

第12回若手科学者によるプラズマ研究会

2009年3月16 - 18日 JAEA那珂核融合研究所

# BA計画の現状・今後の研究

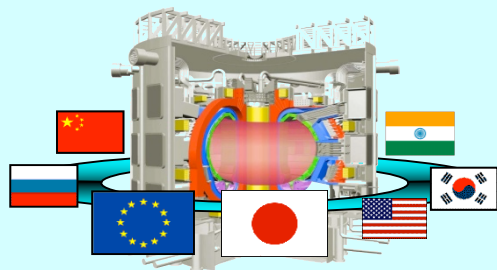
原子力機構 鎌田 裕

## 若手科学者によるプラズマ研究会

- 第1回(1997): 「プラズマ粒子制御」
- 第2回(1999): 「プラズマ中の揺動と不安定性」
- 第3回(2000): 「プラズマ中の電場形成と役割」
- 第4回(2001): 「定常化研究」
- 第5回(2002): 「周辺プラズマ及びプラズマ・壁相互作用」
- 第6回(2003): 「輸送と構造形成」
- 第7回(2004): 「燃焼プラズマに向けた現状と展望」
- 第8回(2005): 「不安定性とプラズマの振る舞い」
- 第9回(2006): 「燃焼プラズマに向けた計測と制御」
- 第10回(2007): 「ITERに向けたプラズマ科学の新展開」
- 第11回(2008): 「プラズマ中の現象の視覚化とその展望」
- 第12回(2009): 「プラズマ中の現象の解析手法・モデリング・予測手法の新展開」

# ITER・BA活動の最近の進捗

## 核融合エネルギーの実証



国際熱核融合実験炉  
(ITER)

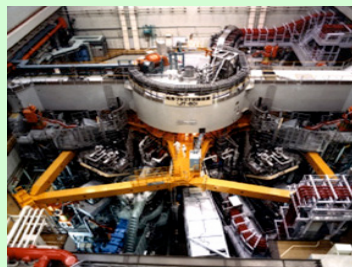
- 平成30年からの運転開始に向け池田機構長のもと平成19年より建設開始
- 我が国が分担する機器の調達に着手
- 超伝導コイルの調達取り決めをITER機構と締結し、それに基づき契約を締結

## 核融合発電の実現



原型炉

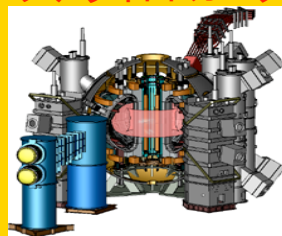
## 超高温の実現



JT-60

- 平成20年8月に実験完遂
- 現在、解体準備中

## 経済的実現性の追求 サテライトトカマク

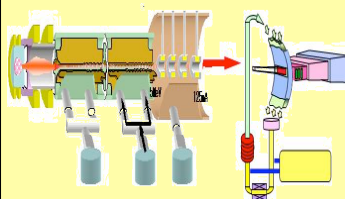


JT-60SA(那珂)

- 平成27年度からの運転開始に向けプロジェクトチーム及び日欧両実施機関による統合設計
- 我が国が分担する機器の調達取り決めを欧州実施機関と締結し、調達を開始

## 原型炉早期実現に向けた研究開発

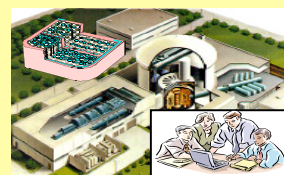
### 材料照射施設開発 (IFMIF/EVEDA)



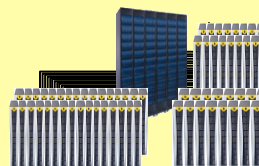
- 機器設計、建設及び運転等の調達取り決めを締結し、調達活動を開始

### 国際核融合エネルギーセンター

#### 原型炉設計R&D



#### シミュレーション



#### 遠隔実験技術



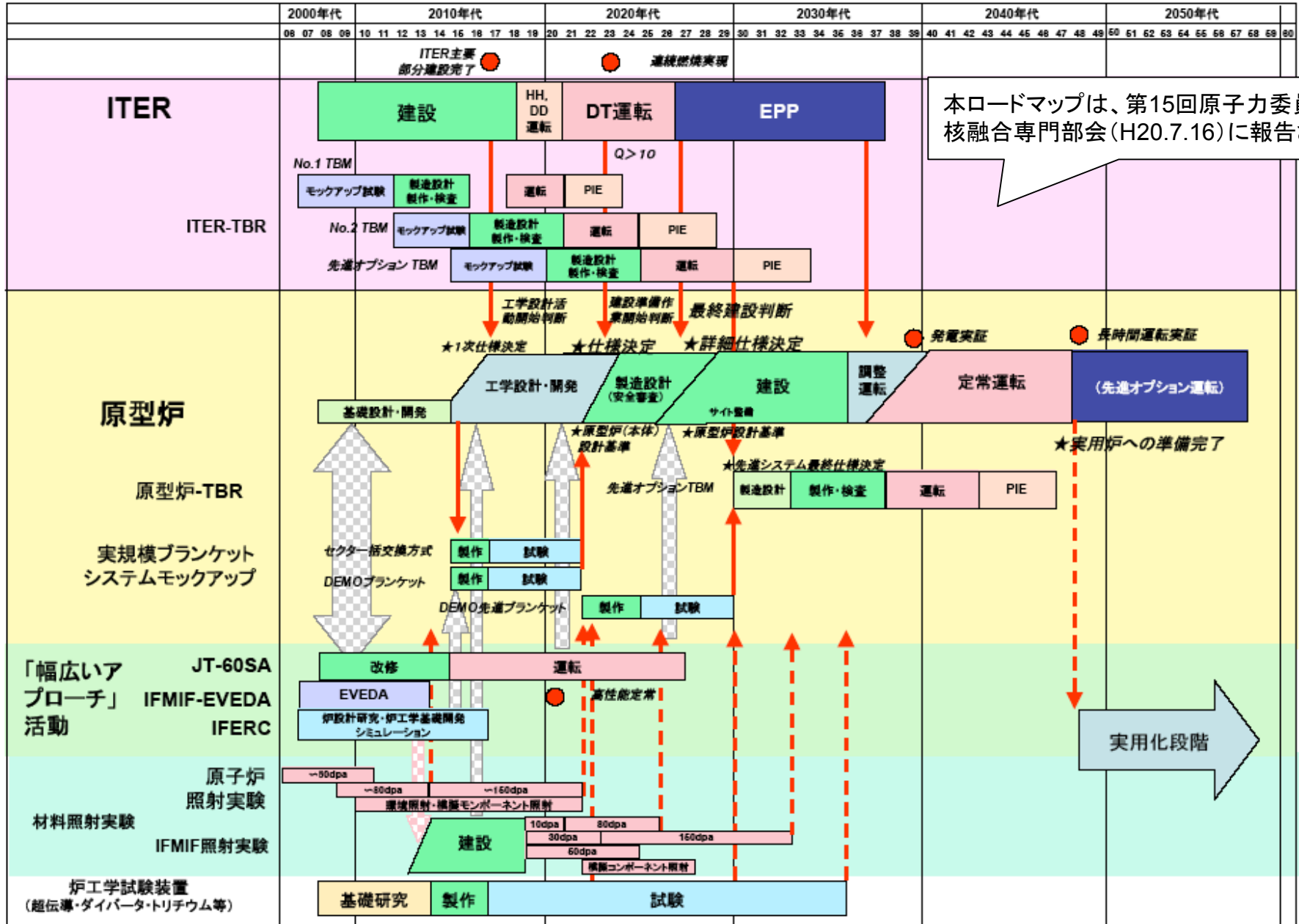
- 原型炉R&Dの実施計画策定及び調達取り決めの準備
- シミュレーション用計算機の機種、ベンチマークコード選定のための活動

青森県六ヶ所サイト  
建屋建設中

幅広いアプローチ(BA)



# 核融合エネルギー実用化に向けた全体ロードマップ



本ロードマップは、第15回原子力委員会核融合専門部会(H20.7.16)に報告された

実用化段階

本報告書は、文部科学省からの依頼により、トカマクによって原型炉を建設するためのケーススタディとして核融合エネルギーフォーラムによって作成されたものである。全文は以下のウェブサイトからダウンロードが可能  
<http://www.naka.jaea.go.jp/fusion-energy-forum/>



- 自分の世代が、どのような位置にいるか
- 行ないたいことは何か
- 求められるものは何か

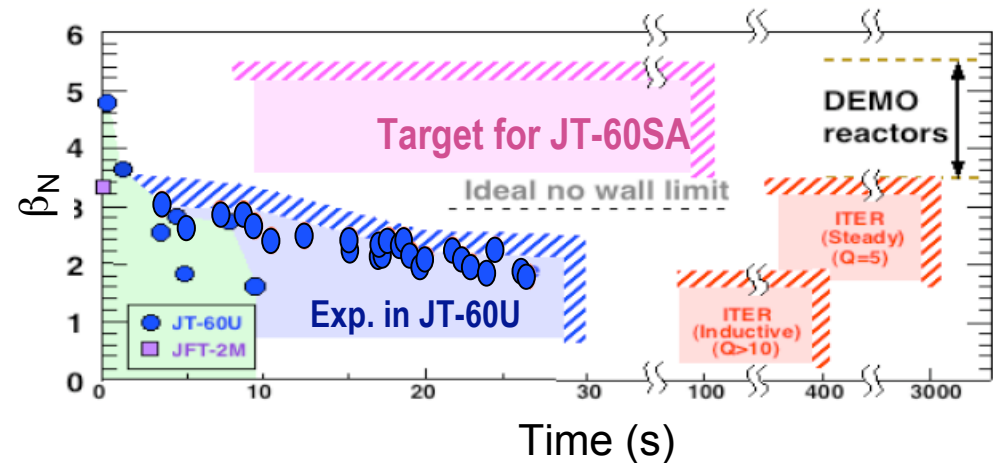
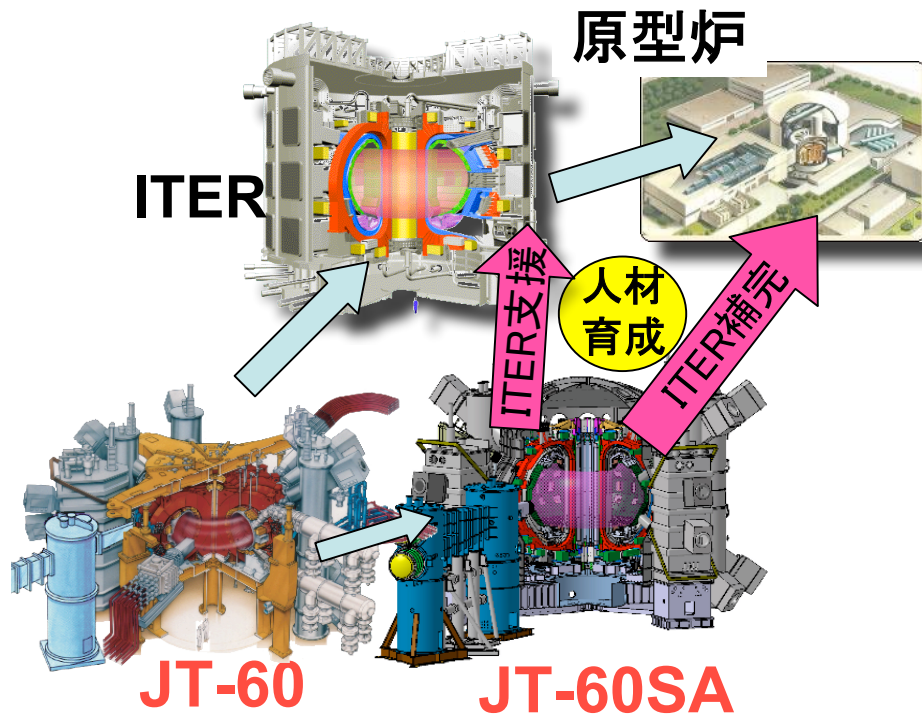
## 幅広いアプローチ計画におけるサテライトトカマク計画と トカマク国内重点化装置計画(国内計画)の合同計画

### ITERの技術目標達成のための支援研究

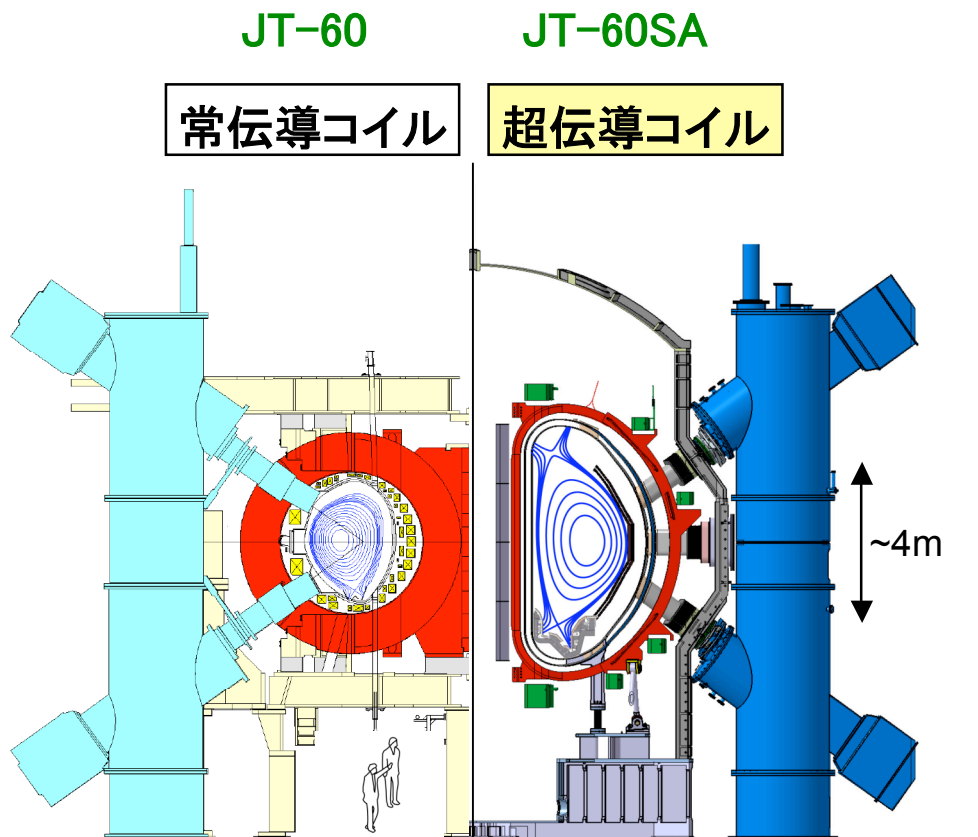
臨界条件クラスのプラズマを長時間(100秒程度)維持する高性能プラズマ実験を行い、その成果をITERへ反映させる。

### 原型炉に向けたITERの補完研究

原型炉で必要となる高出力密度を可能とする高圧カプラズマを100秒程度維持し、原型炉の運転手法を確立する。



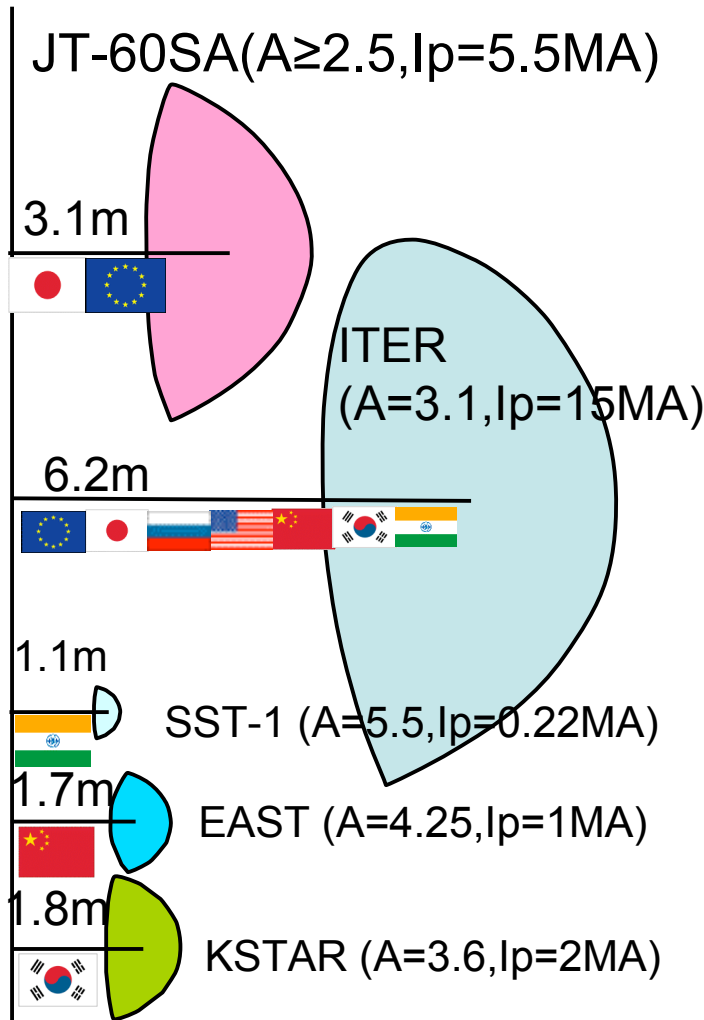
# JT-60SAの装置パラメータ



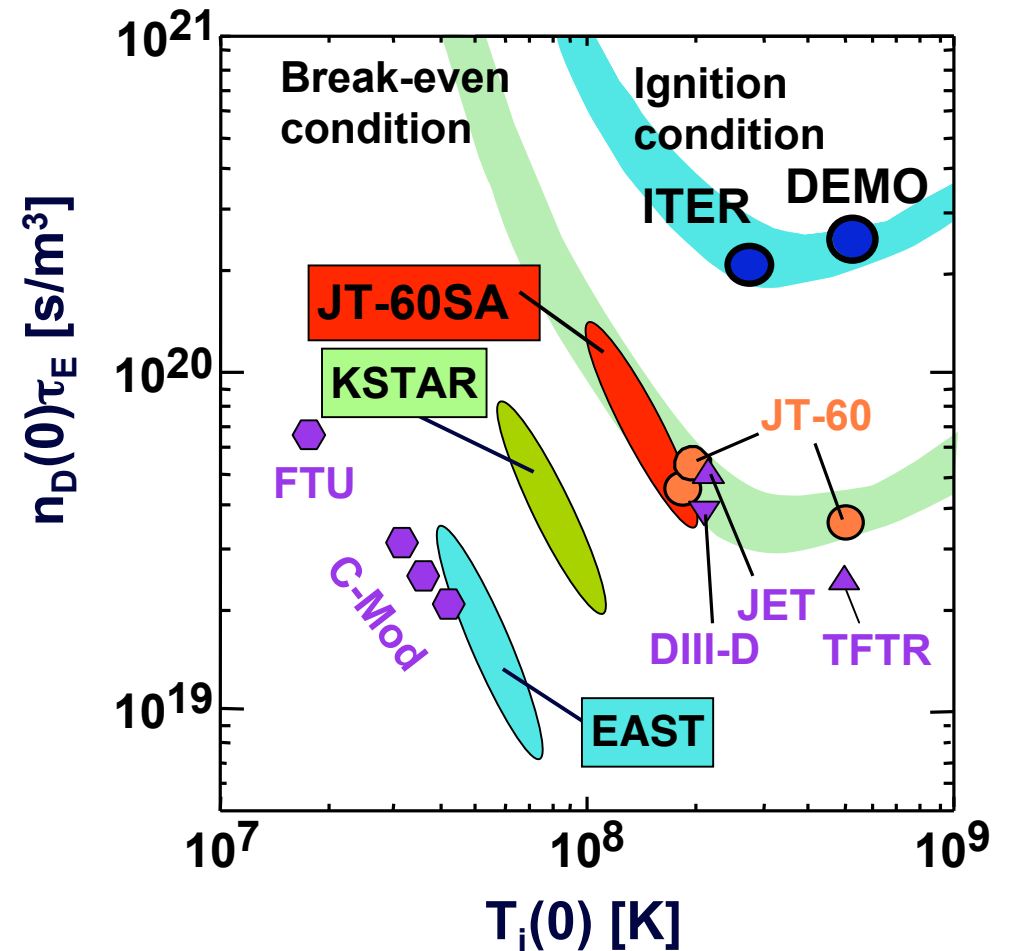
プラズマ形状等の幅広い制御性

プラズマ電流 $I_p$	5.5MA
トロイダル磁場 $B_t$	2.25T
大半径 $R_p$	2.97m
小半径 $a_p$	1.18m
非円形度 $\kappa_x$	1.93
三角度 $\delta_x$	0.5
表面安全係数 $q_{95}$	3
プラズマ体積 $V_p$	133m <sup>3</sup>
フラットトップ時間	100 s
加熱・電流駆動パワー	41MWx100 s
垂直入射 NBI	16 MW
接線入射(Co) NBI	4 MW
接線入射(CTR) NBI	4 MW
負イオン源NBI	10 MW
ECRH	7 MW
プラズマ対向機器熱負荷	15 MW/m <sup>2</sup>
中性子の年間発生量	1.5 x 10 <sup>21</sup>

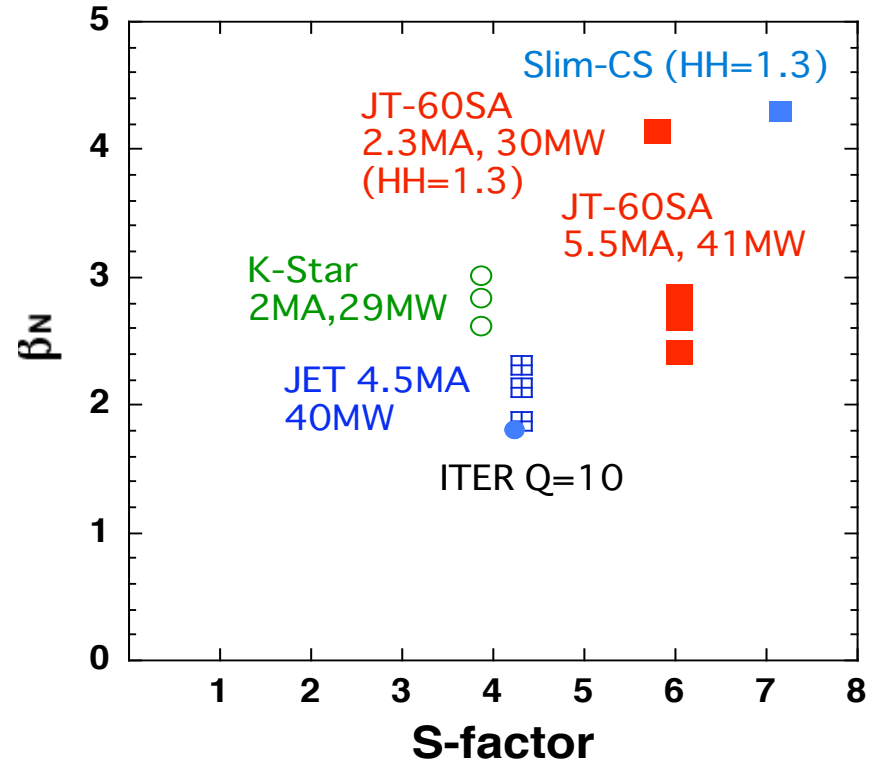
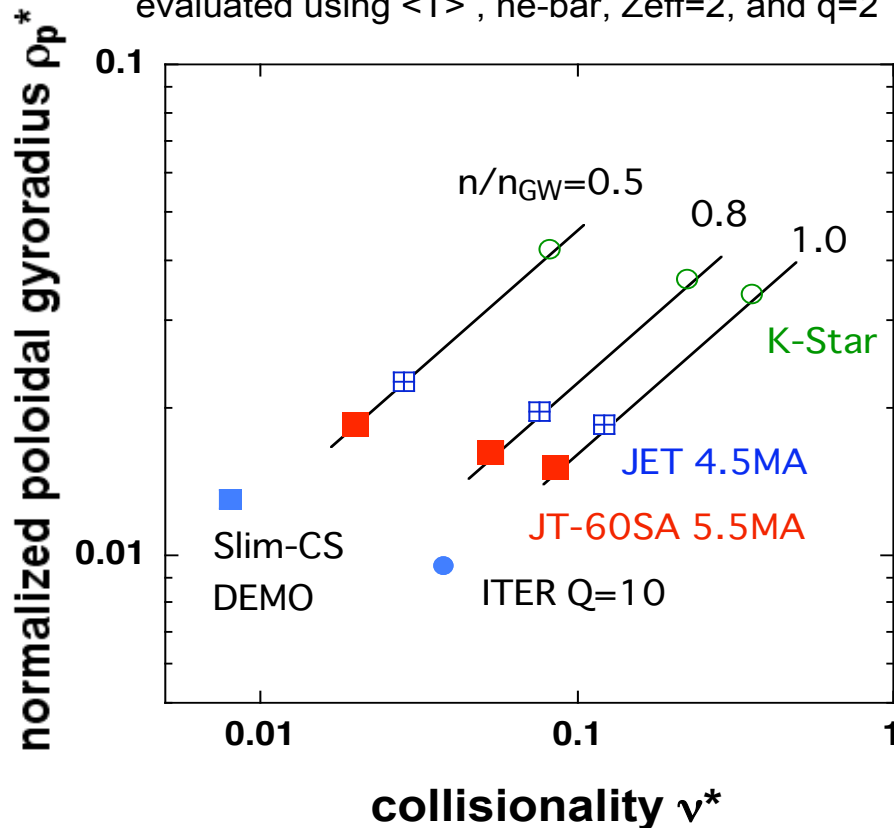
- The JT-60SA will create no substitute database for steady-state high-beta operation in the break-even equivalent regime.



Non-circular superconducting tokamaks



$HH=1$ , (SlimCS:H=1.3)  
 $T_i=T_e$ ,  
 $n(r)&T(r)=\text{parabolic shape with } \alpha_n=0.5, \alpha_T=1.5$   
 evaluated using  $\langle T \rangle$ ,  $\bar{n}_e$ ,  $Z_{\text{eff}}=2$ , and  $q=2$

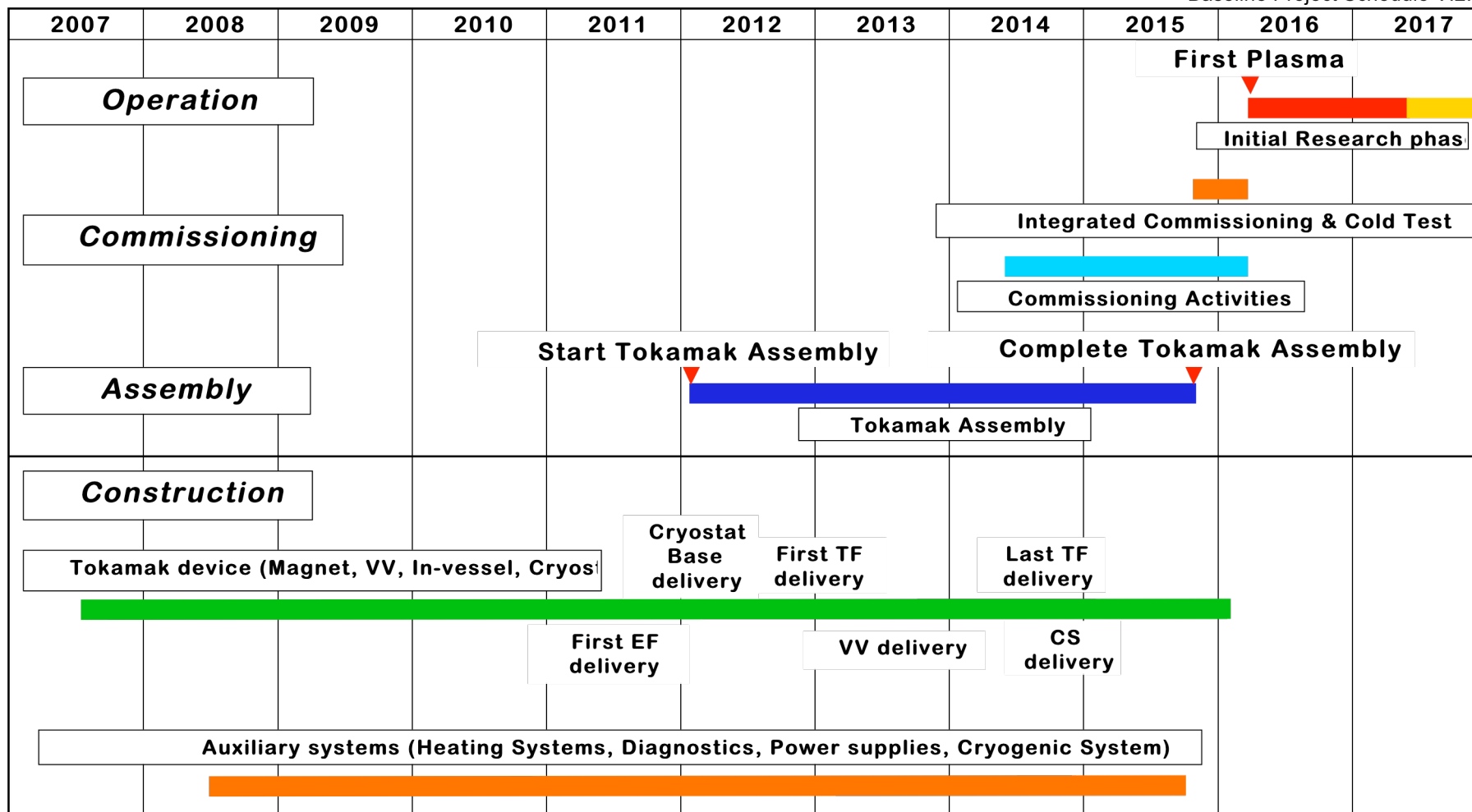


- To be fair, the same assumption is employed for the profiles even for JET. Engineering parameters are taken from each machine to evaluate  $\rho_p^*$  and  $\nu^*$ . (JET:  $R=2.8\text{m}$ ,  $a=1.02\text{m}$ ,  $\kappa=1.7$ ,  $\delta=0.29$ ,  $P=40\text{MW}$ )
- As indicated, JT-60SA can step further towards the reactor relevant regime.

# スケジュール

## ファーストプラズマ= 2016年3月

Baseline Project Schedule V.2.0



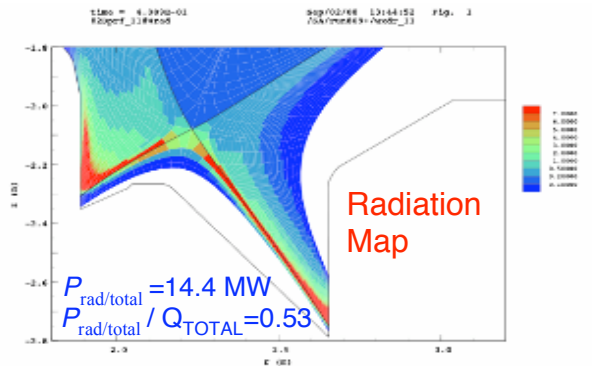
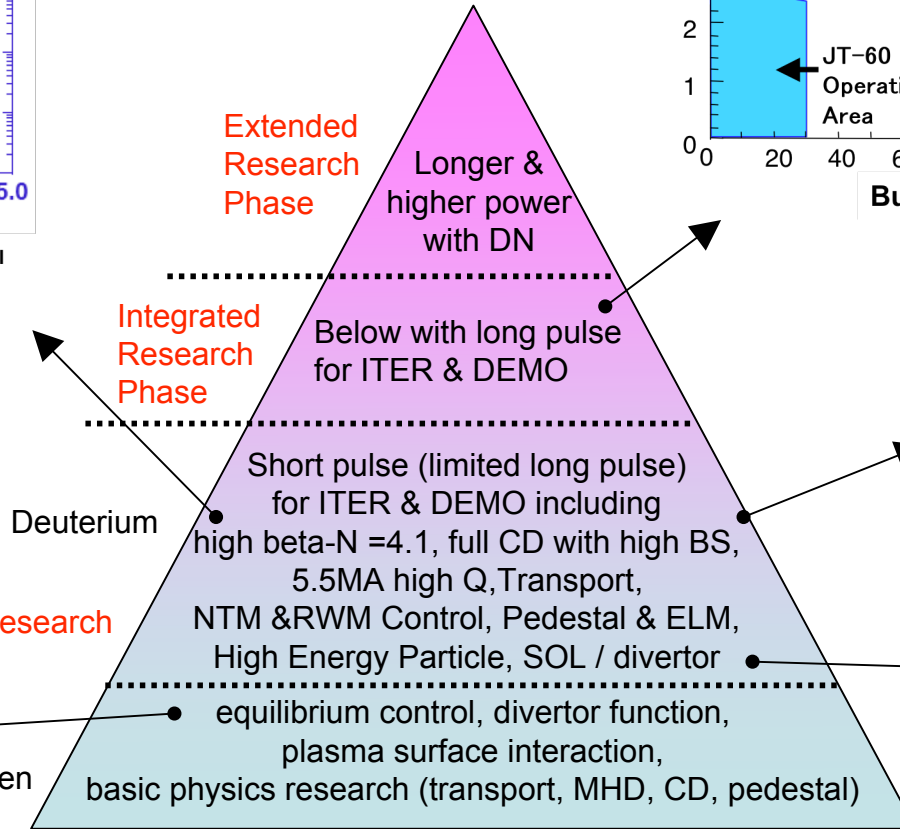
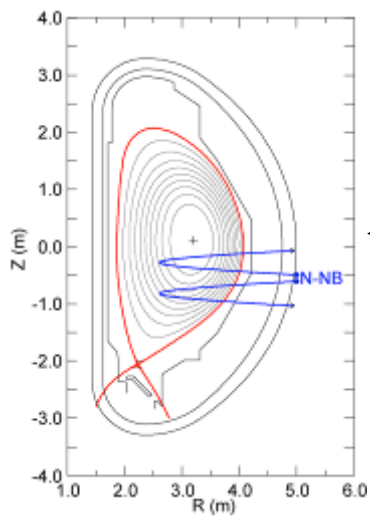
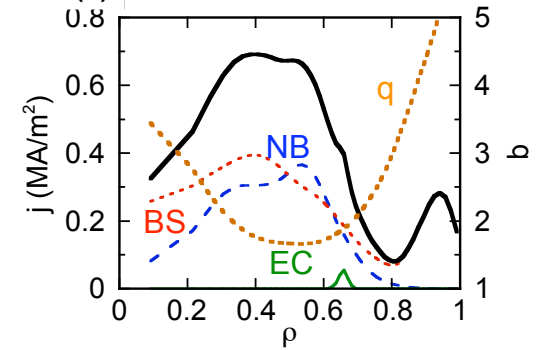
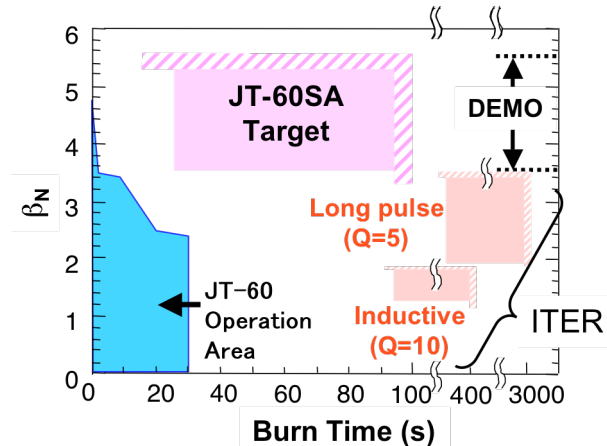
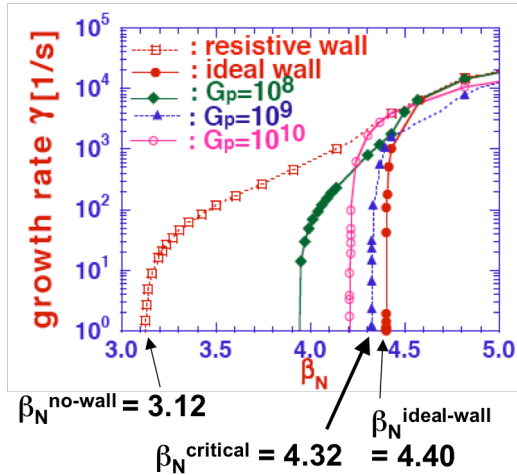


# 段階的な運転計画

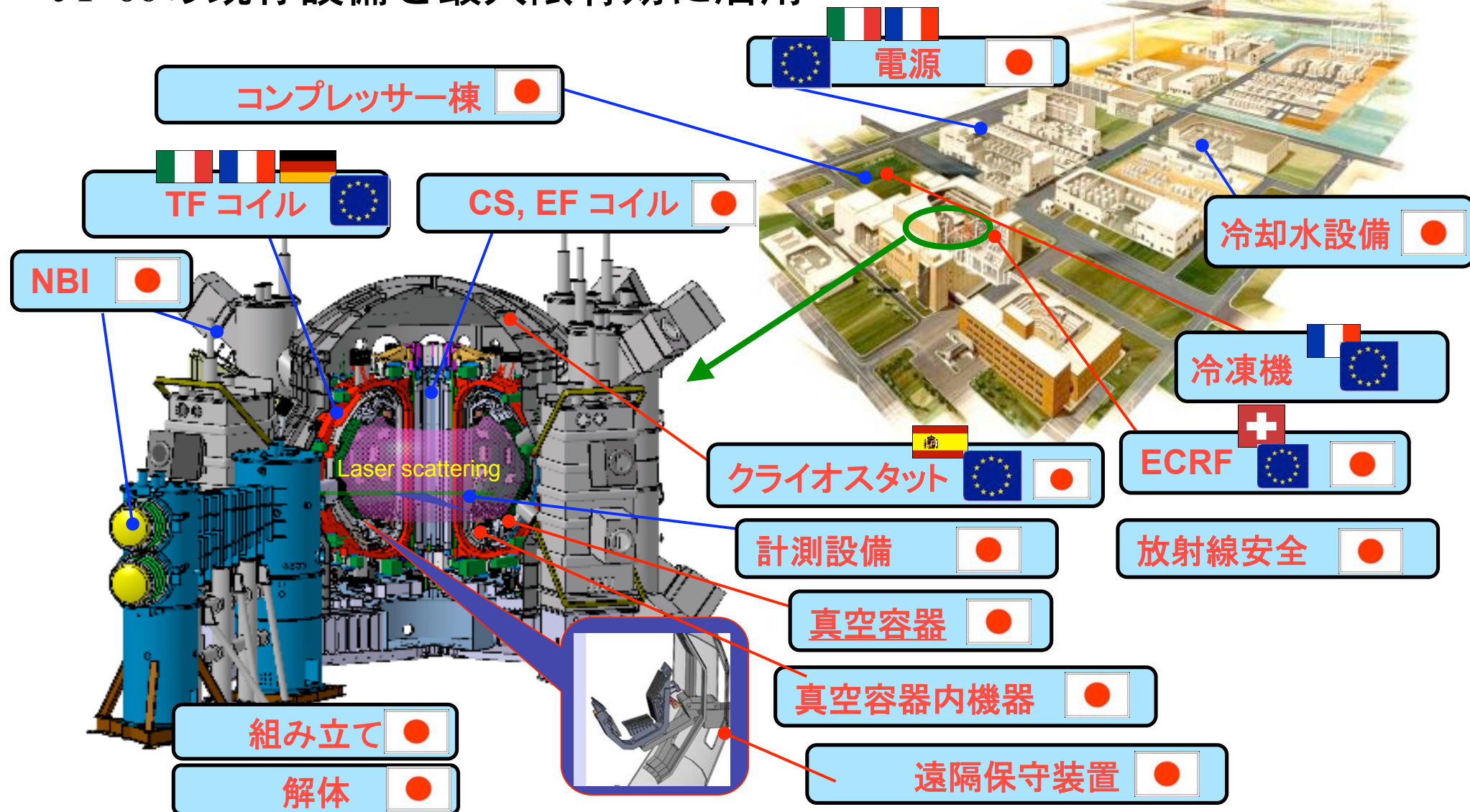
- JT-60SA is planned to be upgraded according to the phased equipment plan.
- Exploitation within the BA period will aim at the **initial research phase**:
  - HH operation for commissioning with the plasmas
  - DD operation for identification of the issues in preparation for full DD operation

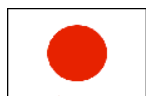
	Phase	Expected Duration		Annual Neutron Limit	Remote Handling	Divertor	P-NB	N-NB	ECRF	Max Power	Power x Time
Initial Research Phase	phase I	1-2 y	<b>H</b>	-	R&D	LSN partial monoblock	10MW	10MW	1.5MW x100s + 1.5MW x5s	23MW	NB: 20MW x 100s 30MW x 60s duty = 1/30  ECRF: 100s
	phase II	2-3y	<b>D</b>	4E19			Perp. 13MW		1.5MW x5s	33MW	
Integrated Research Phase	phase I	2-3y	<b>D</b>	4E20	Use	LSN full-monoblock	Tang. 7MW	7MW	37MW	41MW	
	phase II	>2y	<b>D</b>	1E21			DN				
Extended Research Phase		>5y	<b>D</b>	1.5E21						41MW	41MW x 100s

# 研究の進め方

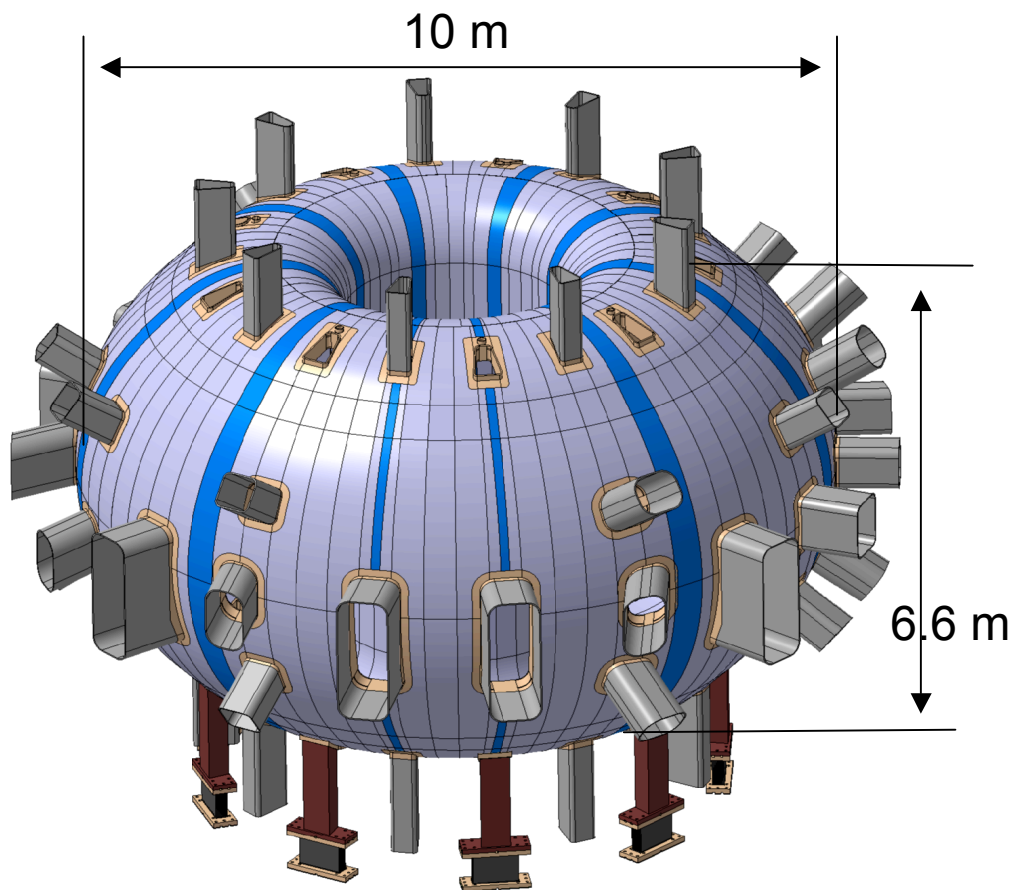


## JT-60の既存設備を最大限有効に活用

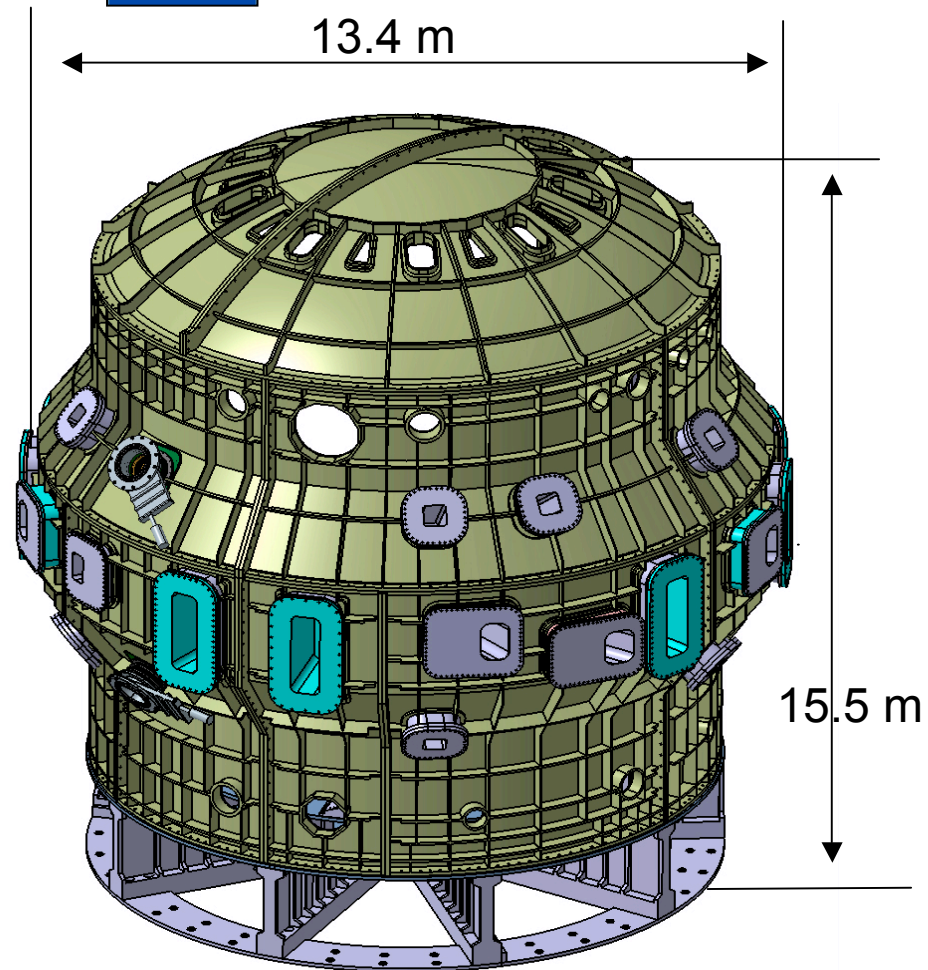




Vacuum Vessel



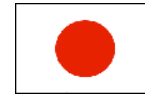
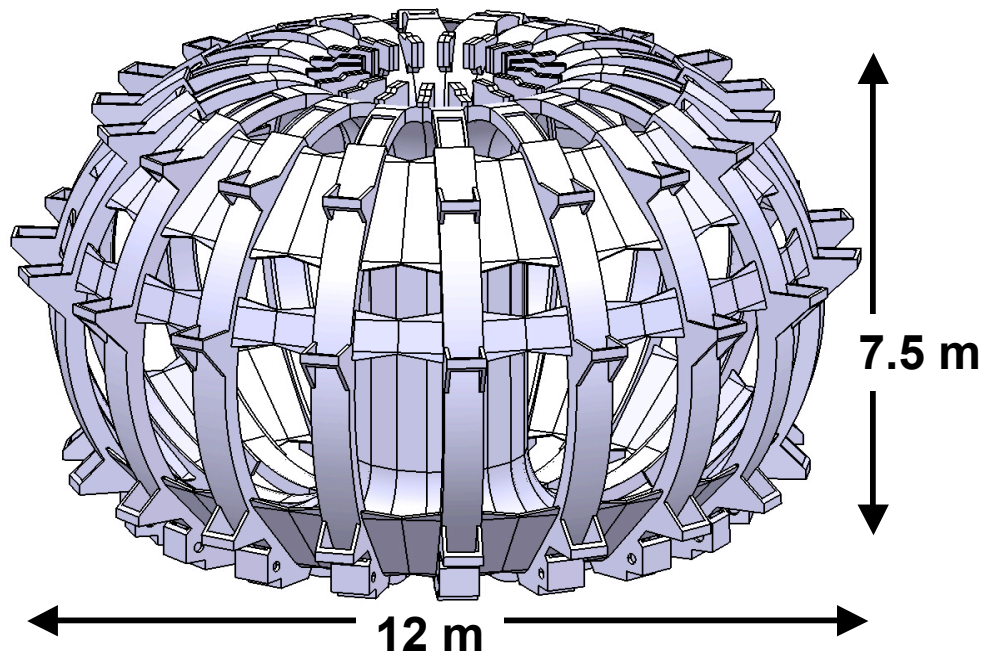
Cryostat



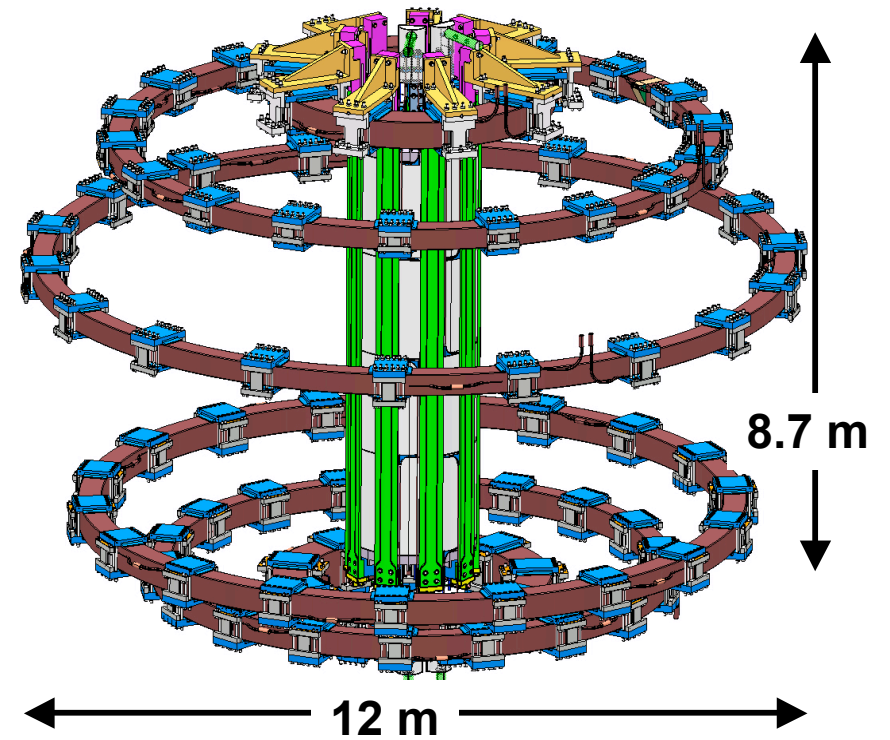




TF Coil



CS and EF Coil



# JT-60SAの計測システム



- Diagnostic systems to measure the plasma parameters are shown below.

## For Machine Protection and Operation

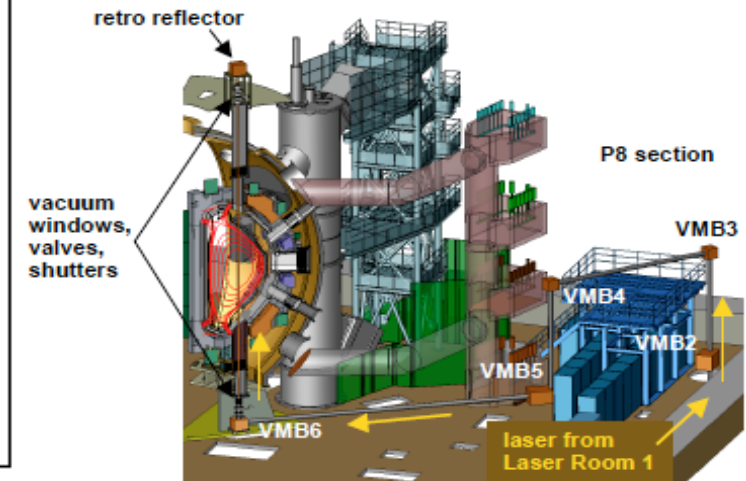
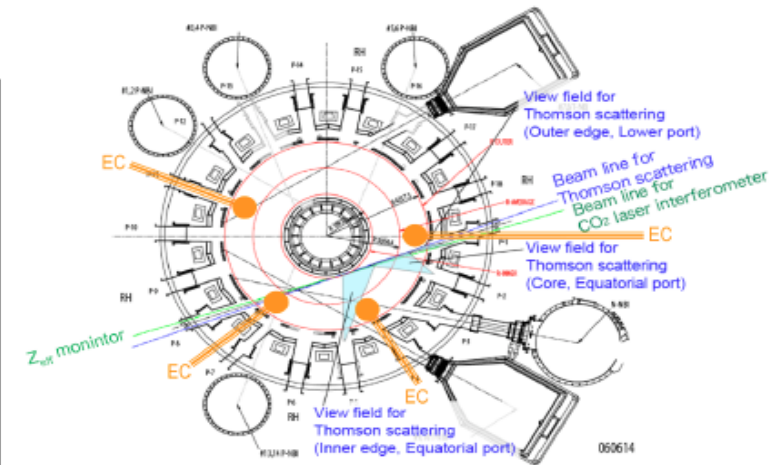
Neutron monitor	Neutrons
Neutron activation measurement	Neutrons
Visible TV camera	Plasma-wall interaction
D $\alpha$ emission monitor	Particle recycling
Divertor Langmuir probe	Plasma Configuration,
	Electron density and temperature
Infrared TV camera (divertor)	Heat load

## For Fundamental Parameter Measurement

YAG laser Thomson scattering system	Electron density and temperature
CO <sub>2</sub> laser interferometer / polarimeter (tangential and vertical)	Electron density
Electron cyclotron emission diagnostics (Fourier transform spectrometer, Grating polychromator, Heterodyne radiometer)	Electron temperature
Charge exchange recombination spectroscopy	Ion temperature, Plasma rotation, Impurity
Z <sub>eff</sub> monitor (Visible bremsstrahlung emission)	Impurity
VUV spectrometer	Impurity
Motional Stark effect polarimeter	Plasma current profile
Bolometer (main, divertor)	Radiation loss power

## For Physics Understanding

Soft X-ray detector array	Soft X-ray emission
Neutron emission profile monitor	High-energy ions
14 MeV neutron detectors	High-energy ions
Neutron spectrometers	High-energy ions
Infrared TV camera (first wall)	High-energy ions
Li-beam probe	Plasma current profile in the edge
Reflectometer	Perturbations
Reciprocating Mach probe	Plasma flow
Visible spectrometer for the divertor	Electron temperature and density in the SOL
VUV spectrometer for the divertor	Impurity, Recycling
Neutral gas pressure gauge (Penning gauge, Fast response ionization gauge)	Impurity
	Neutral gas pressure





ITERの燃焼プラズマ  
JT-60SAの高圧力定常プラズマ  
にどう立ち向かうか？

# 燃焼・高β プラズマの性質

プラズマ：多階層性：プラズマ過程（電子／イオン／MHD）  
+ 原子分子過程

燃焼プラズマシステム  
 $D + T \rightarrow n + \alpha$

燃焼

高温・高密度＝高圧力  
高速イオン  
自己加熱

高効率・定常

高ベータ（＝プラズマ圧力／磁気圧）  
高自発電流  
低温高密度ダイバータ

大きな勾配：温度、密度、圧力 etc  
勾配：揺動&不安定性の駆動源

自律性

：平衡、構造形成

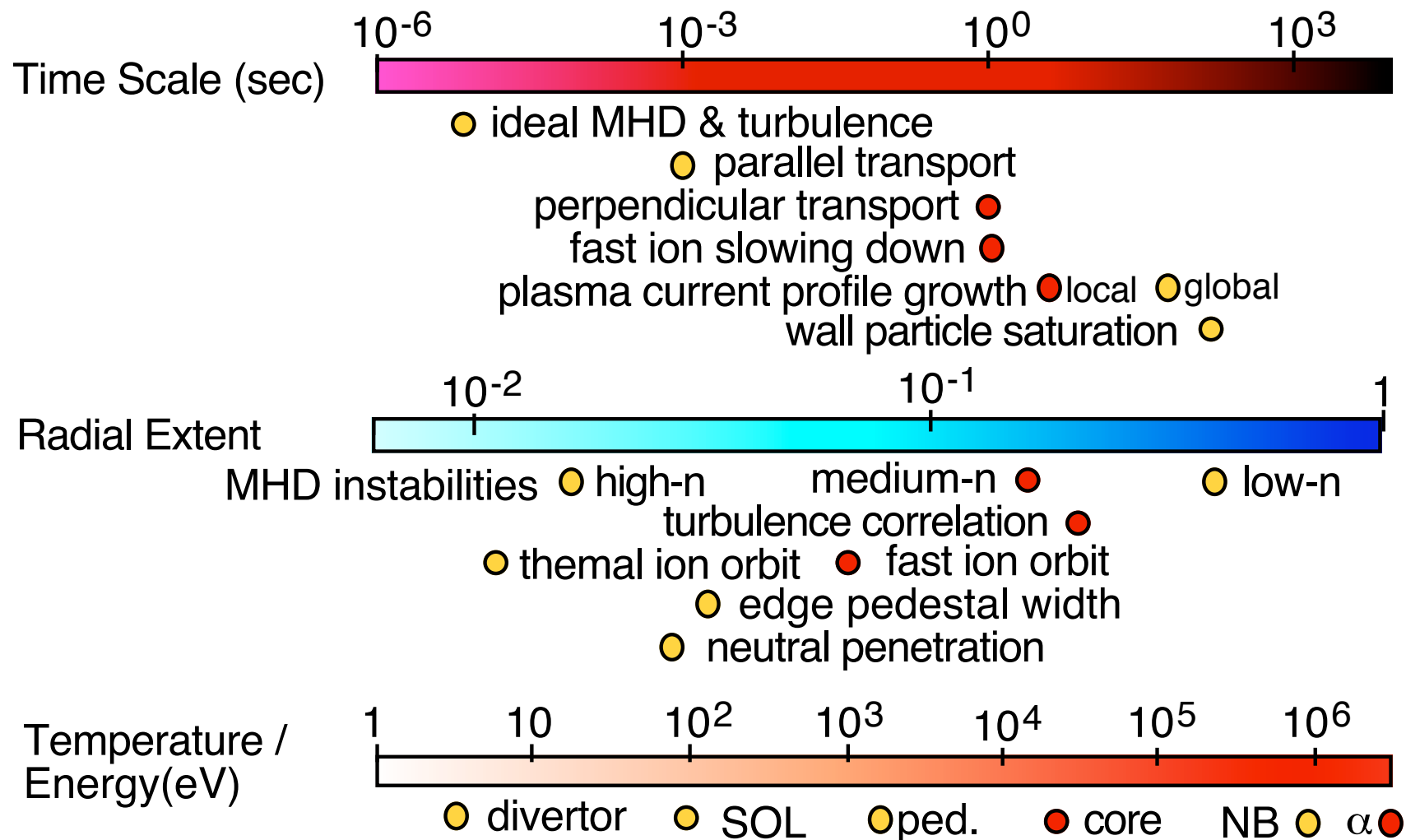
複合性

：支配現象の異なる領域の複合

# 現象の広がり: 時間、空間、温度領域 =>これが半径数m以内に共存

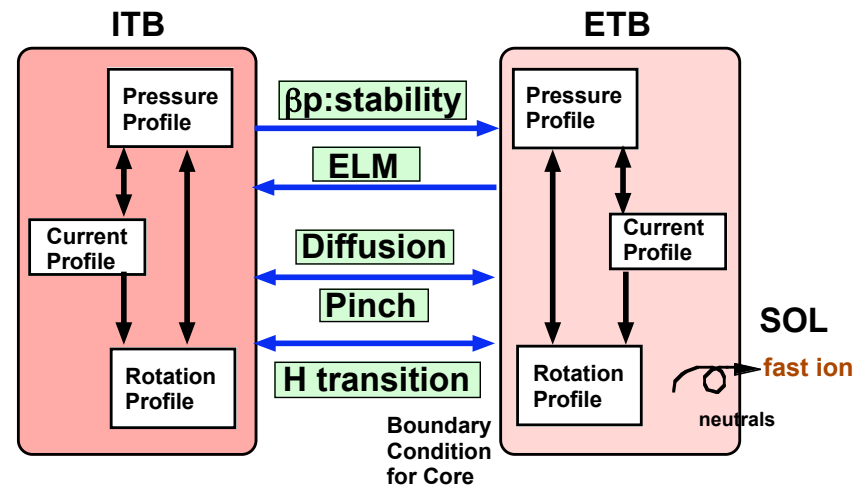
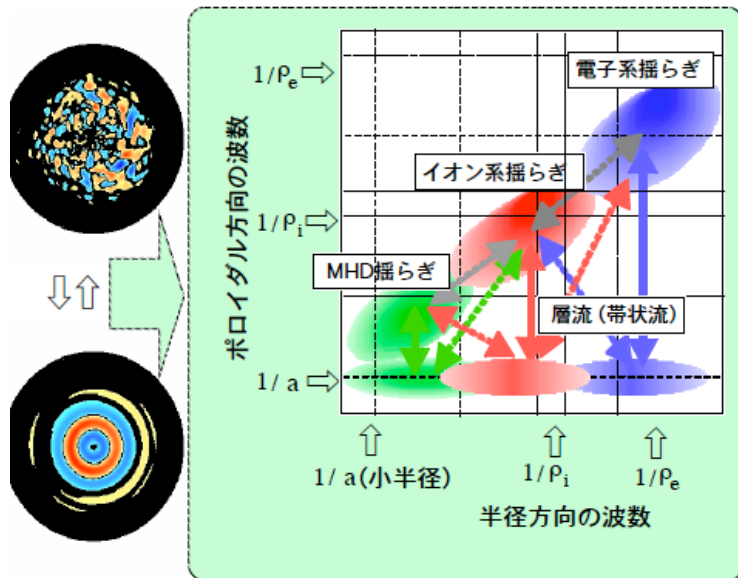
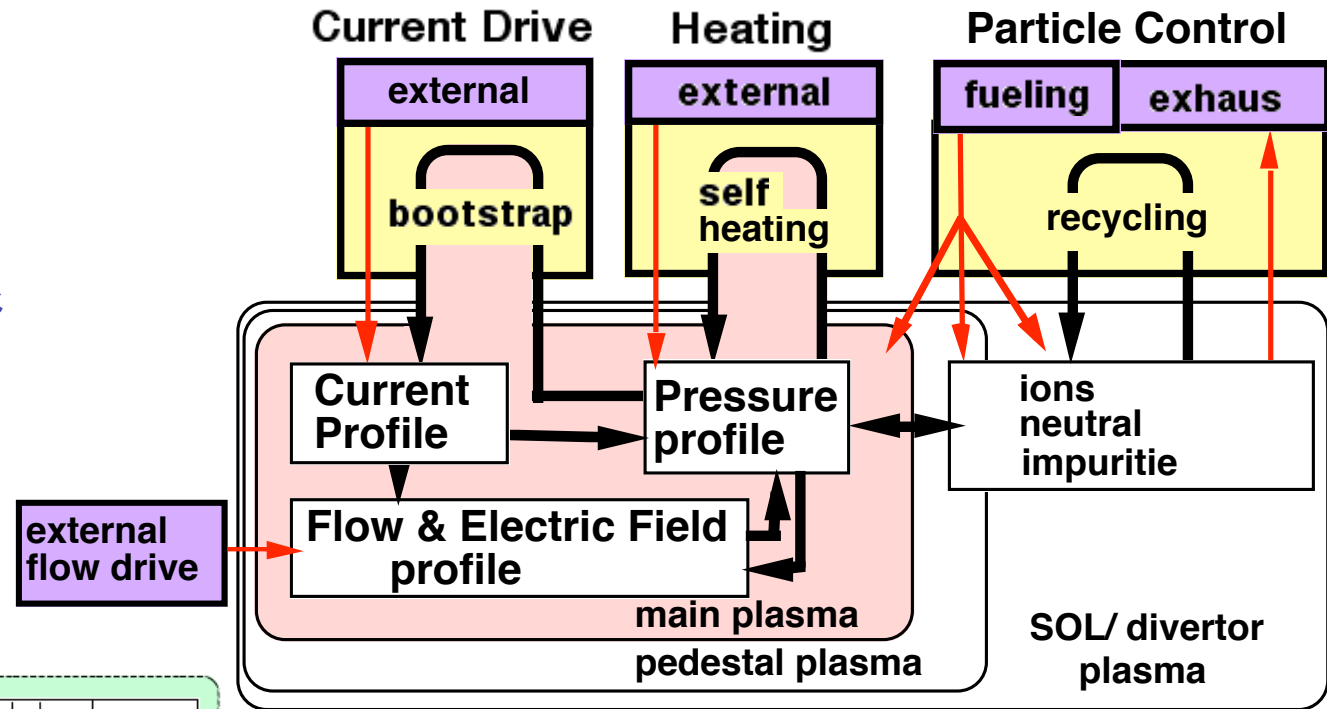
系全体：広範な時空間領域

要素過程：近接時空間での協同



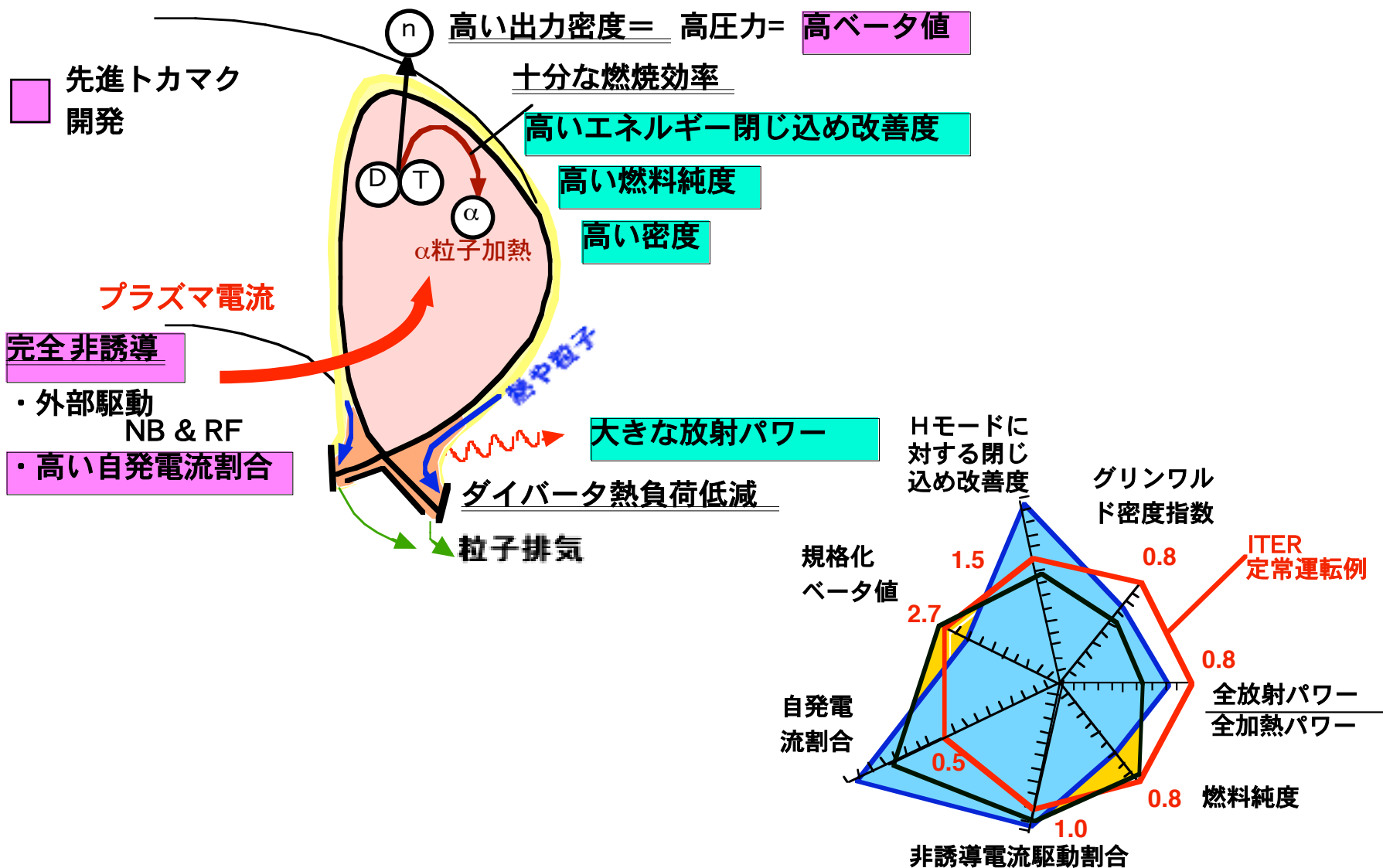
# プラズマは自律・多階層・複合系=>どう理解し、どう制御するか？

アクチュエータの選択と  
効率の向上  
ロジックの確立と制御裕  
度の確証が必要



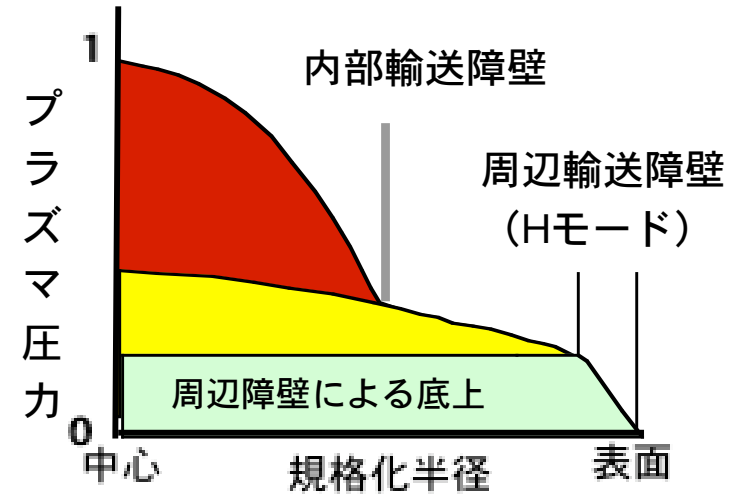
# 総合性能: 燃焼状態で同様に達成・維持できるか?

必要な要素性能を高い次元で統合=システムとしての最適化

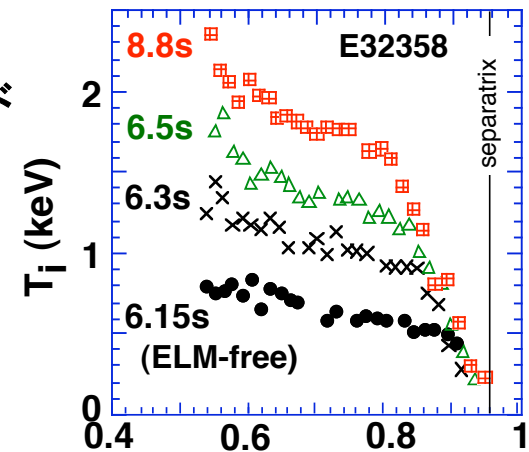
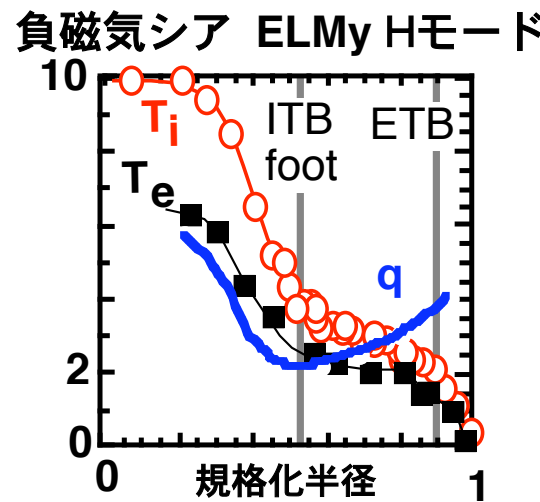
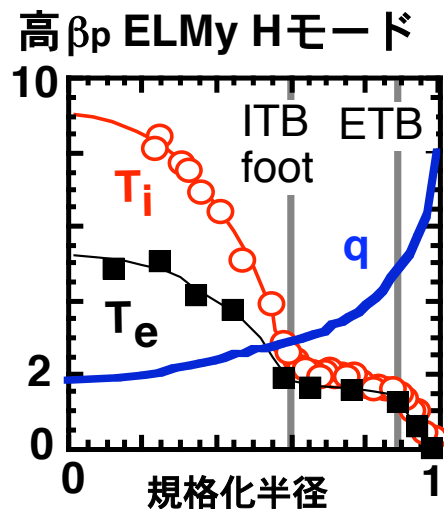


# 分布(勾配): 輸送特性 & 安定性が大きく変化

プラズマ諸量は分布を持つ。  
相転移的な構造形成も伴う。  
分布が変わると、  
閉じ込め性能: ~ 4 倍、  
圧力限界 (安定性): ~ 4 倍  
程度変化。 <=> 勾配



イオン温度  $T_i$  (keV)  
電子温度  $T_e$  (keV),  
安全係数  $q$

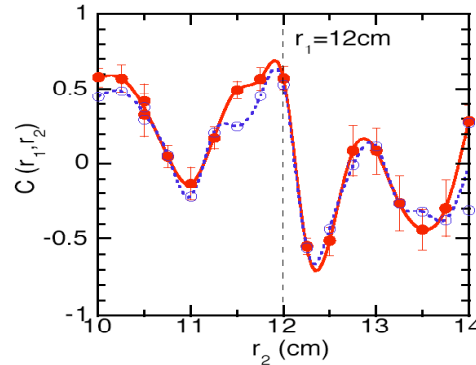
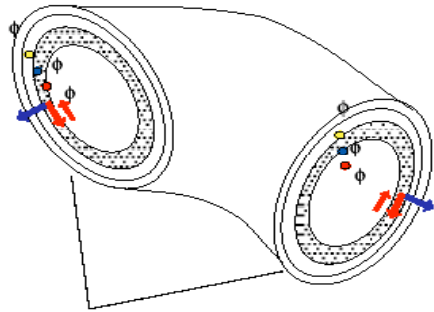


周辺ペデスタル部  
プラズマ過程と  
原子分子過程が複合

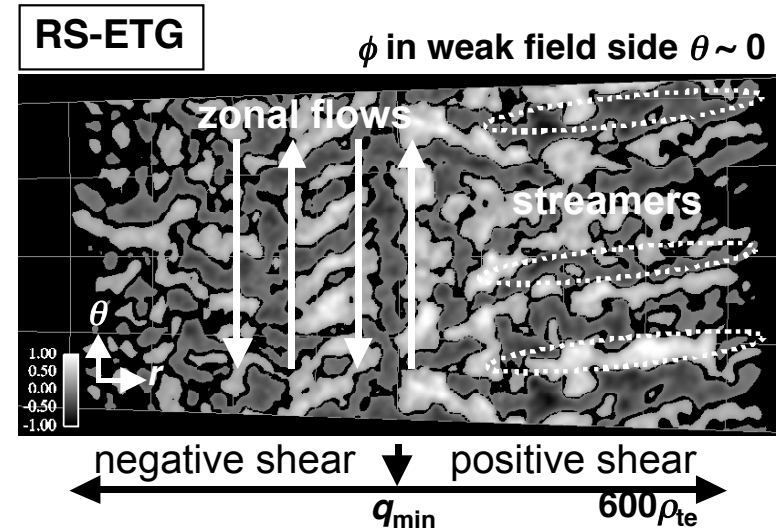


# 発見、解明、実証 ⇒ 統合

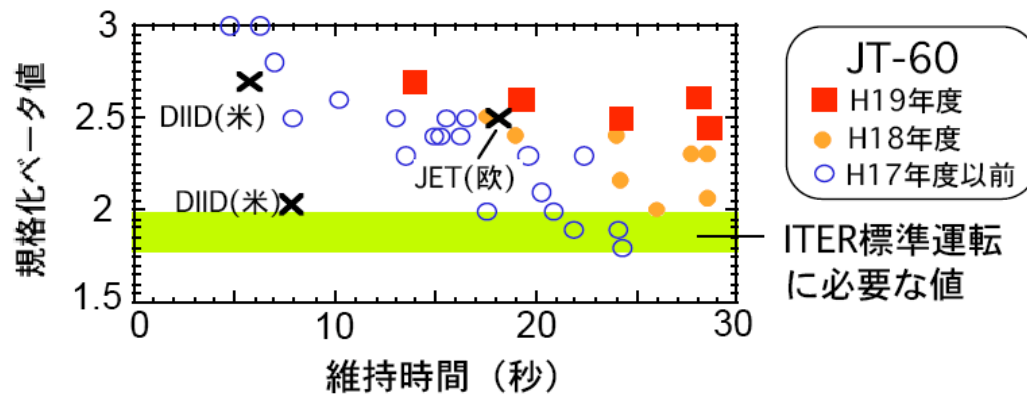
## CHS: Identification of Zonal flow



## Simulation : RS-ETG turbulence



## JT-60U: 高β長時間維持の実証



系全体の総合的振る舞いと

解明した素過程を統合する研究が必要

# まとめ：自分のアプローチを

プラズマは「システム」である。=> 自律、多階層、複合  
JT-60SA・ITERに向けた研究段階に入った。

予測：見つけた現象を、  
どう一般化するか。  
どう外挿するか。（そのままOKか。）

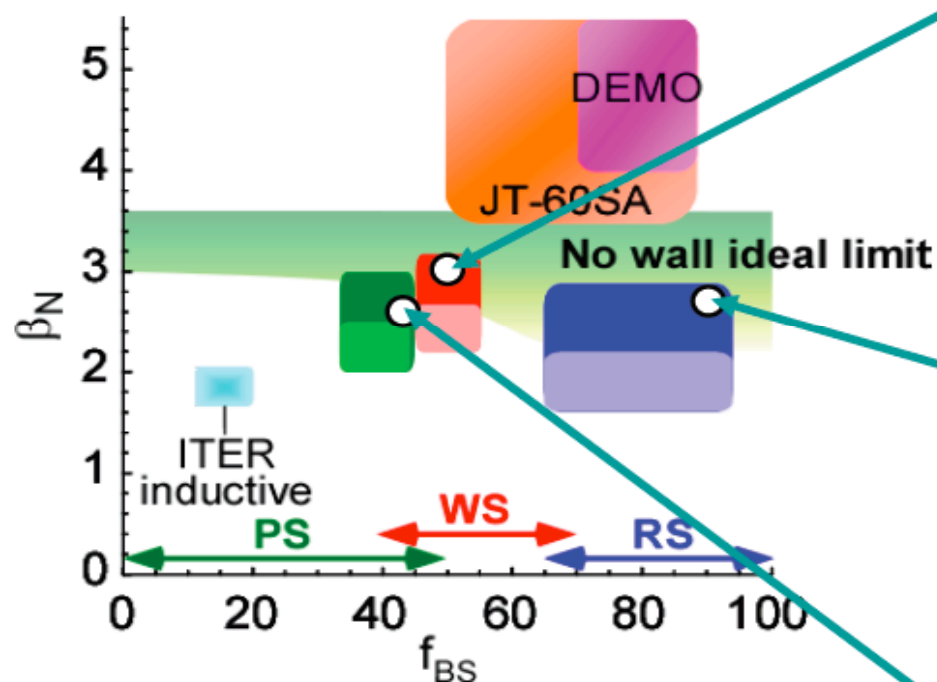
それを確かめるためには  
どんな実験が必要か  
どんな計測が必要か  
どんな計算が必要か

これらを、どのように制御に使うか

# JT-60Uの先進トカマク運転領域

JT-60U

Operation regimes of AT plasmas are significantly expanded.



Steady-state scenario for ITER and DEMO

High  $\beta_N \sim 3 > \beta_N^{\text{no-wall}}$  for  $\sim 5$  s ( $> 3\tau_R$ ) in WS regime

- RWM can be stabilized by  $V_T$
- Suppression of High  $\beta_N$  bursting mode is also important

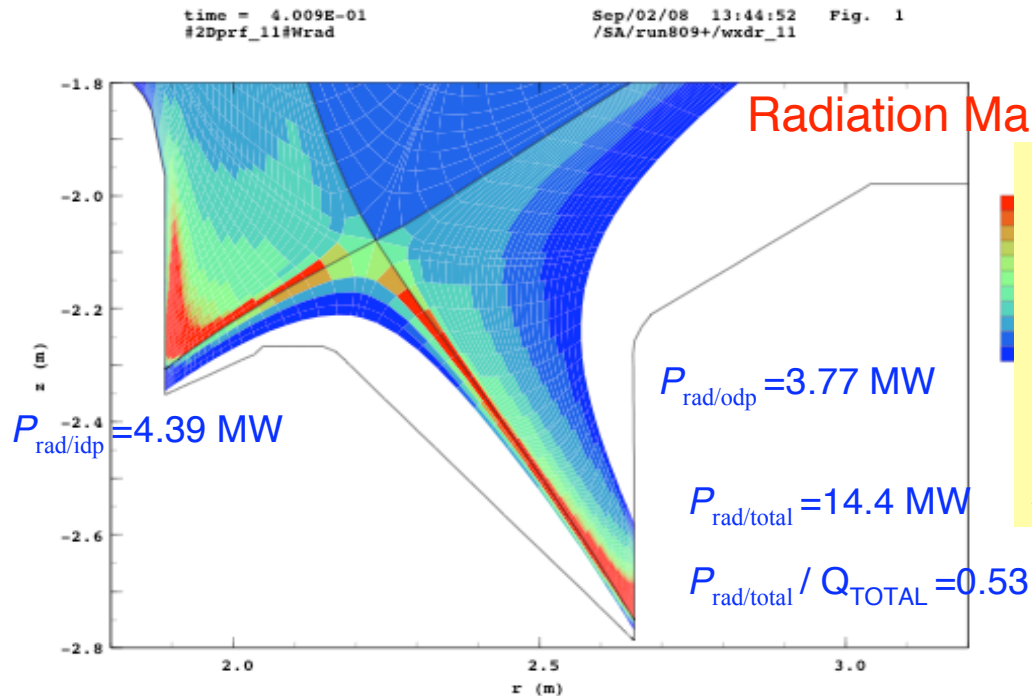
High  $\beta_N > \beta_N^{\text{no-wall}}$  with high  $f_{BS} \sim 0.9$  is obtained at  $q_{95} \sim 5$  in RS regime

- Integrated performance almost satisfies ITER SS scenario.

Hybrid scenario for ITER

$\beta_N = 2.6$  and  $H_{H98(y,2)} = 1$  for 25 s ( $\sim 15\tau_R$ ) with  $f_{BS} > 43\%$  and G-factor = 0.54

# Heat flux can be handled with gas control



## Input parameters for simulation

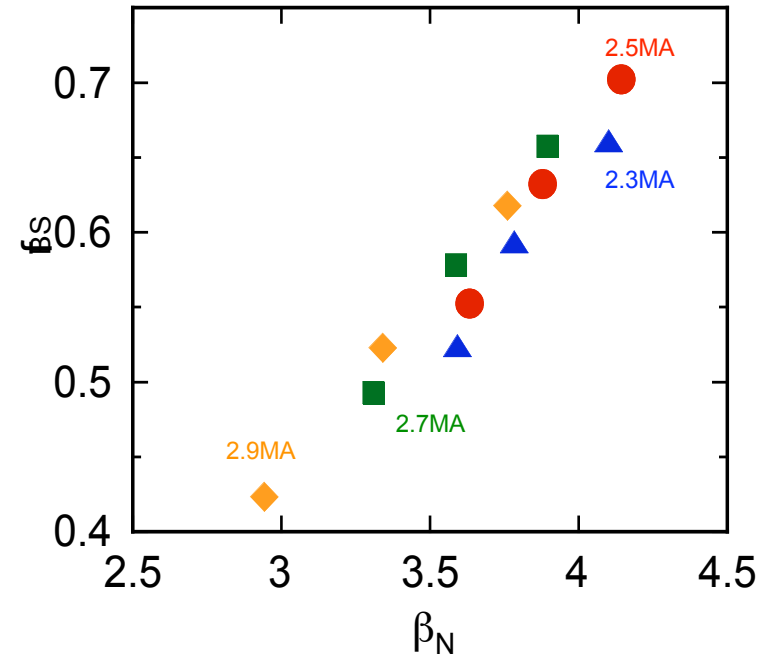
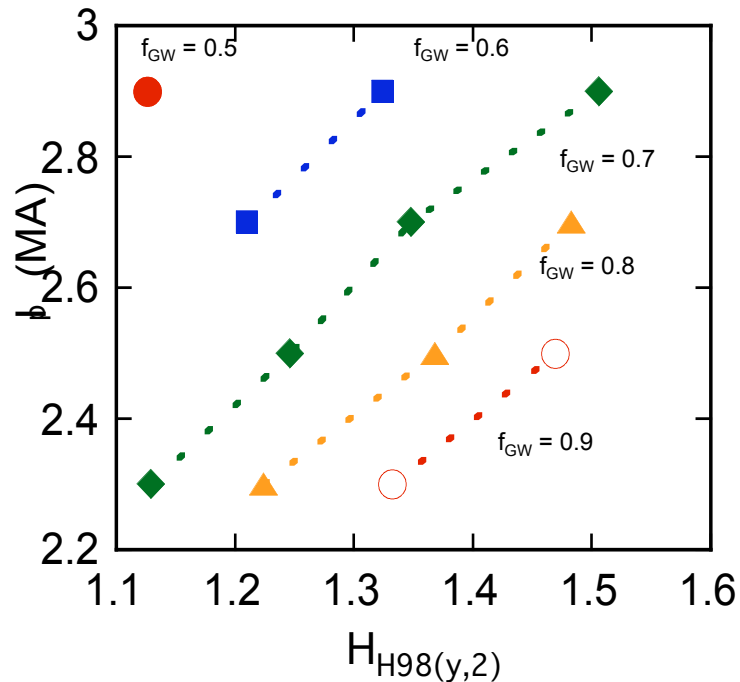
$Q_{\text{total}} = 27 \text{ MW}, \Gamma_{\text{ion}} = 2.0 \times 10^{21} \text{ s}^{-1},$   
 $\Gamma_{\text{puff}}^{\text{osol}} = 2 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}, S_{\text{pump}}^{\text{in}} = 100 \text{ m}^3/\text{s},$   
 $n_c/n_e = 1\%,$   
 $\chi_e = \chi_i = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}, D = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$

## Results

$q_{\text{peak}} = 7.32 \text{ MW/m}^2,$   
 $n_{e, \text{sep}} = 2.70 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

- The peak heat flux can be suppressed within the mono block capability gas puffing.
- Considering 5.5MA operation,  $n_{e, \text{ave}} \sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  at  $f_{\text{GW}} = 0.8$ ,  $n_{e, \text{sep}} = 2.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  is acceptable.

# High $\beta_N$ steady state operational space



- Assuming profiles, full-CD ( $I_{OH} = 0$ MA) solutions are evaluated by ACCOME with varying  $I_p$  and  $f_{GS}$ . Full power injection is assumed.
- full CD at 2.3 MA (with  $f_{GW} \sim 0.9$ ) to 2.9 MA (with  $f_{GW} \sim 0.6$ ) can be expected with moderate  $H_H$  of 1.3.
- Here  $q_{95}$  is around 5.5,  $q_{min} \sim 1.6$ ,  $\rho_{min} \sim 0.5 - 0.55$ .
- $I_p$  of 2.9 MA is limited by the maximum in  $B_t$ .
- $f_{BS}$  up to  $\sim 70\%$  is expected with DEMO relevant  $\beta_N$ .