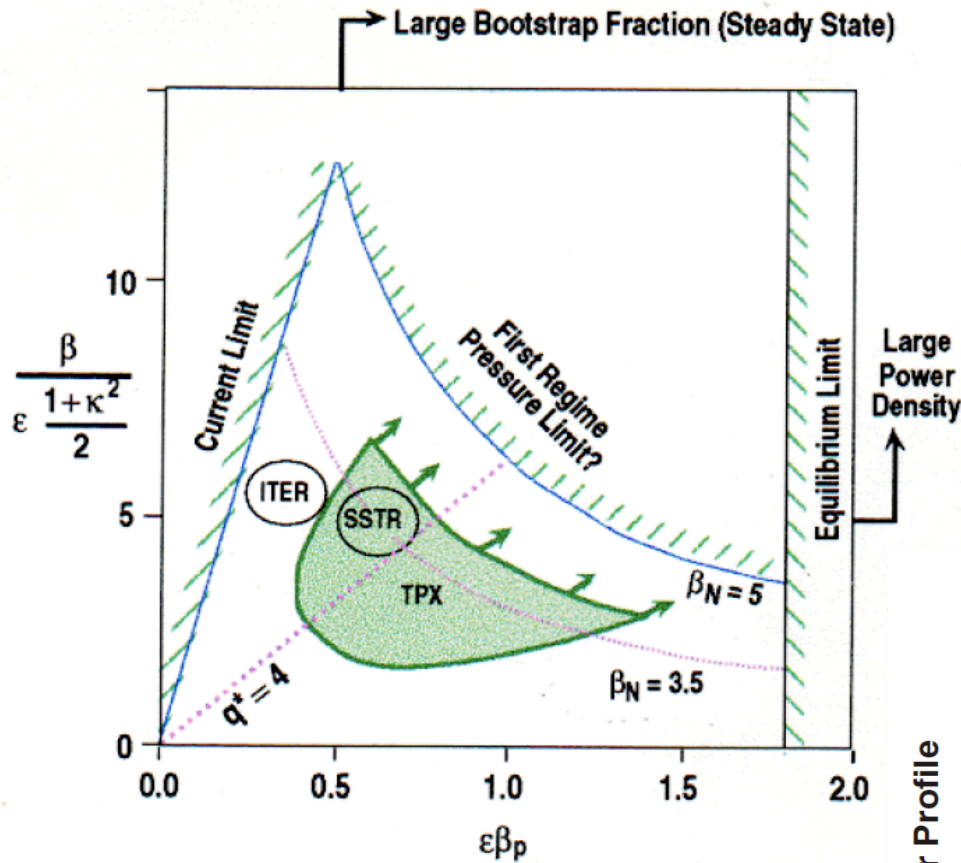


高ベータ領域の開拓

定常運転には高ブーツラップ電流割合が必要

先進トカマクには高トロイダルベータが必要

核融合炉として高い出力密度には、高トロイダルベータ(高規格化ベータ)が必要

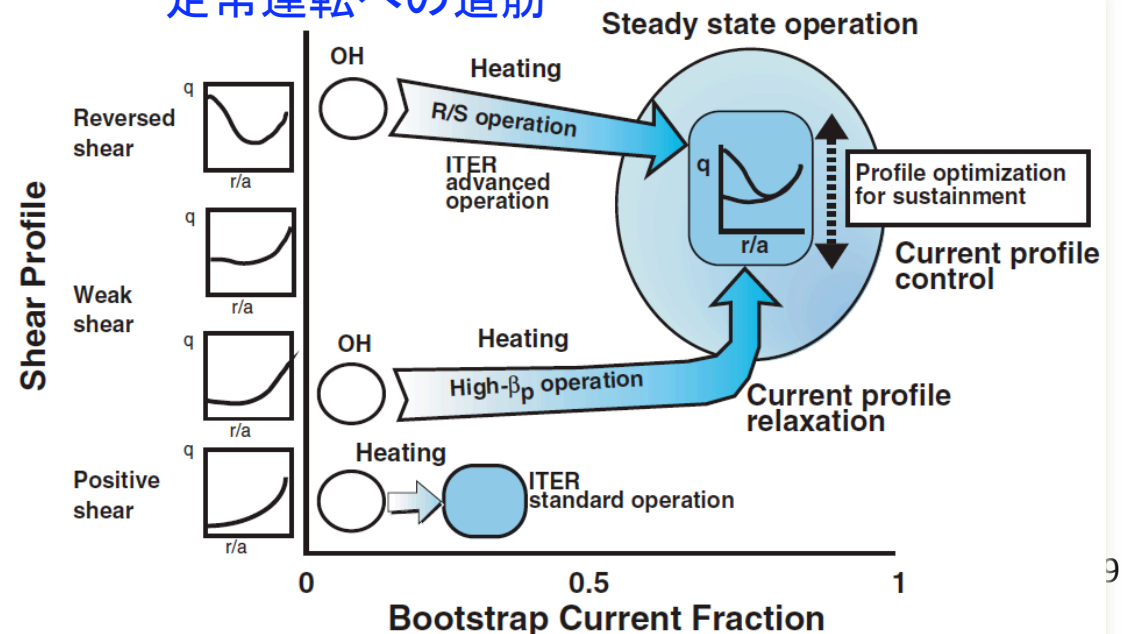


Beta relation : $\beta_p \beta_t = \kappa \beta_N^2 / 4$

Troyon beta scaling : $\beta_t = \beta_N I_p / a B_t$

Poloidal Beta : $\beta_p = 4 / P_{dv} / \mu_0 \pi I_p^2$

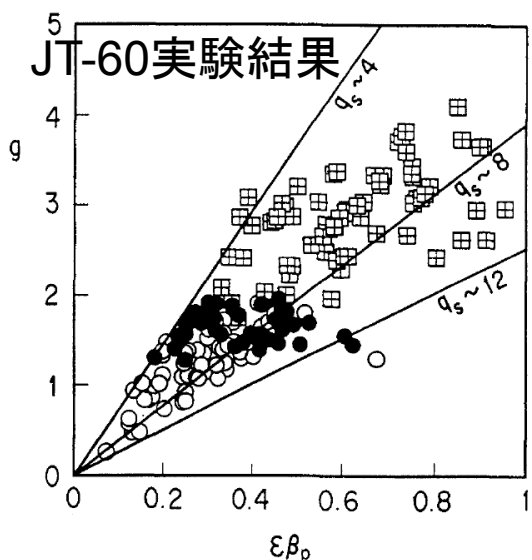
定常運転への道筋



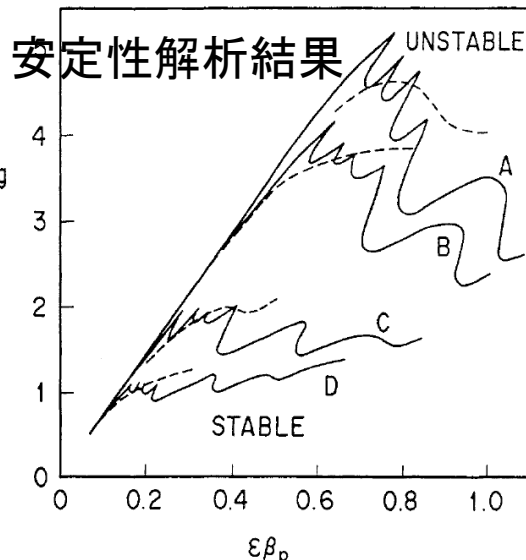
高ベータプラズマへ

圧力分布、電流分布の最適化による高ベータプラズマ化(高 β_p 且つ高 β_N)へ。

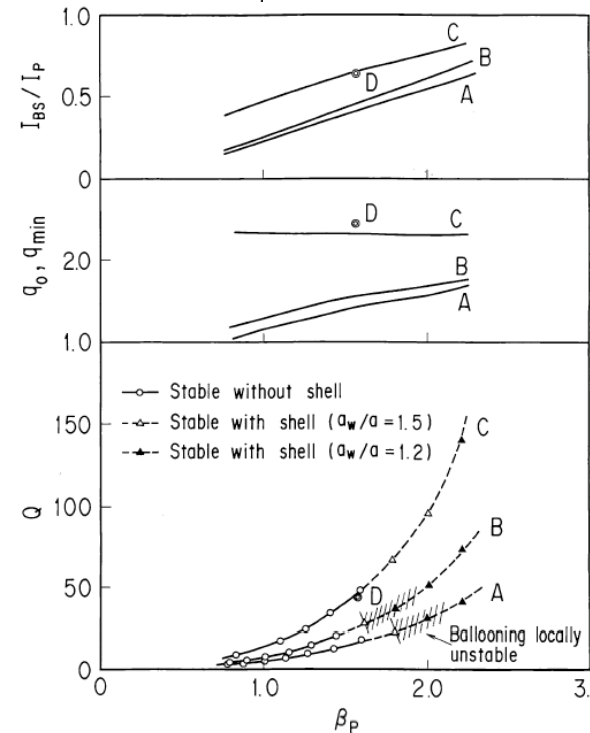
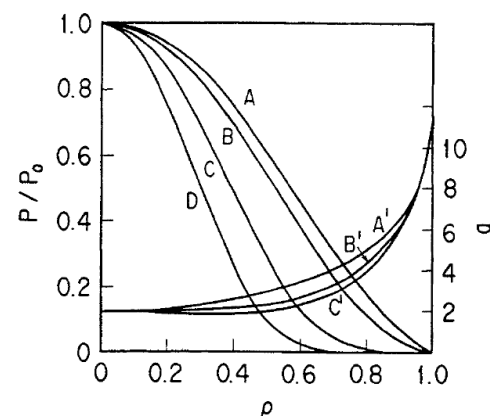
弱磁気
シア



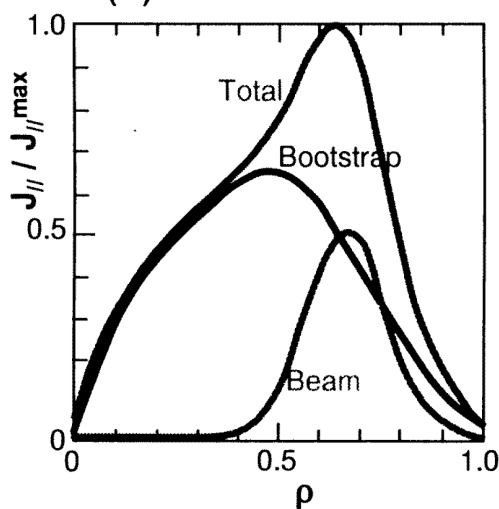
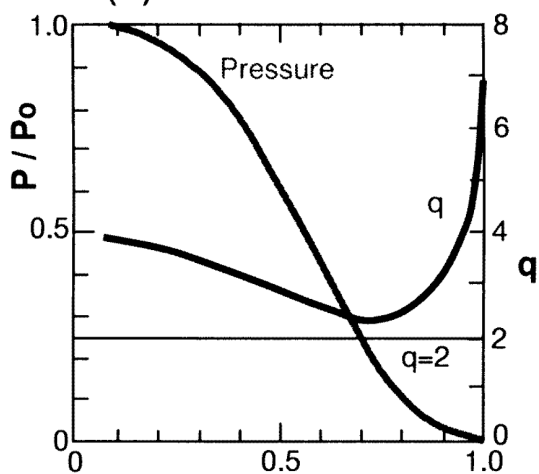
(a)



(b)



負磁気
シア



電流・圧力分布の最適化へ ρ

壁による安定化効果と抵抗性壁モード (RWM)

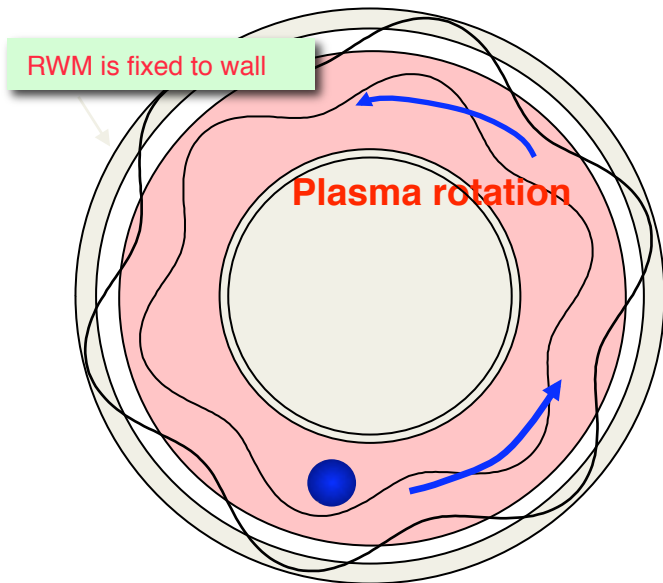
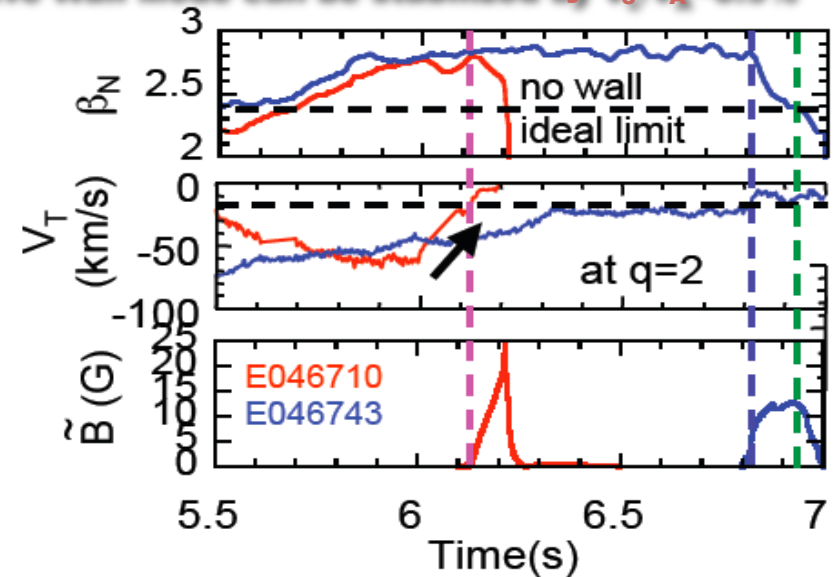
Resistive Wall Mode can be stabilized by $V_c/V_A \sim 0.3\%$

[1] Early 1990's, wall stabilization was thought to be difficult. Wall is not ideal. Mode will slip against plasma rotation and wall stabilization does not work.

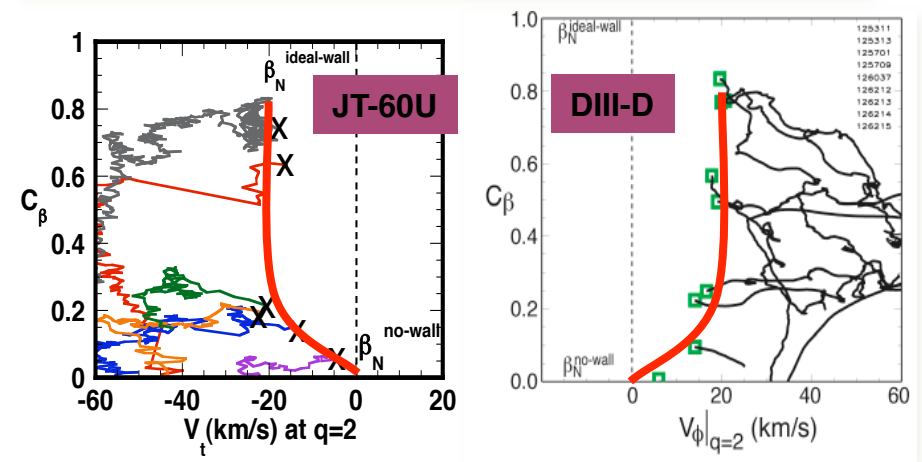
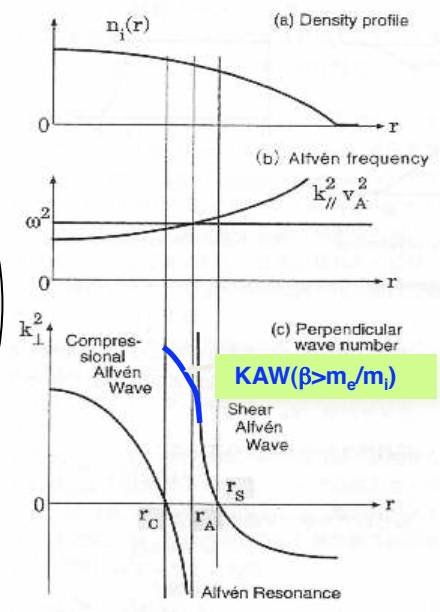
[1] C.G. Gimblett, N.F. 26(1986)617

[2] Actually, Mode conversion of Shear Alfvén wave to Kinetic Alfvén Wave (KAW) at the resonance surface $\omega = k_{\parallel} v_A$ can stabilize RWM by the Landau damping.

A. Hasegawa, Liu Chen, Phys. Fluids 19(1976)1924.



Stabilization of RWM



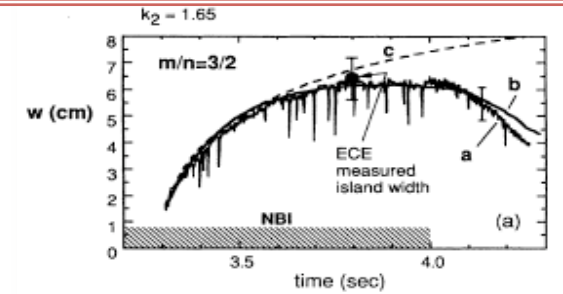
M. Takechi et al. (JT-60U), PRL98(2007)055002
 H. Reimerdes et al. (DIII-D), PRL98(2007)055001

外部コイルから低トロイダル回転によるRWMの安定化へ

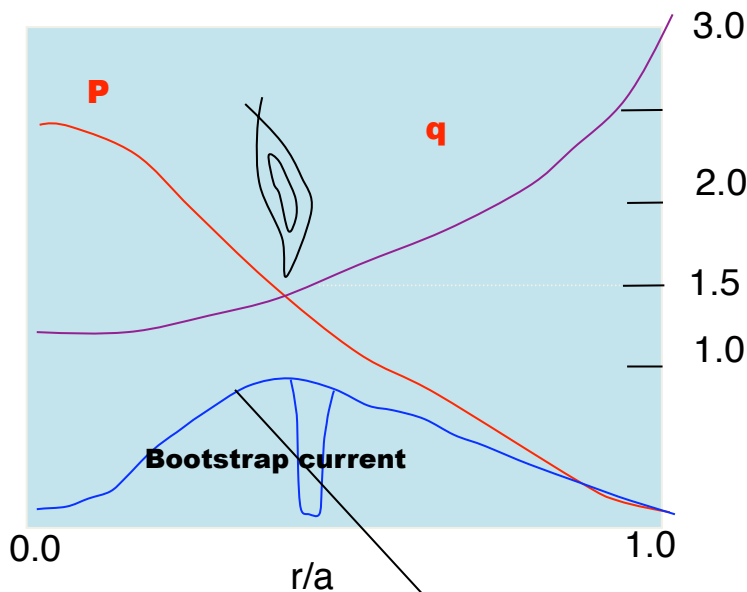
定常高ベータ化へ：新古典テアリングモード(NTM)

ブートストラップ電流の有効利用により定常トカマク炉が成立、ブートストラップ電流によって、新古典テアリングモードNTM (Neoclassical Tearing Mode)が発生。

NTM：磁気島における局所的な圧力分布の平坦化がブートストラップ電流の損失を招き、テアリングモードを不安定化する。NTMの安定化は定常化への重要課題。

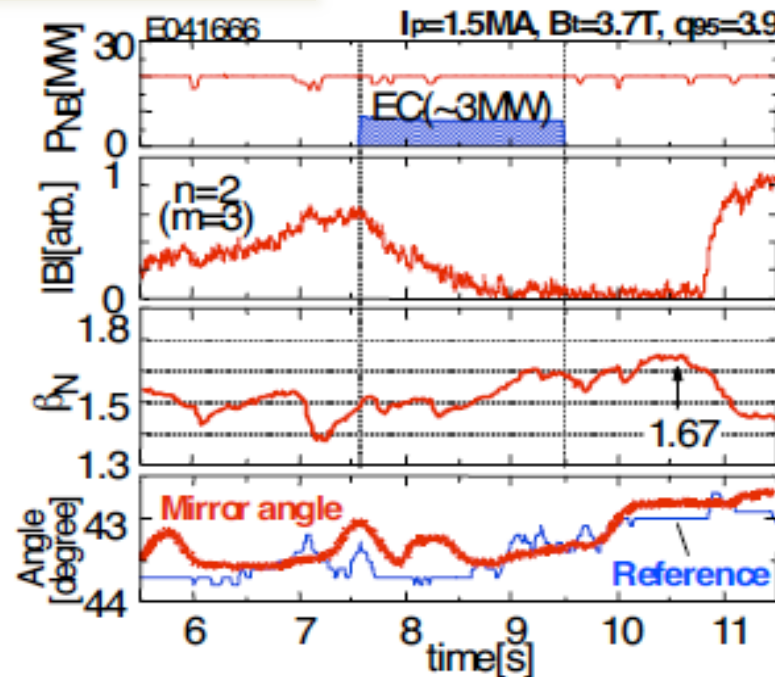


Z. Chang et al., PRL74(1995)4663
- First measurement of NTM



Loss of bootstrap current due to island formation

ITER : $v_e^* \sim 0.03$, $1\Omega_{ce}$ JT-60U : $v_e^* \sim 0.03$, $1\Omega_{ce}$
DIII-D : $v_e^* \sim 0.03$, $2\Omega_{ce}$ AUG : $v_e^* \sim 0.16$, $2\Omega_{ce}$



ECRFを用いた磁気島への局所的電流駆動によるNTMの完全な安定化。ECミラーによる磁気島への入射 (Isayama, NF03).

新古典テアリングモードの解析モデル

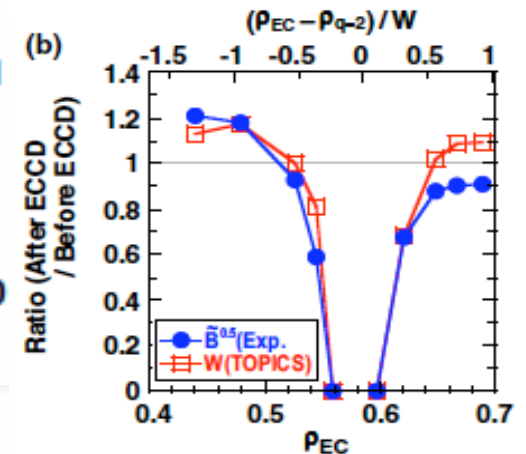
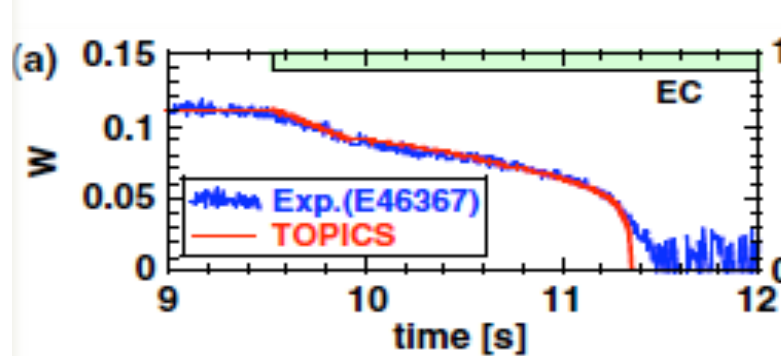
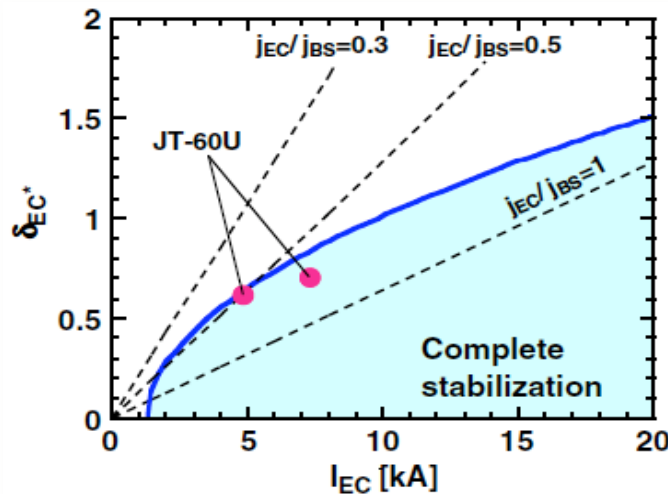
修正ラザフォーフォド方程式による JT-60U におけるNTM現象のモデル化 (Hayashi, NF03)

$$\frac{\mu_0}{\eta} \frac{dW}{dt} = \underbrace{k_c \Delta'(W) \langle |\nabla \rho|^2 \rangle}_{\text{Classical}} + \underbrace{k_{BS} \mu_0 L_q j_{BS} \left\langle \frac{|\nabla \rho|}{B_p} \right\rangle \frac{W}{W^2 + W_d^2}}_{\text{Bootstrap}} - \underbrace{k_{GGJ} \varepsilon_s^2 \beta_p \frac{L_q^2}{\rho_s L_p} \left(1 - \frac{1}{q^2}\right) \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \frac{1}{W}}_{\text{GGJ}}$$

$$- \underbrace{k_{pol} \varepsilon_s^{1.5} \beta_p \left(\frac{\rho_{pi} L_q}{L_p}\right)^2 \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \frac{1}{W^3}}_{\text{Polarization}} - \underbrace{k_{EC} \mu_0 \frac{L_q}{\rho_s} \left\langle \frac{|\nabla \rho|}{B_p} \right\rangle \eta_{EC} \frac{I_{EC}}{a^2} \frac{1}{W^2}}_{\text{ECCD}}$$

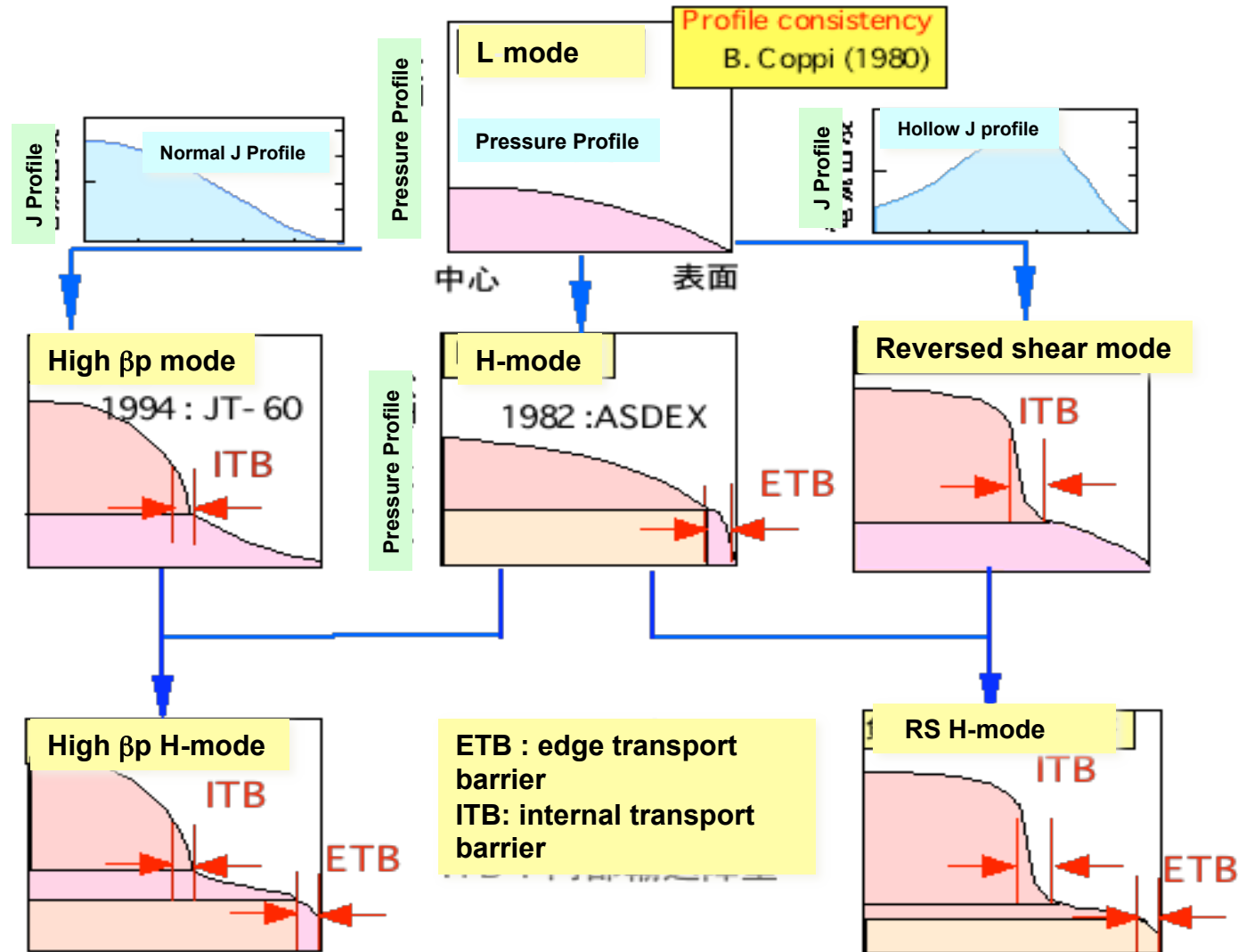
$$k_{BS} \sim 4-5, k_{GGJ} < 10, k_{pol} \sim 1, k_{EC} \sim 3-4, W_d \sim 0.02$$

$J_{ECCD} \sim 0.5 J_{bs}$ のECCD電流によるNTMの安定化、ECCD電流の最低化が重要
EC電流の先頭化、EC入射位置と磁気島中心の一致 (Isayama, NF07)



閉じ込め改善モードの観測：内部輸送障壁(ITB)

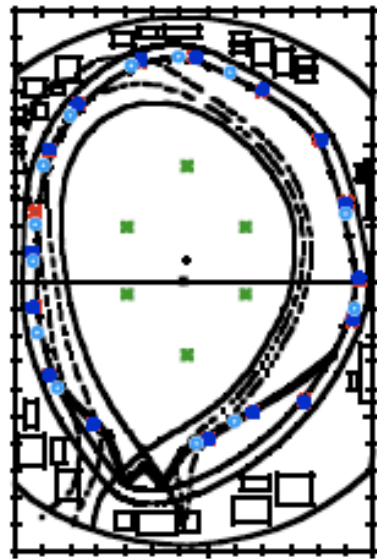
There are many improved modes starting from Wagner's H-mode.
 "ITB" is accepted as common phenomena after Koide's PRL 94.



[1] Y. Koide, M. Kikuchi et al., PRL72(1994)3662, Naming of "ITB"

実験プラズマ平衡の再構築FBI/CCS/SELENE

最外殻磁気面の同定
(First Boundary Identification Code)*



- 接線磁気プローブ
- 垂直磁気プローブ
- ワンターンループ
- × 円環電流フィラメント

(MHD 平衡と分布)

— 定常輸送解析 —

(境界条件)

$$\frac{dP}{d\psi} = C A(1) Y(\psi)$$

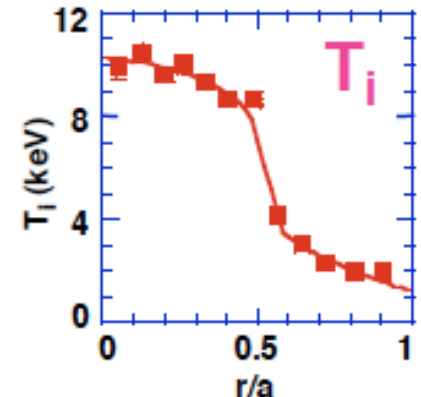
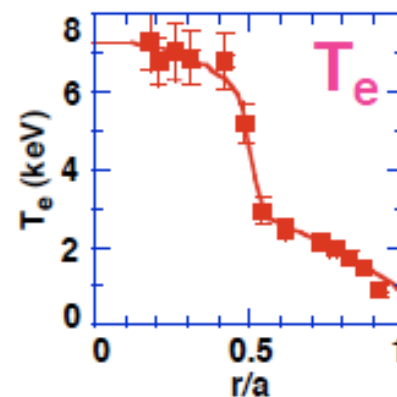
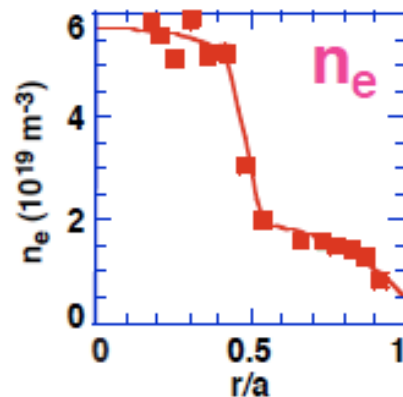
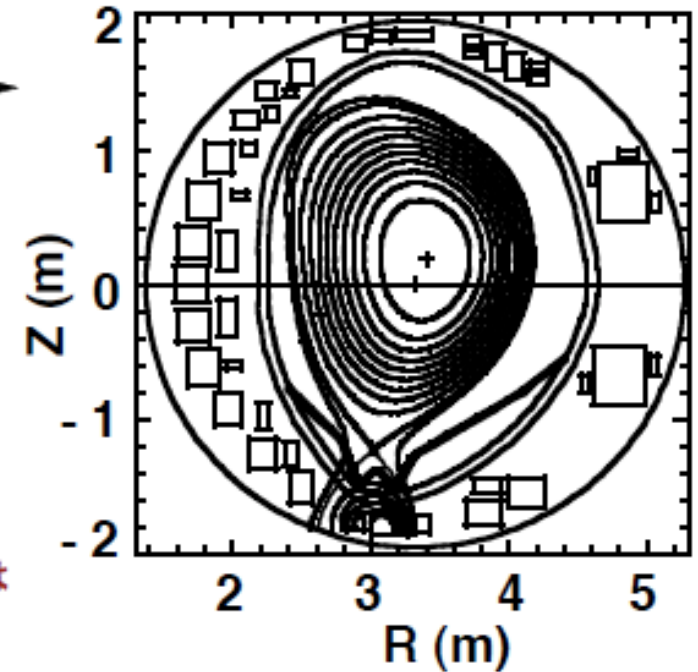
$$\frac{1}{\mu_0} F \frac{dF}{d\psi} = C (1 - A(1)) R_p^2 Y(\psi)$$

$$Y(\psi) = 1 - \psi_n^3 + A(4) + A(2)(\psi_n - \psi_n^3) + A(3)(\psi_n^2 - \psi_n^3)$$

$$\psi_n = \frac{\psi - \psi(0)}{\psi(1) - \psi(0)}$$

フィッティング関数は数種類ある

プラズマ内部の計算 (SELENE Code)** → 平衡 DB に登録

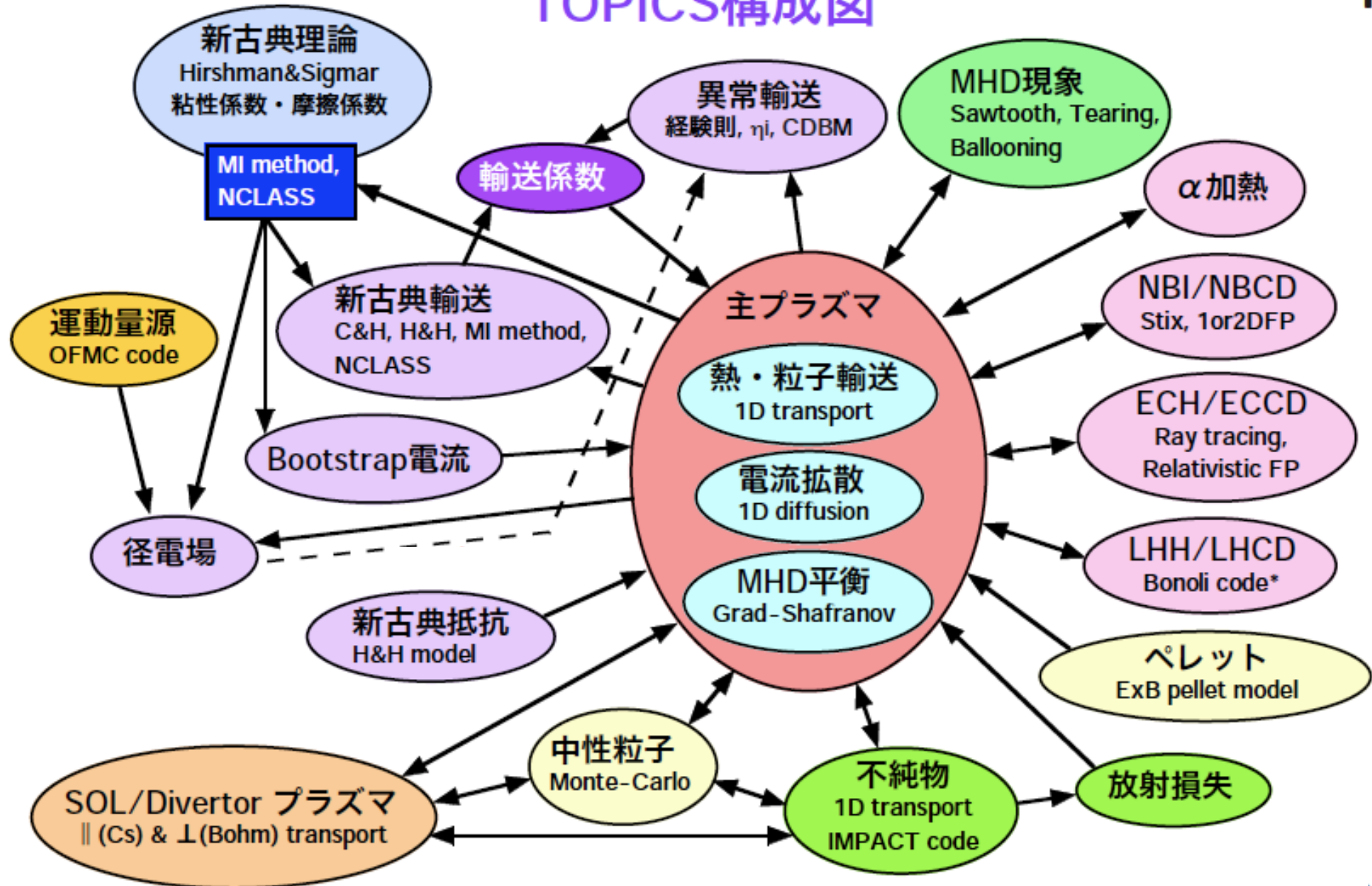


* 辻、他、JAERI-M 86-006 (1986).

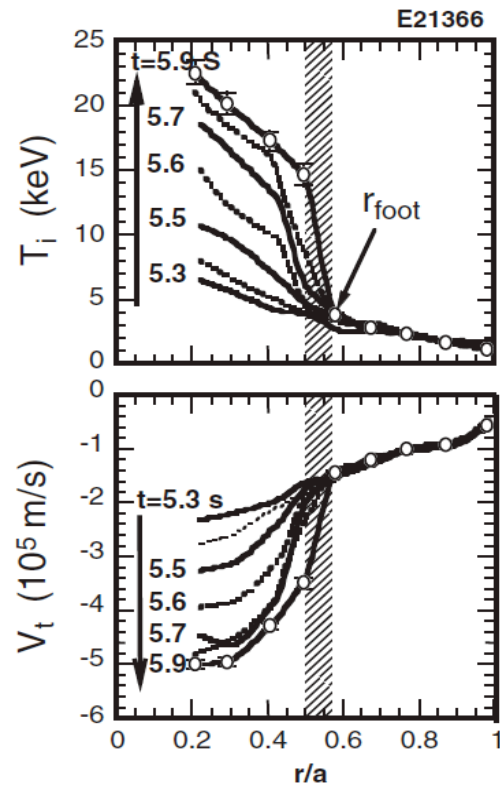
** T. Takeda, et al., JAERI-M 8042 (1979).

輸送解析コードTOPICS

TOPICS構成図

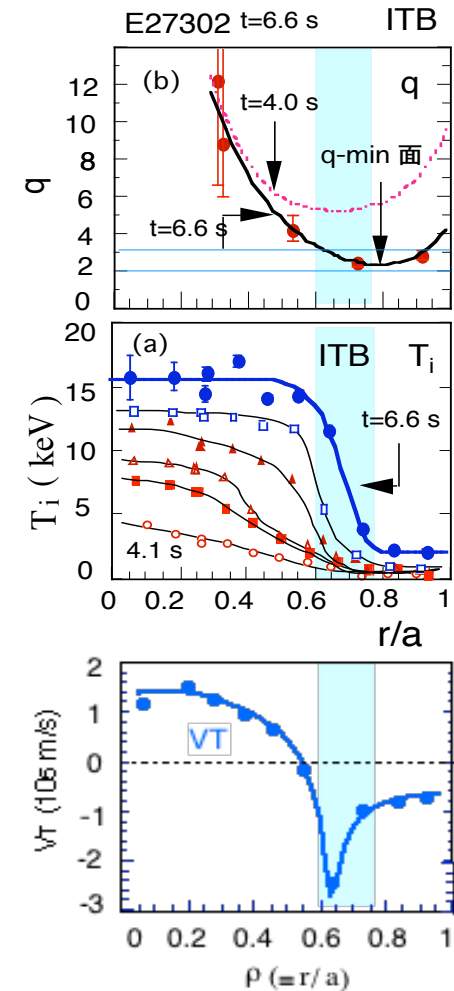
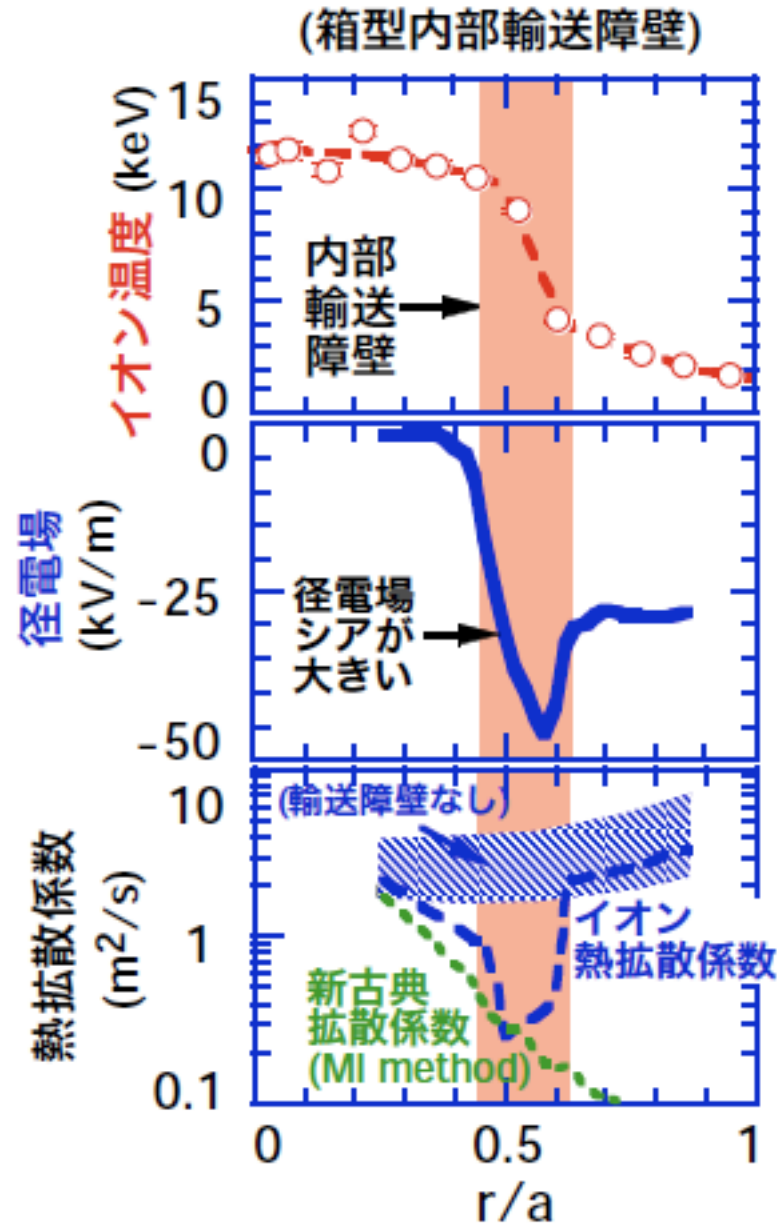


輸送改善モードの解析



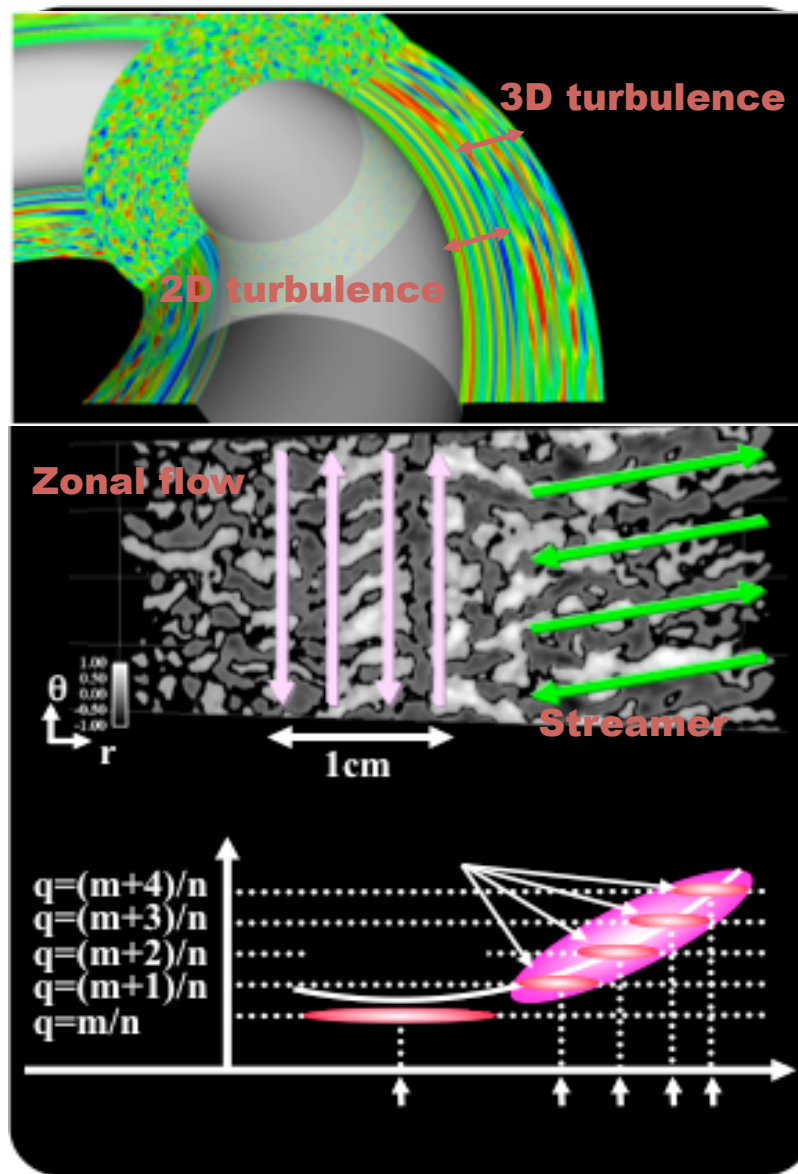
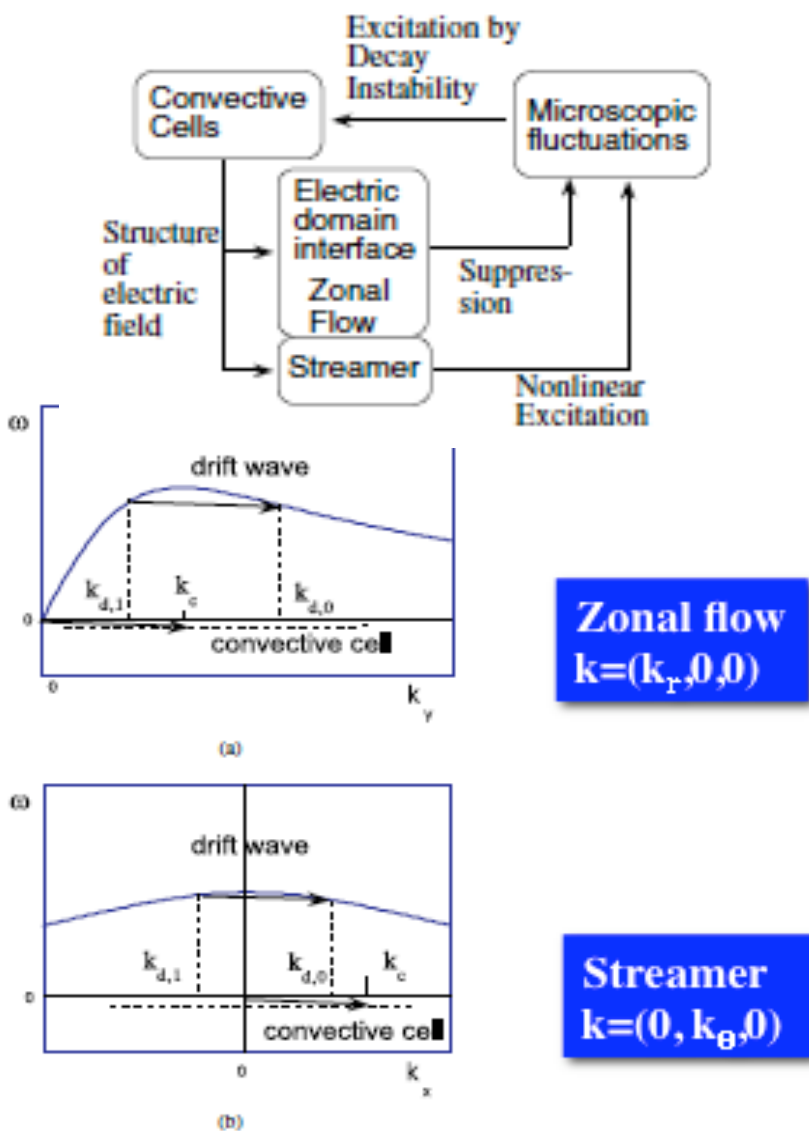
High β_p mode: Koide IAEA94
Impurity Toroidal Rotation:

輸送コードによる
閉じ込め特性解析



RS mode: Fujita NF38(1998)207

輸送改善モードの解析

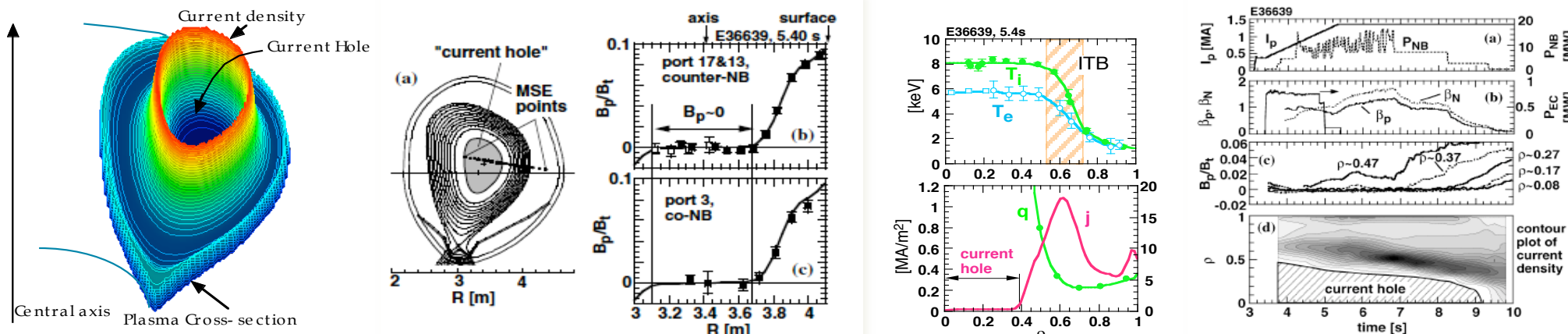


乱流コードによる異常輸送と閉じ込め改善の解明

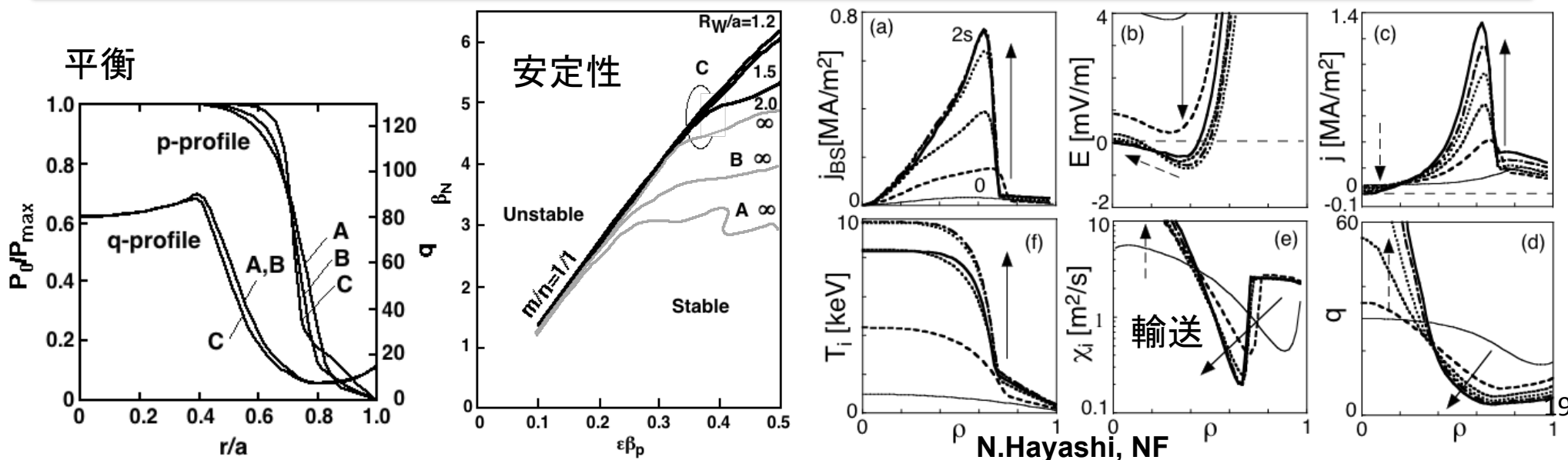
電流ホールプラズマの発見

負磁気シアプラズマの極端な場合として電流ホール
(Current Hole) を観測 $q(0) \rightarrow \infty$

T. Fujita et al., P.R.L. 87(2001)245001
N.C. Hawkes et al., P.R.L. 87(2001)115001



電流ホールプラズマによる高ベータの可能性。形成機構、新古典輸送レベルの閉じ込め。



N.Hayashi, NF

アルフェン固有モードの観測／解析 (TAE, EAE, NAE, RSAE)

Shear Alfvén wave resonance:

$$\omega = k_{\parallel} V_A, N_{\perp} = ck_{\perp} / \omega \rightarrow \infty$$

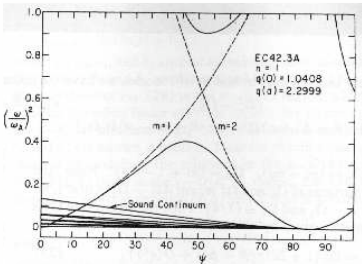
Toroidal coupling of m and $m+1$ produces frequency range Alfvén resonance is prohibited.

$$[(k_{\parallel m}^2 - (\omega/V_A)^2)(k_{\parallel m+1}^2 - (\omega/V_A)^2) - \epsilon^2 (\omega/V_A)^2] = 0$$

$$k_{\parallel m} = (n-m/q)/R$$

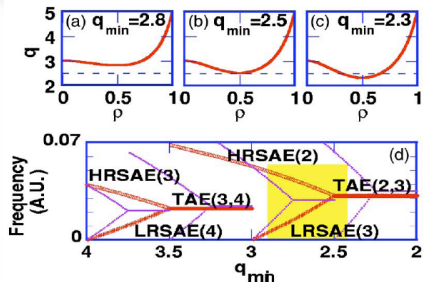
$$k_{\parallel m} = -k_{\parallel m+1} \rightarrow q = (m+1/2)/n$$

Spinor : $\sin(m\theta) + \sin((m+1)\theta) = \sin[(m+0.5)\theta] \cos(0.5\theta)$
 Mobius band (periodic with two circulation) can not resonate.

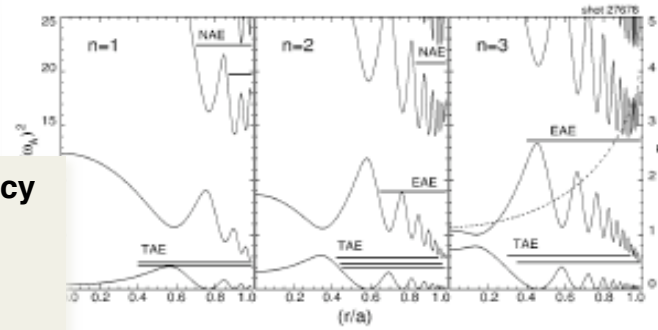


Τησ Torοιδιχιτησ-ινδυχεδ shear Alfvén Eigen mode can be destabilized by the coupling with Energetic Particles if the α pressure gradient is high enough.

$$\omega_{* \alpha} = \mu_{\alpha} T_{\alpha} (\delta \lambda_{\nu \alpha} / \delta \rho) / e_{\alpha} B r > \eta \omega \quad (\eta = 0.5 - 1)$$

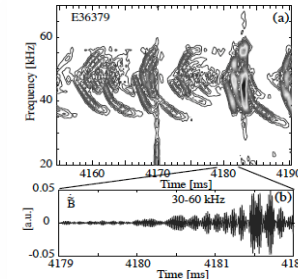
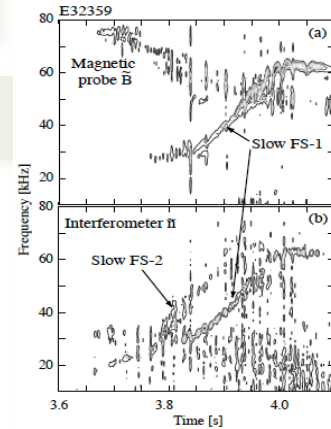


Takechi PoP05; RSAE



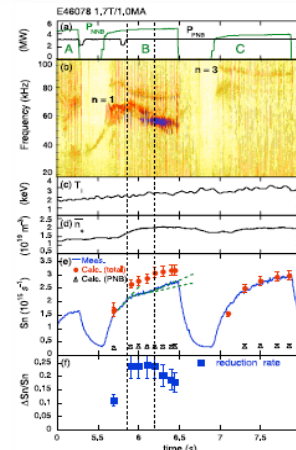
シアアルフェン波解析によるEAE、NAEモードの同定

Kramer PRL98; EAE, NAE



AEモードの非線形性。非線形性シミュレーションへの提言

ShinoharaNF01; Slow Freq. Sweeping, Fast FS



輸送コードによる中性子発生量の評価によるAEモードによる高エネルギー損失の解析

Ishikawa NF07 EP transport

燃焼プラズマに向けて

Integrated modeling in JAEA

- **To progress the high beta steady state research, it is necessary to understand complex features of ITER and the advanced tokamak plasmas.**
 - **Because, in the steady state, plasma has very wide time scale and spatial scale, and it has complex physics such as turbulence, transport, MHD, wave-particle interaction, plasma-wall interaction, atomic and molecular physics, and so on**
- **Exploration and understand of the complex plasma are big issues.**
 - **High confinement, high beta, high bootstrap fraction, high radiation fraction, control of ash and impurity, α -heating, etc.**
- **Control of the complex plasma are also serious issues.**
 - **Strong coupling of each physics mechanism, i.e. autonomous plasmas**

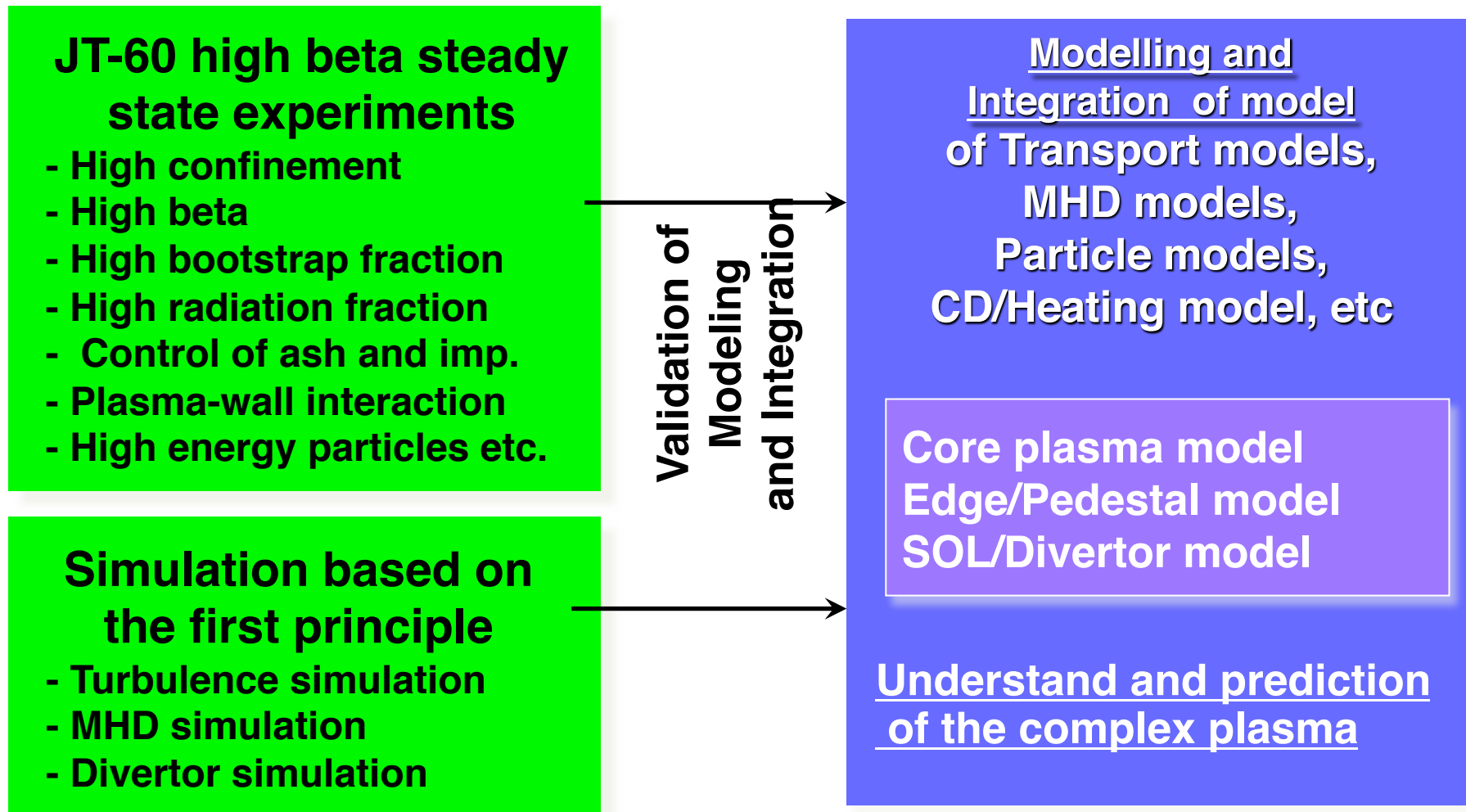
To solve these issues:

- **Modeling and integration of the model are a useful method for the complex burning plasma. JAEA is planning to make the integrated code for the burning plasma analysis.**

物理モデルの開発と統合化への方策

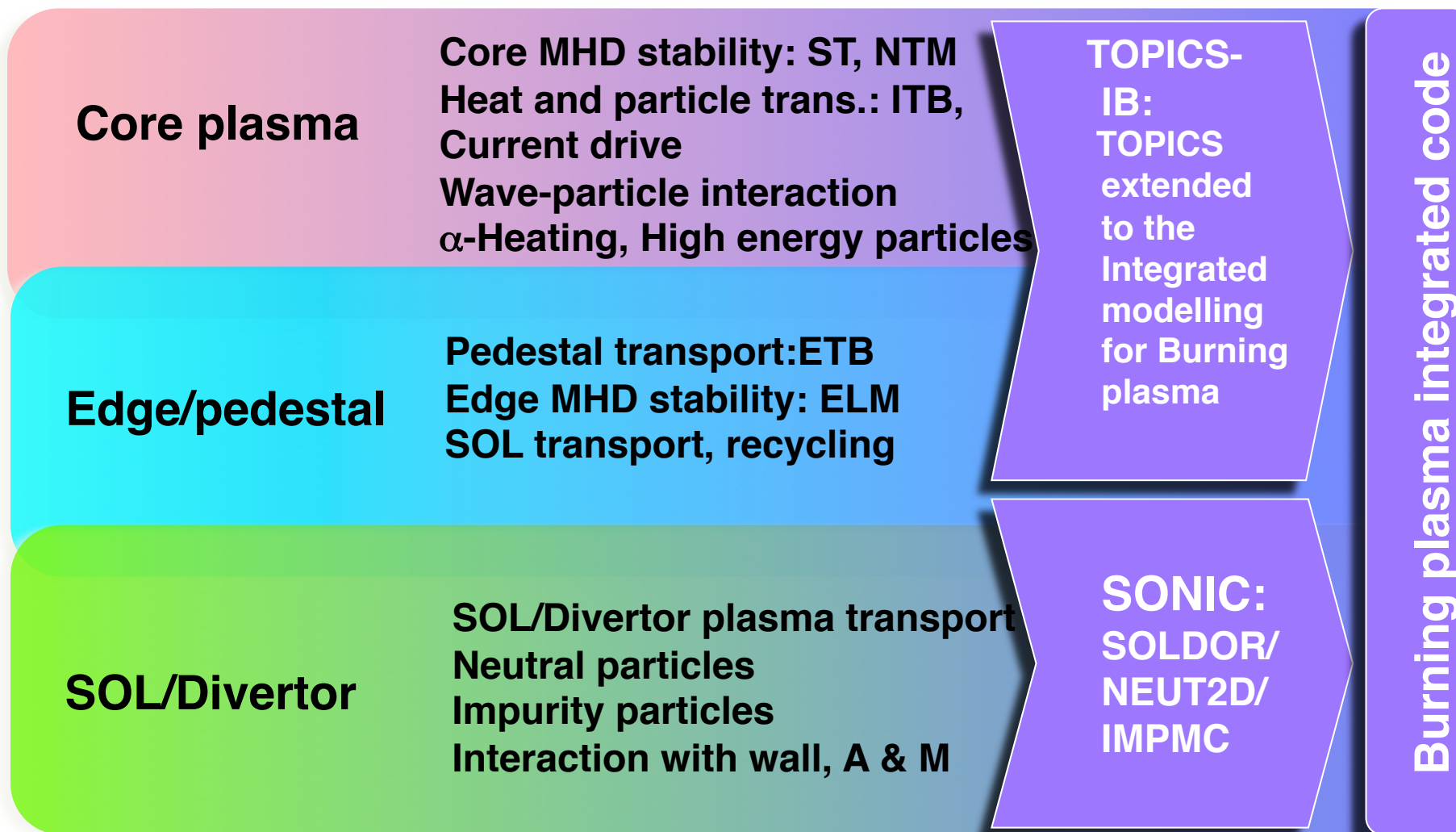
Integrated modeling in JAEA

To make the integrated model, validation is necessary based on the fundamental researches of experiment and simulation.



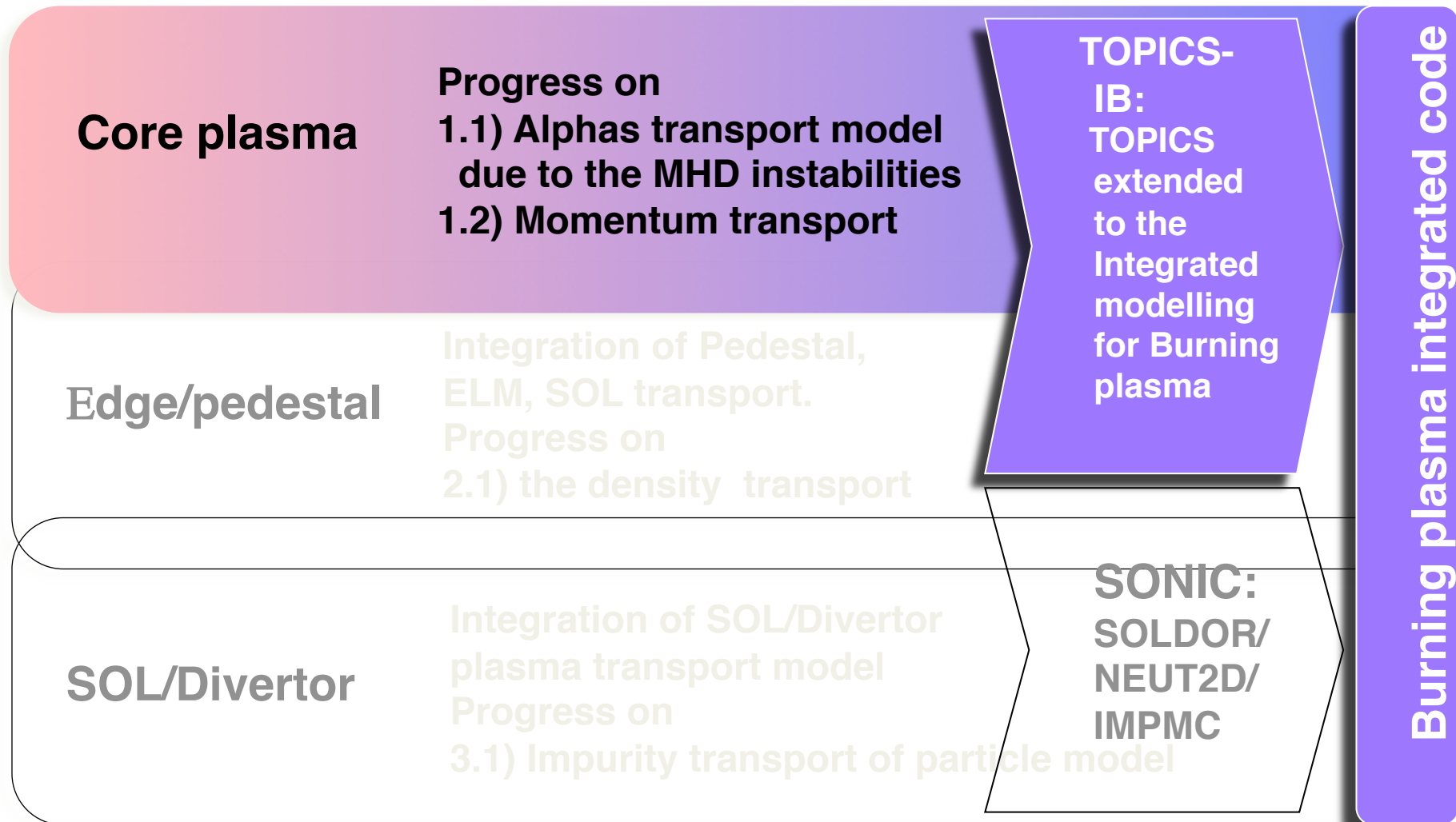
統合コードの開発

Integrated modeling in JAEA



コアプラズマ領域の統合化

Integrated modeling in JAEA



コアプラズマ領域の統合化

- ・核燃焼のコア領域、コアプラズマ輸送領域、主要なMHD安定性発生領域
- ・時間スケール、空間スケールが大きく異なる核燃焼プラズマの制御が必要な領域

核燃焼モデル(α 加熱、 α 粒子輸送、磁気流体モード(アルフェン固有モード等)との相互作用)の開発・統合: α 粒子モデルの統合輸送コードと結合

$f(v, \rho, t)$: **Velocity distribution function of alphas** v : velocity, ρ : minor radius

$$\frac{\partial}{\partial t} f(v, \rho, t) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \left(-D(v, \rho) \frac{\partial f}{\partial \rho} + V_{AN}(v, \rho) f \right) \right] = \sum_j C_j(f) + S(v, \rho) - L(f)$$

2D Fokker-Planck Equation

$$D(v, \rho) = D_{NC}(v, \rho) + D_{AN}(v, \rho)$$

○ $D_{NC}(v, \rho)$: **Neo-classical diffusion**

$$D_{NC}(v, \rho) = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon} \frac{\Delta_b^2}{\tau_{eff}}}, \Delta_b = \frac{2v \cos \alpha}{\Omega_p}, \tau_{eff} = \frac{4\varepsilon}{1+\varepsilon} \tau_{\perp}(v), \varepsilon = \frac{\rho}{R_0}, \tau_{\perp}(v) : \text{Pitch angle scat. time}$$

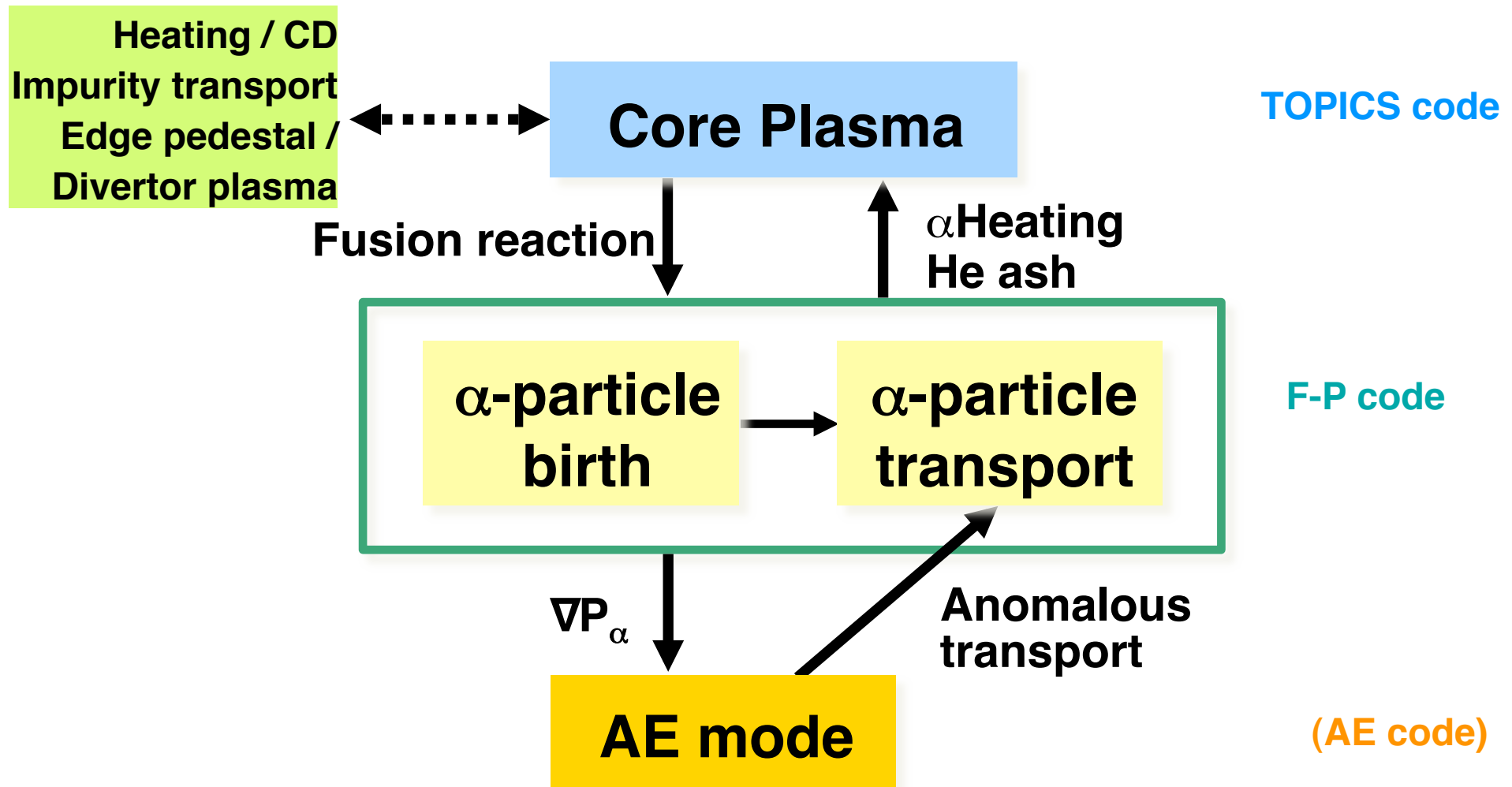
○ $D_{AN}(v, \rho)$ & $V_{AN}(v, \rho)$: **Anomalous diffusion & convection**
model of the resonance with MHD instability

○ $C_j(f)$: **Collision term colliding with j -th bulk plasma**

$S(v, \rho)$: **Particle source**

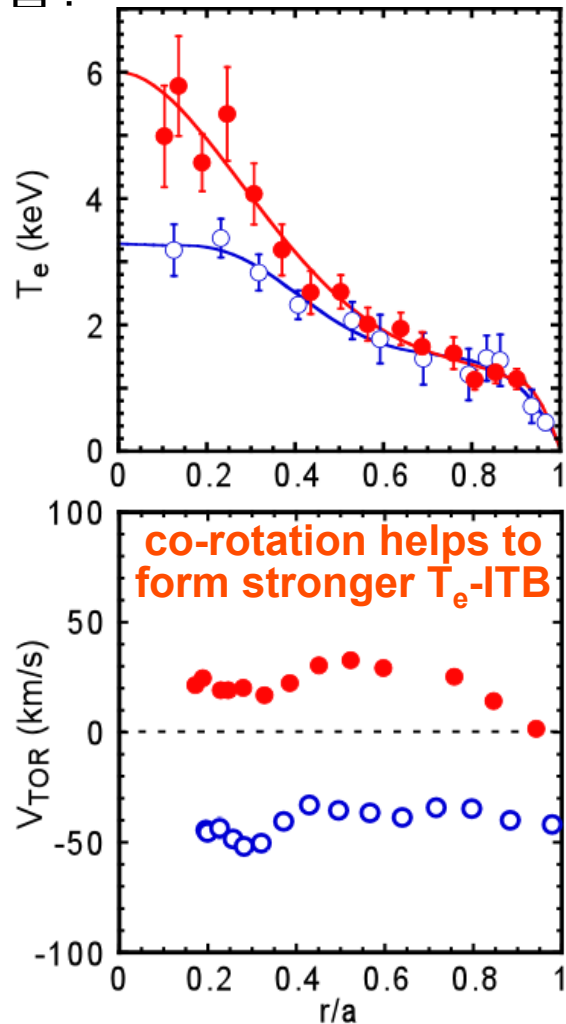
$L(f)$: **Loss term** removes slowed down particles

AEモードによる異常輸送モデルと自立性・回帰特性の解明へ

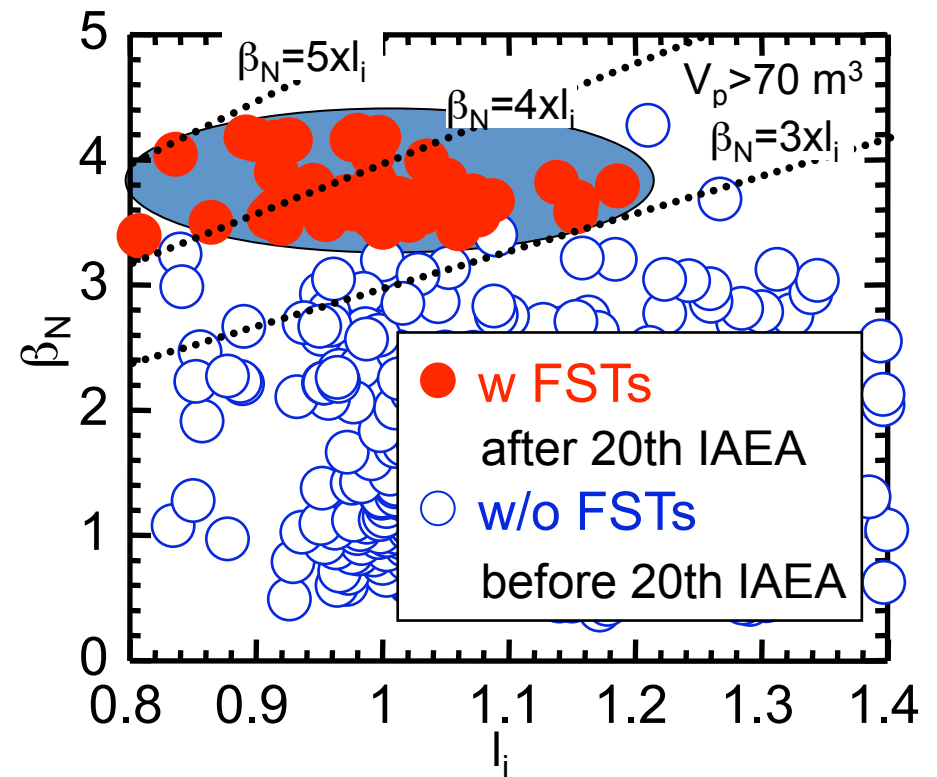


運動量輸送モデル, TASK/TX

プラズマ回転による熱・粒子輸送の改善:



プラズマ回転によるMHD安定性の向上



JT-60においてリップル磁場低減による電流方向トロイダル回転の増加。閉じ込め／安定性の向上

運動量輸送モデル, TASK/TX

Integrated modeling in JAEA

- ・プラズマ回転と熱・粒子輸送、MHD安定性の相互作用解明に向けて、運動量輸送の統合化
- ・運動量輸送モデルの開発

Multi-fluid equations [1]

[M. Honda and A. Fukuyama, *Journal of Computational Physics* **227** (2008) 2808]

Flux-surface averaged equations in the cylindrical coordinates

Simultaneously solving 21 equations consisting of two-fluid equations for electrons and ions

Continuity equations

Momentum equations in the radial, poloidal and toroidal directions

Energy transport equations

Maxwell's equations

Equations for beam ions and neutral diffusion equations

Main features of the code

Self-consistent calculation of the radial electric field E_r and the rotations

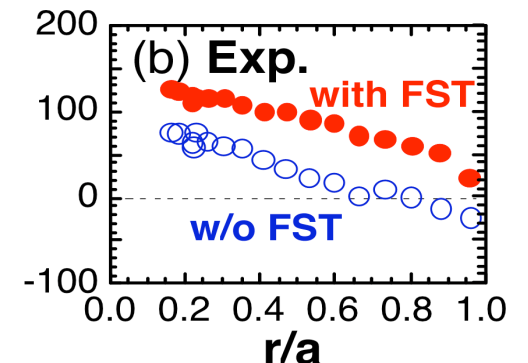
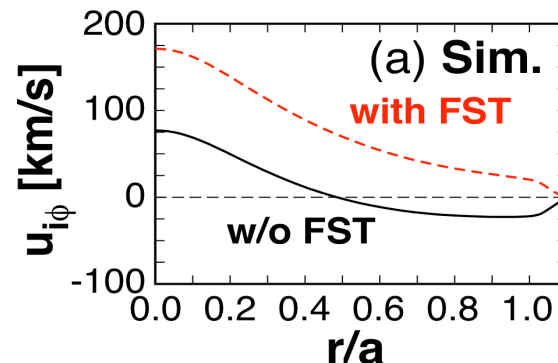
No need of explicit quasi-neutrality

Analyzing the behavior of a whole plasma including the SOL

TASK/TX により JT-60U 実験結果を再現、機構の解明 [2]

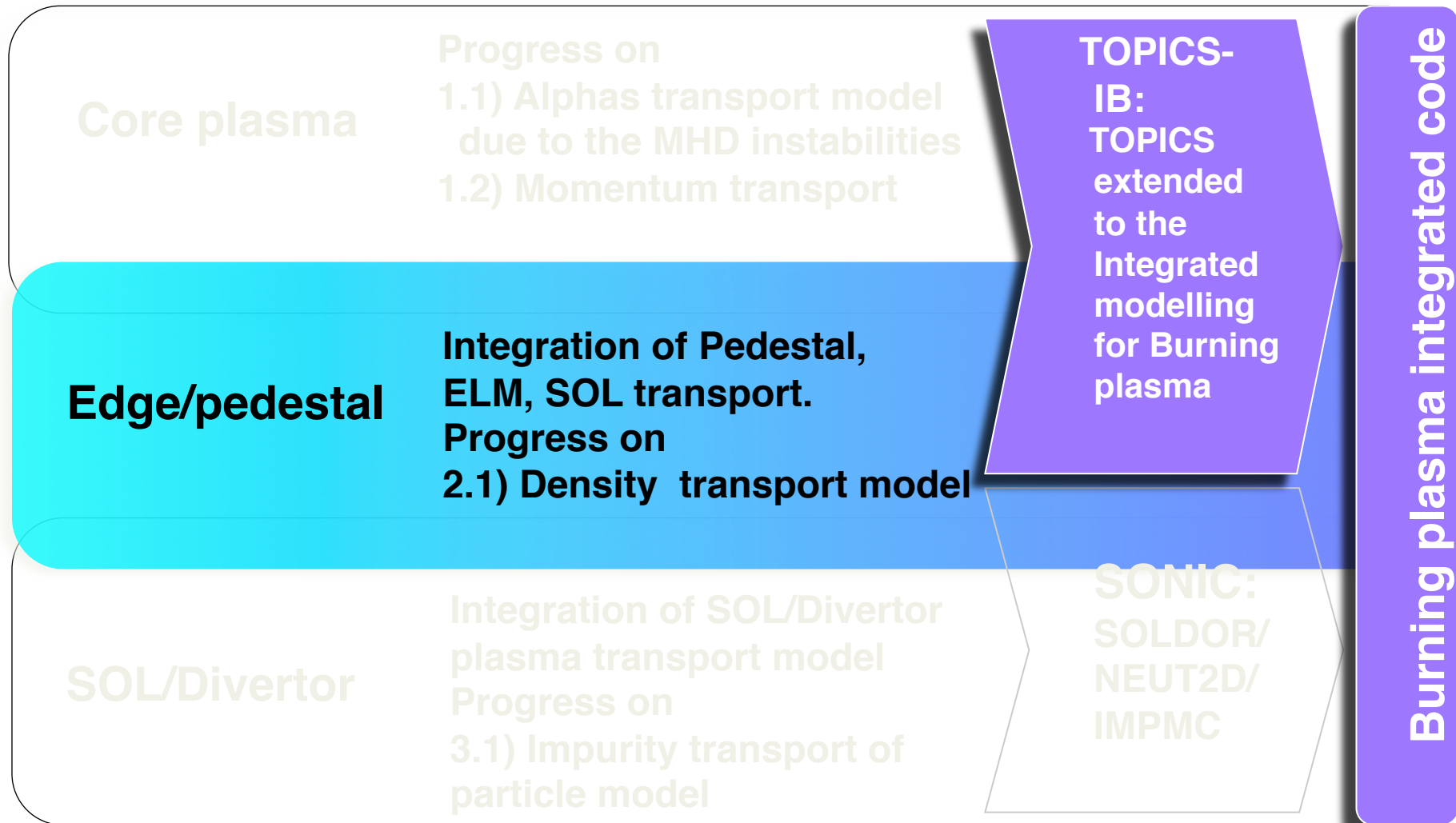
[2] M. Honda et al., *Nuclear Fusion* **48** (2008) 085003

コアプラズマの統合化により核燃焼プラズマのシミュレーションへ



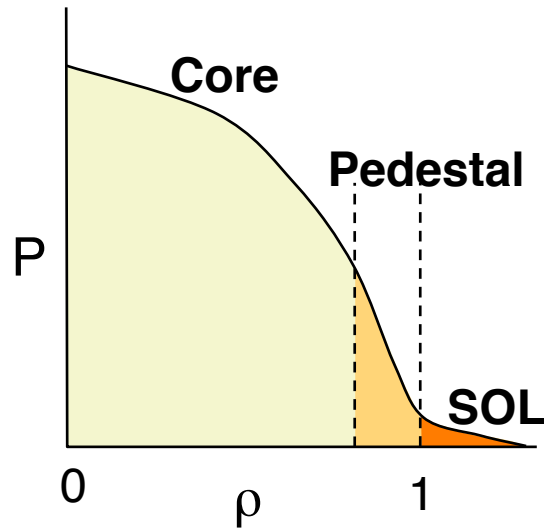
Edge/Pedestal領域の統合化

Integrated modeling in JAEA

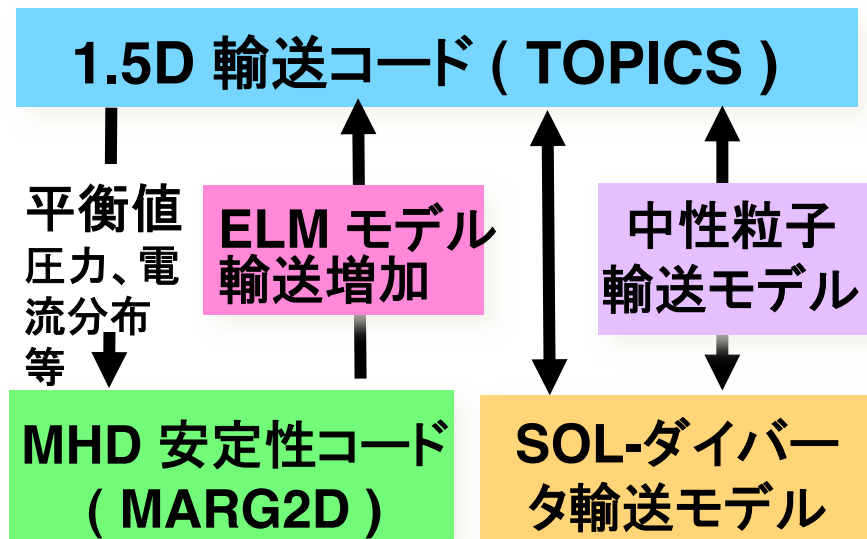


Edge/Pedestal領域の統合化

- Edge/pedestal 領域は、様々な物理の連結する領域



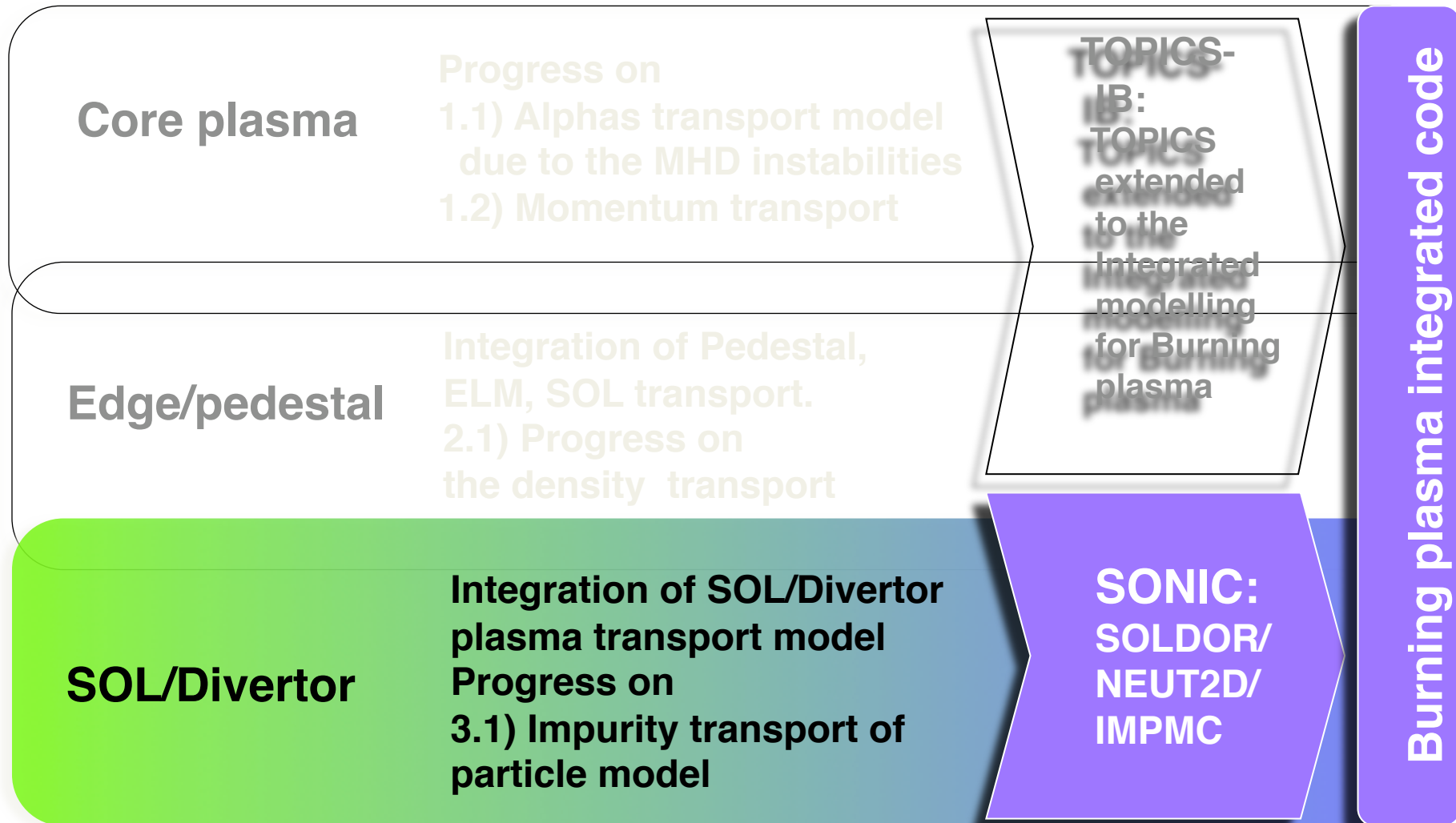
- Pedestal / ELM
 - Stability: low- n and high- n modes, peeling
 - Transport: Pedestal width, ETB, turbulence, flow,..
 - SOL/Divertor
 - Parallel transport
 - Neutral / Impurity/ Recycling
- These factors interact with one another.



- 有力な解決策として、輸送コードをベースに、MHD安定性コード、SOLダイバータ輸送コード、中性粒子輸送コードを統合する。
- 燃焼プラズマの制御に向けた指針を示す。(当研究会、明日の講演、林)

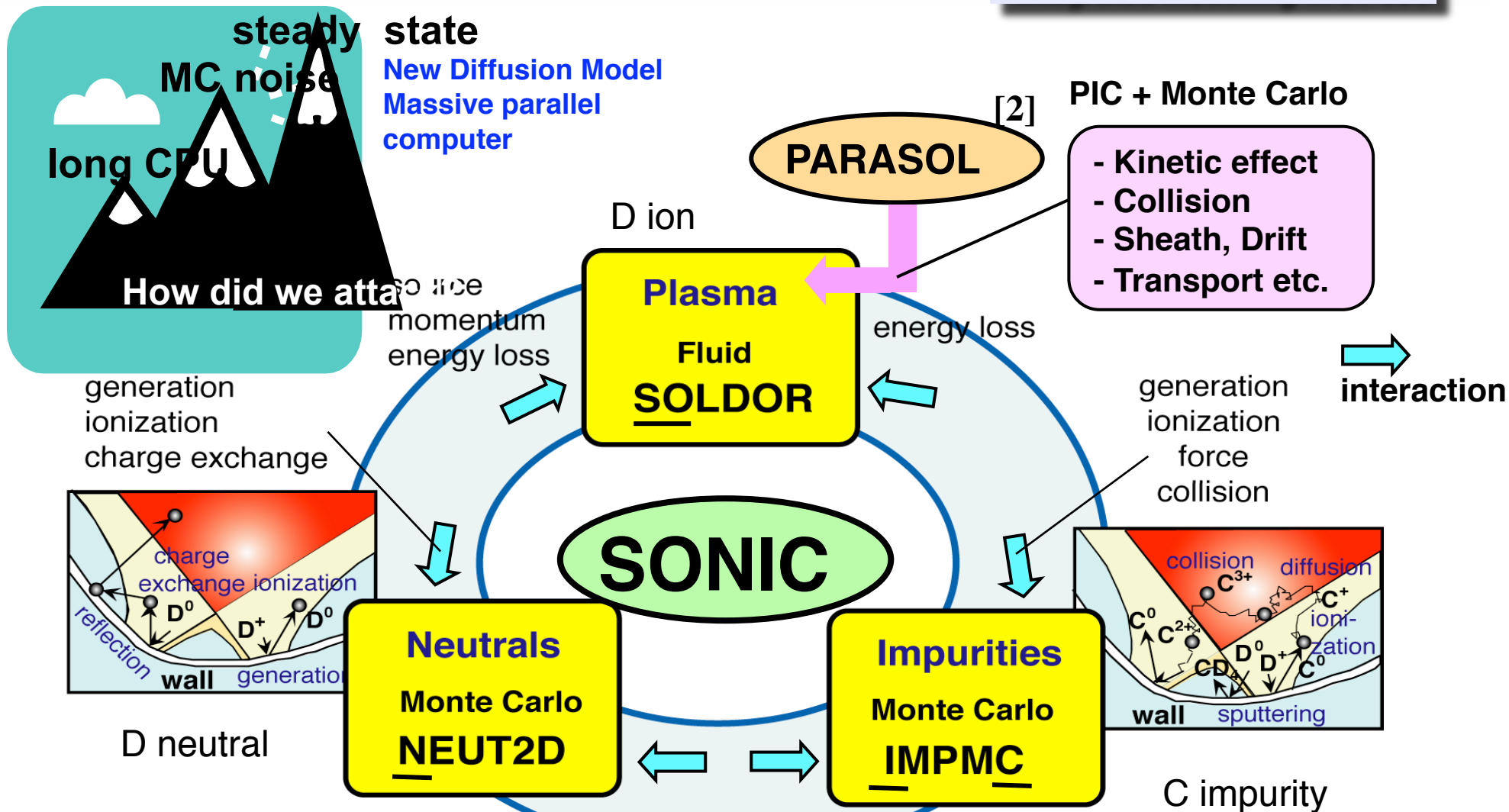
SOL-ダイバータ領域の統合

Integrated modeling in JAEA



SOL-ダイバータ領域の統合: SONIC

Integrated modelling in JT-60U



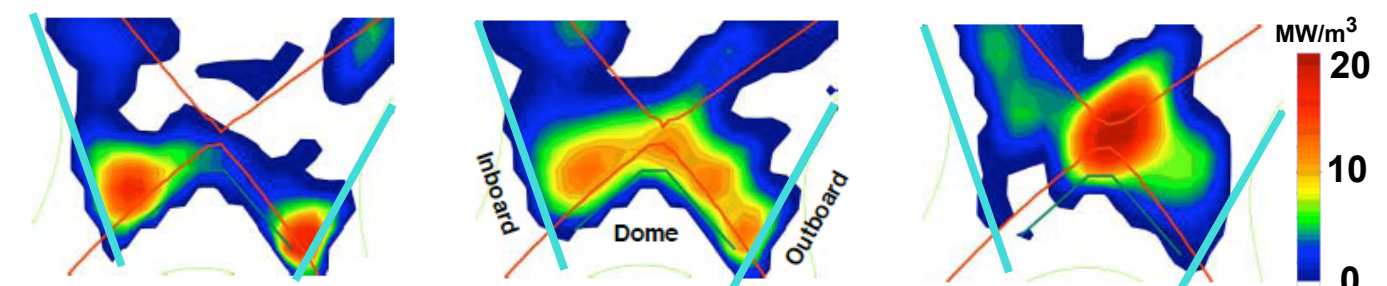
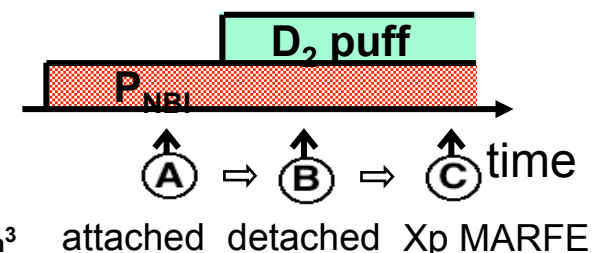
The elaborate impurity Monte Carlo code (IMPIC) has been successfully combined with divertor code [1].

[1] K. Shimizu, et al., 17th PSI (2006).
 [2] T. Takizuka, et al., 15th PSI (2002).

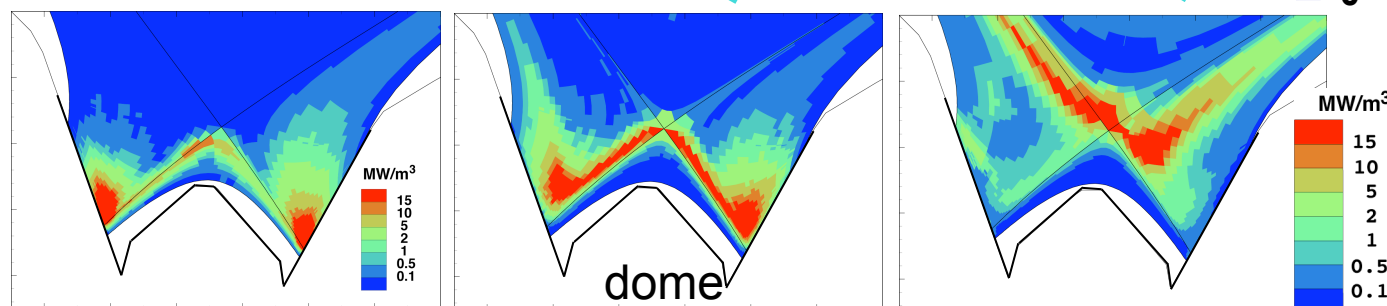
SONICコードによるX点 MARFE シミュレーション

To reduce the high heat load onto the divertor plate, the control method for impurity retention in the divertor region should be established.

SONIC simulations reproduced the formation of X-point MARFE in JT-60U discharge with high heating NBI power.



JT-60U
experiment
($P_{NB}=15\sim 20MW$)



SONIC
simulation
($P_{NB}=15MW$)

attached plasma

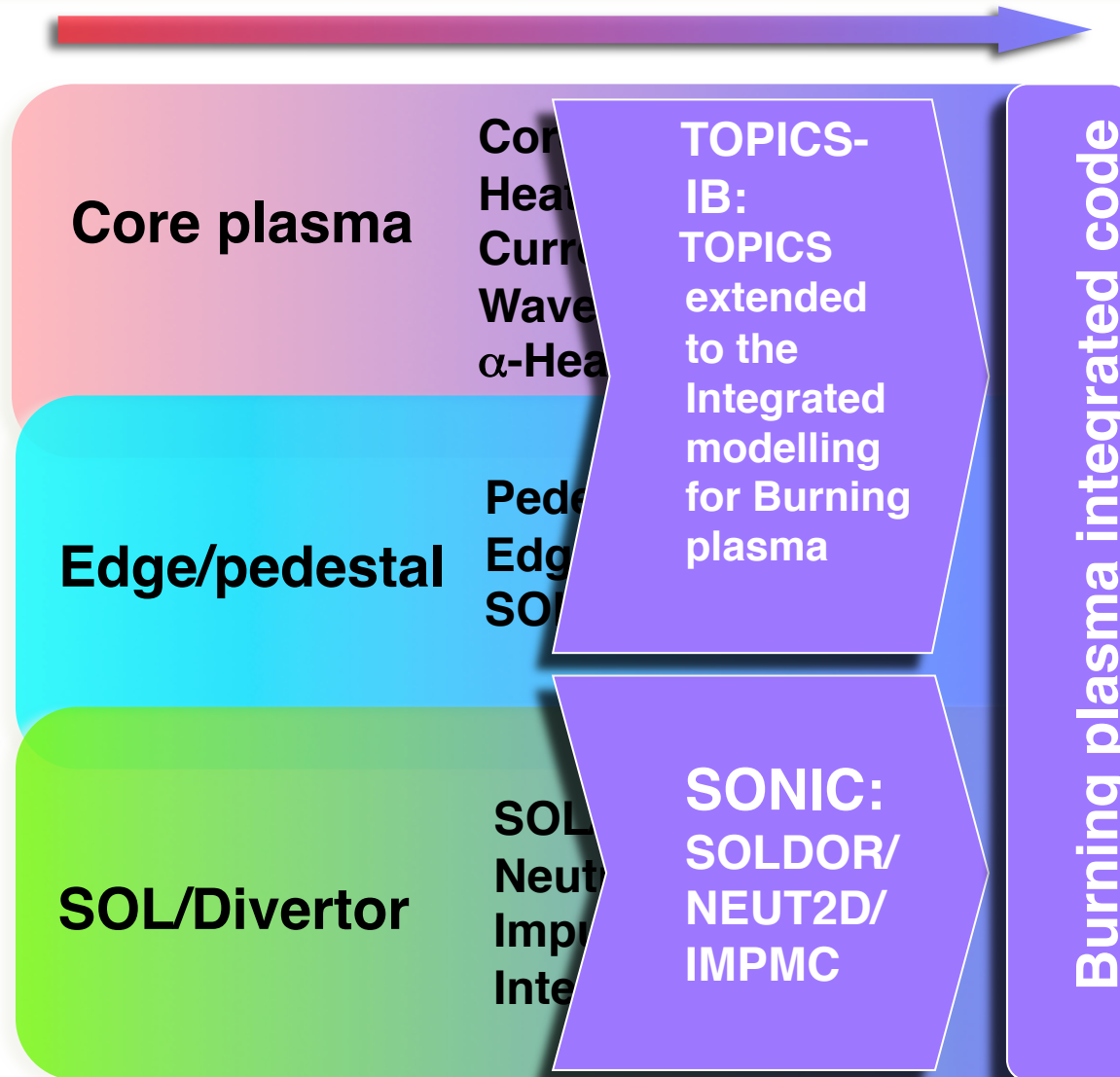
detached plasma

X-point MARFE

Hydrocarbons sputtered from the dome contribute to the enhanced radiation near the X-point.

全トカマクプラズマ統合モデルの開発へ

Integrated modelling in JT-60U



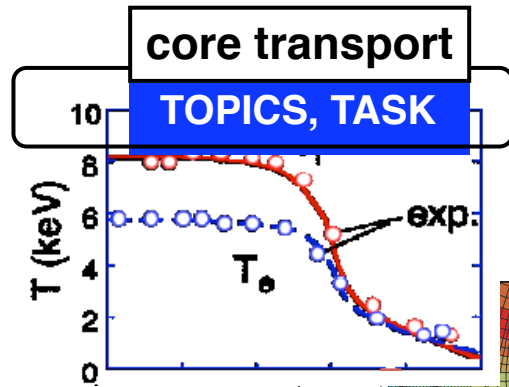
Two ways for whole plasma simulation of burning plasma

- 1) TOPICS-IB will extend to the divertor region:
 - Dynamic response
 - Simple divertor model
 - Transport model is key
- 2) SONIC will extend to the core region:
 - Accurate divertor model
 - 2D transport model

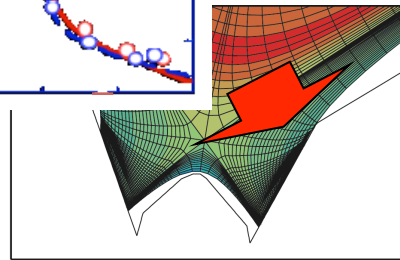
The construction of integrated model according the purpose of research is important.

全トカマクプラズマ統合モデルの開発へ

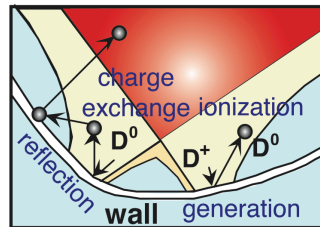
Integrated modeling in JAEA



The integration with the core transport code is planned.



- Motions based on the magnetic surfaces



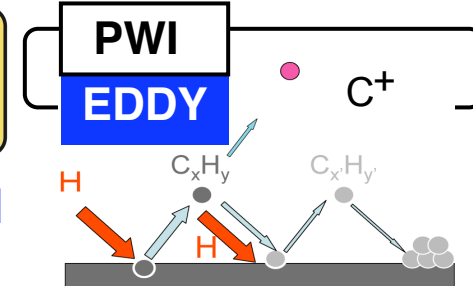
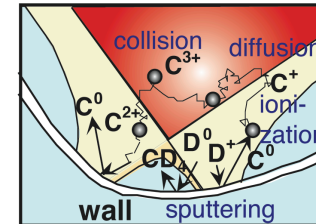
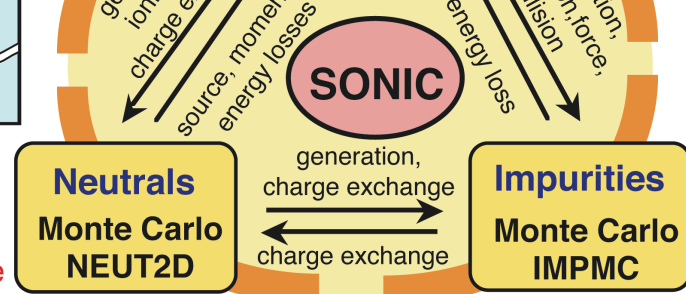
- Straight motion
- Strong dependence on the wall structure

SOL/divertor
SONIC

PIC + Monte Carl
PARASOL

- Kinetic effect
- Sheath, Boundary condition
- Drift, Transport

Plasma
Fluid
SOLDOR



The integration with PWI (EDDY code) is planned.

The impurity Monte Carlo code (IMPIC) has been successfully combined with divertor code.

まとめ

1. JT-60における炉心プラズマの解析

定常・高ベータ化研究を先導。定常核融合炉を推進。

- ✓ ブーストラップ電流による高効率駆動
- ✓ 高ベータ化(高ポロイダルベータ化)による定常化・最適化
- ✓ 内部輸送障壁等による様々な閉じ込め改善
- ✓ リップル低減による高性能化・トロイダル回転の増加
- ✓ AEモード等による高エネルギー粒子挙動の解明
- ✓ ダイバータ特性解明

2. JT-60炉心プラズマの解析に基づくJT-60SAおよびITER燃焼プラズマの解明に向けて

- ✓ 統合モデルの開発(核燃焼モデル、Edge/Pedestal、SOL/Div.)
- ✓ 複雑現象、マルチスケール現象の解明に貢献
- ✓ 核燃焼プラズマの制御に貢献
- ✓ 全プラズマモデルの統合化へ