

ヘリカル核融合炉概念設計と プラズマ運転制御シナリオ検討

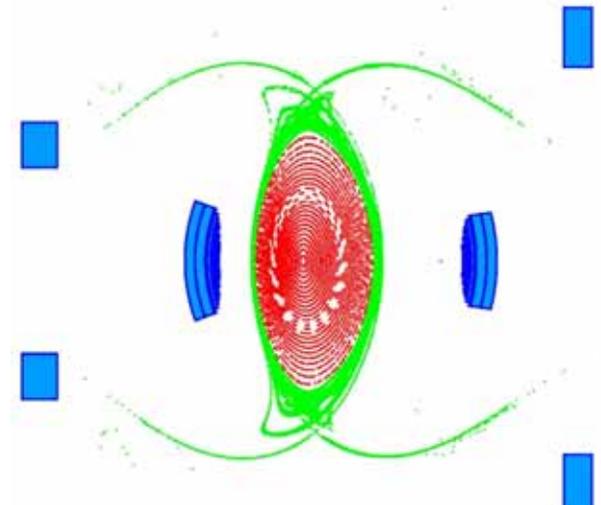
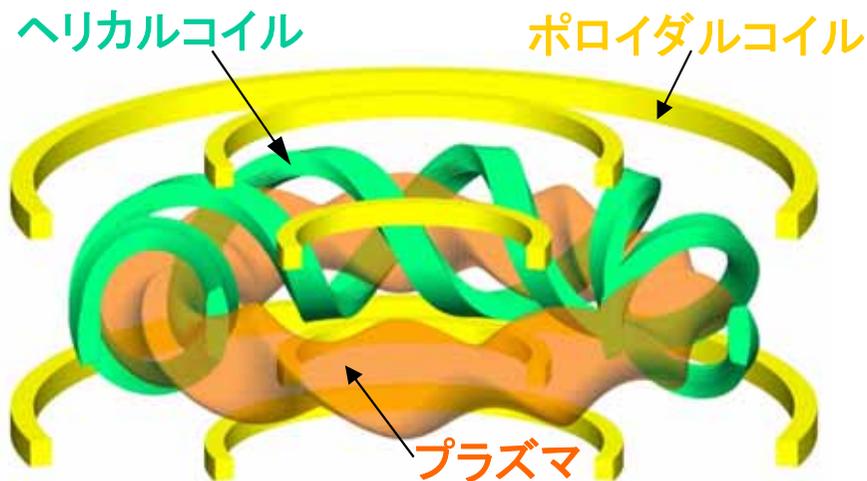
後藤 拓也、柳 長門、濱口 真司、田村 仁、田中 照也、
宮澤 順一、坂本 隆一、相良 明男、FFHR設計グループ
核融合科学研究所 核融合工学研究プロジェクト

第17回若手科学者によるプラズマ研究会

2014.3.5-7、日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

ヘリカル系＝無電流プラズマ

- ヘリカル＝外部導体のみで閉じ込め磁場を形成する
環状閉じ込め装置＝無電流プラズマ
 - ディスラプションがなく定常運転が容易
 - 定常電流駆動が不要で自己点火(Q無限大)運転が可能
- ヘリオトロン＝ヘリカルコイル＋ポロイダルコイル
 - 比較的シンプルなコイル・プラズマ形状
 - ダイバータ磁力線構造



ヘリカル核融合炉FFHR-d1の概念設計活動を 2011年度より開始

- 核融合研におけるLHD型ヘリカル核融合炉の設計活動
 - 1990年代半ばの“force-free”コンセプト提案が発端
 - LHD実験の成果を受け設計の改良を継続
 - FFHR-2m2: 30年運転を前提とした商用炉提案

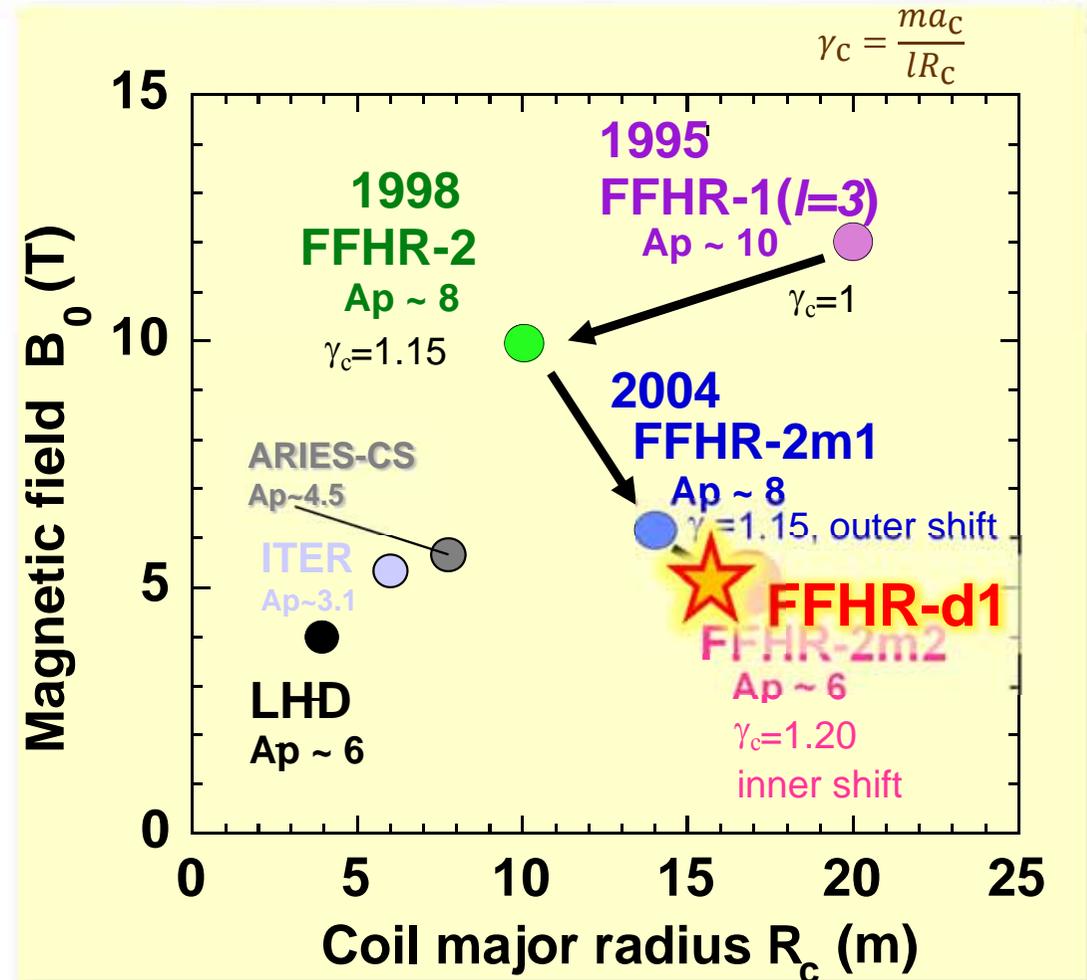


Figure from A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des. **85** (2010) 1336.

- FFHR-d1 は設計のロバスト性、建設の実現可能性、安全性などの強化を目指したFFHRの“Re-design”

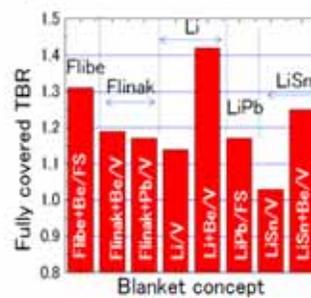
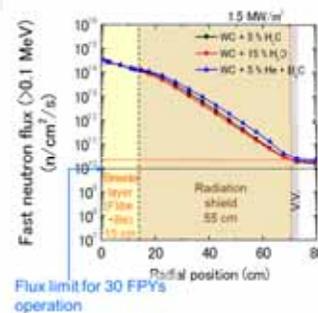
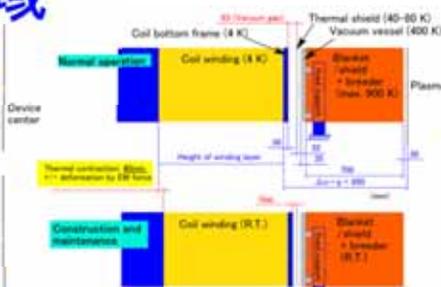
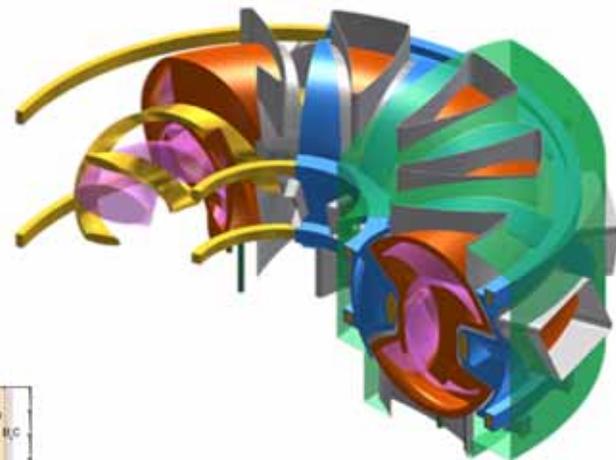
設計の第1ラウンド

～FFHR-d1の主要設計パラメータを決定～

● 第1ラウンド (2010 – 2011年度)

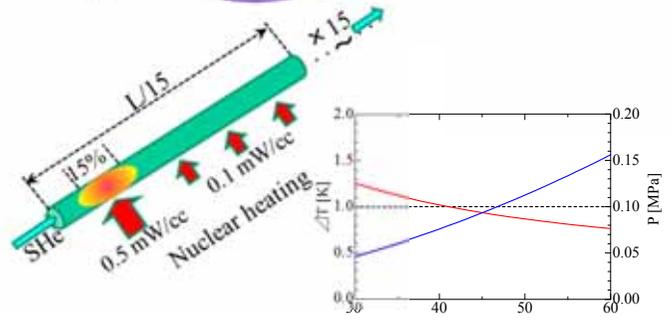
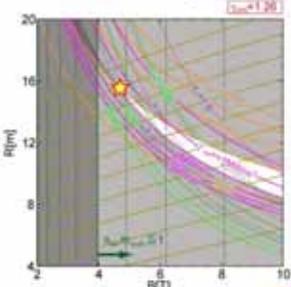
- システムコードによる設計領域解析と関連タスクによる精査

A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des. **87** (2012) 594.
T. Goto *et al.*, PFR **7** 2405084 (2012).

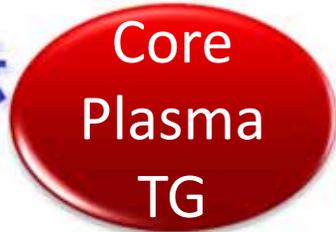


LHD型ヘリカル核融合炉 FFHR-d1

$R_c = 15.6$ m,
 $\gamma_c = 1.2$,
 $B_c \sim 5$ T,
 $P_{fus} \sim 3$ GW,
 $\langle \Gamma_{nw} \rangle = 1.5$ MW/m²



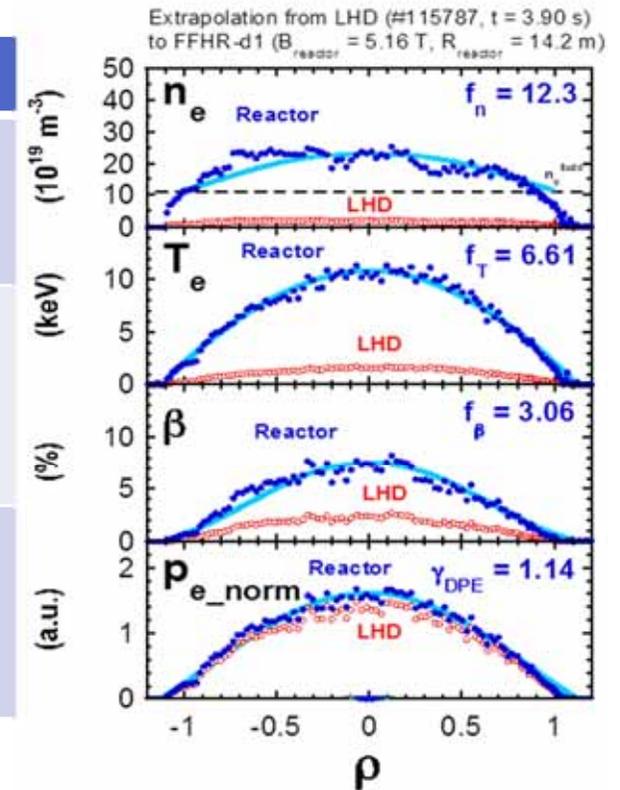
直接分布外挿 (Direct Profile Extrapolation) 法 により炉心プラズマの予測性を向上



J. Miyazawa *et al.*, Fusion Eng. Des. **86** (2011) 2879, Nucl. Fusion **52** (2012) 123007.

- ✓ FFHR-d1設計の最大の特徴
- ✓ Gyro-Bohmモデルに基づきLHD実験結果を炉条件に直接外挿

	ISS (国際ステラレータ則)	DPE (直接分布外挿)
径方向分布	分布形状を仮定 (放物分布) $n(\rho) = n_0(1 - \rho^2)^{\alpha_n}, T(\rho) = T_0(1 - \rho^2)^{\alpha_T}$	実験データをスケールして利用 $n(\rho) = f_n n_{\text{exp}}(\rho), T(\rho) = f_T T_{\text{exp}}(\rho)$
パワーバランス	プラズマ形状および体積の情報が必要 $W_p = \frac{3}{2} \langle n \rangle \langle T \rangle V_p$	分布形状から積分 $W_p = f_R^3 f_n f_T \frac{3}{2} \int_0^1 n_{\text{exp}}(\rho) T_{\text{exp}}(\rho) \left(\frac{dV}{d\rho} \right)_{\text{exp}} d\rho$
閉じ込め性能	経験則による評価 $\tau_E = H^{\text{ISS}} \tau_E^{\text{ISS}}$	実験結果をジャイロボーム則で外挿 $\tau_E = \gamma_{\text{DPE}} * f_a^{2.4} f_R^{0.6} f_B^{0.8} f_P^{-0.6} f_n^{0.6} \tau_{E,\text{exp}}$



$$X_{\text{reactor}} = f_X X_{\text{exp}} \text{ for } X = T(\rho), n(\rho), P(\rho), B, R$$

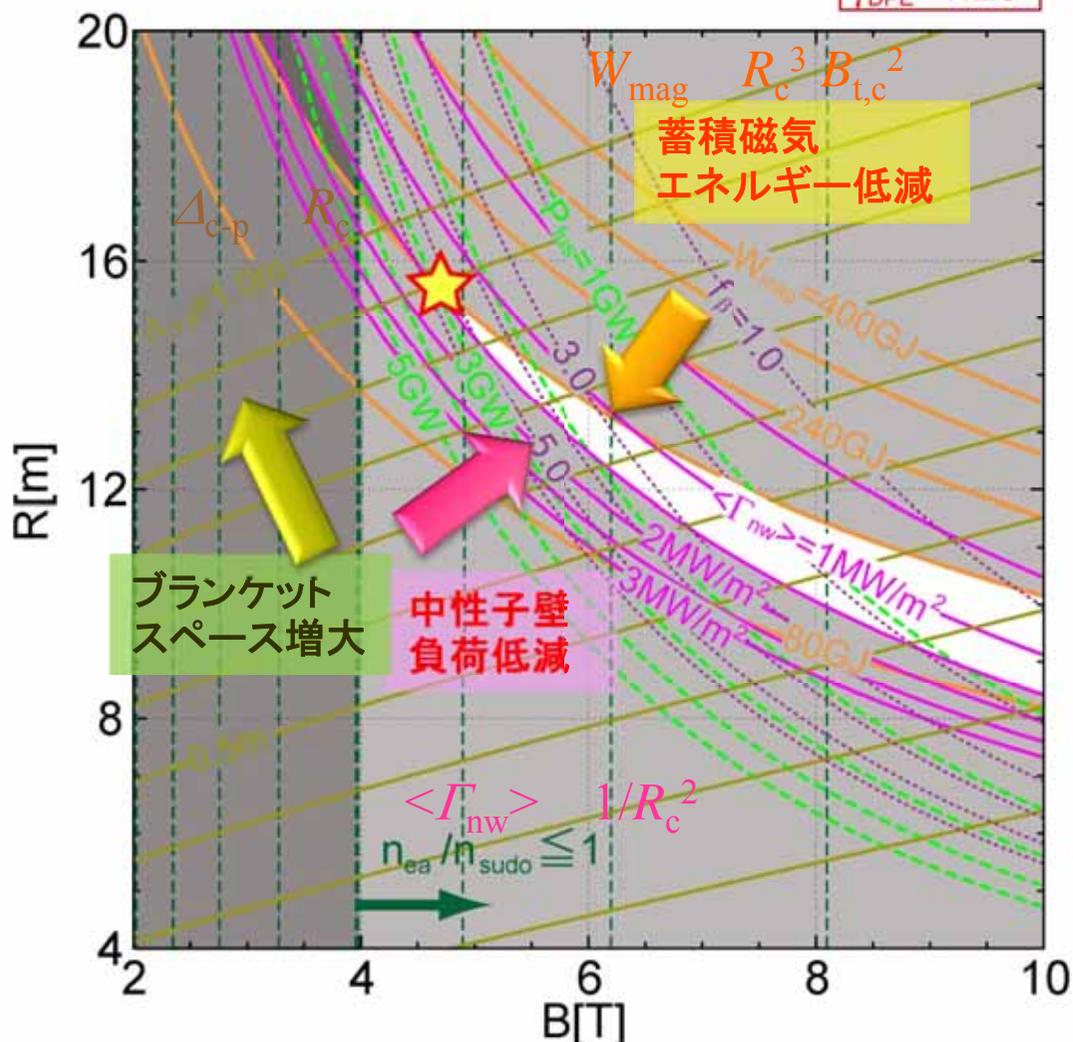
$$f_P = \gamma_{\text{DPE}}^{-2.5} f_\beta^{2.5} f_B^3 f_n^{1.5} \quad f_R^3 f_n^2 \int_0^1 (P'_\alpha - P'_{\text{rad}}) \left(\frac{dV_p}{d\rho} \right)_{\text{exp}} d\rho = f_P P_{\text{exp}}$$

システムコードHELIOSCOPEにより 設計領域解析を実行

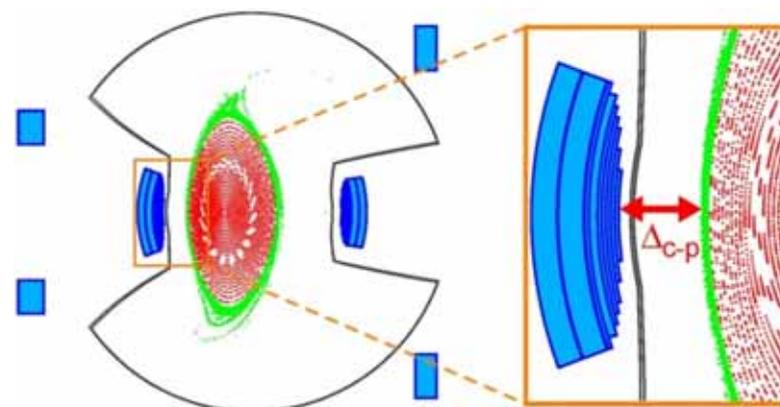
T. Goto *et al.*, PFR 7 (2012) 2405084.

$$R_{\text{reactor}} \propto \gamma_{\text{DPE}}^{-5/6} f_{\beta}^{-1/3} B_{\text{reactor}}^{-4/3}$$

$\gamma_{\text{DPE}}=1.26$



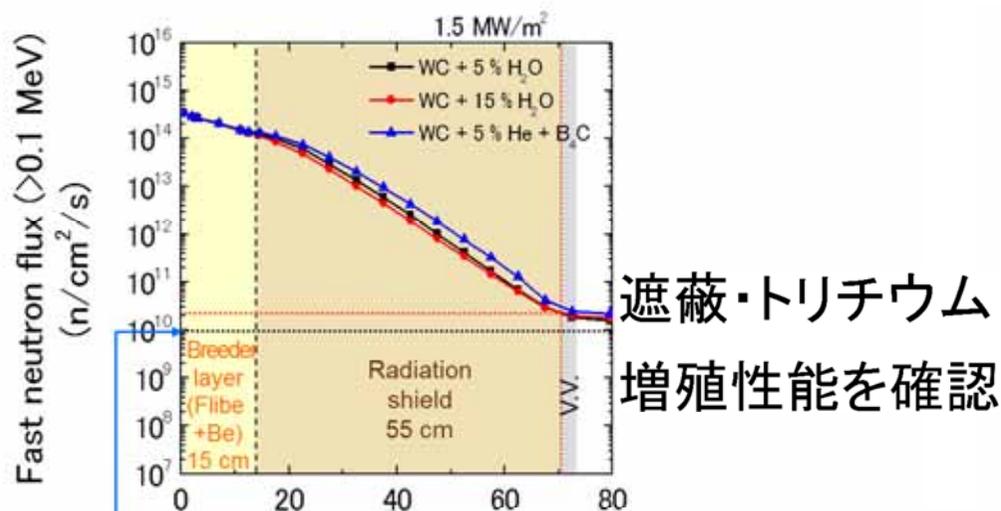
- $j_c=25 \text{ A/mm}^2$, $H/W=2$ を仮定。
- 工学条件として $W_{\text{mag}} \leq 160 \text{ GJ}$ および $\langle \Gamma_{nw} \rangle \leq 1.5 \text{ MW/m}^2$ を採用。
- $R_c=15.6 \text{ m}$, $B_{t,c}=4.7 \text{ T}$ を設計候補点として選択。
- Δ_{c-p} (コイル・プラズマ間最小距離)
: **89cm**



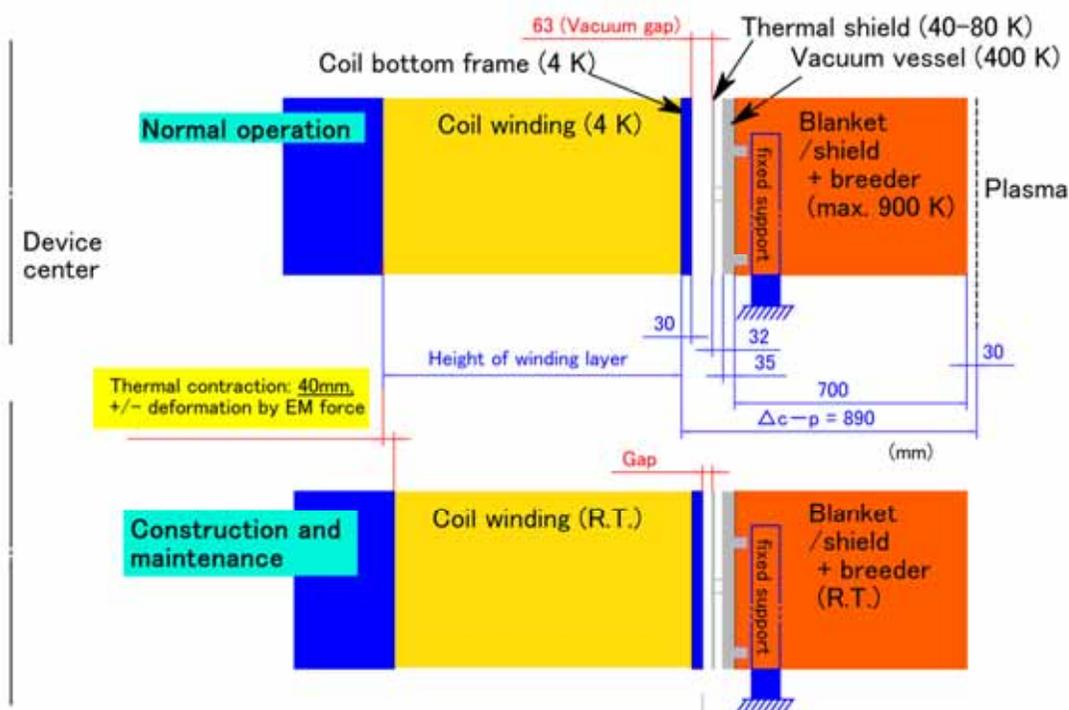
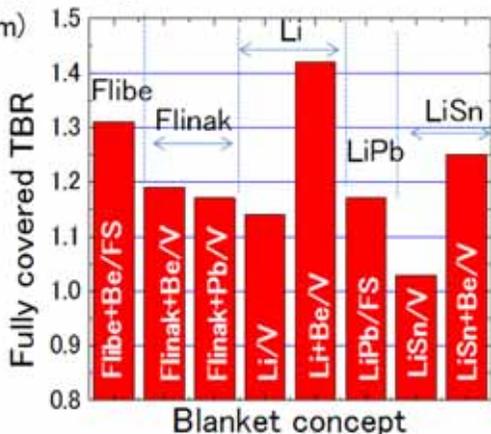
70cm のブランケット設置空間をメンテナンス時にも確保

T. Tanaka *et al.*,
24th IAEA Fusion Energy Conference,
Oct. 8-13, 2012, San Diego, USA, FTP/P7-36.

H. Tamura *et al.*,
Fusion Eng. Des. **88** (2013) 2033.



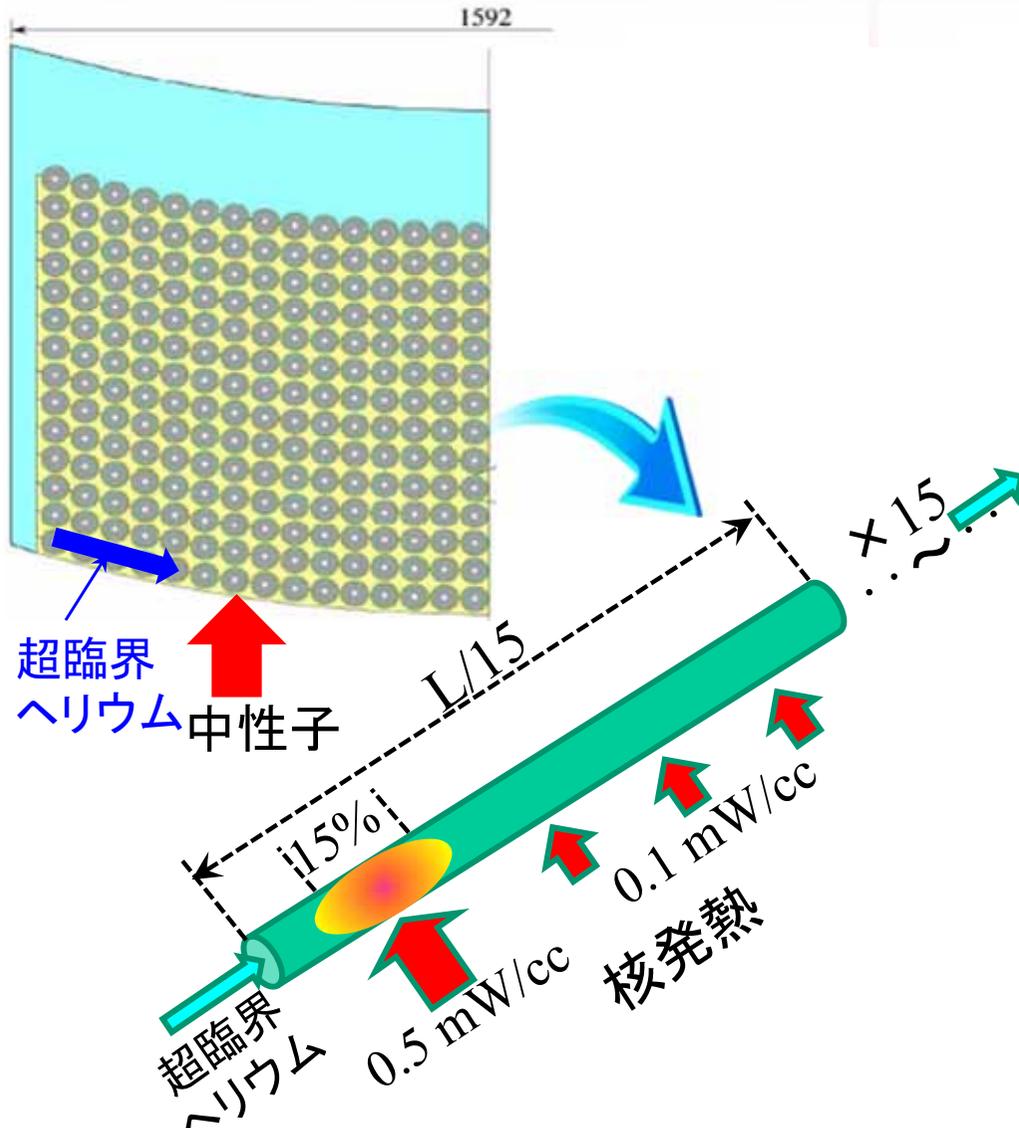
Flux limit for 30 FPYs operation



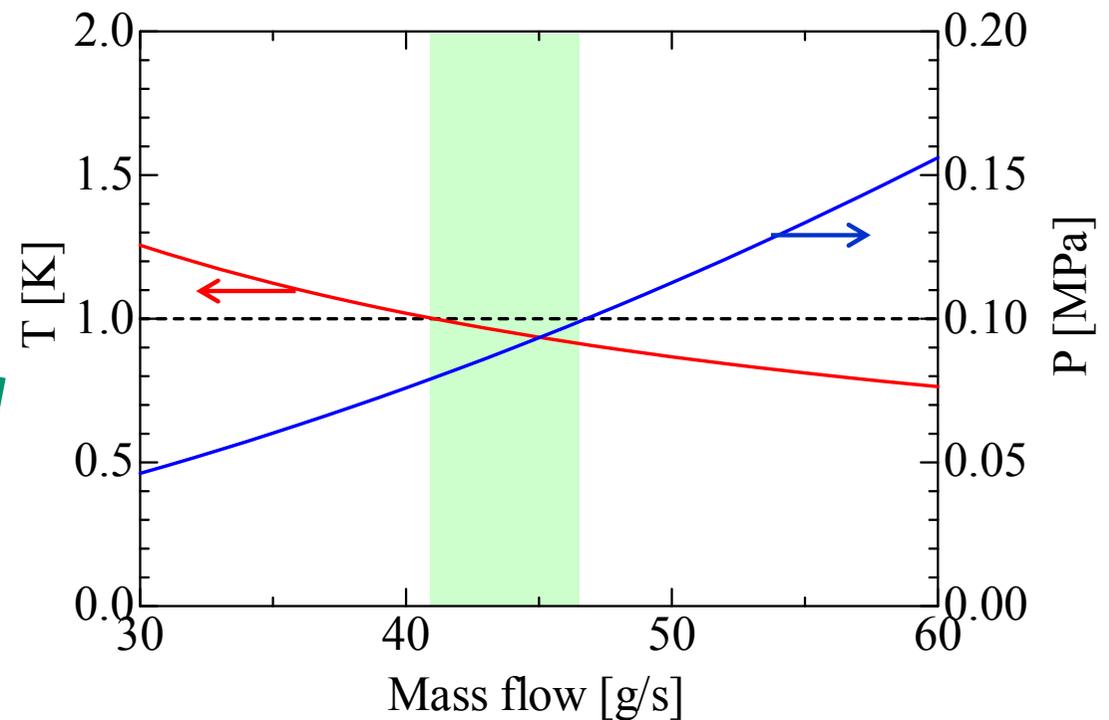
建設(常温)時、プラズマ運転時いずれも
ラジアルビルド成立

CIC(ケーブル・イン・コンジット)導体による 設計成立性を熱流体解析により確認

核発熱による温度上昇および圧力損失が許容範囲であることを確認



By N. Yanagi and S. Hamaguchi



許容範囲:
 流量41-47g/s
 温度上昇 $\Delta T < 1K$
 圧力損失 $\Delta P < 0.1MPa$

ヘリカル核融合炉FFHR-d1の 基本設計パラメータが確定

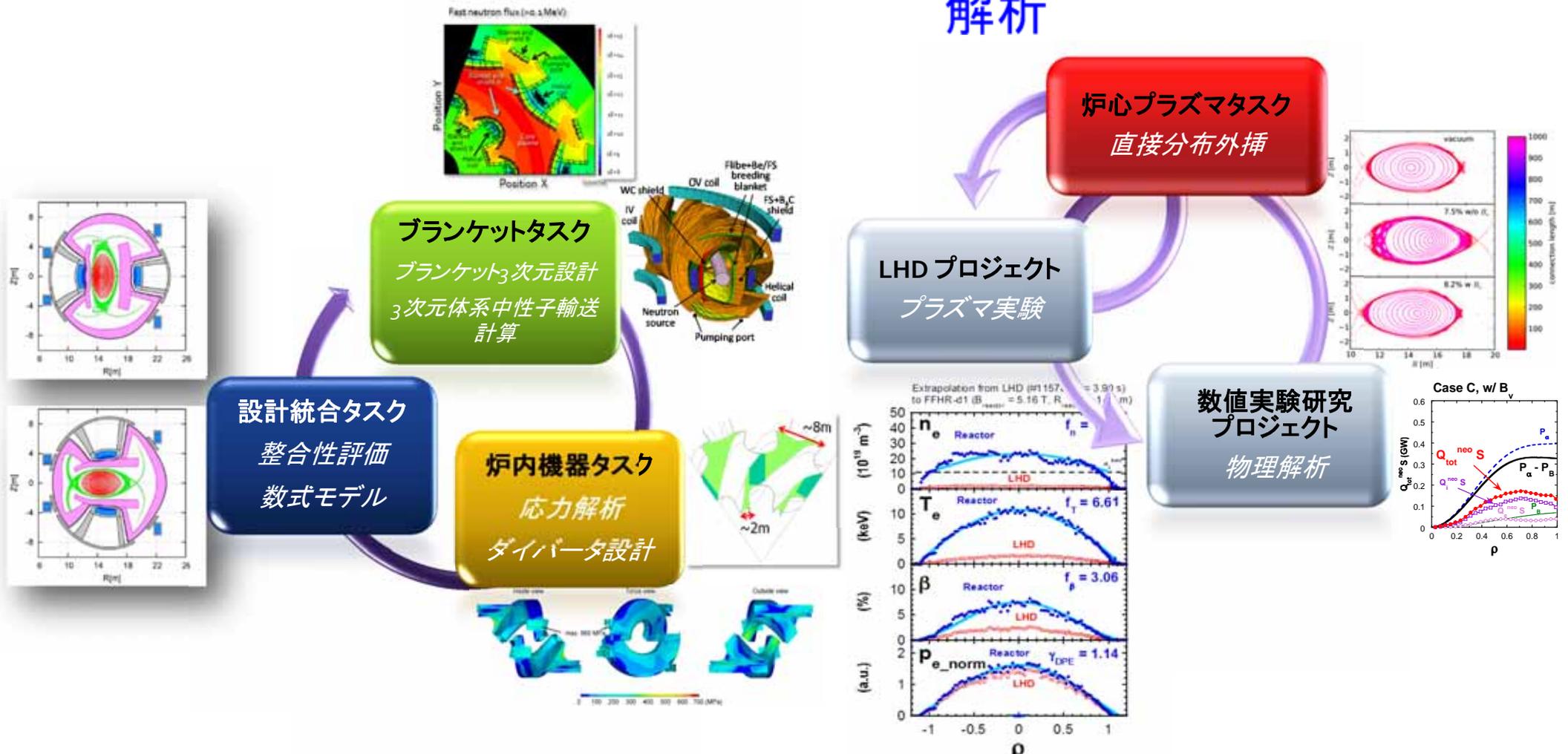
A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des., **87** 594 (2012), T. Goto *et al.*, PFR **7** 2405084 (2012).

$R_c=15.6m, B_c=4.7T,$		
Helical coil major radius R_c [m]	$R_c=89cm,$	15.6
Plasma major radius R_p [m]	$\langle \Gamma_{nw} \rangle = 1.5 MW/m^2$	14.4
Helical pitch parameter γ_c		1.2
Plasma volume V_p [m ³]		1878 $\Delta_{blk}=70cm$
Average toroidal field at the winding center $B_{t,c}$ [T]		4.7
Central electron density n_{e0} [10 ²⁰ m ⁻³]		2.5
Central electron temperature T_{e0} [keV]	LHD exp. data	10.5
Peak beta value β_0 [%]	#96164	10.0
Fusion output P_{fus} [GWth]	@6.966s	3.0
Confinement improvement factor γ_{DPE}		1.3 full cover
Helical coil current density j_c [A/mm ²]		TBR=1.15
Maximum magnetic field on helical coil B_{max} [T]		$q=0.6mW/cc$ 11.9
Average neutron wall load $\langle \Gamma_{nw} \rangle$ [MW/m ²]		1.5

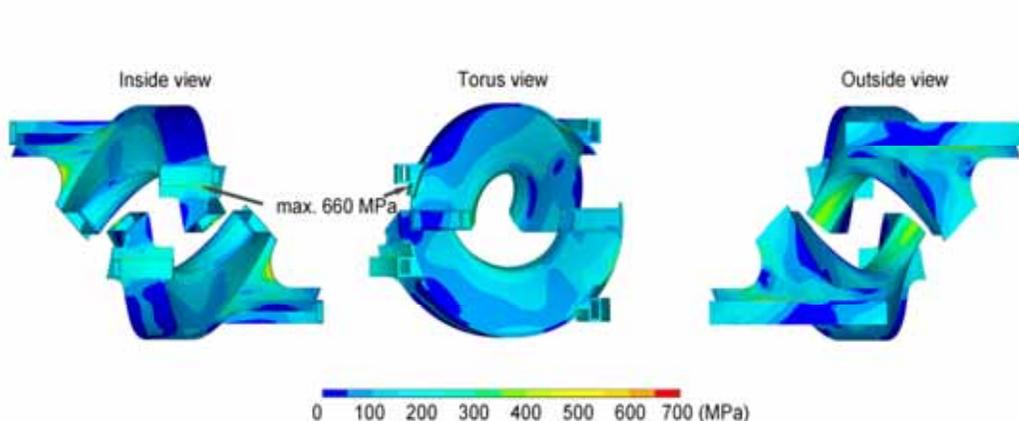
設計の第2ラウンドが現在進行中

- 第2ラウンド (2011年度 -)
 - 炉内機器の3次元設計

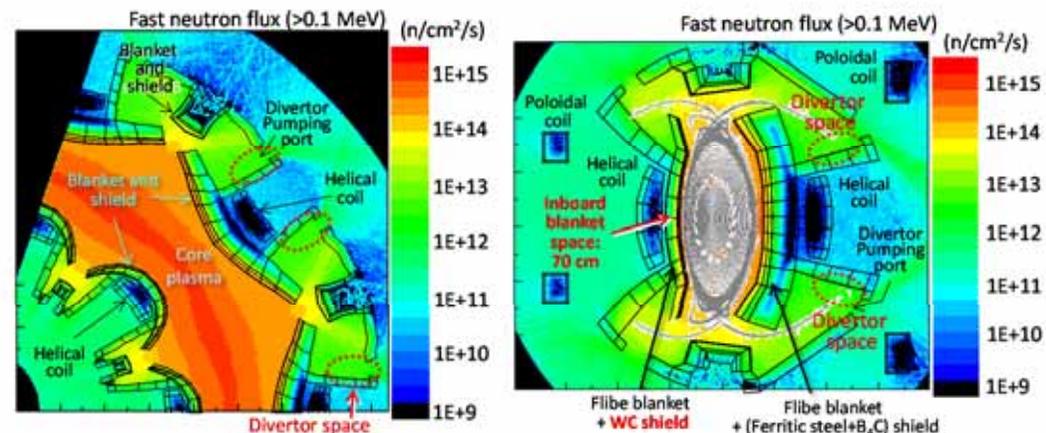
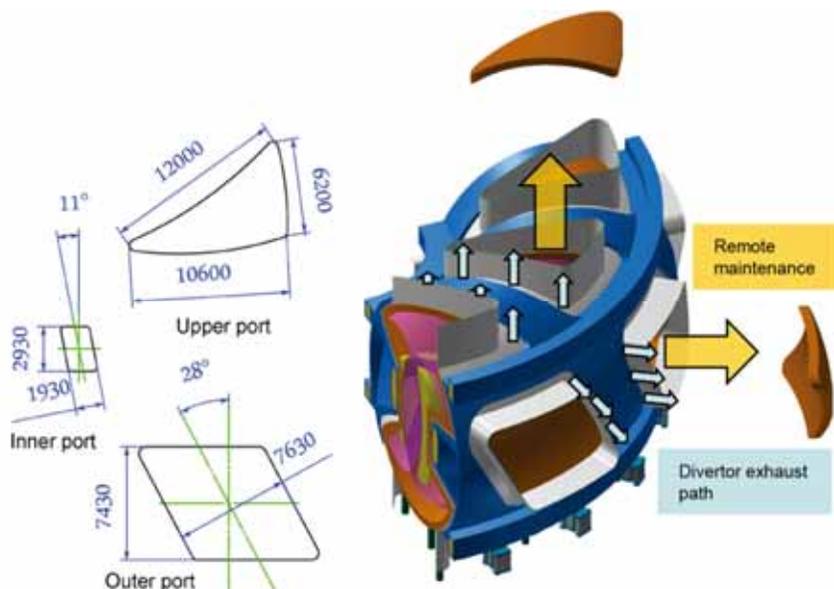
- 炉心プラズマの詳細物理解析



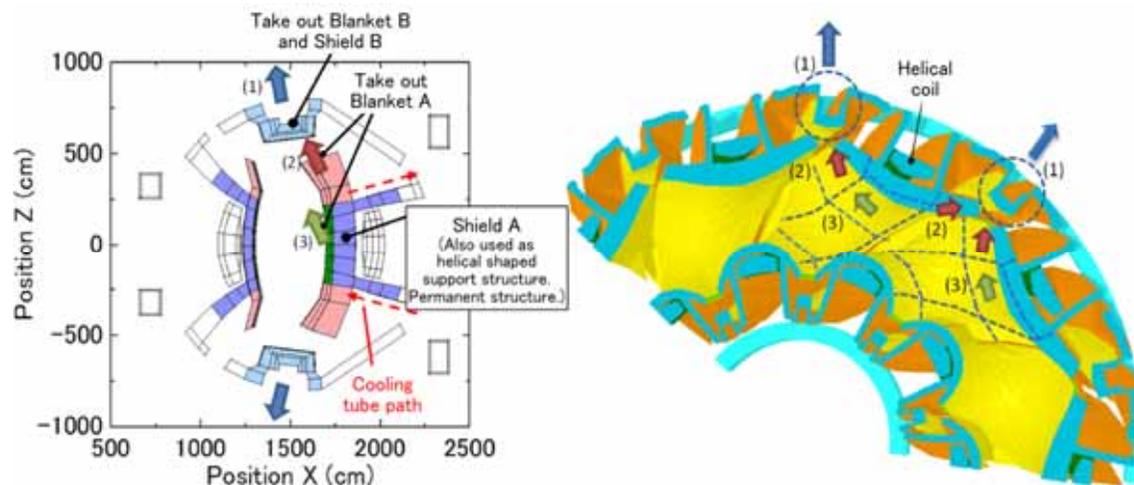
メンテナンス性の確立が設計の鍵



支持構造最適化による大口径ポートの確保



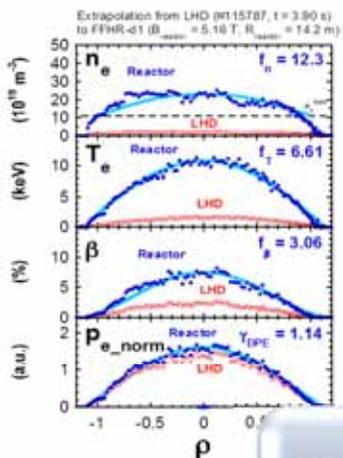
ダイバータをブランケット背面に設置し
中性子束を低減



定常運転点における 炉心プラズマの詳細物理解析が進展



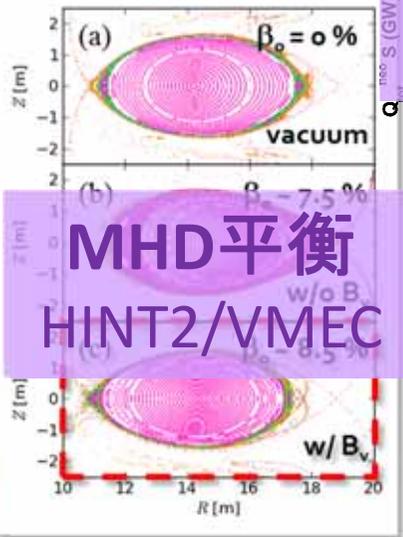
J. Miyazawa *et al.*, IAEA-FEC24, to be published in Nuclear Fusion (2014).



炉心プラズマスケ
直接分布外挿

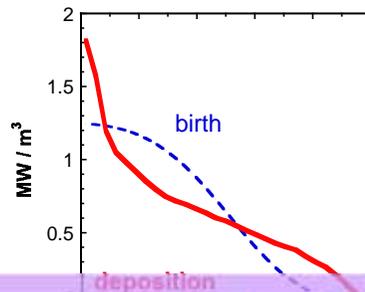
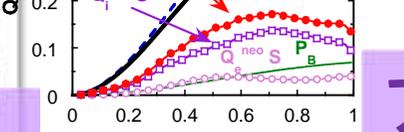
LHDプロジェクト
プラズマ実験

数値実験研究
プロジェクト
物理解析

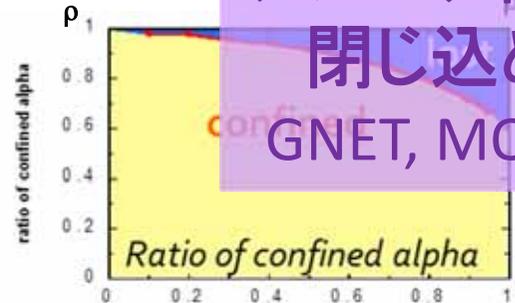


MHD平衡
HINT2/VMEC

新古典輸送
GSRAKE/DGN
FORTEC-3D

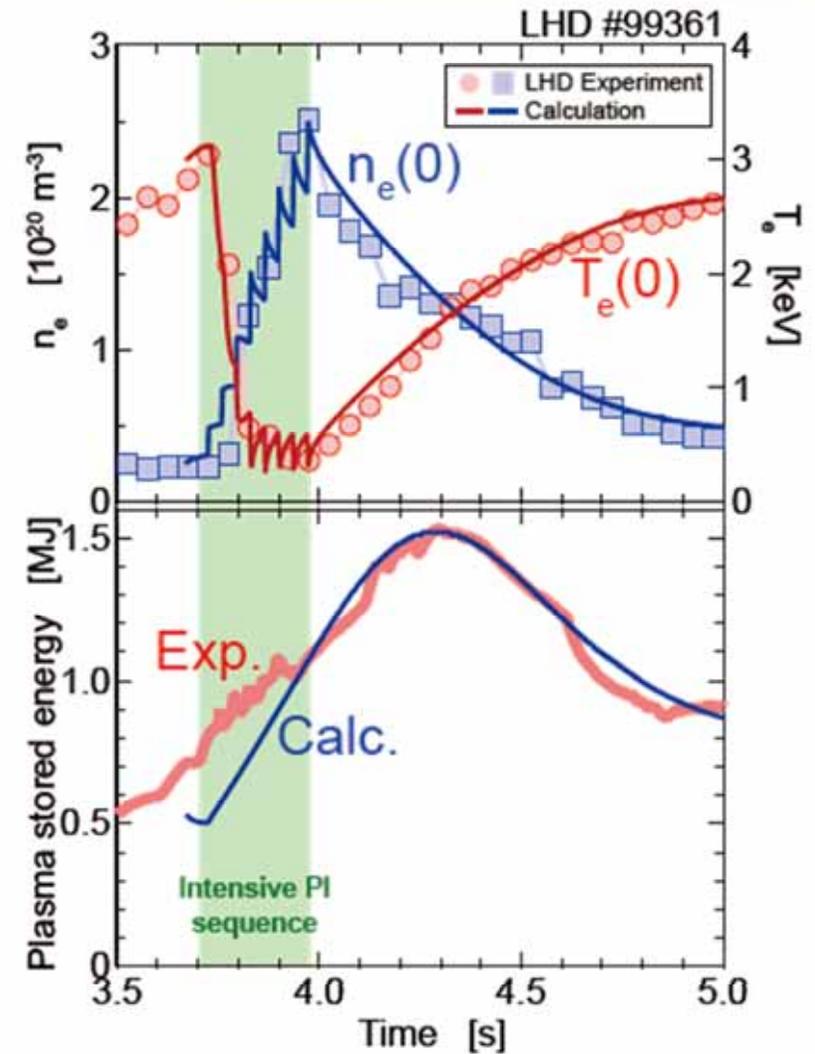
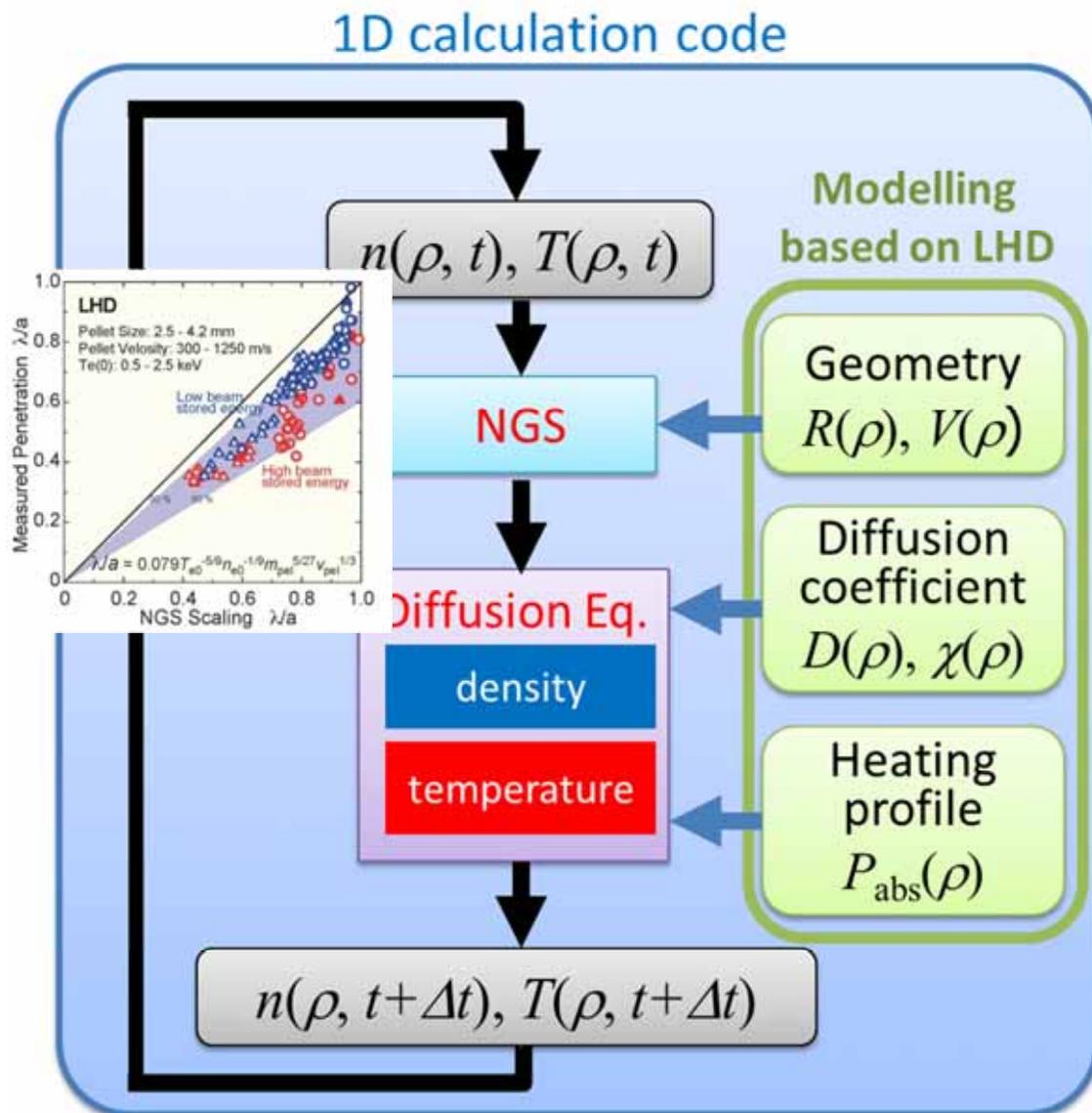


アルファ粒子
閉じ込め
GNET, MORH



- 適切な磁場配位の選択と垂直磁場の制御により、MHD平衡、新古典輸送、アルファ粒子閉じ込めが統合した運転点を選択可能。
- 一方で整合性あるシステム設計のためには定常運転点に至るまでの **プラズマ運転制御シナリオ** の確立が必要。
- 過去の解析は0次元 → **1次元モデル** により分布の効果を検証

LHD実験結果に基づく簡易モデルを活用し 1次元計算コードを開発



● LHD実験結果を良く再現

*R. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **52** (2012) 083006.

後藤拓也、ヘリカル炉概念設計と運転シナリオ、(第17回若手研究会、原子力機構那珂研、2014.3.5-7) 14/21

計算の前提条件

● 圧力分布:

- 高アスペクト比、磁気軸内寄せ配位で比較的ピークした電子密度分布のデータ (LHD実験 #115787@3.90s:

$R_{ax,vac}=3.55m$, $B_{ax}=1.0T$, $\gamma_c=1.2$) を $R_c=15.6m$, $B_c=5.6T$ に外挿

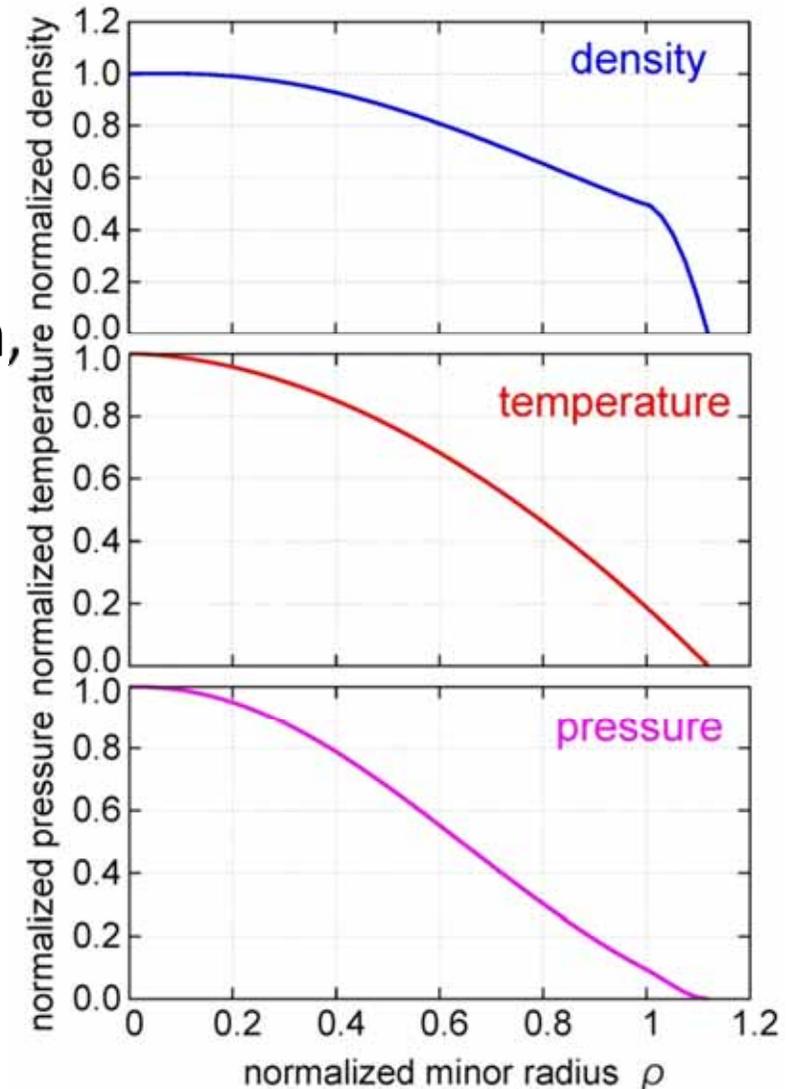
● 磁気面構造:

- 上記実験データに対応した有限ベータ平衡計算結果をスケールアップ

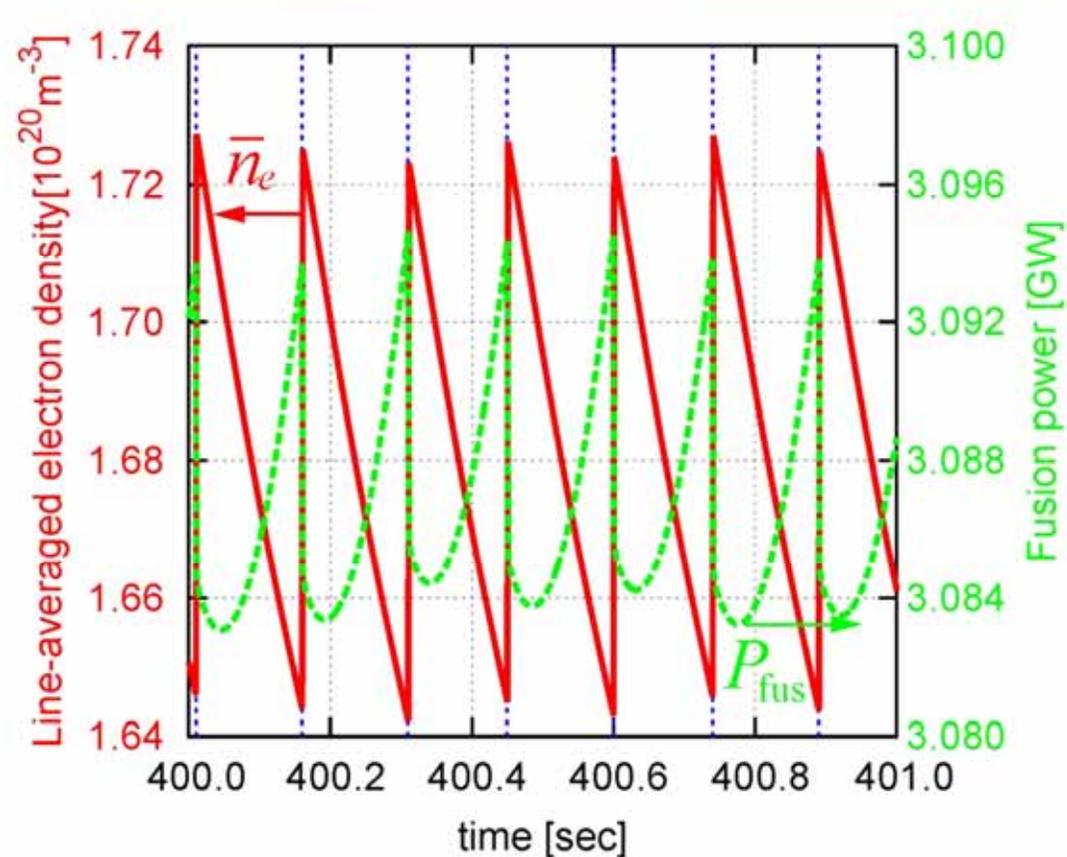
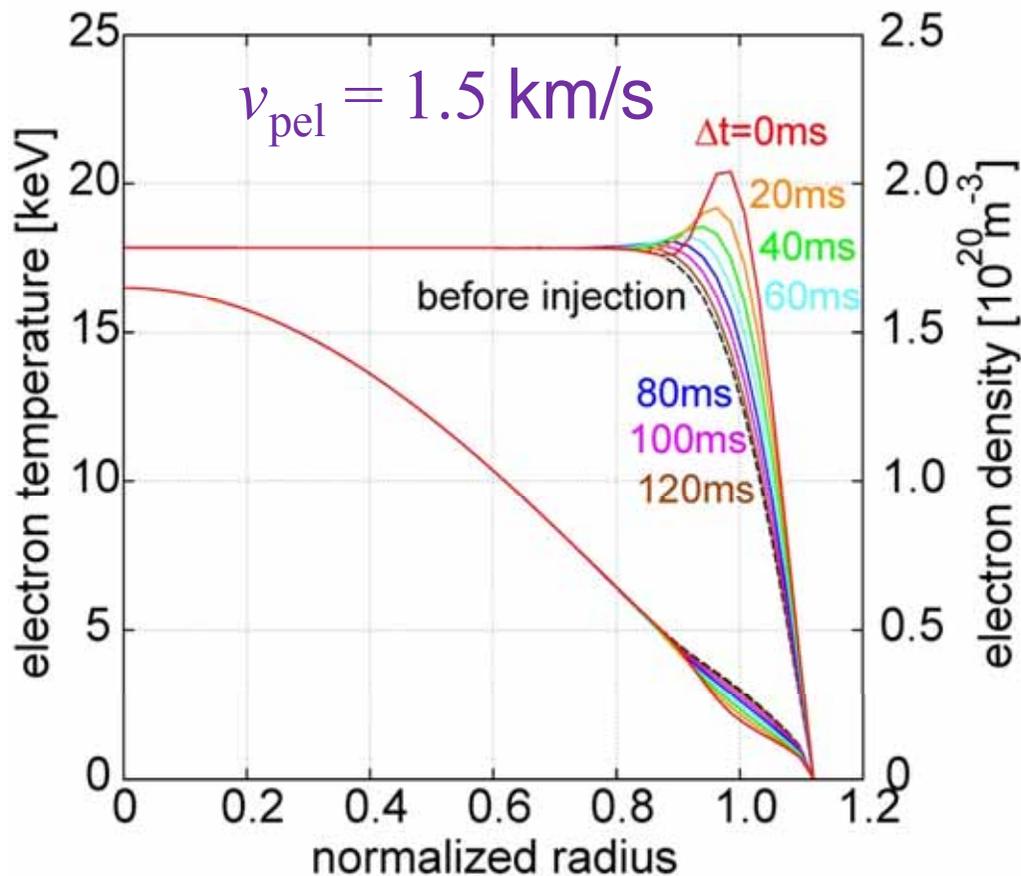
● 燃料供給(ペレット):

- 粒子数 4×10^{22} ($r_p \sim 6$ mm) を想定
- 入射速度: 1.5 km/s

● 加熱パワーの100% 吸収、不純物0を仮定。

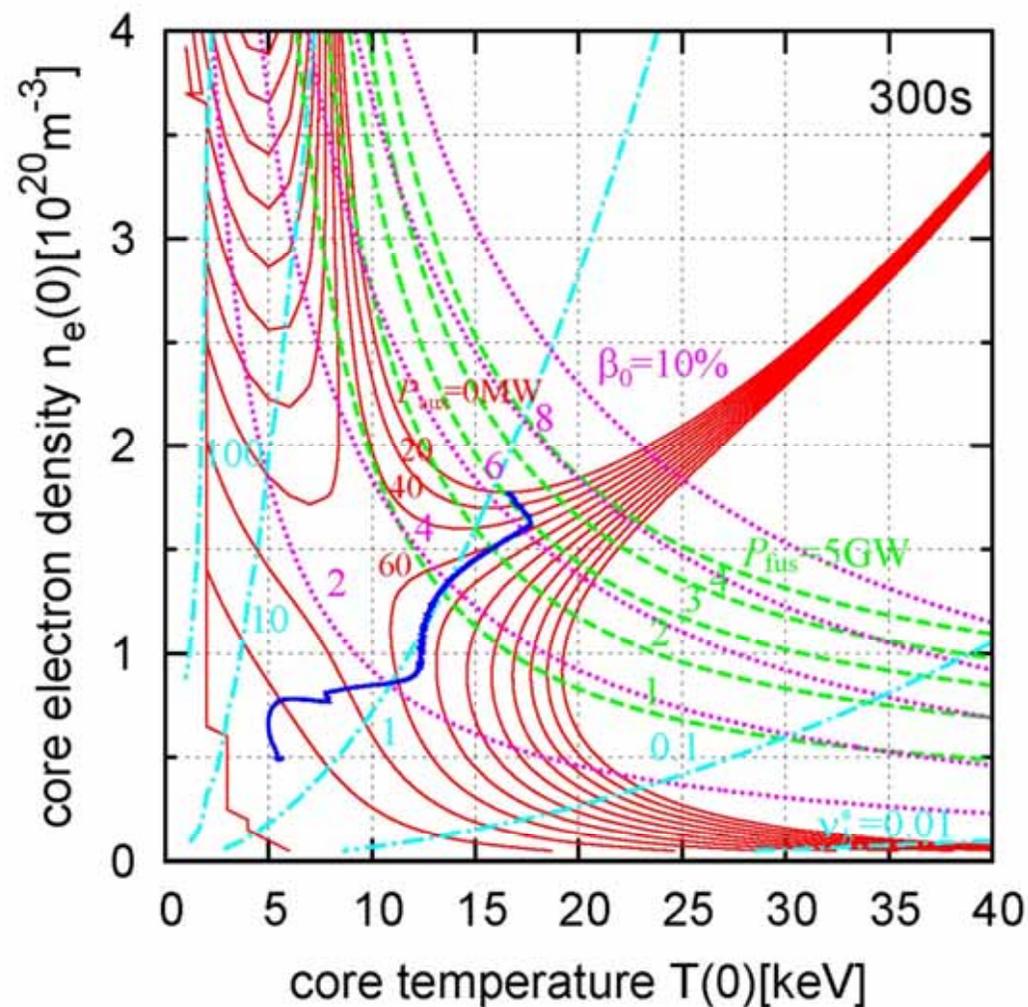
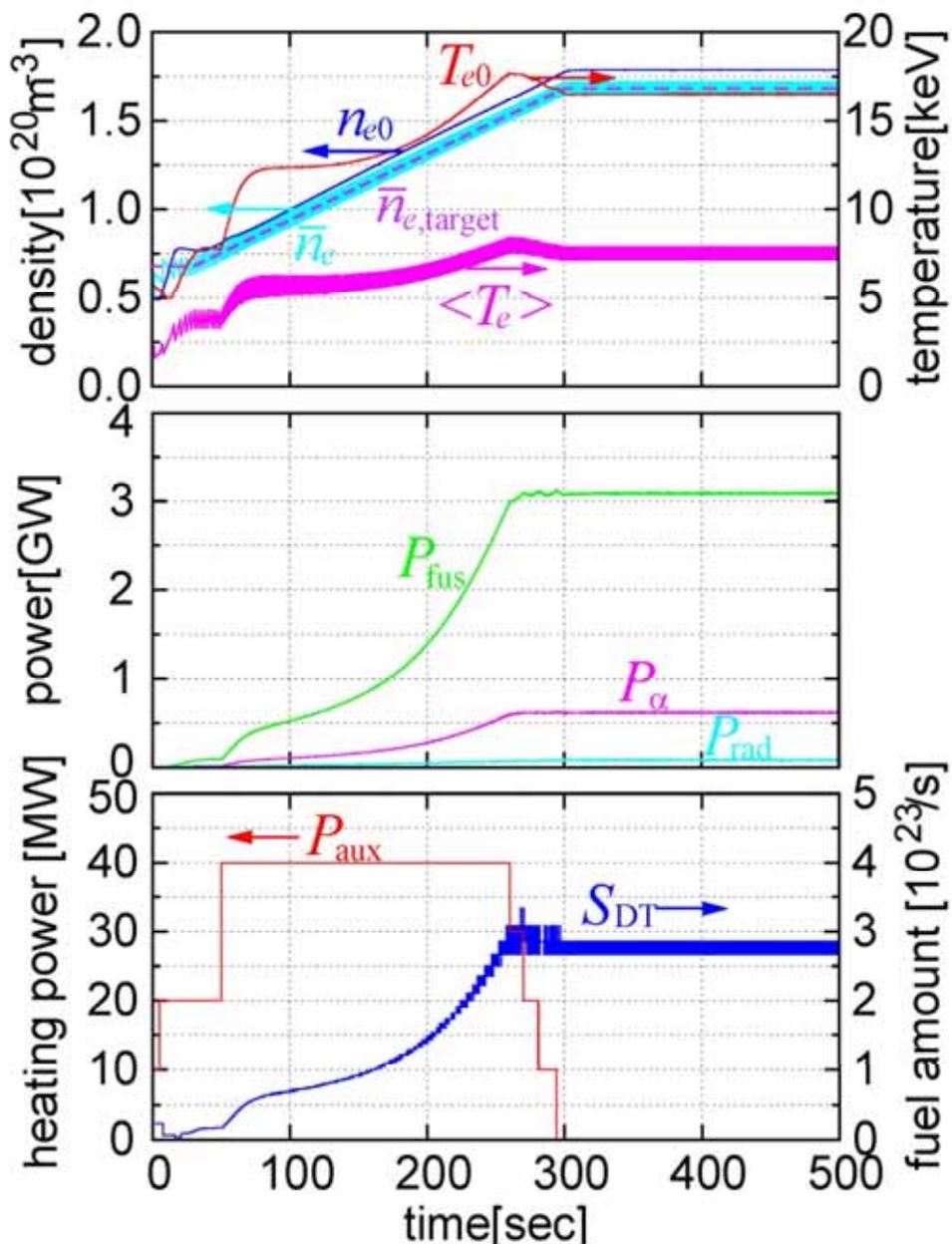


プラズマ分布の変化が制御性に影響



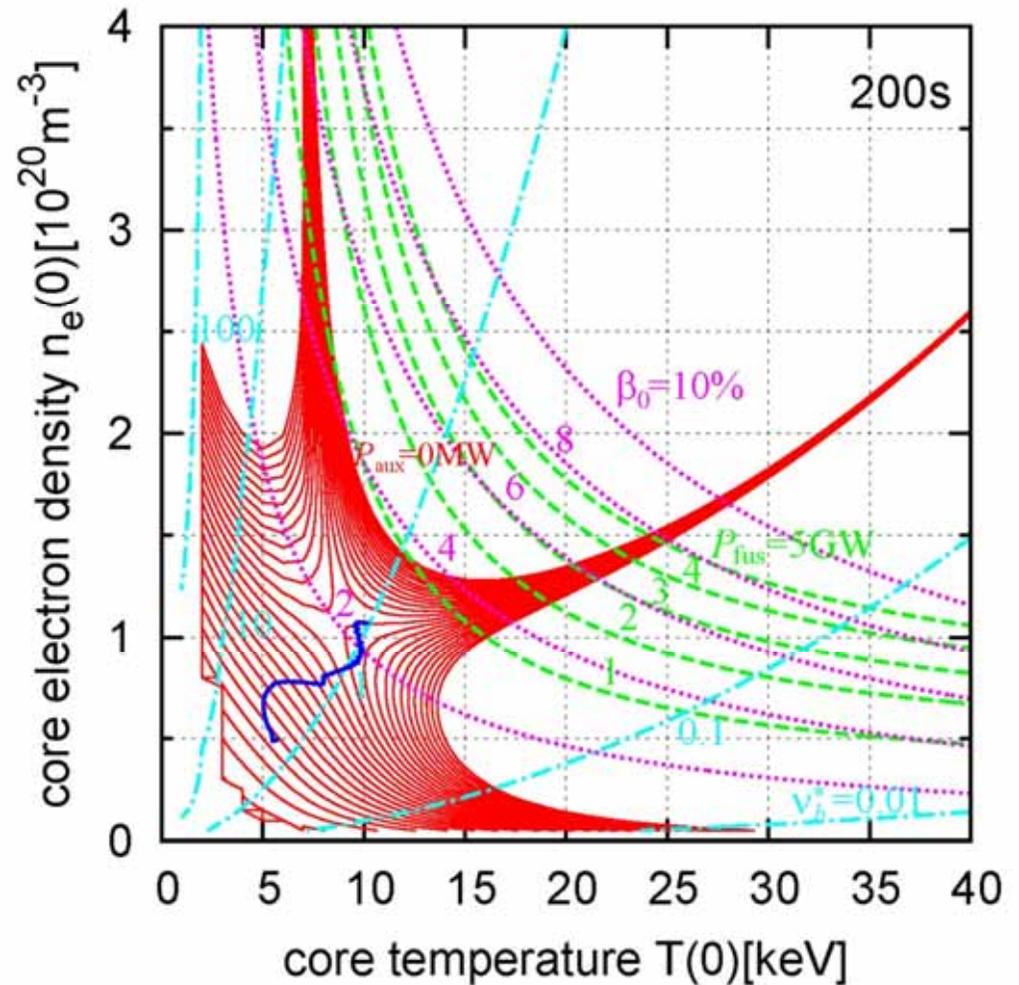
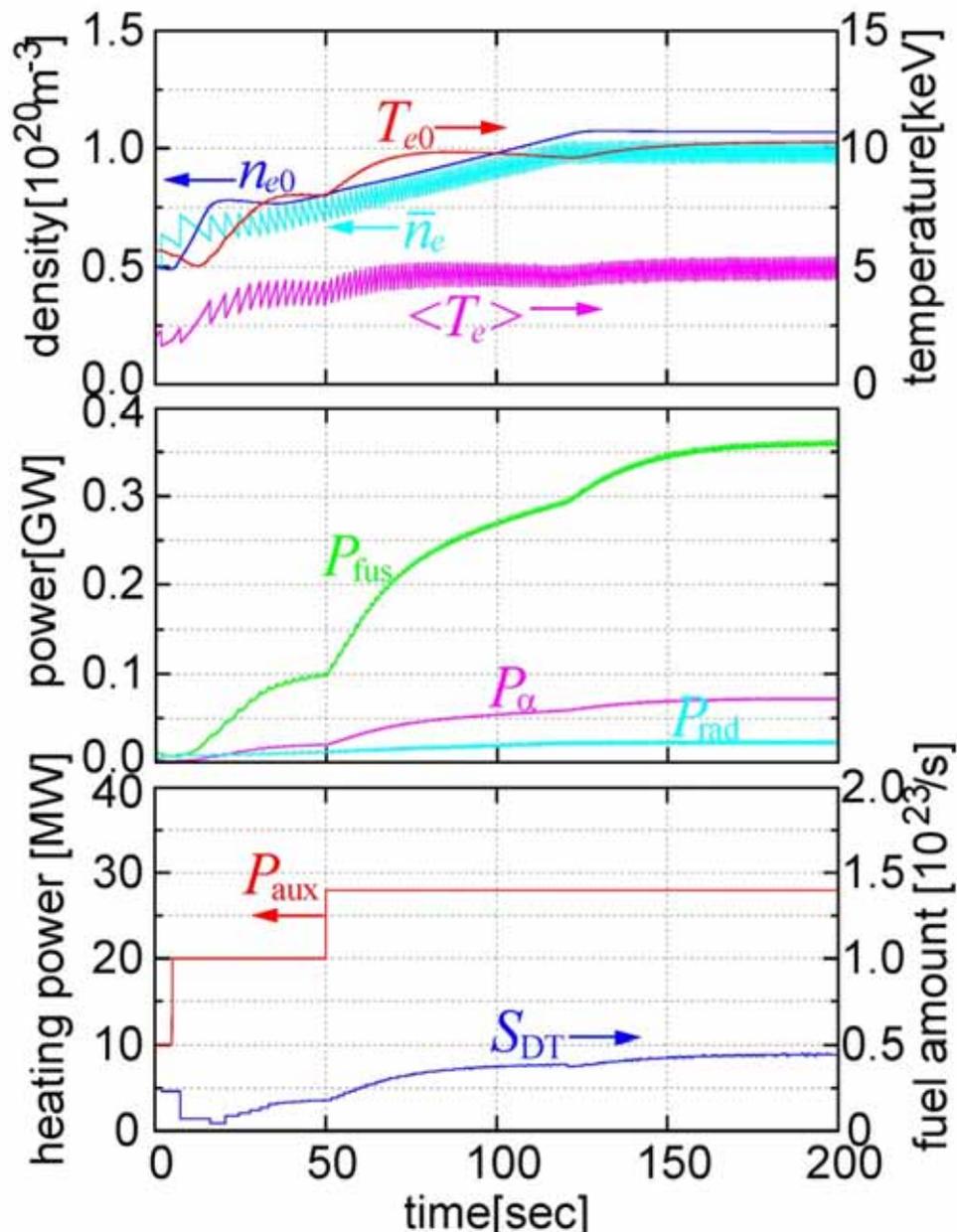
- ペレット侵入長が浅いため平坦な密度分布となり核融合出力に
応答遅れ（核融合出力の直接PID 制御が困難に）。
- 応答性が高く、高精度の計測が複数存在する電子線平均密度
を制御対象に選択。

核融合出力3GWの自己点火燃焼領域への到達および定常維持を達成



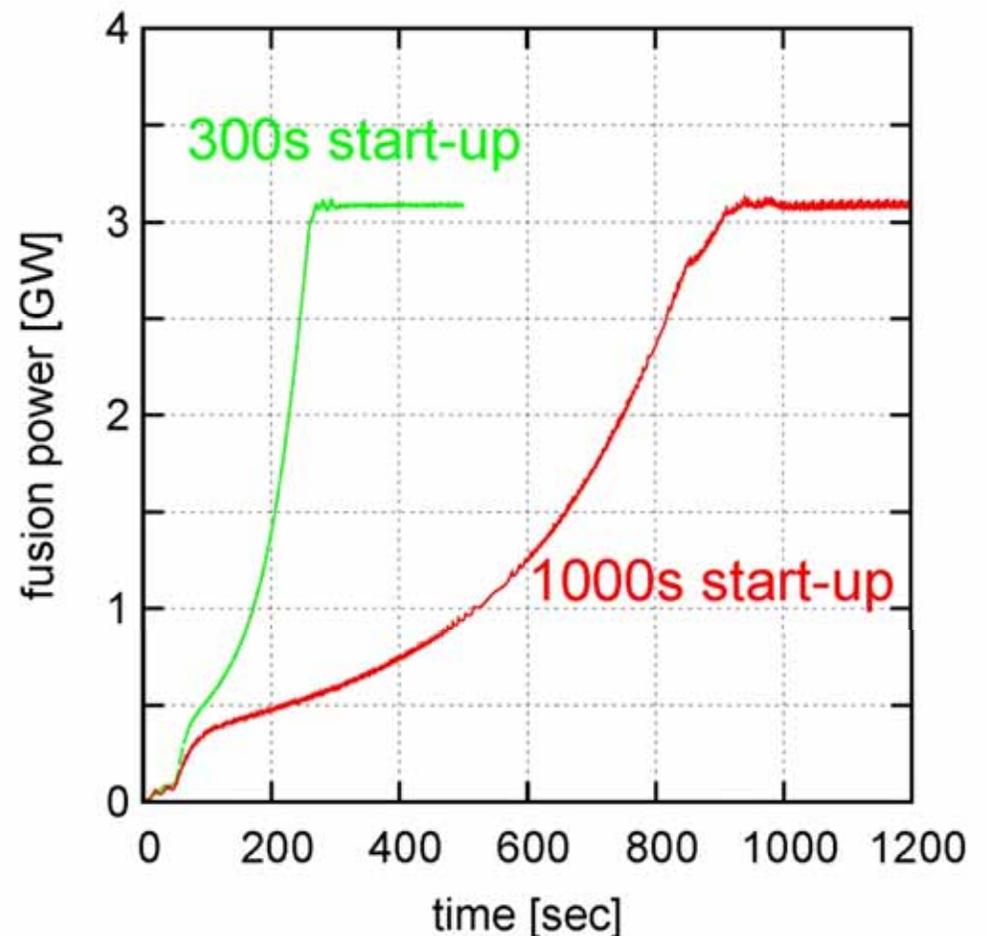
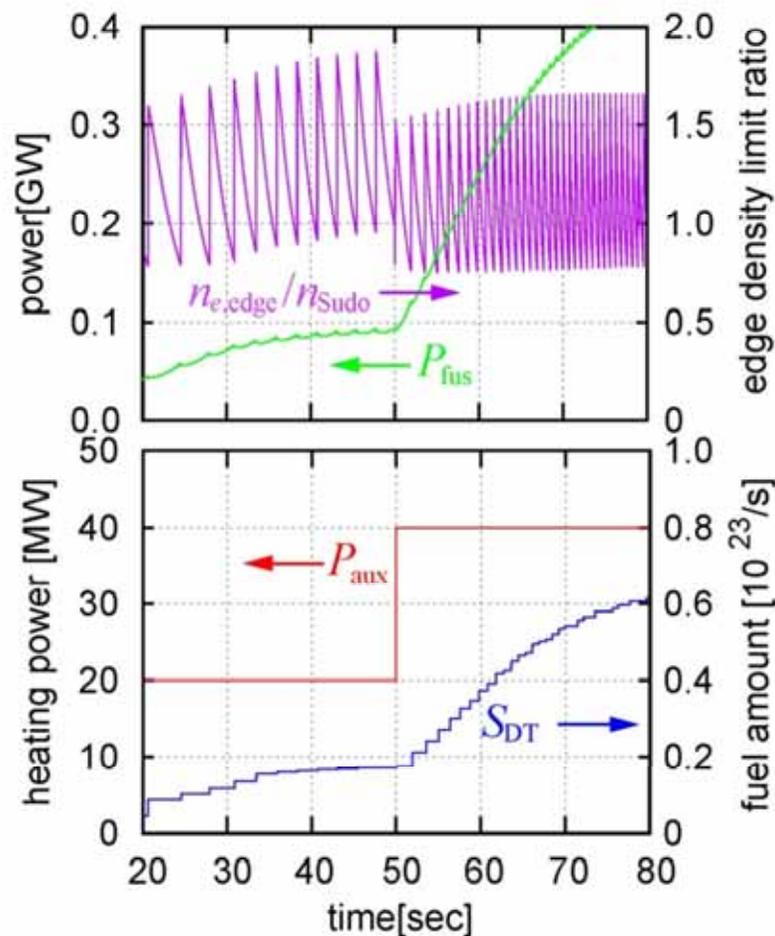
- 定常運転点では核融合出力の擾乱は数%以下。

外部加熱 (~30 MW) 印加により 低出力での運転も可能



- LHD実験で既に達成されたベータ値で $Q \sim 13$ ($P_{aux} = 28 \text{ MW}$) が実現可能。

シンプルかつ少数の計測により ロバストな制御が実現可能



- 周辺密度と核融合出力のモニタリングにより安定した制御を実現

- 立ち上げ時間に本質的な物理制約なし(機器設計に望ましい長時間立ち上げが可能)。

まとめ

- 核融合研核融合工学研究プロジェクトの下、ヘリカル核融合炉FFHR-d1の概念設計活動が進展。
 - LHD実験成果および過去の設計活動の工学的知見を生かし基本設計パラメータを確定。
 - 建設およびメンテナンス手法の確立を視野に入れた炉内機器の3次元設計と、炉心プラズマの詳細物理解析が進行中。
- プラズマ運転制御シナリオの確立に向け、1次元コードを用いた解析を実行中。
 - 少数のシンプルな計測による安定した制御の実現可能性を確認（無電流ヘリカル系のメリットのもうひとつの側面）。
 - 今後より詳細な解析を継続し、周辺機器（計測・加熱・燃料供給）やプラント機器（熱輸送・発電系）の詳細設計につなげる。