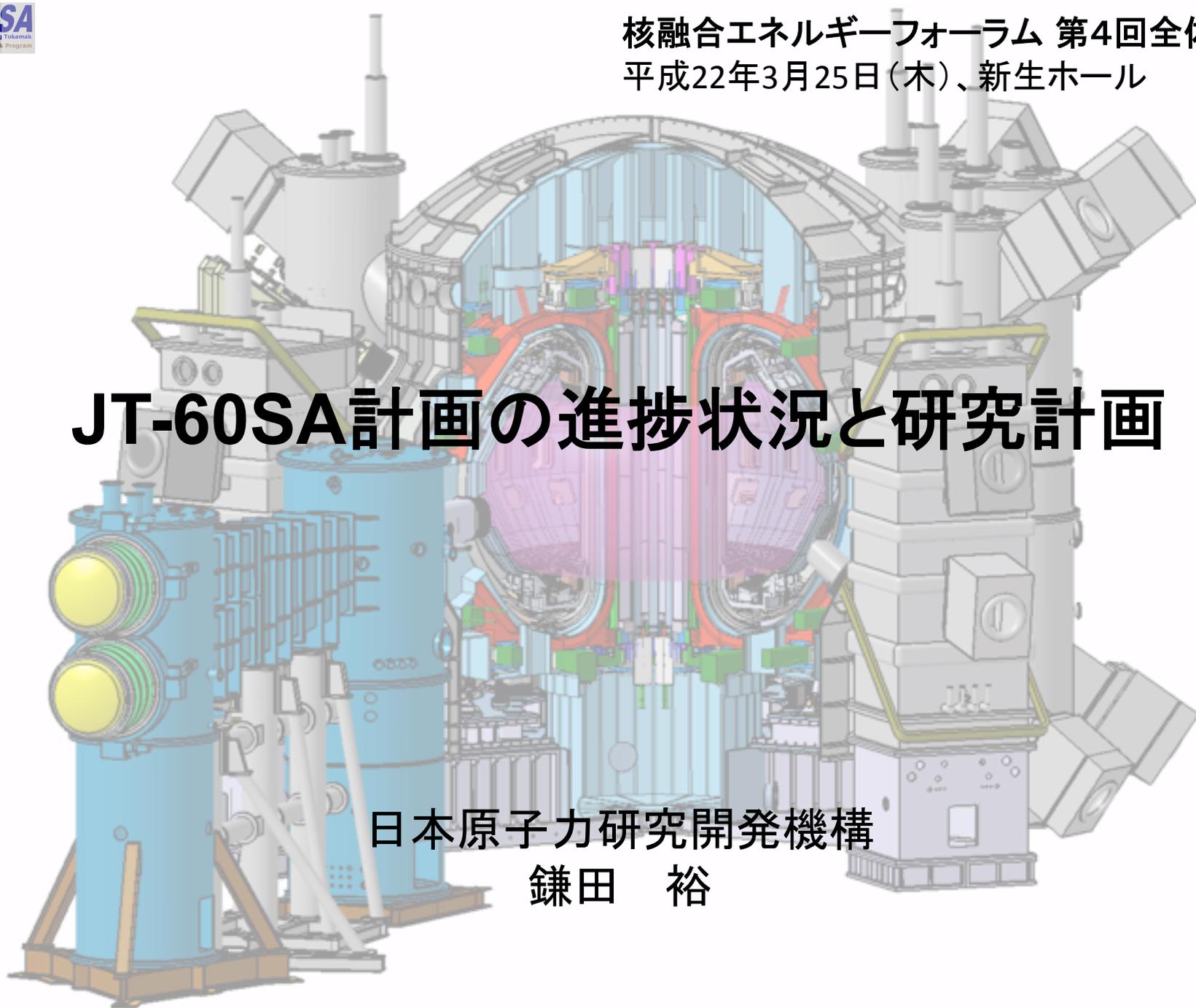


JT-60SA計画の進捗状況と研究計画

日本原子力研究開発機構
鎌田 裕



JT-60SA (JT-60 Super Advanced)計画

幅広いアプローチ活動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の合同計画⇒ 核融合炉の早期実現

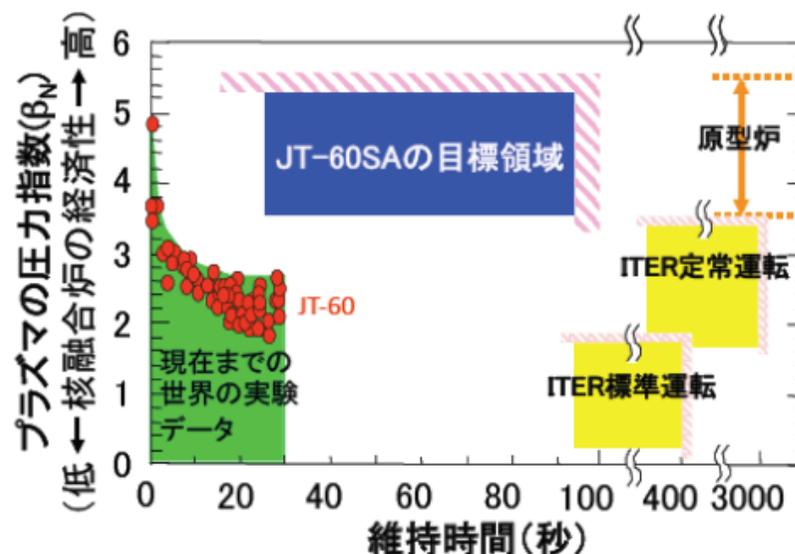
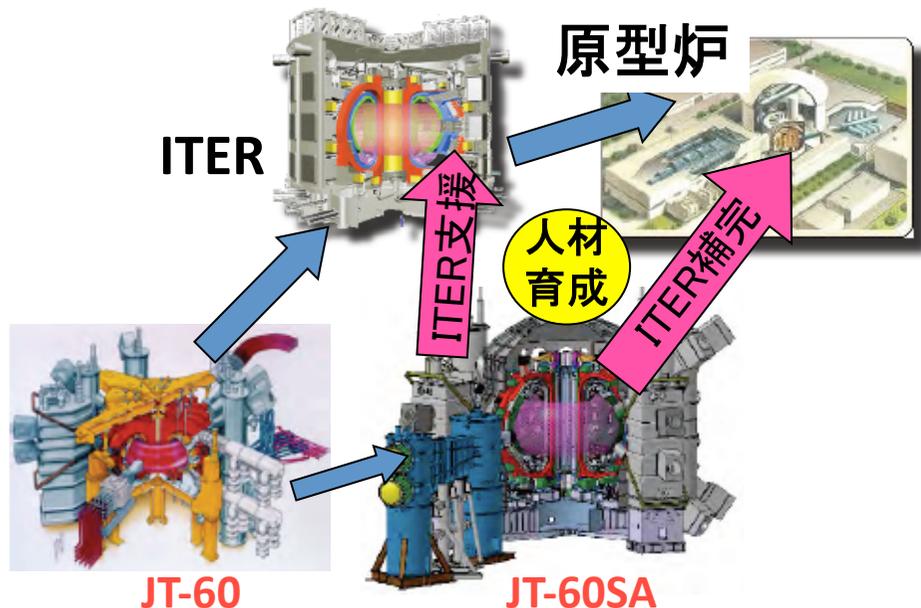
○ITERの技術目標達成のための支援研究

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。

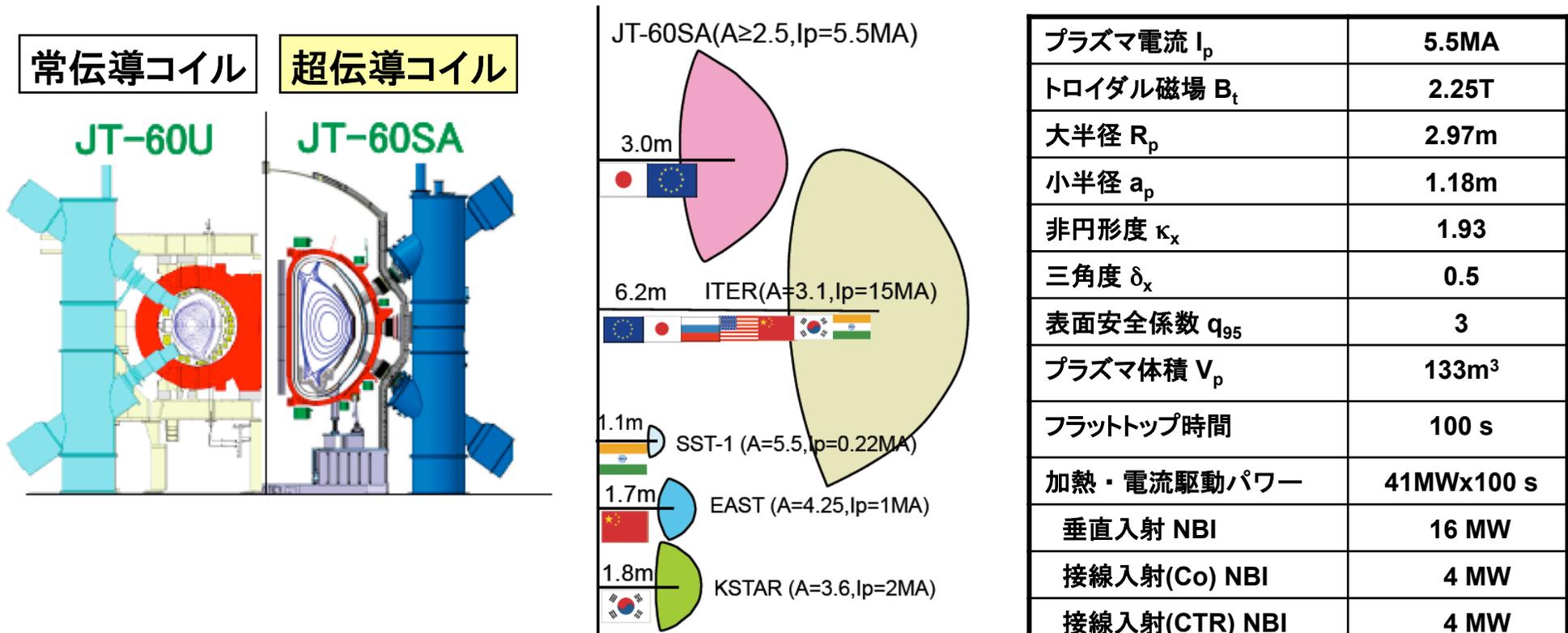
○原型炉に向けたITERの補完研究

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

JT-60を超伝導装置として改修。我が国唯一の大型トカマク装置であり、世界の核融合実験装置の中で、ITERに対して最も大きな支援を行なう能力を有するとともに、ITERでは実施が難しい高圧力プラズマ定常化研究開発を実現できる世界で唯一の装置。
ITER・原型炉開発を主導する人材を育成する。

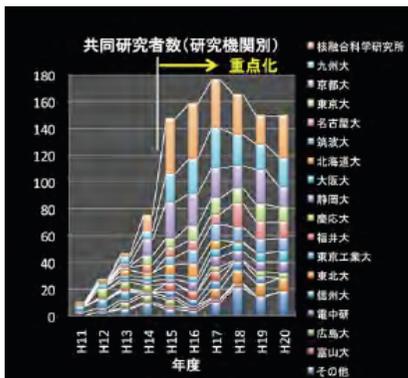


プラズマ電流5.5MA、プラズマ体積130m³で、高形状ファクター ($S=q_{95}I_p/(aB_t) \sim 7$)・アスペクト比2.5を含む多様なプラズマ配位の自由度と41MAx100秒の加熱パワーを有する。



JT-60SAのプラズマサイズ~ 0.5 x ITER
 超伝導トカマク (SST-1, EAST, KSTAR, TORE-SUPRA, JT-60SA, ITER) の総合的知見で原型炉に向けた信頼性の高い科学技術を確立する。

JT-60SA : 国内及び日欧の共同研究拠点

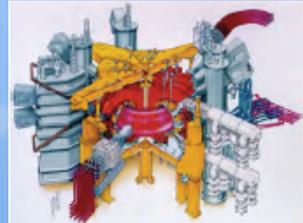


国内研究者200-300名
 欧州を中心とする外国研究者200-250名

トカマク国内重点
 化装置計画

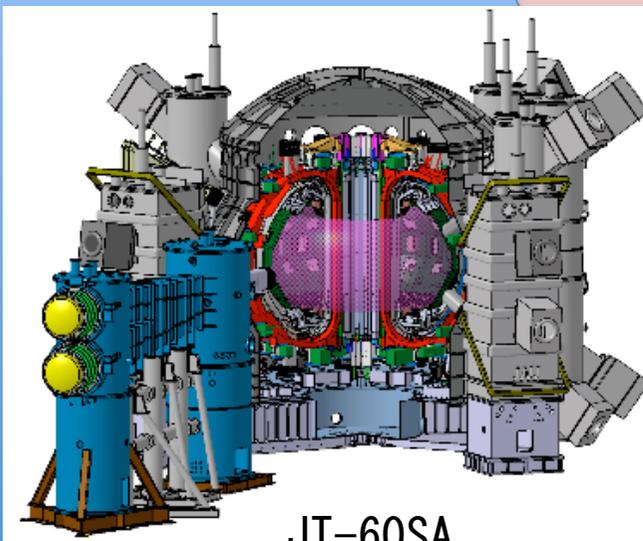
日欧の幅広いアプローチ・サテ
 ライトトカマク計画

JT-60



現在の共同
 研究者数:
 150名/年
 (助教・大学
 院生58%)

国内コミュニティ
 核融合エネルギーフォーラム
 核融合ネットワーク等



JT-60SA

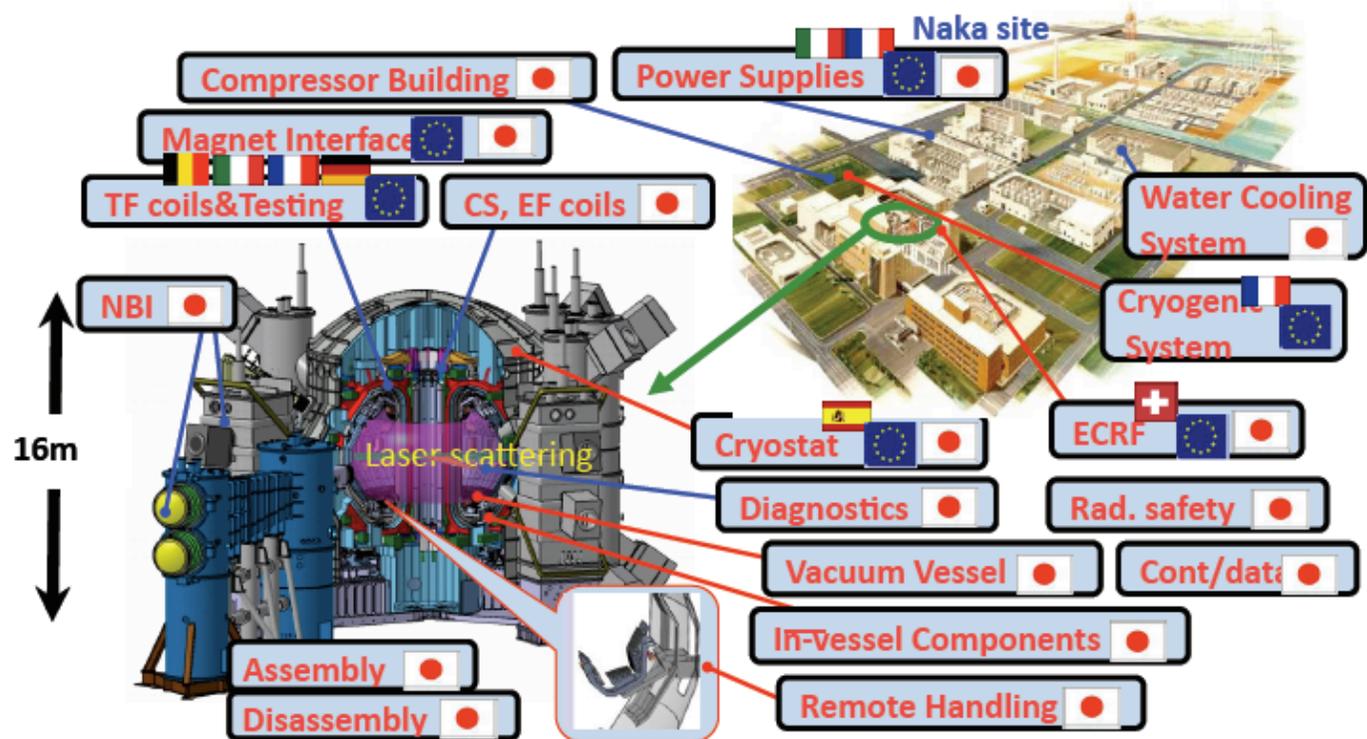
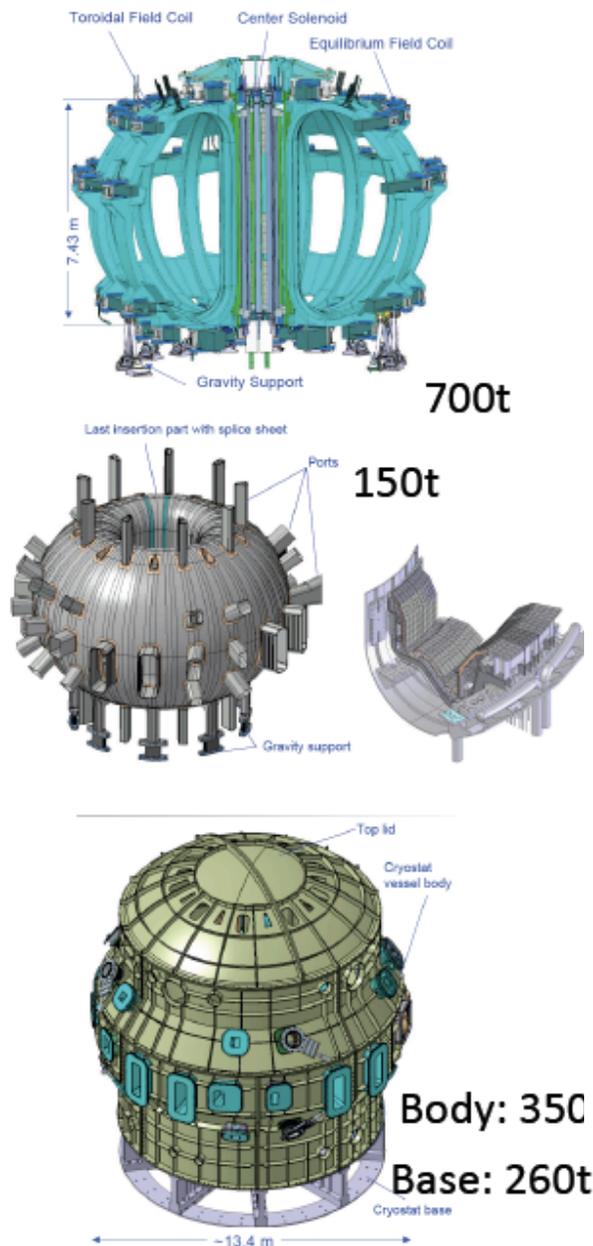
欧州コミュニティ



ITER建設は国際協力であるが、ITER運転は国際競争。国際的主導性を堅持するためには、自国の研究開発計画で必要なデータを事前に取得・解析するとともに、優秀な人材を育成することが必須。

JT-60施設を再利用し、日欧で新規設備の調達を分担

- JT-60SA本体、超伝導コイル、電源、加熱設備を日欧で分担して製作
- JT-60施設の主要な設備機器を再利用
- 予算: BA活動分(日欧折半、日本分 217.5億円)+ 国内整備分



JT-60SA計画の運営

H21年度

- ・TCM会議3回、PCM会議16回、設計レビュー会議4回開催
- ・JT-60とJT-60SAを包含する国内重点化装置共同研究を開始(30件)
- ・JT-60SAに関する公募型委託研究(応募審査・成果評価はフォーラム&ネットワークに依頼)3件を実施。



H21年

	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
運営委員会SC		● SC4 12/10@ドイツ			● SC5 5/12@六ヶ所		●					● SC6 12/4@イタリア	●	
事業委員会PC					● PC4 3/11@東京							● PC5 10/19?@東京		
設計レビュー会議PCDRM											● DRM 9/25@TV			
技術調整会合TCM	● TCM4 1/26-28@独			● TCM5 4/21-23@那珂		●			● TCM6 9/16-18@スペイン		●	● TCM7 12/15-17@那珂	●	
国内		● JT-60SA専門部会3 2/25					● JT-60専門部会1 7/28 ● JT-60SA専門部会1 7/24				●	● JT-60SA専門部会2 ● JT-60専門部会2		

JT-60SAダイバータ形状検討会(座長:高瀬JT60SA専門部会長:東大)で大学・JAEAが進めて来た、原型炉へ向けた「高形状ファクタープラズマ」と整合するダイバータ構造に決定

順調に進むJT-60SAの設計・製作

日本分担分 これまで6つの調達取り決めの下、34件の契約(今年度新規7件)で製作を進めている。
3月までに、本年度の発注契約全てを締結した。



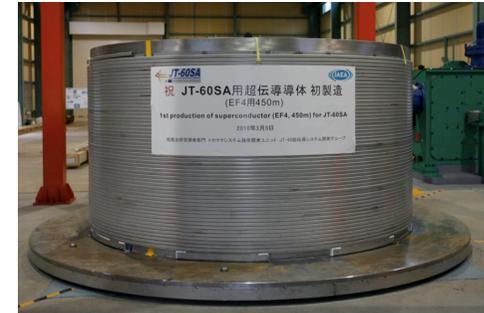
超伝導コイル
サンプル試験
に成功(核融合
科学研究所
との共同研究)



超伝導コイル巻線棟
が竣工



超伝導導体製作棟が竣工
630mの製造ライン



長さ500mのEF-H導体
製作に成功



真空容器材料納入



20°上半部試作: インボード直線部と曲線部の接続



アウトボード20°上半部試作

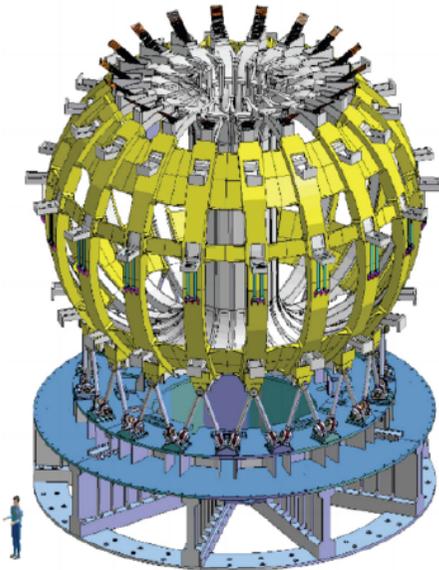


リサーチプラン
ホームチーム原案5月
=> 国内原案1月完成

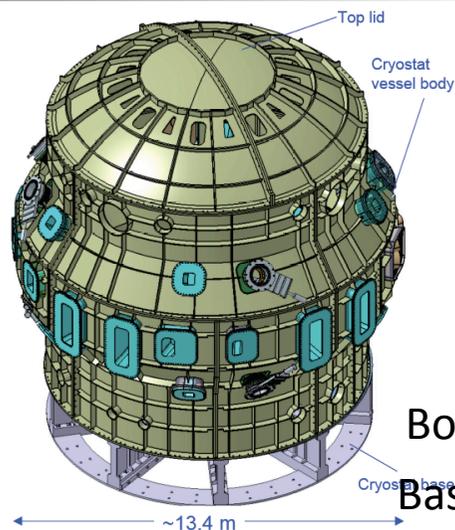
欧州調達分:

主要機器の設計をほぼ合意し、調達取り決め(PA)3件を締結

トロイダルコイル設計レビュー(欧州内)完了(6月)
欧州実施機関(F4E)と欧州内貢献機関間が調達分担合意(8月)



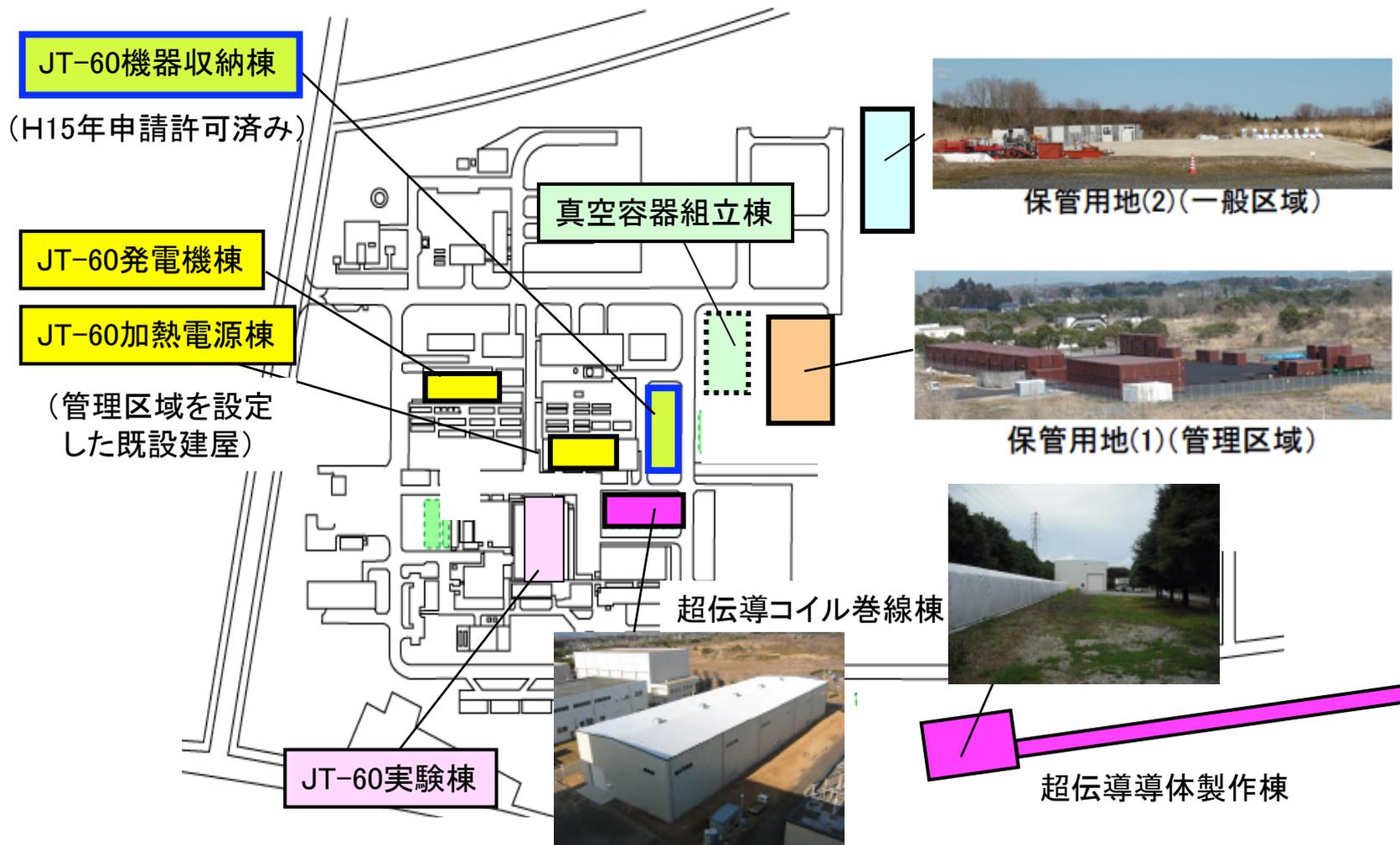
- (1)クエンチ保護回路: PA調印12月完了
- (2)クライオスタットベース: PA調印12月完了
- (3)高温超伝導電流リード: PA調印2月完了
- (4)トロイダル磁場コイル: PA調印2010春予定
技術仕様確定。導体調達の契約事務が開始
- (5)トロイダル磁場コイル試験: PA調印2010春予定
技術仕様確定。
- (6)電源(トロイダルコイル用、ポロイダルコイル用、
高速位置制御コイル用): PA調印2010春予定
技術仕様確定最終段階
- (7)冷凍機システム(技術仕様確定)
- (8)クライオスタット(技術仕様確定最終段階)
- (9)ECH、RWM電源は、技術検討継続中。



欧州製作機器の日本側の受入準備(許認可手続き等)を開始した。

那珂核融合研究所のサイト整備の進捗

那珂核融合研究所敷地内に、保管用地(1)及び(2)の整備を完了した。
放射化物の保管に使用する既設建屋及び保管用地(1)は管理区域を設定した。
真空容器組立棟は契約が整いこれから建設に着手する。

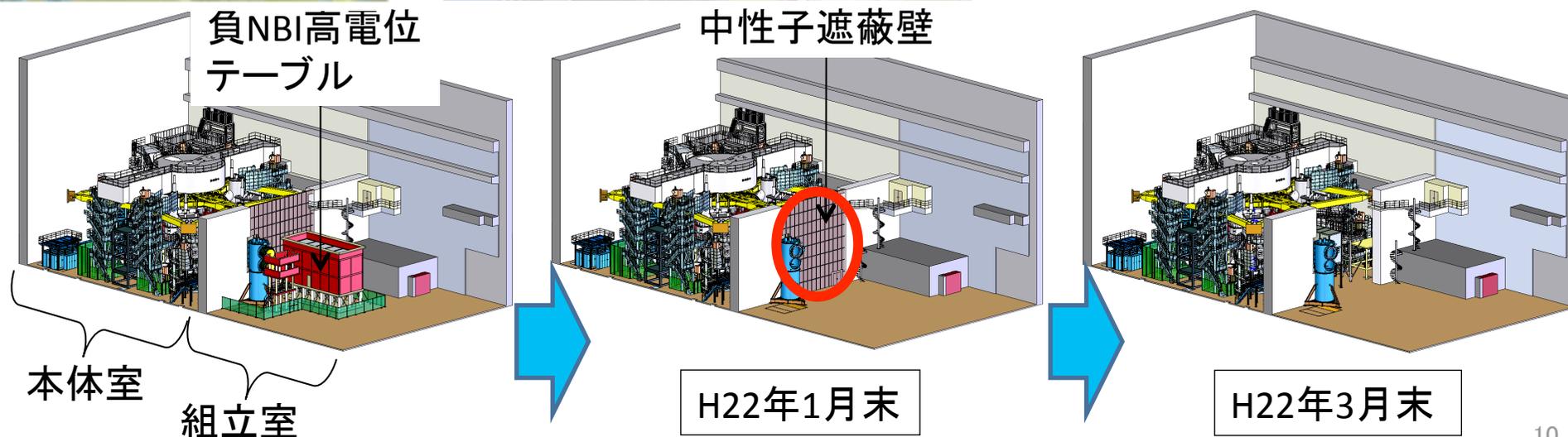
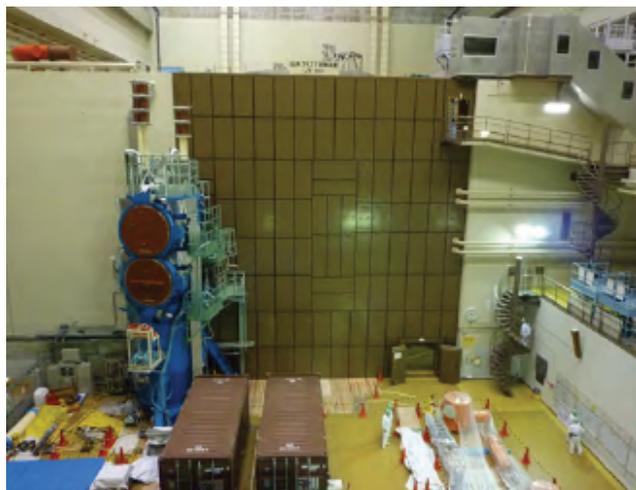


解体放射化物品
(再使用機器を除く
約5300トン)の約
80%をJT-60機器収
納棟に、
約20%は、保管容
器に収納して保管
用地(1)に保管。

放射化していない
解体品は保管用地
(2)に保管。

H21年度解体準備作業の進展

H22-H23年度のJT-60装置本体及び周辺機器の本格的な解体に備え、解体準備作業を実施。組立室の負NBI用高電位テーブル及び中性子遮蔽壁を取り外し、保管した。



JT-60SAの設計方針

ITER・原型炉を「直接見通せる領域」

無次元量(規格化衝突度、規格化ラーマ半径、ベータ値)でほぼ同等:コア & ペデスタル
 有次元量(温度、密度)でほぼ同等:特にダイバータプラズマ
 十分な高速イオン(NNB)、同等の加熱条件、同等のプラズマ形状

魅力的な実験装置であること

実証する／証明／確認することが出来る (総合性能、制御、モデリング予測)

これまで出来なかったことができる／これまで分らなかったことが分る

渡河 (自由境界限界以上、電流拡散時間以上、壁粒子飽和時間以上 etc.)

将来の研究の発展に対応する「場」となる柔軟性

ITER及び原型炉
 に必要な主要研
 究ニーズと、要求
 される機器性能を
 分析

Main Issues		ITER	DEMO	Requirements for devices
Integration	Demonstration	Integrated Performance required for Q=10 in ITER	Integrated performance required for DEMO	Integration of the followings Off-axis NNBCD Long Pulse ~100s
	Identification of operational boundaries	stability limit, density limit etc. in high Ip ITER-like plasmas	stability limit, density limit etc. in high βN & high bootstrap & radiative plasmas	
	Development of integrated control and study on plasma response	Test of controls for ITER at ITER-like regime & configurations	Development of Integrated Control for highly self-regulating high βN & high bootstrap & radiative plasmas	
	current profile control j(r)	relaxed j(r) with bootstrap fraction <50%	relaxed j(r) with bootstrap fraction >50%	
	Particle Control	Particle Control under saturated wall condition		
	Equilibrium Control	Fully superconducting operation		
MHD Stability and Disruption	high β operation boundary	Demonstrate long pulse high βN ~3 and determine stability boundary	Demonstrate long pulse high βN >4. Determine stability boundary. Clarify plasma shape effects	Low-A, strong shaping, NNB
	RWM	RWM Control with internal coils Compatibility with RMP	RWM stabilization with rotation	RWM control-coil Rotation Control
	NTM	Efficient real time control with ECCD, Compatibility with RMP	Simultaneous stabilization of NTM & RWM at high βN>4	ECCD, NNB, CO/CTR/Perp-NB
	Disruption mitigation	Fast VDE control by VS-coil, Mitigation by large amplitude magnetic fluctuation or Increase of electron density		Fast position control coil, Killer pellets, massive gas injection and helical fields
	Disruption prediction	Develop prediction scheme such as using Neural network	Disruption limits & behavior at high βN & high radiation	Active MHD diagnostics

	Main Issues	ITER	DEMO	Requirements for devices
Confinement & Transport	confinement	Confirmation / extrapolation to ITER (mainly H-mode)	Confirmation / extrapolation to DEMO (advanced Operation)	High Ip and large plasmas
		low collisionality & normalized gyro radius at high density dominant electron heating		
	heat, particle, momentum transport and confinement	low central fueling		NNB & ECH
		rotation effects including low external torque input		CO/CTR/Perp-NB, NNB & ECH
High Energy particle	Response & Control of burning plasmas	Response & Control of transport in highly self-regulating plasmas	Response & Control of transport in highly self-regulating plasmas	CO/CTR/Perp-NB, NNB & ECH, puff, pellet
	AE	Stabilization / Control of AE at high fast ion beta,		
	Transport	Study transport of high energy particles		
	Interaction with MHD modes	Clarify Interaction of high energy ions with various MHD modes		High energy & high power NNB
Pedestal	NBCD	High energy NBCD	High energy off-axis NBCD	
	L-H transition	low collisionality at high ne electron heating	highly shaped configuration	High Ip and large scale & highly shaped plasmas
	Pedestal structure	Pedestal characteristics at high current & high density	Pedestal characteristics with highly shaped configuration	
	ELM control	Behavior of type I ELMs Mitigation with RMP and pellet	small/no ELM regime development at high βN	RMP, highly shaped, Rotation Control
Divertor & SOL	Particle Control	Main and impurity particle control with Fueling & Pumping satisfying required integrated performance		Strong Pumping, Pellet, puff
	Power handling	ITER-like divertor configuration with high heating power	Large radiation fraction with high confinement	ITER-like divertor, divertor puff&pump
	compatibility with high performance plasmas	carbon / metal wall material	advanced wall material and divertor structure	Replaceable divertor structure

ITER及び原型炉に必要な主要研究ニーズ満足するよう設計

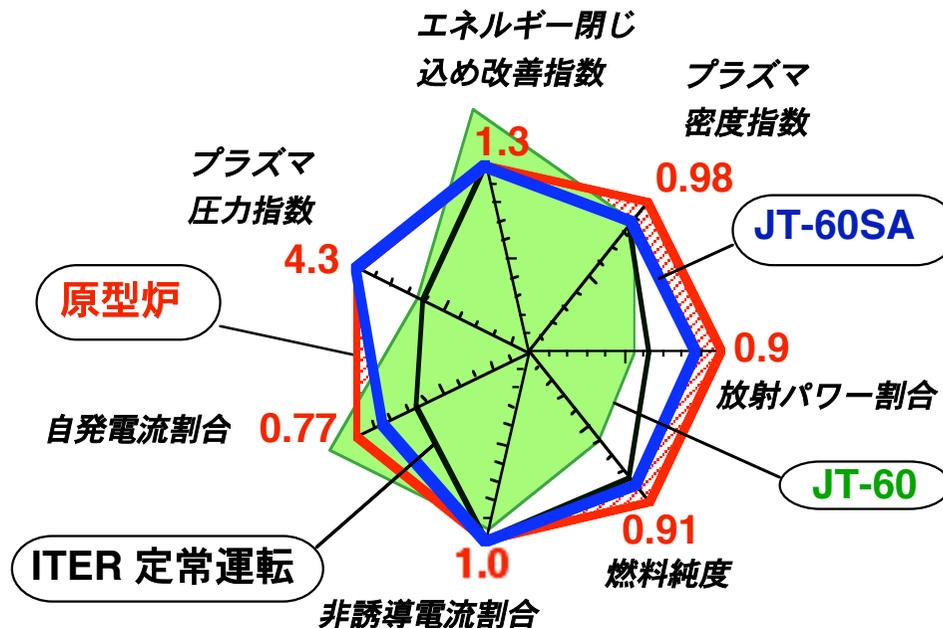
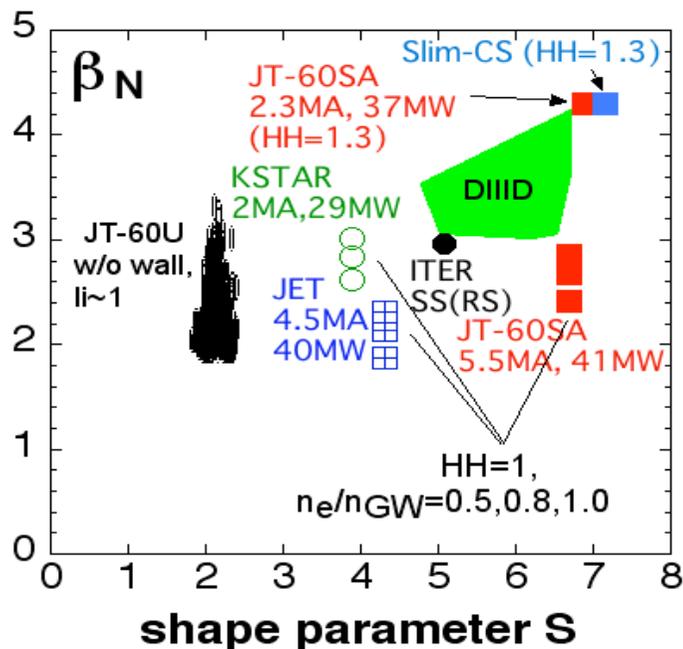
核融合炉の信頼性・安全性・経済性向上を目指した研究開発を実施するため、ITER&原型炉を見通すことができる装置規模、かつ機動性に富んだ装置として最適化。

JT-60SAの特長

- 大型超伝導装置
- 高形状ファクタープラズマ
- 高パワーで多様な加熱・電流駆動機器
- 高いプラズマ安定制御能力
- 高いダイバータ熱・粒子制御能力
- 多様な高分解能計測群



JT-60の研究思想を継承。
各研究分野をITER・原型炉領域に拡張、
その統合によって、これまで実現されていない
原型炉に必要な高い総合的プラズマ性能を定常維持する。
どこまで経済的な原型炉を構想できるかを決定。



41MWx100sの大パワー・多彩な加熱システム

世界で最も多彩な、加熱・電流駆動・運動量注入の組み合わせが可能

NB: 34MWx100s

正イオン源NB

85keV

12units x 2MW=24MW

CO接線x2u, 4MW

CTR接線x2u, 4MW

垂直x8u, 16MW

負イオン源NB

500keV, 10MW

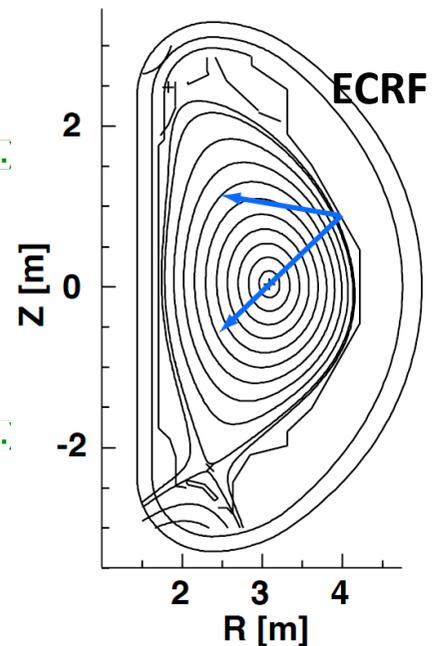
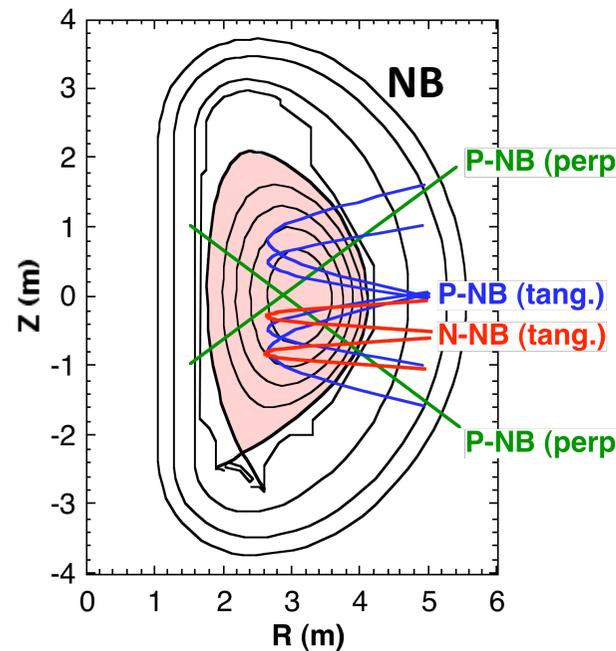
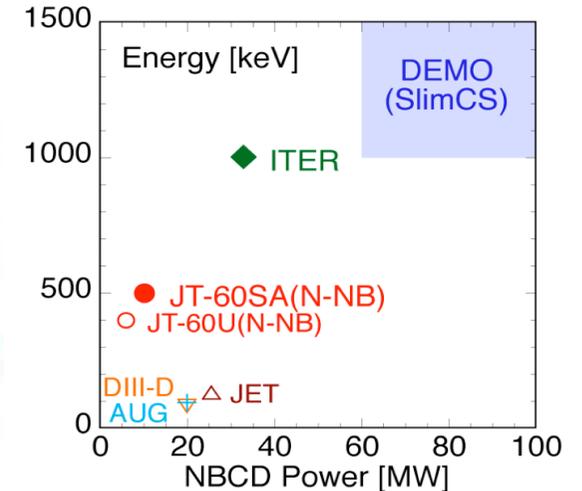
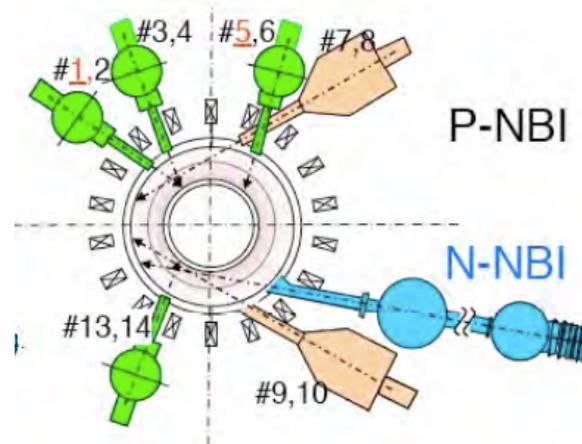
Off-axis for NBCD

ECRF: 110GHz, 7MW x 100s

9 Gyrotrons,

4 Launchers with movable mirror

>5kHz modulation



ITER & 原型炉と同等な加熱条件・スキャンが可能

JT-60SAは、以下を実施可能。

電子加熱主体、電子加熱割合のスキャン
 低中心粒子供給での高パワー加熱
 低外部トルク入射での高パワー加熱
 (回転スキャン含)

ECH (110GHz, 7MW)

N-NB (500keV, 10MW)

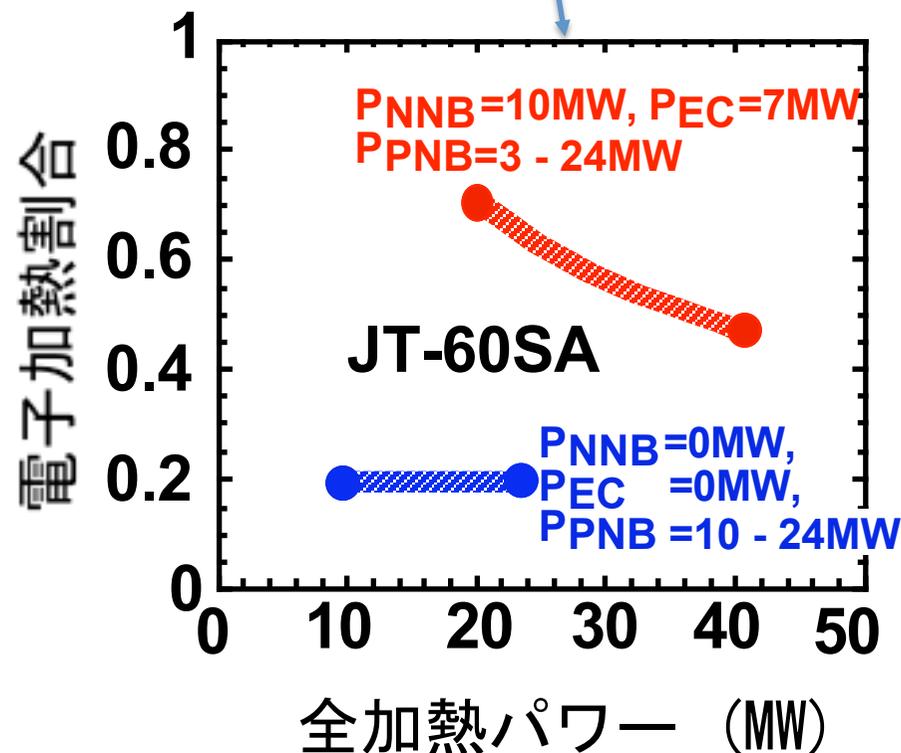
=>電子加熱主体
 低粒子補給
 低トルク入射

P-NB (85keV, 24 MW)

=>イオン加熱主体

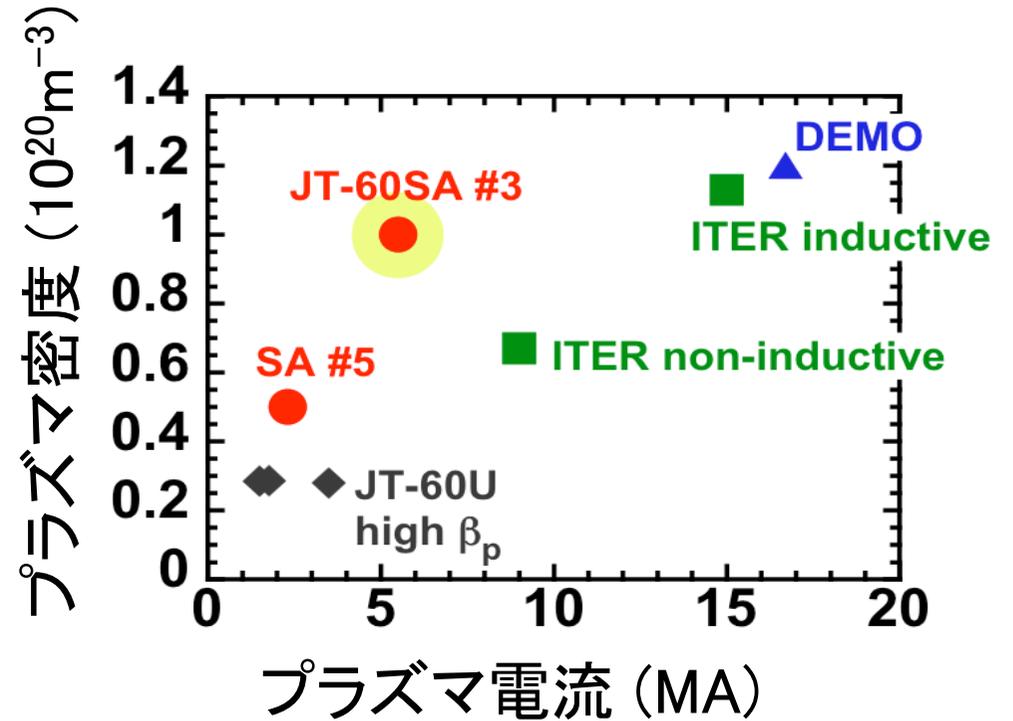
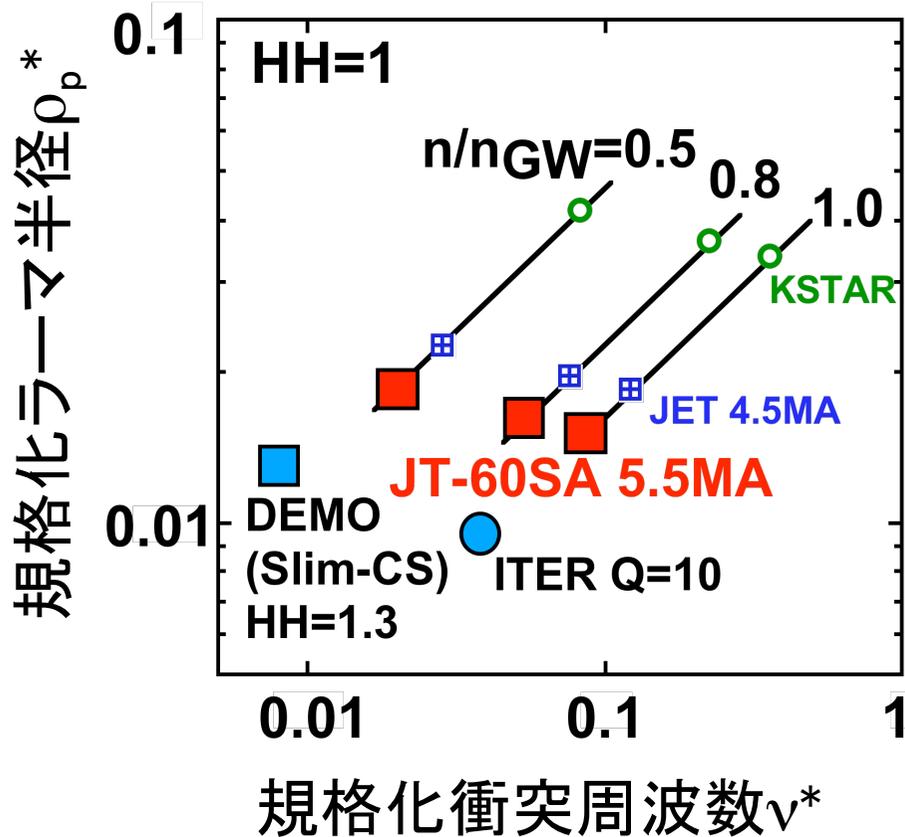
Perp-NB & balanced CO/CTR-NB

=低トルク入射
 (トルク入射スキャン)



ITER & 原型炉級の無次元量領域

JT-60SA では、
ITER&原型炉級の無次元量領域での研究を、
ITER&原型炉同様の高密度領域 ($1 \times 10^{20}/\text{m}^3$.) で実施。

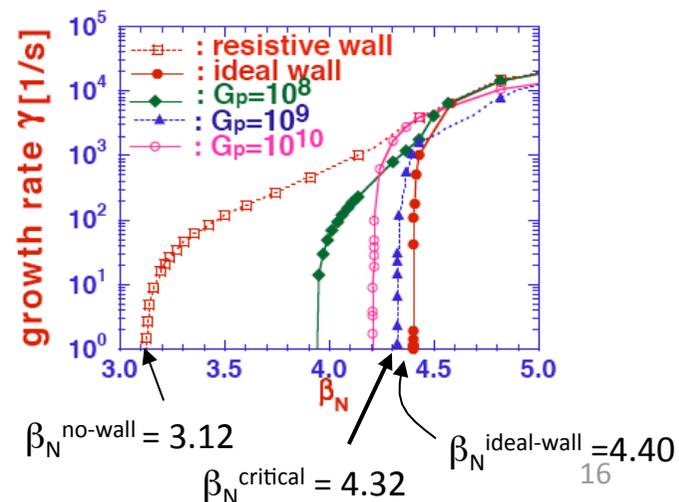
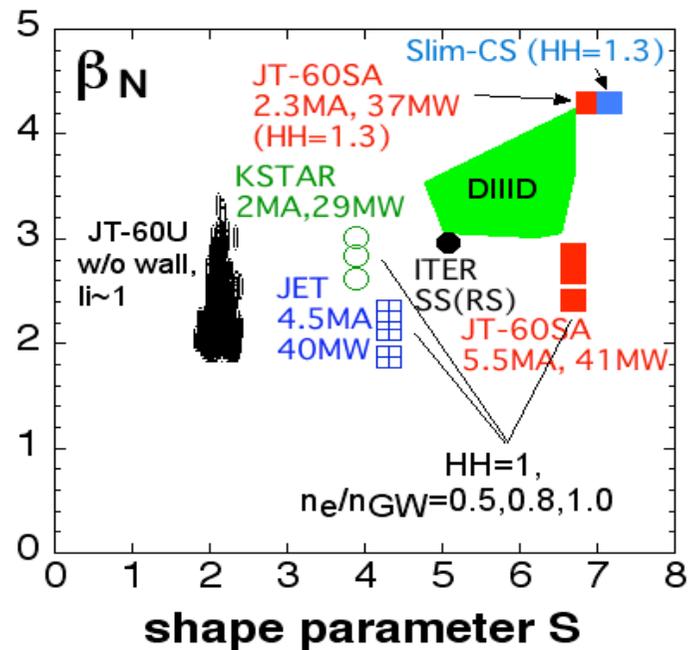
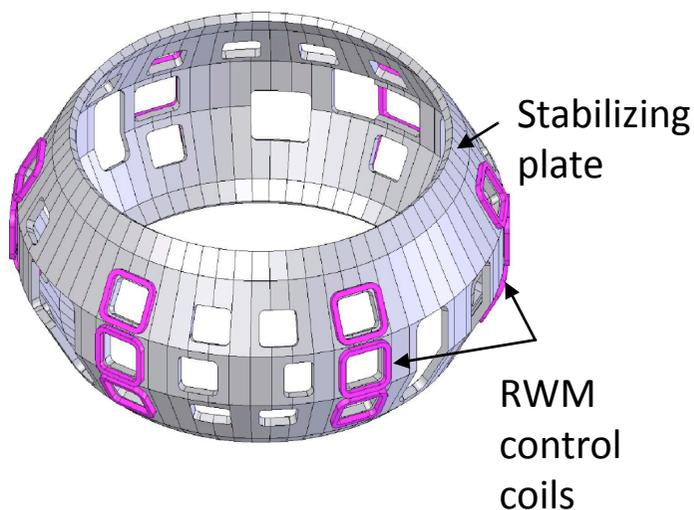
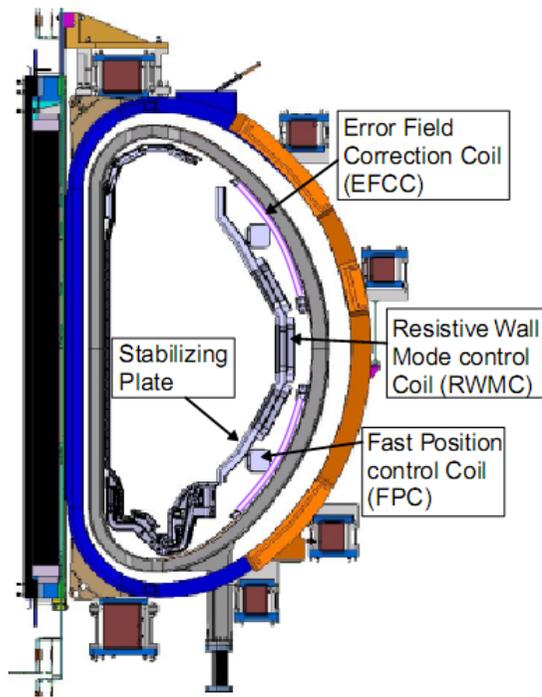


原型炉へ向けた、自由境界限界を越える高ベータ化研究と実証

高い形状ファクター(～7)、安定化板、RWM制御コイル、誤差磁場補正コイル、高パワー加熱・電流駆動・運動量入射等で、高ベータ定常化研究を推進する。

原型炉のためには、RWM安定化に必要な回転速度下限を明らかにする必要がある。

高 β_N でのディスラプション限界の同定と実時間予測・回避制御



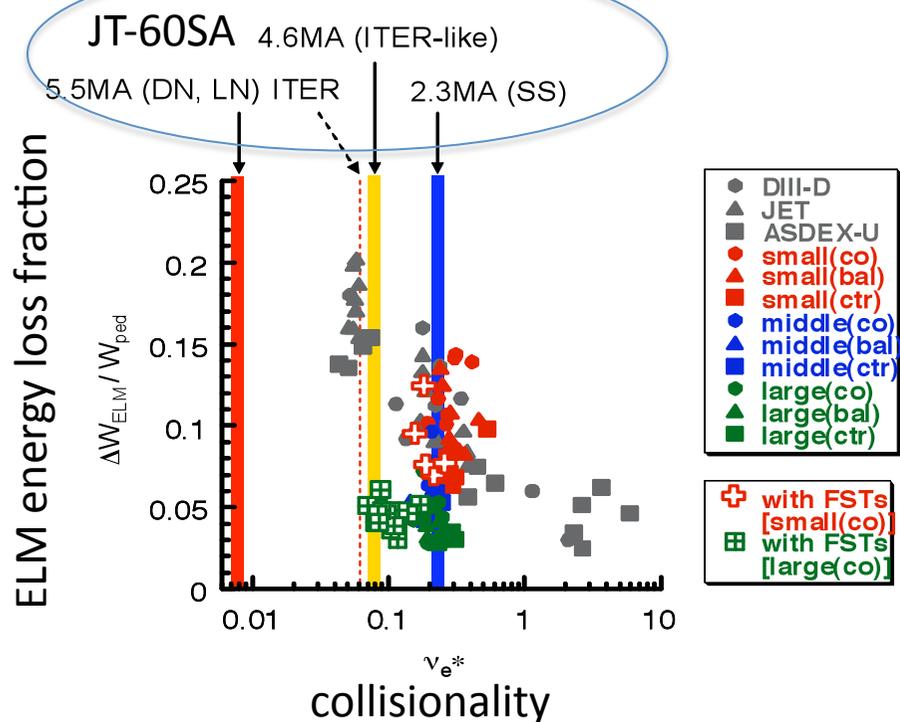
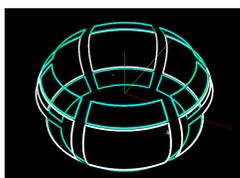
ITER & DEMO のためのELM緩和

ELM緩和：ITERの最大の課題の一つ。

JT-60SAの高Ip高加熱パワーHモード：十分低いペデスタル衝突度でType I ELMの研究が可能

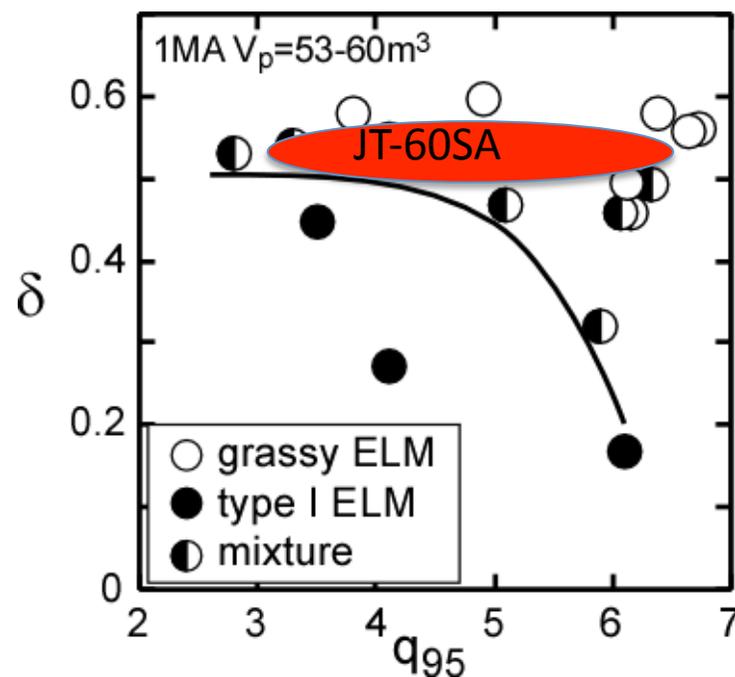
1) RMP & ペレット入射によるELM緩和 (for ITER)

誤差磁場補正／生成コイルによるRMP



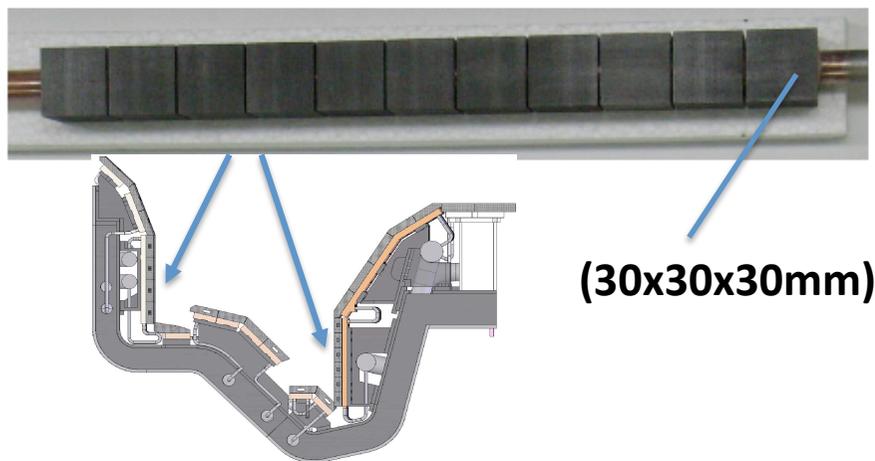
2) JT-60SAの高三角度形状(~DEMO)は小振幅ELM(JT-60で開拓したGrassy ELM等)の生成に適した選択 (for DEMO).

=> RMPを用いないELM緩和

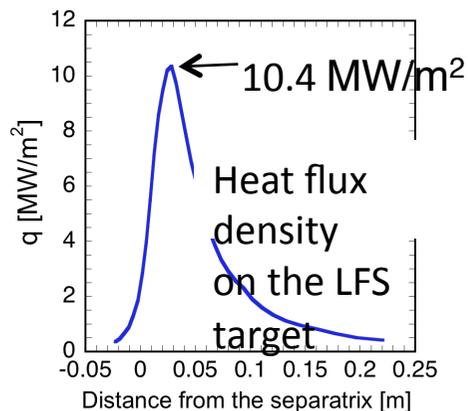
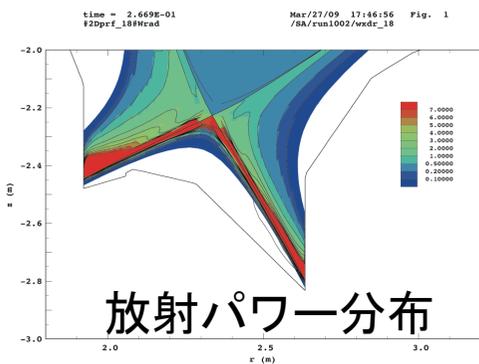


CFC モノブロックターゲットの開発

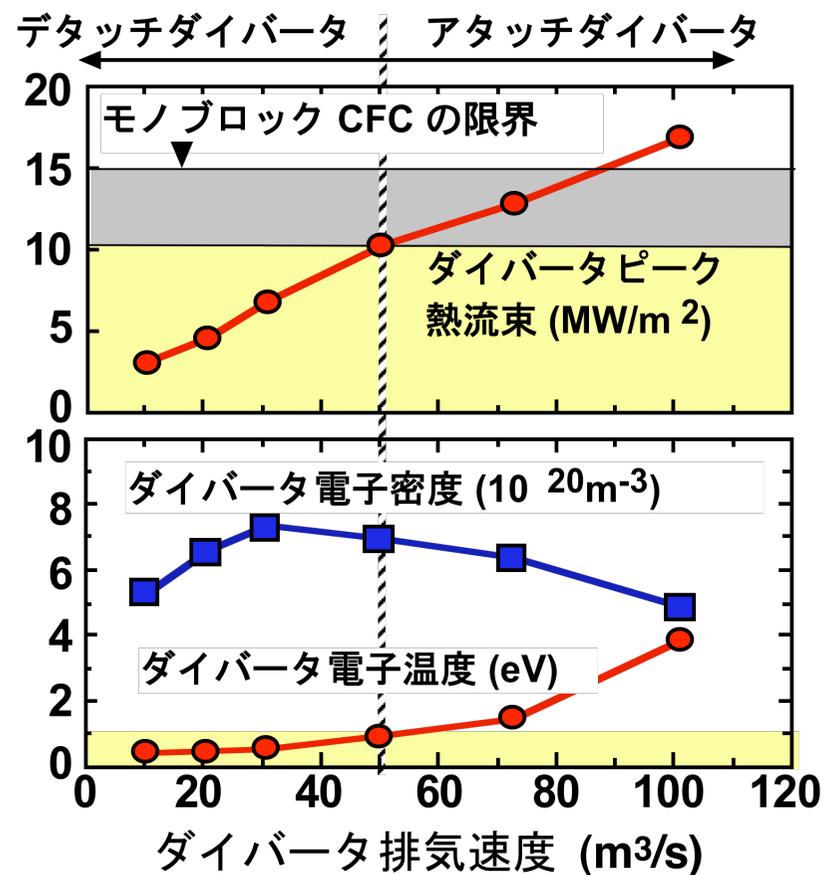
12本のフルサイズ試験体をJEBISで試験 (15MW/m²)
=> 半数が合格=> 歩留まり向上の研究中



ITER同様のW型Vコーナー付ダイバータ形状でダイバータ放射を増加し、熱流速を許容値以下に低減



8段階のダイバータ粒子排気で、ダイバータ熱流速を制御



DEMOへ向けた統合制御開発： 自律・複合プラズマシステムの理解と制御

高ベータ・高自発電流割合プラズマ
 =>強い自律性を持つ非線形システム
 コア&ペDESTAL部で電流・圧力・回転分布の強い相関
 強い空間的連関 コア-ペDESTAL-SOL-ダイバータ

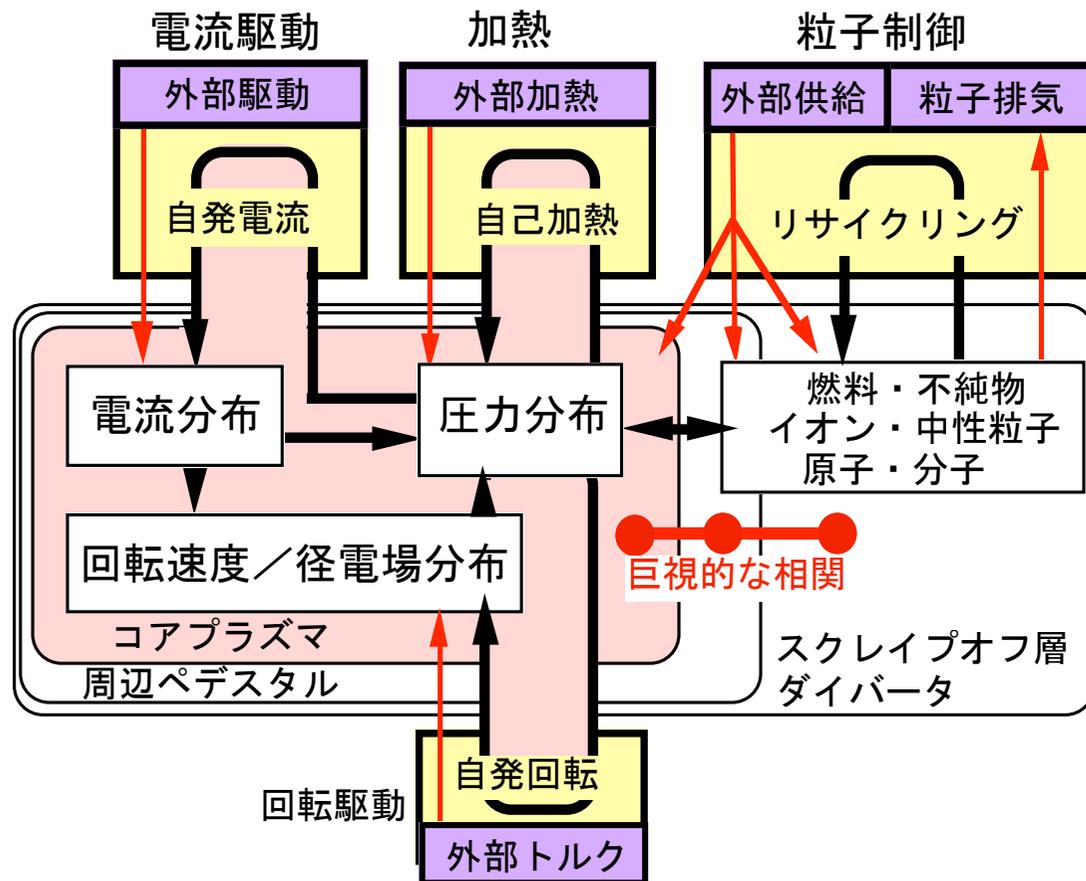


プラズマの応答と制御性の研究
 実時間予測法の開発

運転限界（特にディスラプション限界）と制御裕度



最低限必要なアクチュエータ・計測と制御ロジックの決定

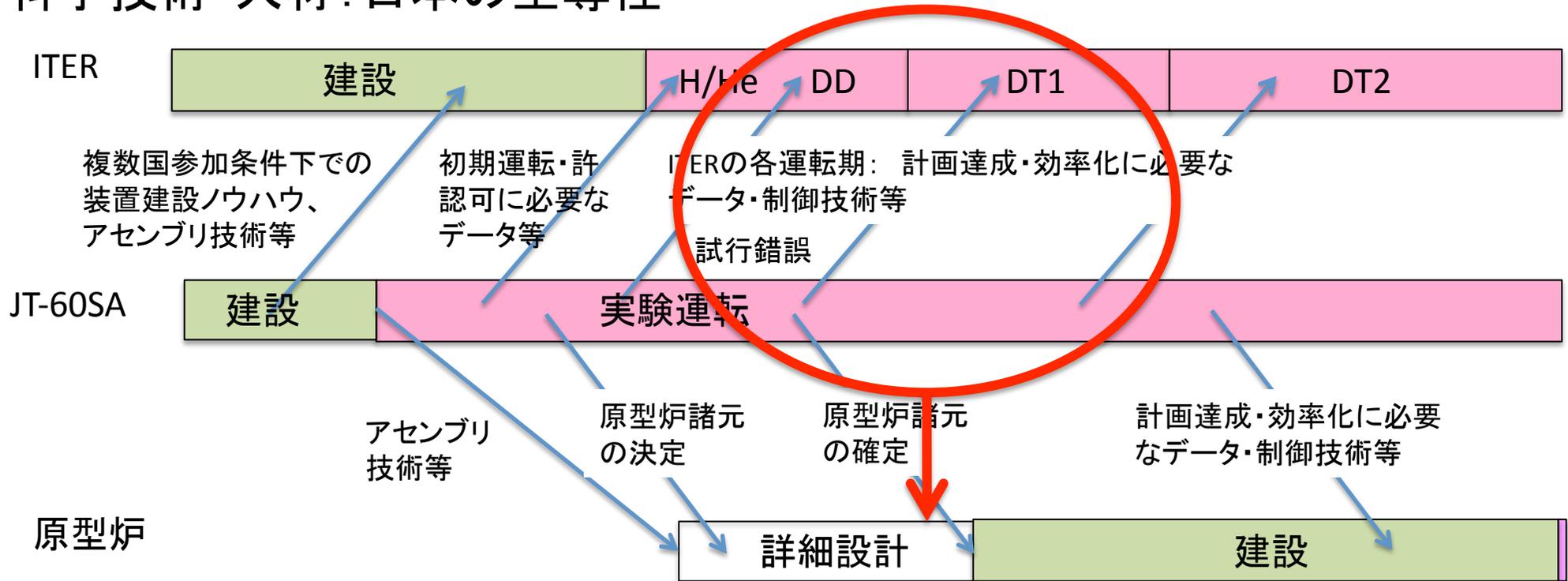


JT-60SAの研究段階と主要機器整備

	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	H	-	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	D	4E19			Perp. 13MW			33MW	
Integrated Research Phase	phase I	2-3y	D	4E20	Use	LSN full-monoblock	Tang. 7MW	7MW	37MW	41MW	
	phase II	>2y	D	1E21			DN				
Extended Research Phase		>5y	D	1.5E21						41MW	41MW x 100s

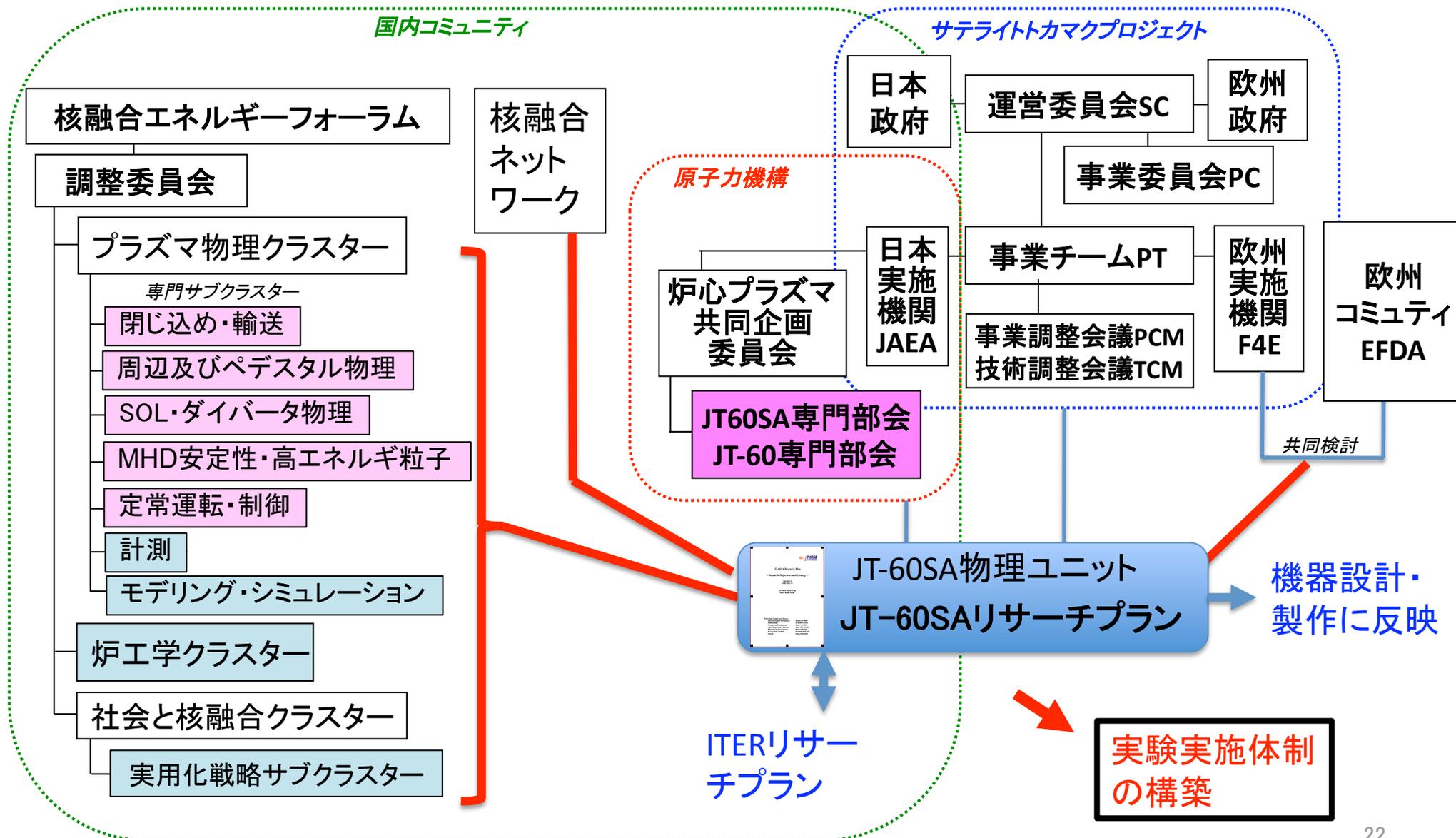
JT-60SA、ITER、原型炉

JT-60SAとITERを両輪として有機的にすすめることで高い費用対効果
 科学技術・人材：日本の主導性



課題：研究者のライフサイクルや、世界を主導して来ている日本の研究レベルの維持・向上が重要で、これを考慮した長期的計画性が必須。JT-60の停止(2008年夏)以降、JT-60SAの実験開始まで、国内にはITERや原型炉に直接貢献する装置は無い。日本の空白期間中、欧米は十分な研究環境を保持し、韓国・中国が伸長。

JT-60SAリサーチプランの検討体制



JT-60SAリサーチプラン策定の進め方

原型炉へ向け、ITERを含めた、総合的リサーチプランが重要

1. ITERに先行する実験・試験によるITERへの貢献(研究 & 研究者)
2. ITERと協力して行なう原型炉への貢献
3. ITERを補完する原型炉への貢献
4. JT-60SAの特長を活かした/JT-60SAでこそ行うことのできる研究
5. わが国のコミュニティ/研究者の育成と国際主導性の堅持・向上

=> 原型炉へ向けた
ロードマップと整合

- ・JT-60SAの各研究フェーズでの研究の進め方について、運転領域開発、MHD安定性と制御、輸送と閉じ込め、高エネルギー粒子挙動、周辺ペDESTAL、ダイバータ・SOL・プラズマ壁相互作用の主要6研究領域の詳細をJT-60SAの実験を担う若手研究者を中心に企画・提案。
- ・炉心プラズマ共同企画委員会：原型炉を見据えた課題の明確化をコメント。
- ・JT-60SA専門部会及びJT-60専門部会等で詳細な検討を行ないつつ、大学等の研究者の提案を含めて取りまとめた (Ver.2: 国内原案)。
- ・この国内原案を、より広く国内研究コミュニティで、特に若手研究者世代を中心に検討・発展させるべく、核融合エネルギーフォーラム物理クラスターからの推薦により専門研究領域毎に、原子力機構1名及び大学等1名の検討代表者を決定。
- ・上記代表者を中心に物理クラスター、工学クラスター、社会と核融合クラスター会合やJT-60SA研究計画検討会(第1回を3月2日に実施)等で策定作業を進める。さらに、核融合ネットワークからも意見を頂く。
- ・平行して欧州と議論(日欧のJT-60SA物理ユニット)(H22年～)を進める。
- ・H22年度=> Ver.3 (国内案+日欧案)

JT-60SAリサーチプラン検討のとりまとめ

分野	国内検討代表者 (フォーラム物理クラスター)		JAEA専門部会		実用化戦略サブクラスター	炉工学クラスター	核融合ネットワーク
	JAEA	大学等(H22年1月以降)	JT60SA専門部会主担当	JT60専門部会主担当	検討世話人	検討世話人	意見集約世話人
全体計画	鎌田 裕	高瀬 雄一 (東大)	高瀬 雄一 (東大)	山崎 耕造 (名大)	岡野 邦彦 (電中研)		小川 雄一 (東大)
運転領域開発	鈴木 隆博	長崎 百伸 (京大)	岡野 邦彦 (電中研)	長崎 百伸 (京大)			
MHD安定性と制御	松永 剛	古川 勝 (東大)	飯尾 俊二 (東工大)	山崎 耕造 (名大)			
輸送と閉じ込め	吉田 麻衣子	田中 謙治 (NIFS)	花田 和明 (九大)	稲垣 滋 (九大)			
高エネルギー粒子挙動	篠原 孝司	長壁 正樹 (NIFS)	竹入 康彦 (NIFS)	東井 和夫 (NIFS)			
ペDESTアル及び 周辺プラズマ特性	浦野 創	森崎 友宏 (NIFS)	福田 武司 (阪大)	北島 純男 (東北大)			
ダイバータ、SOL、プラズマ・材料相互作用	仲野 友英	坂本 瑞樹 (九大)	増崎 貴 (NIFS)	大野 哲靖 (名大)			
炉工学	櫻井真治						
		欧州側とりまとめ: カール・ラックナー					

3月2日: 第1回JT-60SA研究計画検討会

まとめ

- 日本調達機器の設計・製作は計画通り順調
- 欧州調達機器の設計は大きく進展(クエンチ保護回路、クライオスタットベース、高温超伝導電流リードのPA締結)
- JT-60解体に向けた作業を開始
- JT-60SAリサーチプランの国内議論を推進
 - => 核融合エネルギーフォーラム各クラスター等で検討
 - => 日欧で議論