

JT-60とトカマク国内重点化装置計画について

平成 15年 9月 19日

日本原子力研究所 菊池 満

科学技術・学術審議会核融合研究ワーキンググループ報告 (平成15年1月8日：末松安晴座長)

○重点化計画評価の条件：

- ・ ITERが建設されることを前提として国内研究基盤の整備・推進を図ること
- ・ 今後30年程度で核融合原型炉を実現するための課題の解決に必要な研究計画を策定すること

○結果：

- ・ トカマク、炉工学、レーザー、ヘリカル（LHD）を重点化の柱。

○重点化の具体的計画：

- ・ トカマク国内重点化装置計画、核融合材料試験装置計画、レーザー高速点火計画、大型ヘリカル装置計画

トカマク国内重点化装置計画

○計画の必要性：

核融合エネルギーの早期実現に向けて、トカマク方式の改良（高ベータ定常運転の実現による経済性向上等）を我が国独自に進めるとともに、ITER計画での主導権の確保と、数百名規模での人材養成によるITER計画との有機的連携を図るために、国内のトカマク装置を重点化することが必要である。

○装置の概要：

本装置は、臨界プラズマクラスのパラマ性能をもった超伝導装置とし、パラマアスペクト比、断面形状制御性、帰還制御性において、機動性と自由度を最大限確保できるものとし、原型炉で必要な高ベータ（ $\beta_N=3.5-5.5$ ）非誘導電流駆動パラマを、100秒程度以上保持することを目指すものである。

トカマク国内重点化装置計画

○計画の推進：

JT-60及びそれに続くトカマク国内重点化装置を共同研究重点化装置として位置付け、設置主体である日本原子力研究所／新法人と研究者コミュニティが研究計画を共同企画・立案しつつ実施すること。

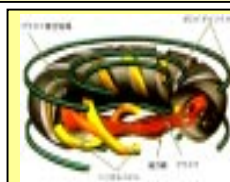
JT-60をトカマク国内重点化装置の建設開始まで運転を継続し共同研究を推進するとともに、ITERの動向を踏まえつつトカマク国内重点化装置への転換を図る必要がある事。

共同企画・共同研究の運用体制を早期に確立する事。

○計画の必要性

ITERと有機的に連携した国際競争力のある国内体制の構築

- ① 経済性／環境適合性改善に向けた研究開発
- ② ITERへの科学的知見の提供（国際トカマク物理活動）
- ③ ITERでの研究をリードする人材の育成



ステラレータ
コミュニティ

ITER

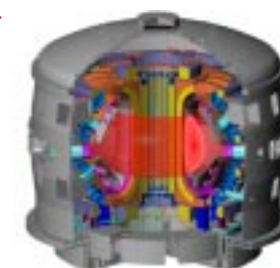
燃焼制御の実証

核融合エネルギーの早期実現
(出力200-300万kW)

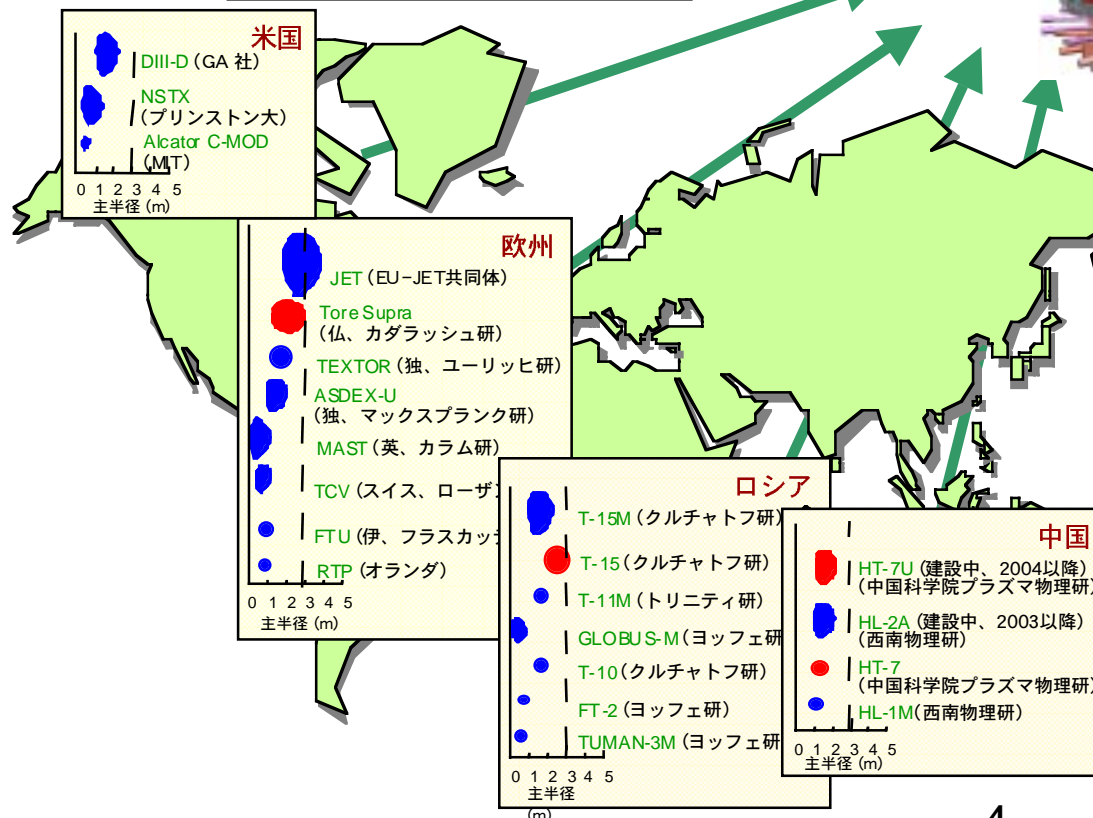


科学的・工学的
知見の提供

経済性改善



トカマク国内重点化装置



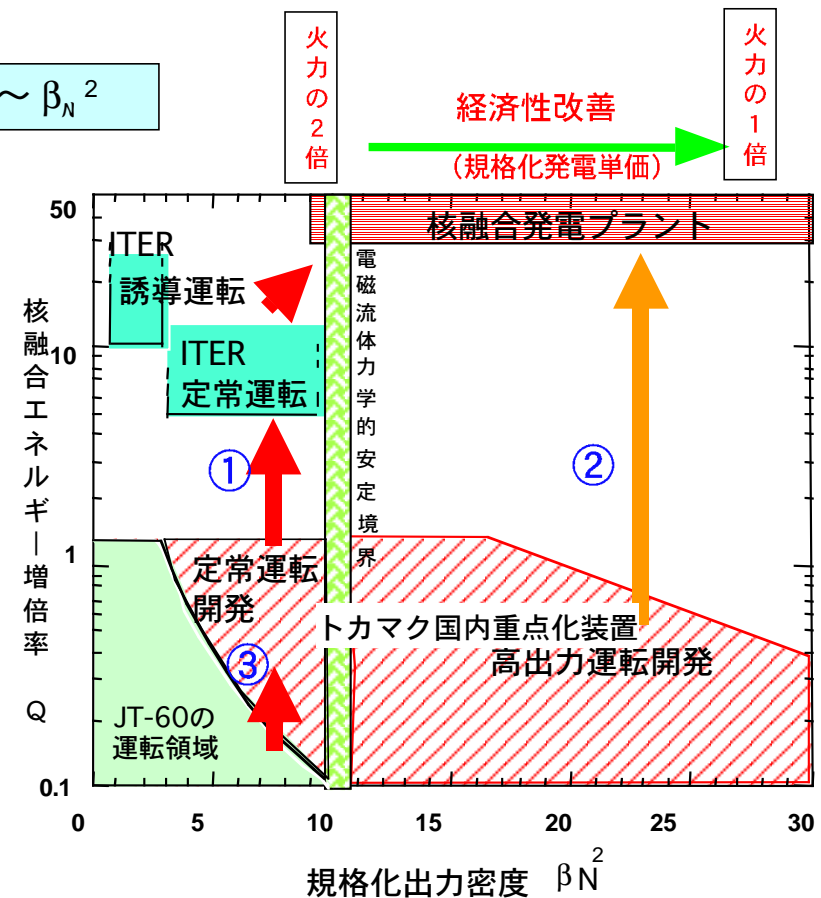
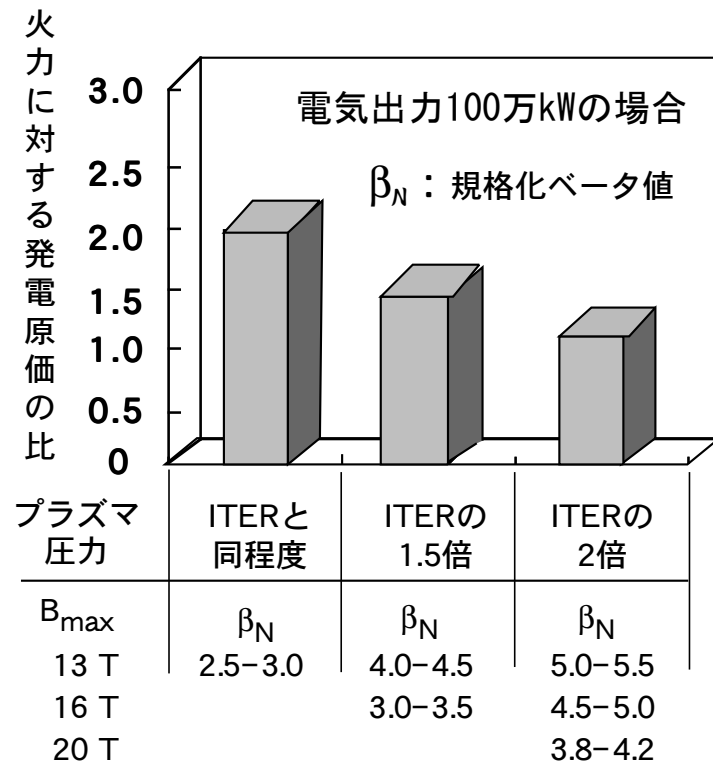
① 核融合エネルギーの経済性改善に向けた研究開発

ITER計画懇談会報告書「失敗と成功のカテゴリー」

(2) 技術的には完成するが、競争力がなく実用化しない。

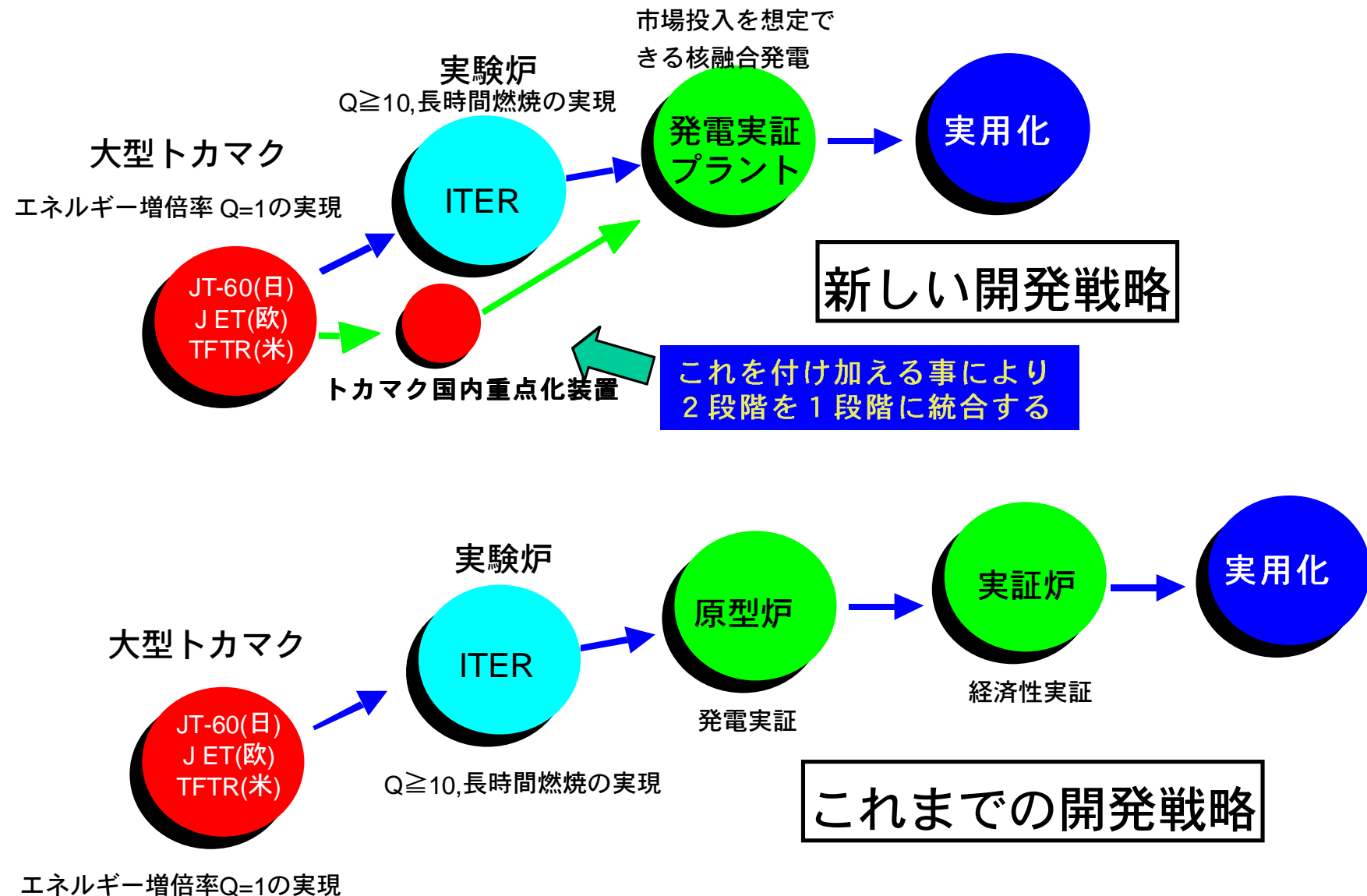
に対する対処が必要で、炉の出力密度を上げ経済性を改善する研究が重要。

出力密度を増やせば発電単価は下がる。出力密度 $\sim(\text{圧力})^2 \sim \beta_N^2$



トカマク国内重点化装置計画がもたらす核融合早期実現効果

－ 経済性改善の主要課題の解決がもたらすもの －

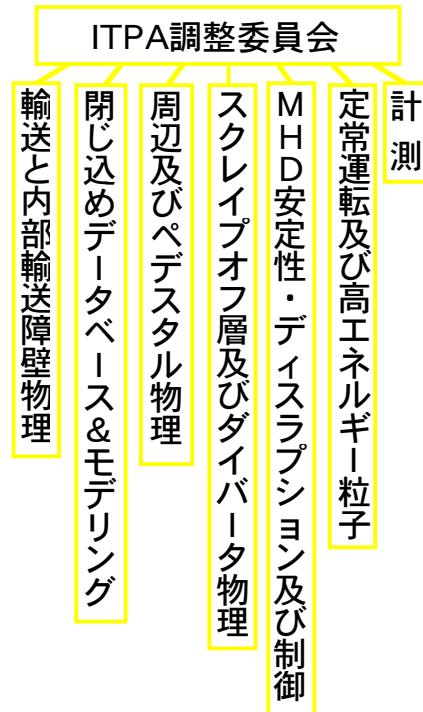


② ITERへの科学的知見の提供（国際トカマク物理活動）

国際トカマク物理活動（ITPA : International Tokamak Physics Activity）

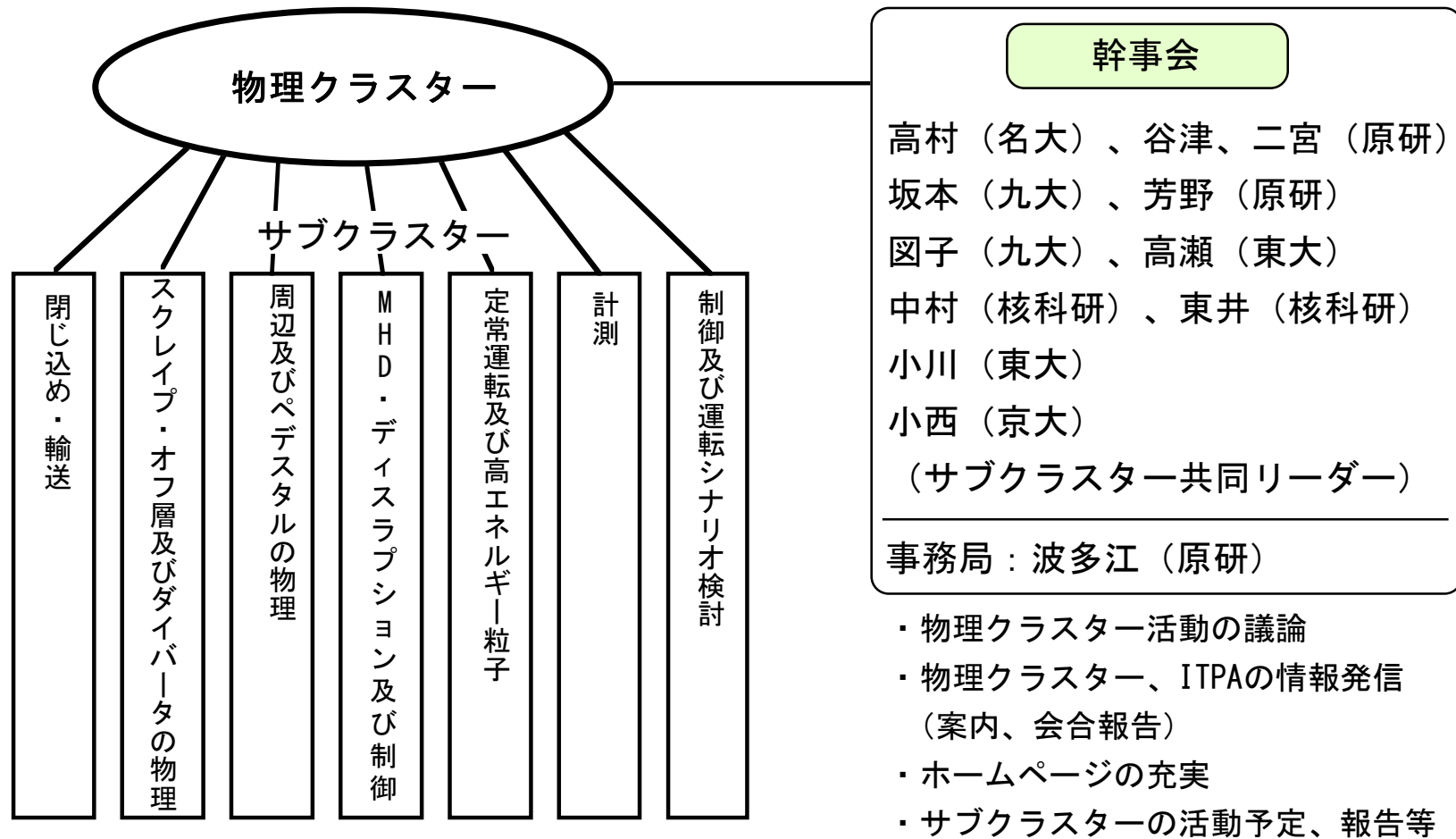
- ITER工学設計活動に貢献したITER物理R&D活動を継承し2001年7月より活動を開始
- IAEA国際核融合研究委員会（IFRC）の支持の下、日、米、欧、露で活動。中国も参加。
- 調整委員会と7つのトピカルグループで構成

ITERの運転裕度を高め、技術目標を確実に達成するために、各国のトカマク装置に対して、物理研究が要請される。



名 称	EU 側委員	日本側委員 (アイツ順)	ロシア側委員	米国側委員	ITERからのEU, 日本、ロシア 委員	ステラレータ コミュニティ からの委員
調整委員会	D. Campbell* F. Romanelli H. Zohm	高村秀一（名大） 東井和夫（核科研） 二宮博正（原研）	N. Ivanov S. Konovalov S. Mirnov	E. Oktay N. Sauthoff R. Stambaugh	下村安夫 嶋田道也**	
輸送及び 内部障壁の物理	J. Connor X. Litaudon B. Unterberg	東井和夫（核科研） 福田武司（阪大） 福山 淳（京大） 藤田隆明（原研）	Y. Esipchuk N. Kirneva S. Lebedev V. Vershkov	E. Doyle* P. Gohil J. Kinsey J. Rice E. Synakowski	V. Mukhovatov**	D. Mikkelsen
閉じ込めデータ ベースと モデリング	J. Cordey X. Garbet F. Rytter	小川雄一（東大） 滝塚知典（原研） 三浦幸俊（原研） 矢木雅敏（九大）	A. Chudnovskiy Yu. Dnestrovskij V. Leonov	W. Houlberg* J. Deboo S. Kaye M. Murakami J. Snipes	A. Polevoi**	C. Hidalgo
周辺及び ペDESTALの物理	L. Horton H. Wilson G. Saibene	居田克巳（核科研） 鎌田 裕*（原研） 波多江仰紀（原研） 谷津 潔（筑波大）	M. Osipenko R. Shurygin	T. Osborne ** J. Drake A. Hubbard T. Rognlien M. Wade	杉原正芳	小森彰夫 （核科研）
スクレイプ・ オフ層及び ダイバータの物理	A. Loarte Ph. Ghendrih A. Kallenbach G. Matthews V. Philipps	朝倉伸幸*（原研） 加藤隆子（核科研） 高村秀一（名大） 田辺哲朗（名大） 東島 智（原研）	V. Kurnaev G. Kirnev	S. Krashenninnikov B. Lipschultz** D. Whyte G. Porter P. Stangeby	A. Kukushkin	K. McCormick
MHD、ディスラプ ション及び制御	O. Gruber* T. Hender J. Lister	飯尾俊二（東工大） 小関隆久（原研） 小野 靖（東大） 河野康則（原研） 中島徳嘉（核科研）	N. Ivanov V. Lukash S. Mirnov V. Pustovitov	T. Strait R. Granetz C. Hegna S. Jardin J. Wesley	Y. Gribov** 杉原正芳	E. Lazarus
定常運転及び 高エネルギー粒子	A. Bécoulet C. Gormezano* A. Jaun	井手俊介**（原研） 高瀬雄一（東大） 飛田健次（原研） 花田和明（九大） 福山 淳（京大）	S. Konovalov V. Kulygin K. Rasumova V. Vdovin A. Zvonkov	C. Phillips P. Bonoli B. Breizman R. Nazikian R. Prater		中村幸男 （核科研）
計測	A. Donné* F. Orsitto R. Pitts F. Serra	草間義紀（原研） 河野康則（原研） 川端一男（核科研） 笹尾真美子（東北大）	A. Kisliakov A. Krasilnikov V. Strelkov K. Vukolov V. Zaveriaev	D. Johnson R. Boivin G. Wurden G. McKee T. Peebles	A. Costley** 杉江達夫	H.J. Hartfuss

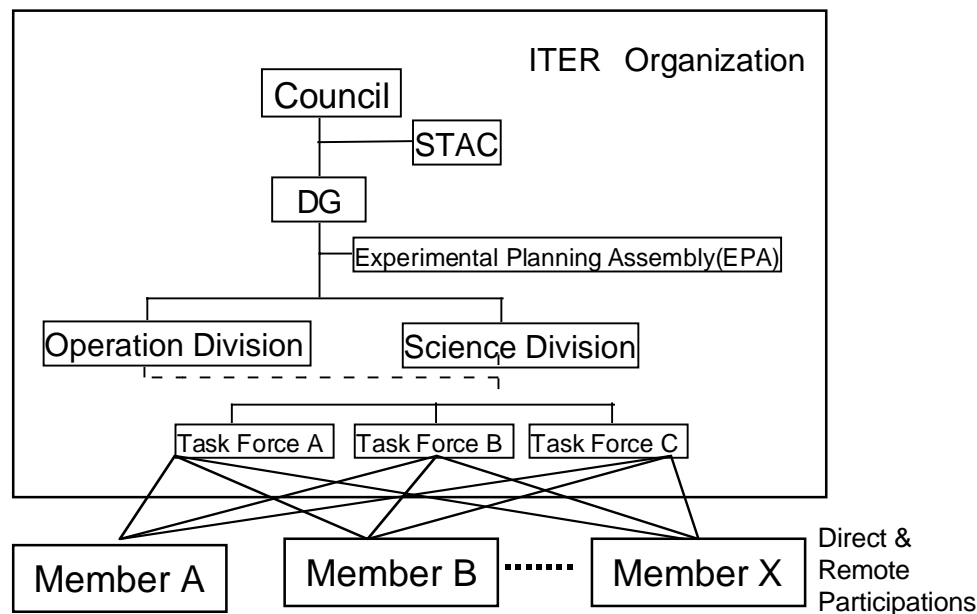
核融合フォーラム物理クラスターの構成



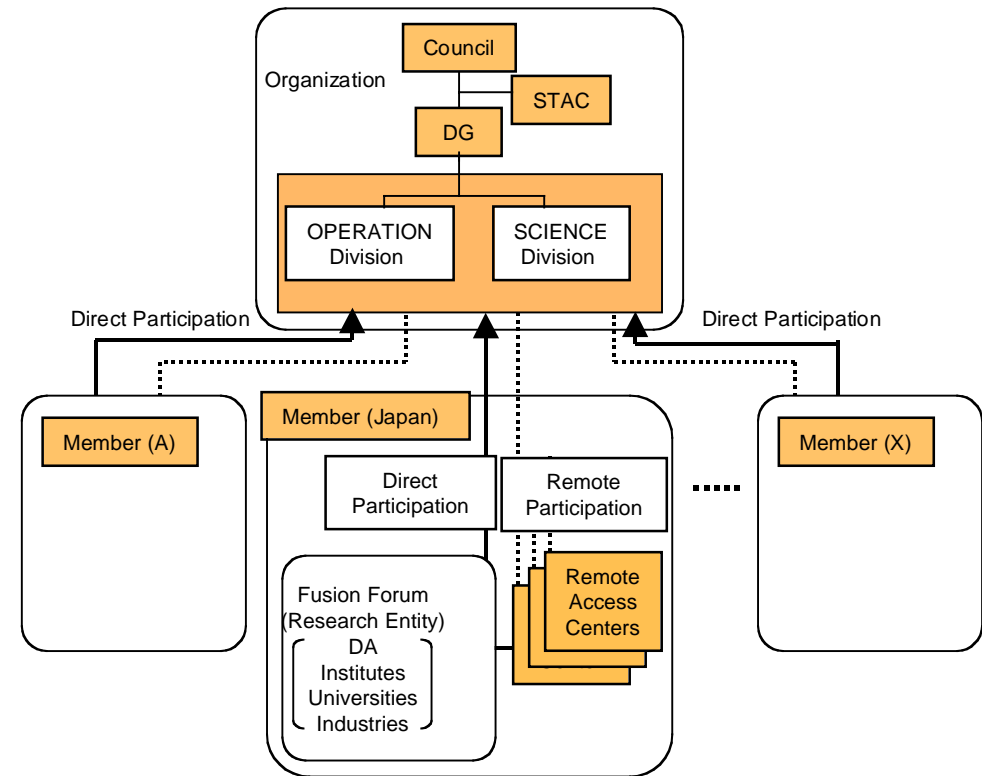
③ ITERでの研究をリードする人材の育成 (機構職員、客員研究員、遠隔研究参加者)

1. 世界のトカマク研究者と競争してITERでのリーダーシップを取れる世界的研究者の育成。
2. 世界中から集まってくるITERの運転員と協調してITERの運転をリードできる技術者の育成。
3. 世界中のトカマクで開発されたトカマク解析コード、理論計算と競争できる基盤。

1.~3.を国内の研究基盤（トカマク国内重点化装置計画）で養成し、ITER計画への参加を必要がある。



タスクフォース制による研究実施形態の検討例



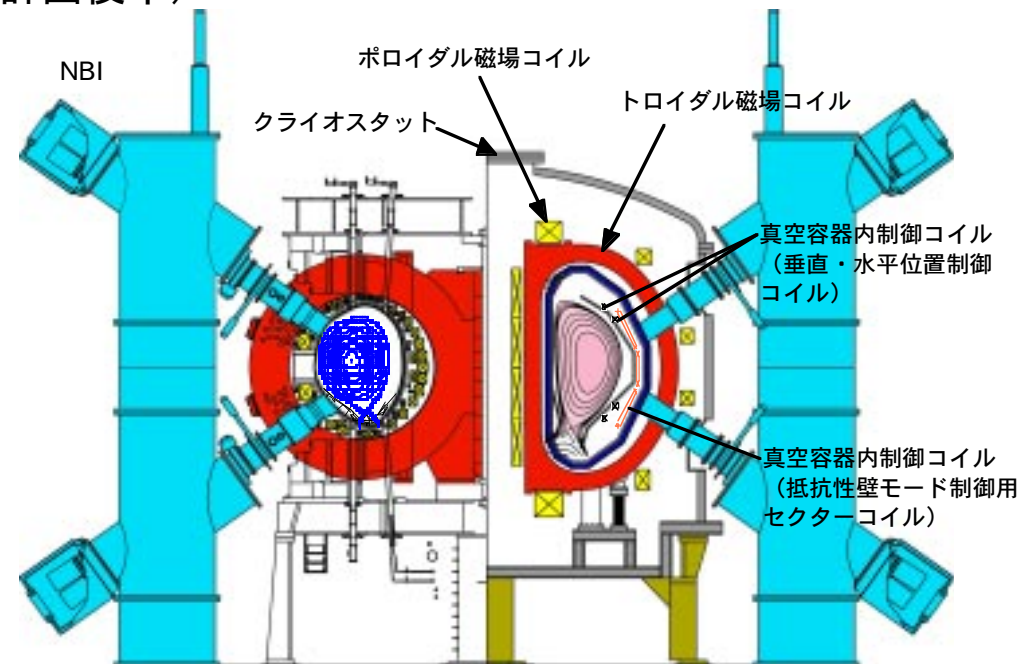
タスクフォース制による研究実施形態の検討例

○ 装置の概要

- ① 臨界プラズマクラス（無衝突プラズマ領域）のプラズマ性能をもった超伝導装置
- ② 原型炉に必要な高ベータ（ $\beta_N=3.5-5.5$ ）非誘導電流駆動プラズマを、100秒程度以上保持
- ③ 機動性と自由度の確保（プラズマアスペクト比（例： $2.6 \leq A < 4$ ）、断面形状制御性（例： $4 < S(\text{形状因子}) \leq 6$ ）、帰還制御性（容器内制御コイル）、多様な分布制御性）
- ④ 超長時間（8時間程度）定常運転の実現（計画後半）

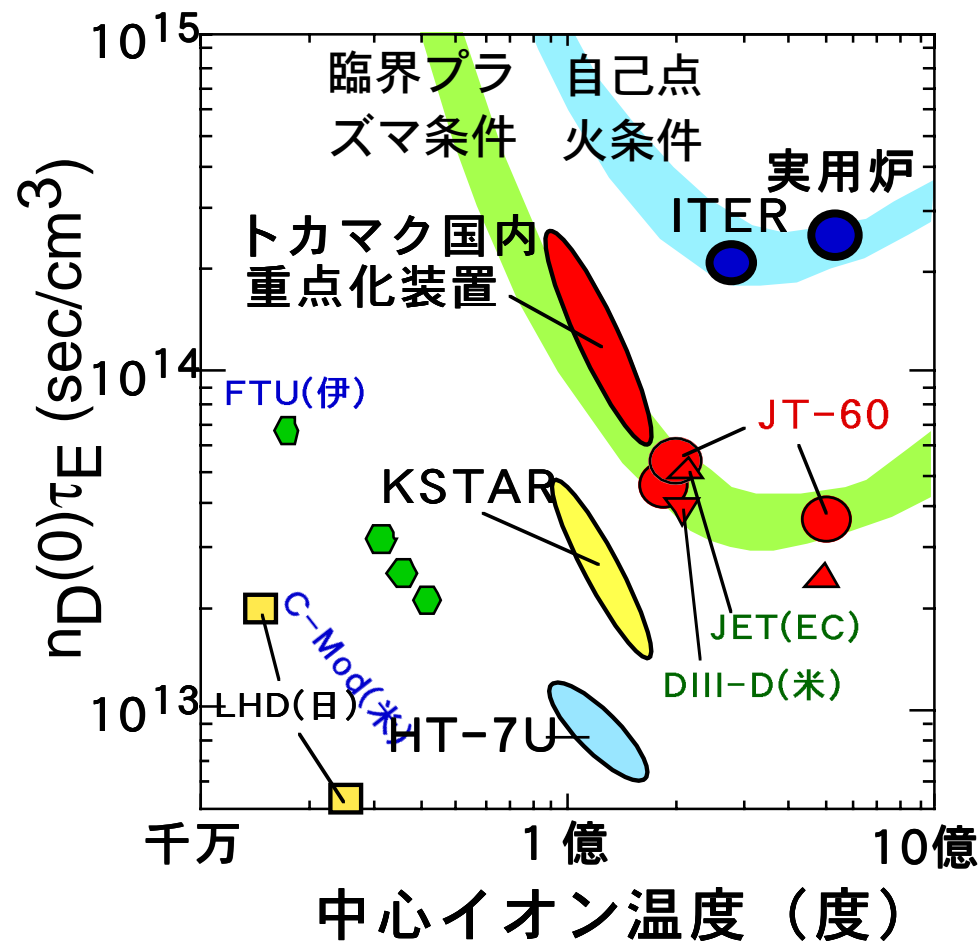
パラメータ	JT-60(現在)	トカマク国内重点化装置*
電流維持時間	15 秒 (全放電時間)	約100 秒 (フラットトップ時間)
最大加熱・ 電流駆動入力	40 MW (10秒)	44 MW (10秒) 14.7 MW (100秒)
プラズマ電流	3 MA	4 MA
トロイダル磁場	4 T	3.7 T
主半径 (Rp)	3.4 m	2.9 m
小半径 (ap)	0.9 m	0.9 m
非円形度 (k_{95})	1.8 ($\delta_{95}=0.06$)	1.8
三角度 (d_{95})	0.4 ($k_{95}=1.33$)	0.4
規格化 β	≤ 3	3.5 - 5.5

*暫定値

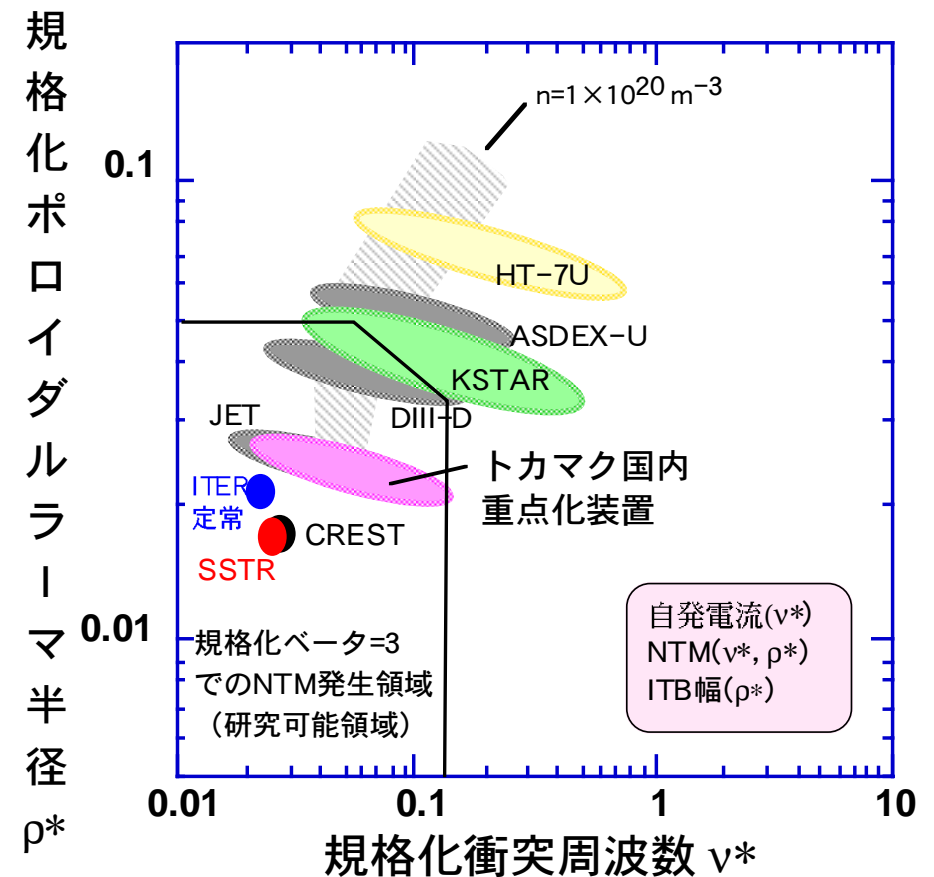


① 臨界プラズマ条件クラス & 無衝突・小規格化ラーマ半径領域

臨界プラズマ条件クラス



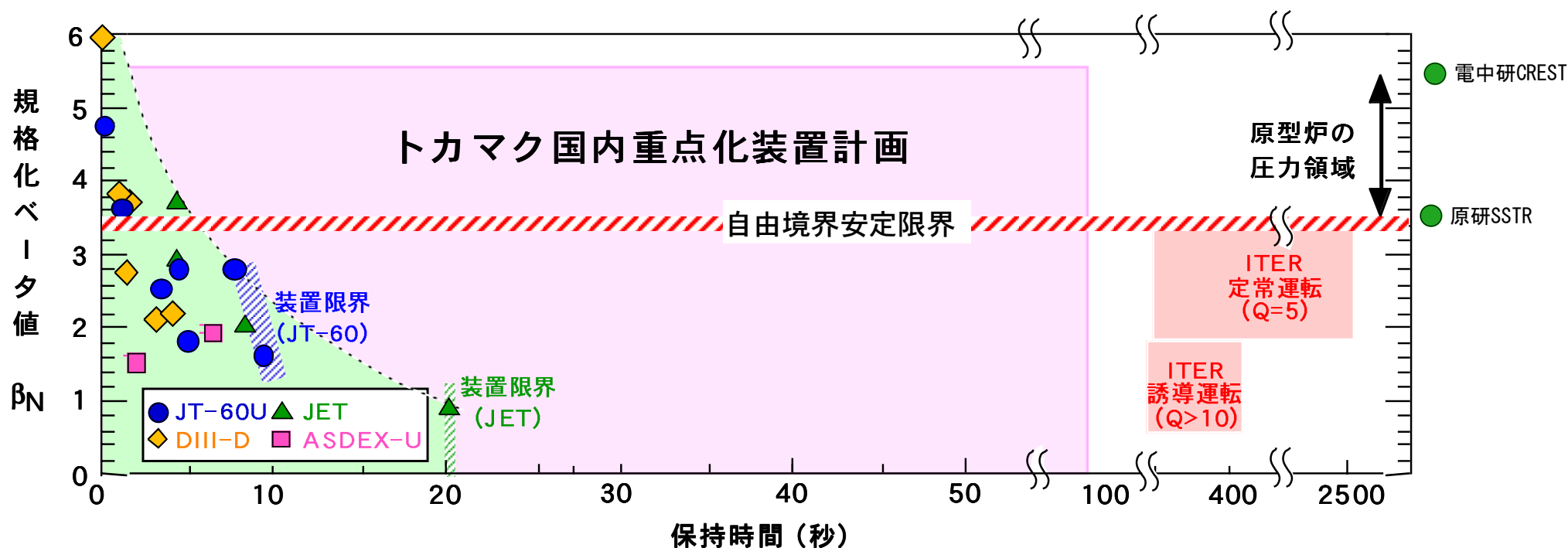
無衝突・小規格化ラーマ半径領域



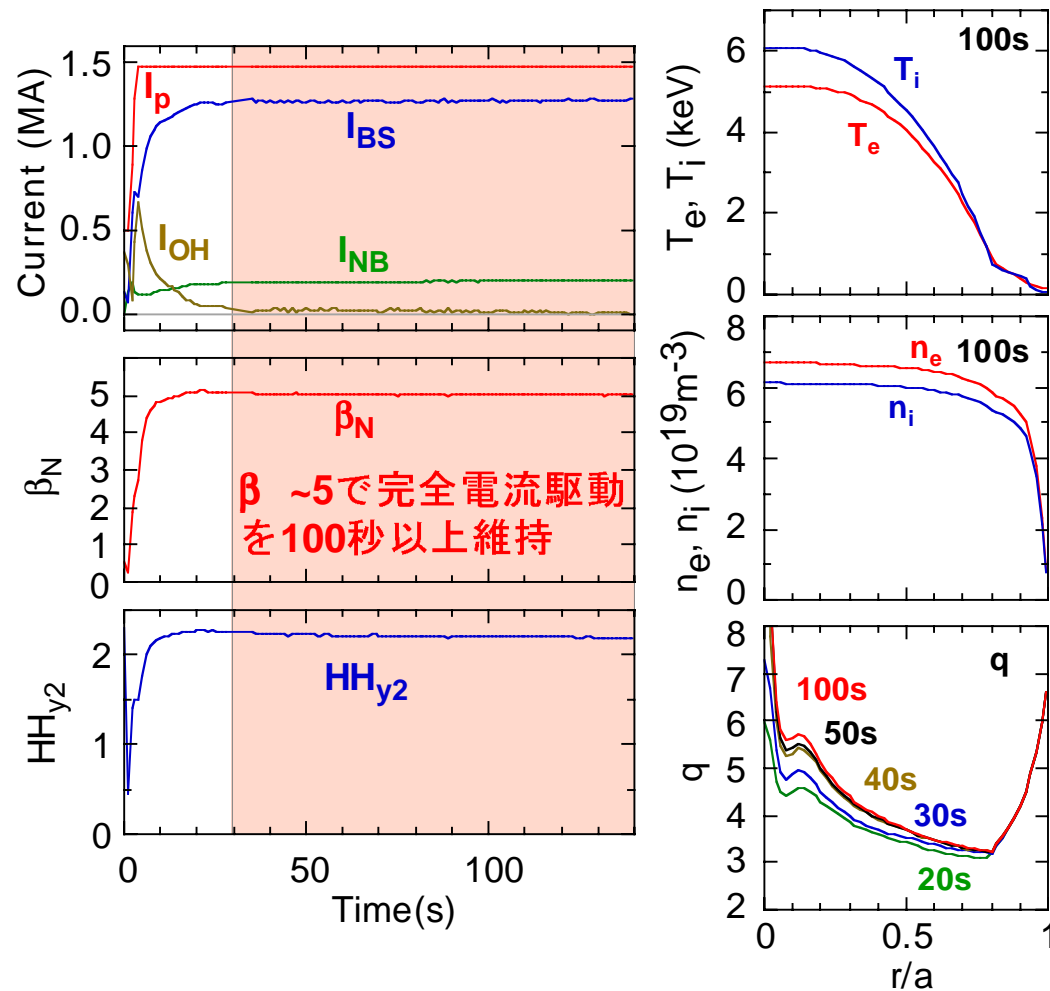
② 高ベータ ($\beta_N=3.5-5.5$) 非誘導電流駆動プラズマ保持

具体的な研究課題

- ・ 断面形状(縦長、三角度)の制御と最適化 (安定領域の拡張)
- ・ 局所的な電流分布制御 (新古典テアリングモードの抑制)
- ・ 導体壁による安定化/安定化制御コイル (抵抗性壁モードの抑制)



高ベータ定常運転シナリオの検討・評価



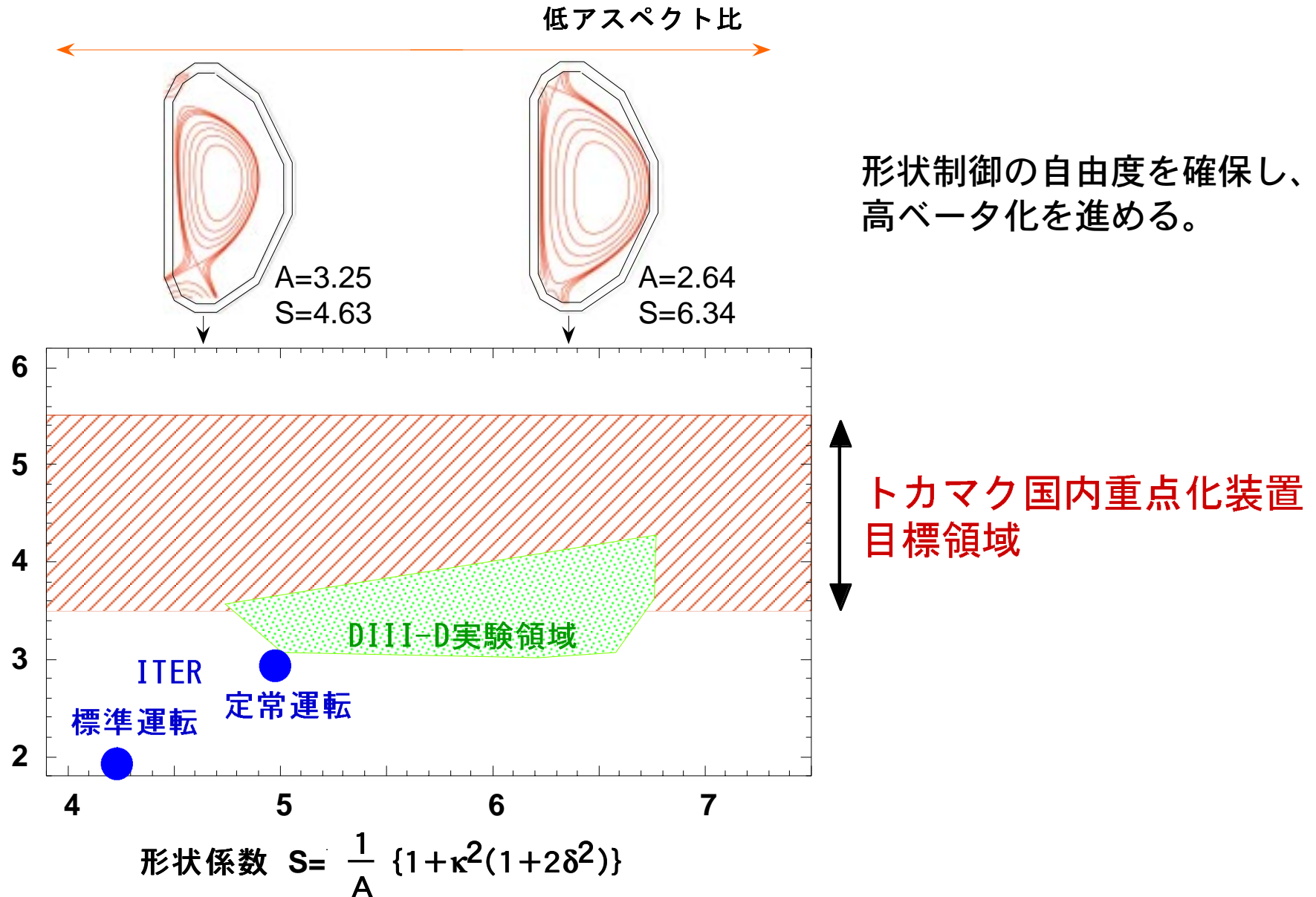
高ベータ定常運転シナリオを非定常輸送解析 (TOPICS) により検討

- $B_T=2$ T
- $I_p=1.5$ MA
- $P_{NB}=11$ MW

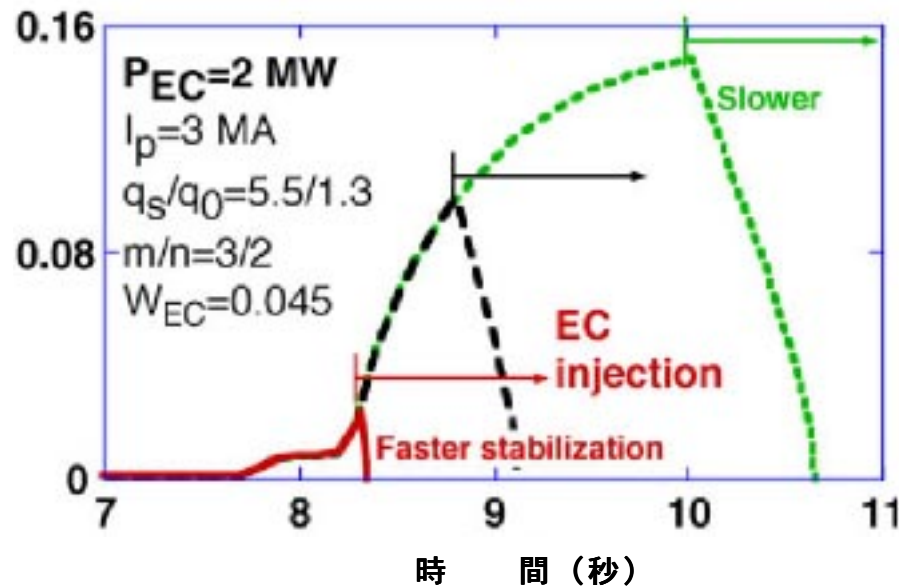
解析結果

- $\beta_N \sim 5$ ($HH_{y2} \sim 2.2$)
- 完全非誘導電流駆動 (自発電流割合 85%)
- 100秒以上維持

③-1 断面形状(縦長、三角度)の制御と最適化 (安定領域の拡張)

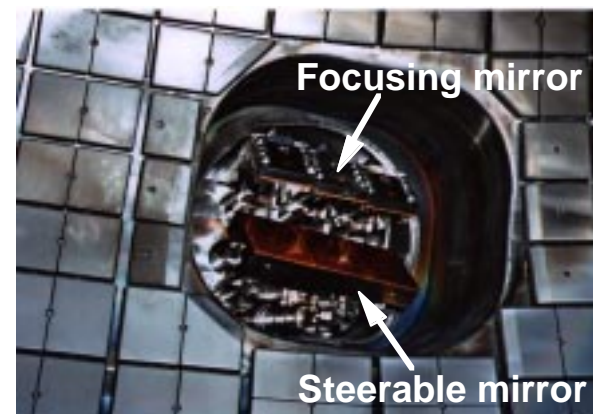


③-2 局所的な電流分布制御（新古典テアリングモードの抑制）



TOPICSとECCDの結合コードにより
解析されたNTM安定化の時間発展

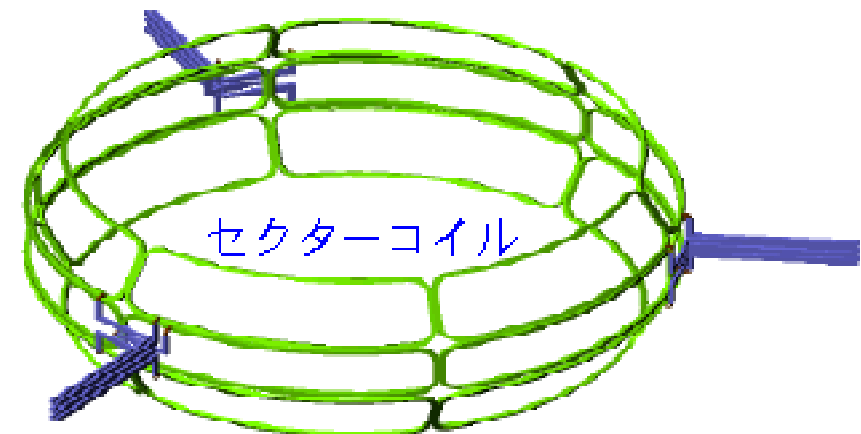
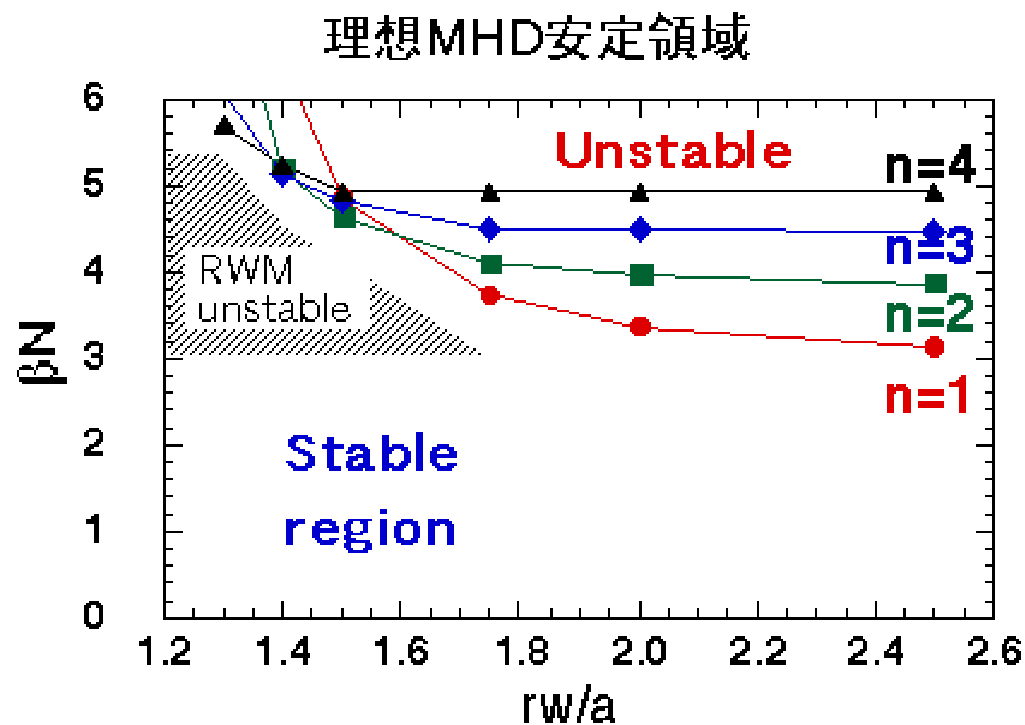
プラズマ高ベータ化の阻害要因
である NTM を、発生 of 初期段階
に ECCD を用いて安定化する。



- ・ 可動ミラー
- ・ ECE等による初期磁気島の検出

③-3 抵抗性壁モードの抑制（内部安定化制御コイル）

真空容器内に設置したセクターコイルを用いたフィードバック制御により $n=1,2$ のRWMを安定化する。



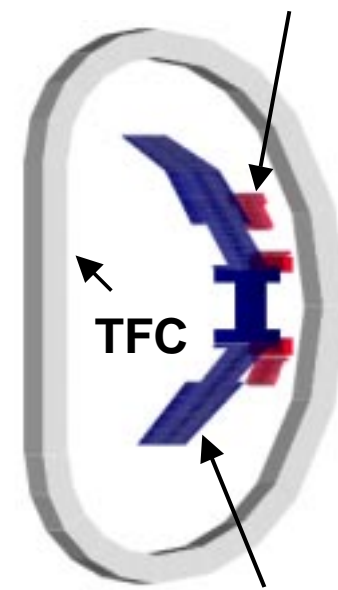
完全導体壁による安定化効果

低放射化フェライト鋼によるトロイダル磁場リップル 補正と高速イオン損失の抑制

トロイダル磁場リップル（18対称成分）

	Ferritic Steel		
評価点	無し	バッフル板	+補正用Fe鋼
赤道面	0.59%	0.46%	0.29%
斜め上部	0.39%	0.29%	0.09%

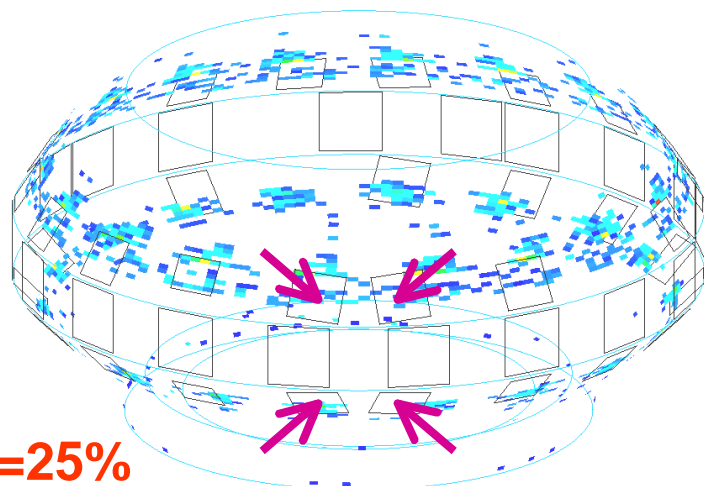
リップル補正用Fe鋼



Fe鋼製安定化板

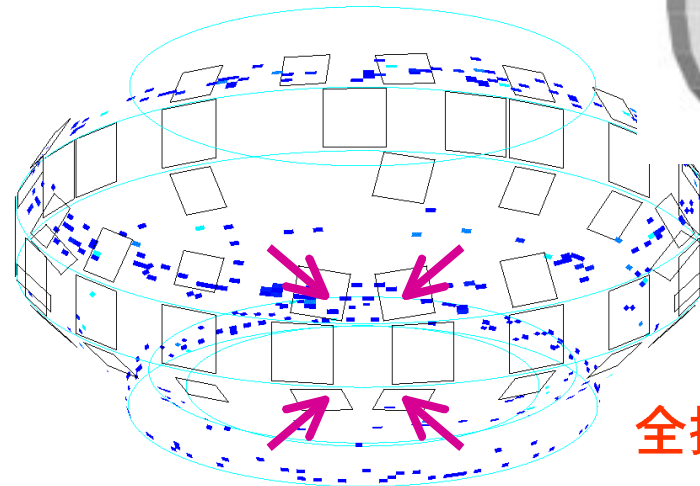
負磁気シアプラズマ
(3MA/3.5T)

正イオンNBI（垂直入射）4ユニットの場合



全損失=25%

補正を行わない場合



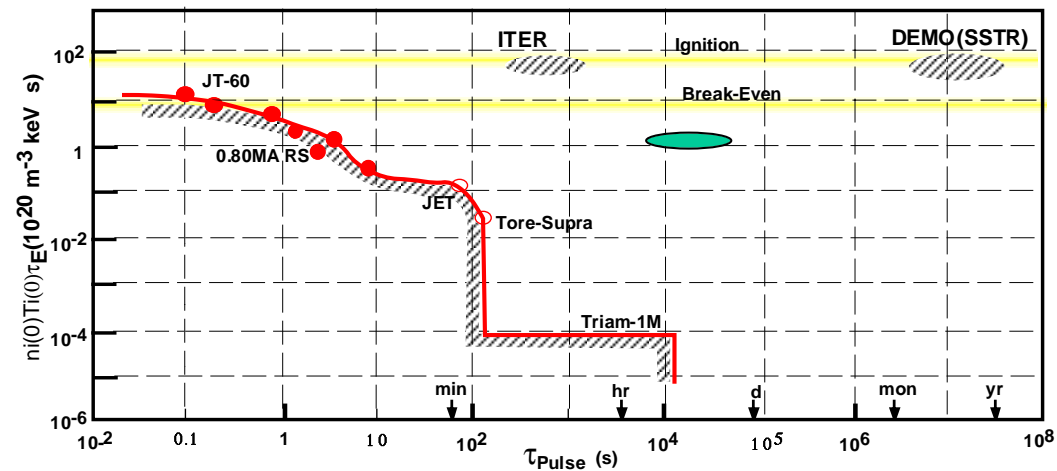
全損失=2%

補正を実施した場合

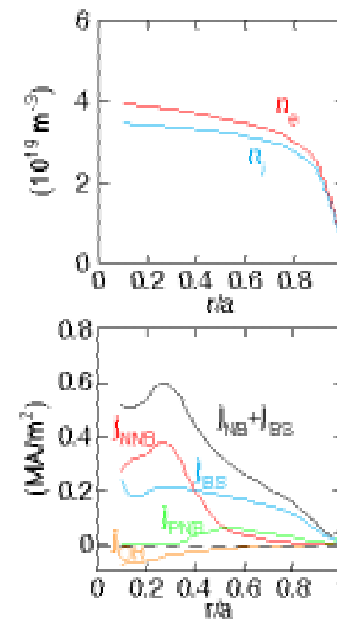
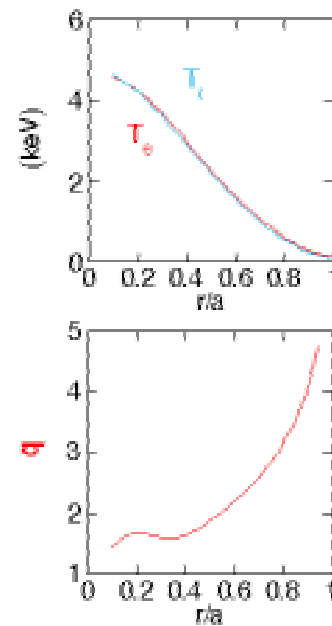
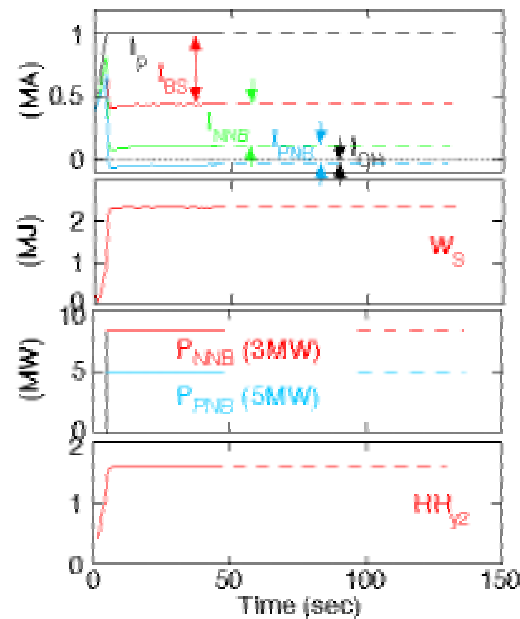
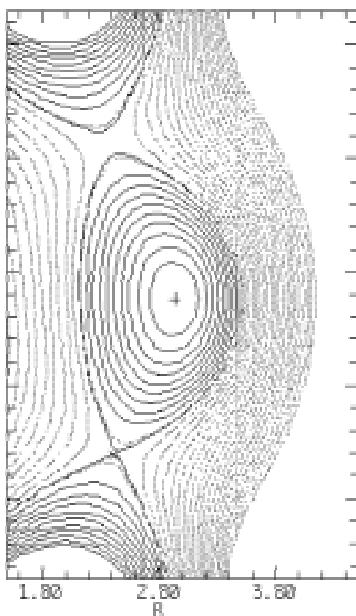
高速イオン軌道追跡コード(OFMC)による高速イオン損失の熱負荷分布

1 日連続運転の可能性

超長時間（8 時間程度）定常運転の実現（計画後半）



PLASMA MAGNETIC SURFACE



「トカマク国内重点化装置への改修」の技術的課題

○磁場強度、磁場変動に応じた超伝導素線の選択

Nb_3Al 、 Nb_3Sn 、 NbTi

○真空容器

- ・ 構造強度、一周抵抗の確保
- ・ 放射線遮蔽能力の増大
→TFコイル内のDD中性子
による核発熱を低減

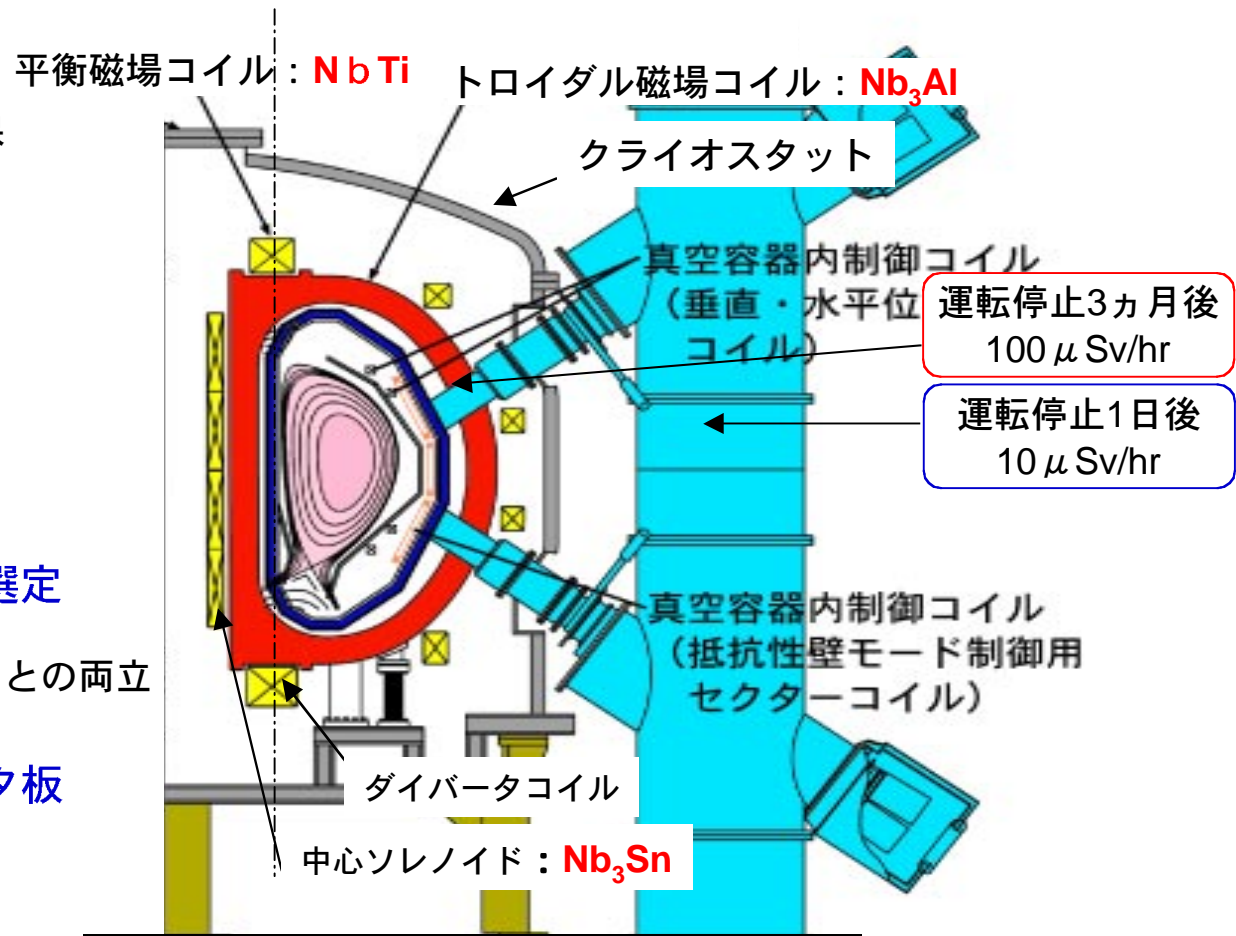
○放射線遮蔽材料及び 低放射化材料の開発

- ・ 遮蔽性能強化
- ・ 作業被ばくの低減

○輻射シールド材料の開発/選定

ベーキング温度(300℃目標)との両立

○除熱性能の高いダイバータ板 及び第一壁



真空容器の設計及び放射線遮蔽・低減化

設計及び技術開発の経過

○ 4 MAディスラプションに耐える構造強度 & 一周抵抗 $30\ \mu\Omega$ 以上

- ・ 加熱・冷却チャンネル付の二重壁構造の真空容器の設計

○ トロイダル磁場コイル内の核発熱 $2.5\ \text{mW/cc}$ 以下とする遮蔽性能

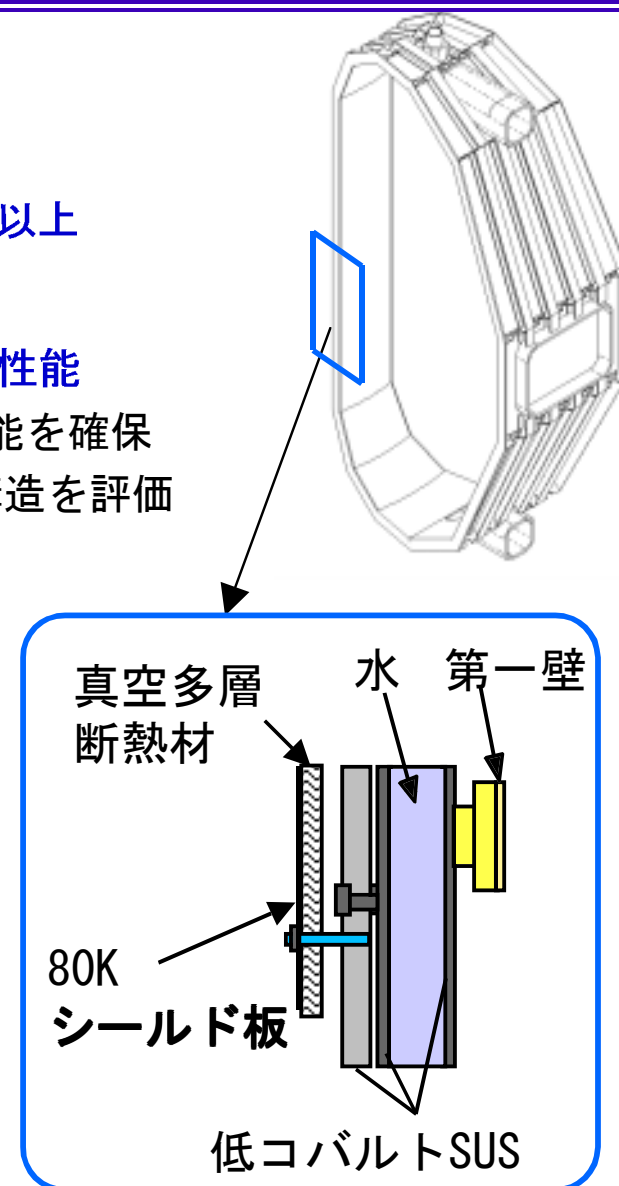
- ・ 二重壁内に充填した水と低コバルトSUSで基本的な遮蔽性能を確保
- ・ 接線ポート等の影響を考慮してポート部の核発熱、遮蔽構造を評価

○ 運転停止後3ヶ月で真空容器内 $100\ \mu\text{Sv/hr}$ 以下

- ・ 低コバルトSUSを真空容器に、低放射化フェライト鋼を第一壁に使用
- ・ ボロン添加レジン(ポート周りの漏れ防止用)、ボロン添加コンクリート(クライオスタット用)で良好な中性子遮蔽性能を確認

○ 熱輻射防止の80Kシールド板への熱侵入 $10\ \text{kW}$ 以下

- ・ 80Kシールド板の固定方法及び固定部品材料を検討



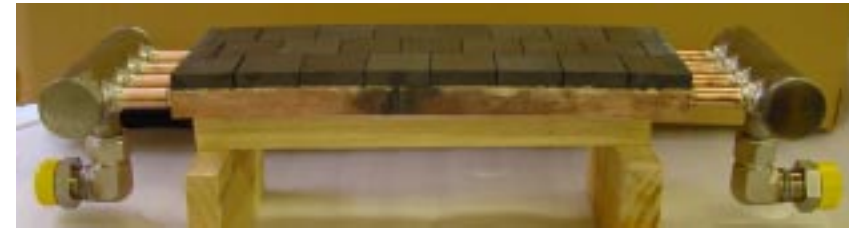
ダイバータ及び第一壁の冷却方式

ダイバータ（強制冷却方式）

構造：CFCタイルを銅製ヒートシンクにロー付、**スクリュウ管**を採用。

- ・ $10\text{MW}/\text{m}^2$ 、30秒間1400回の電子ビーム照射で接合部は健全
- ・ スワール管方式の**約1.5倍の熱伝達性能**

ダイバータ試験体

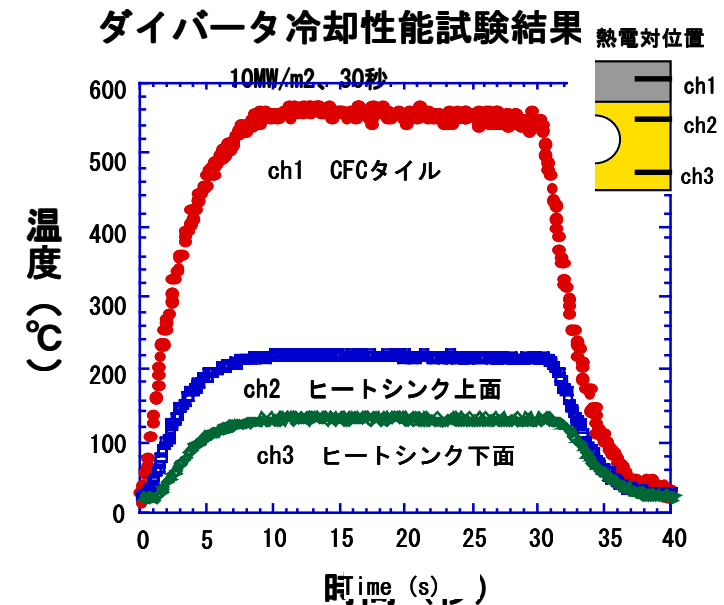


第一壁（間接冷却方式）

構造：CFCタイルと銅製ヒートシンクの間に**スパー・グラファイト・シート**を挿入して、**タイル**をボルト締め

- ・ 接触熱伝達率は**従来 ($1000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) の3倍以上**

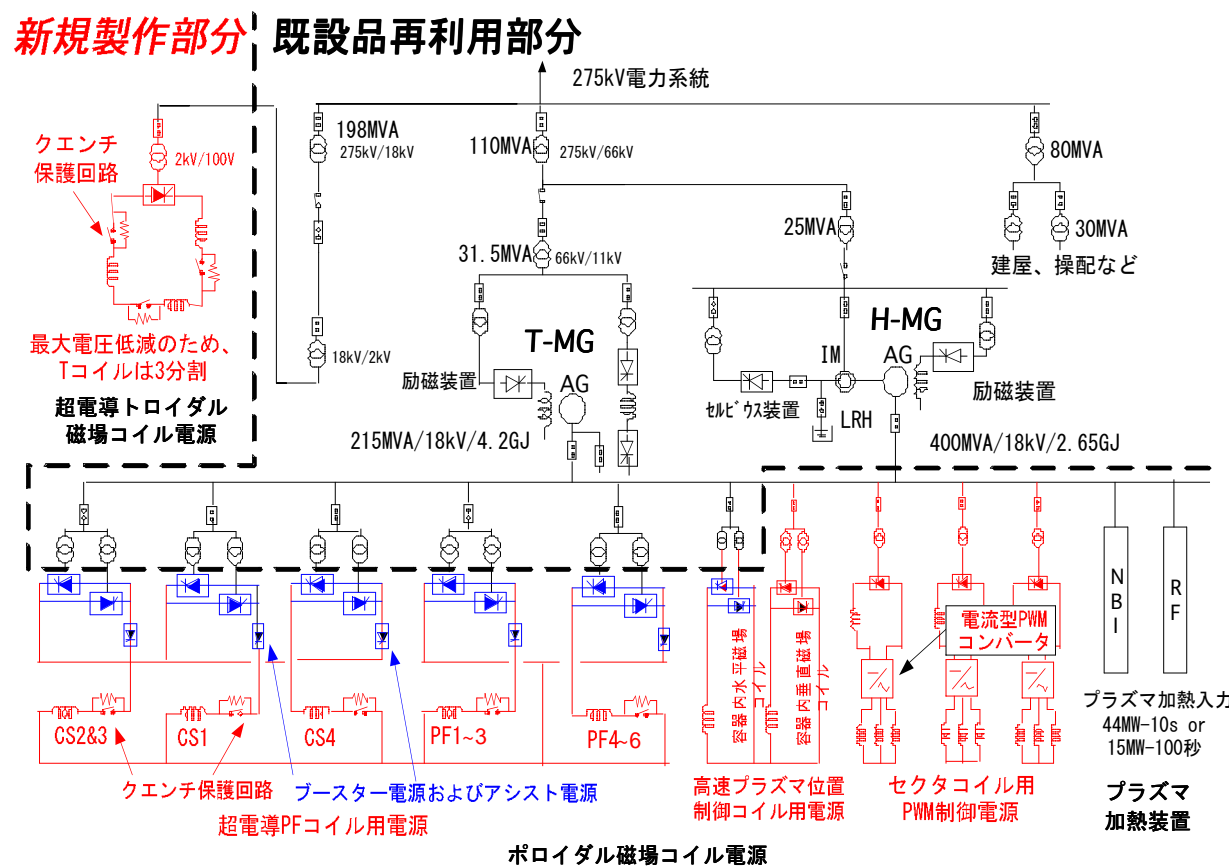
Temperature (°C)



磁場コイル電源

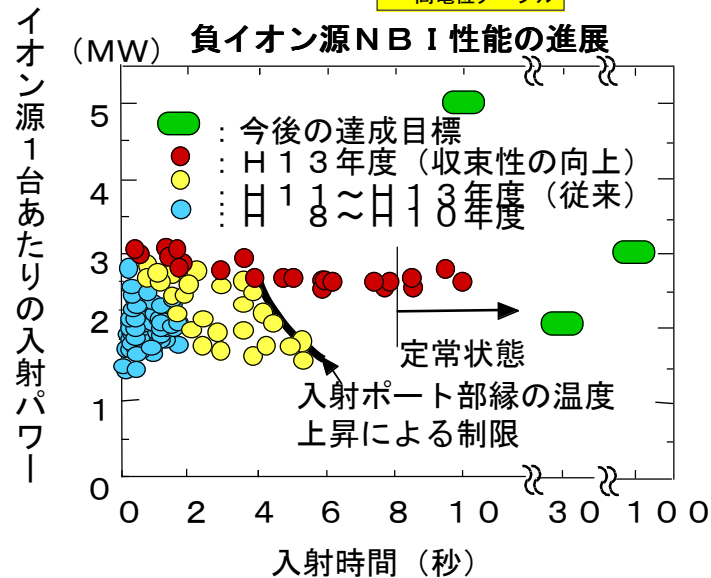
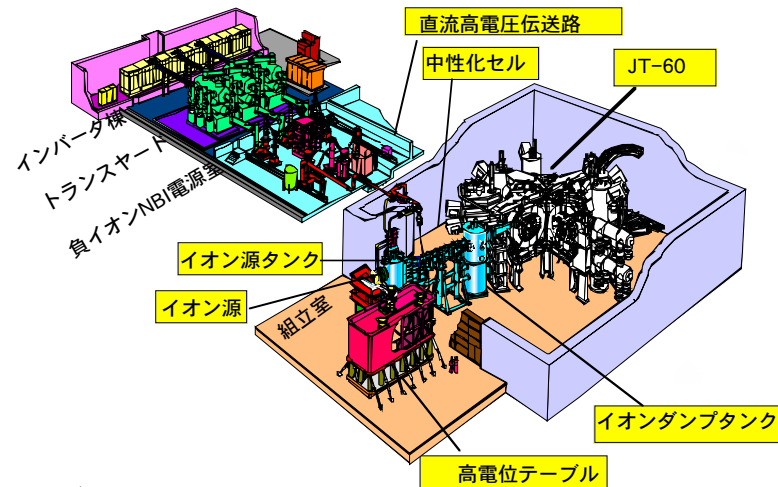
改造基本設計

- ・ 既存機器の最大限の活用
(交流-直流変換器は70%が再利用品)
- ・ 制御電圧の低電圧化による
電源容量の合理化 (着火時の
電界 $\sim 0.3\text{V/m}$)
- ・ 電動発電機は3台から2台
に合理化
- ・ 共通バスによるフィーダーの
低コスト化、空間の合理化

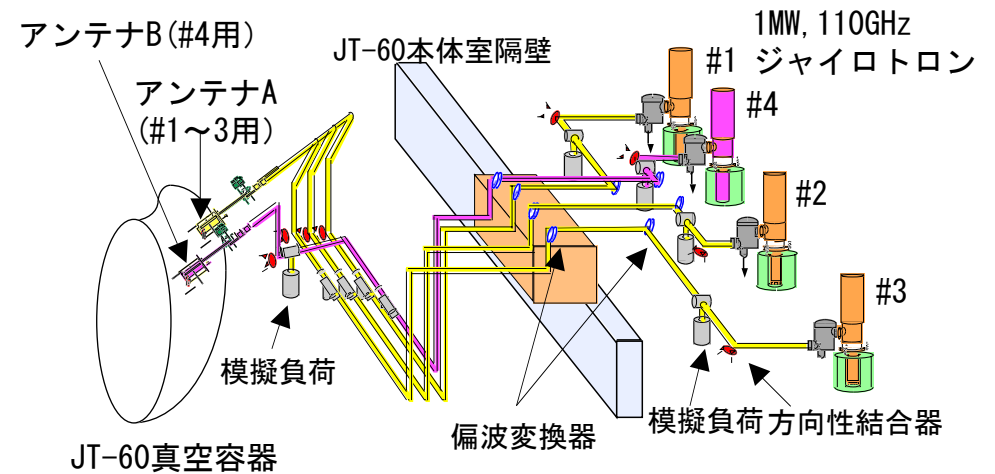


NBI、RF入射装置の改良

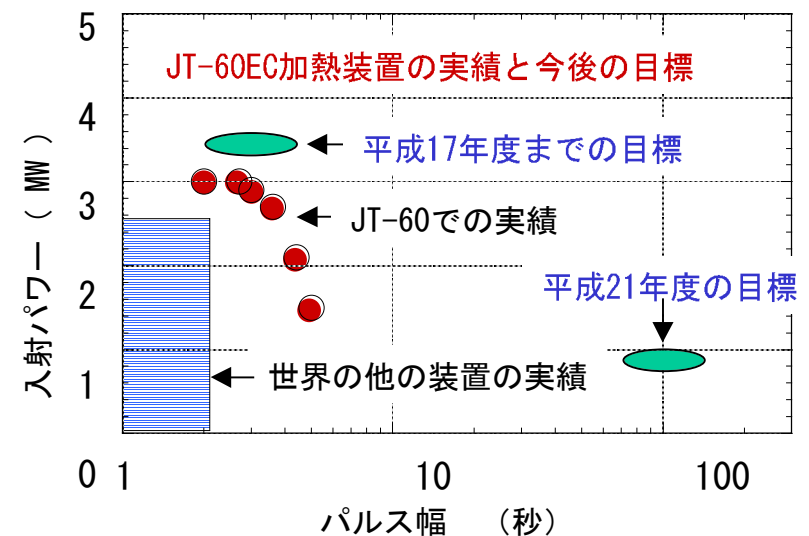
平成20年度までに、10MW入射及び3MWの100秒入射を実現するための技術改良



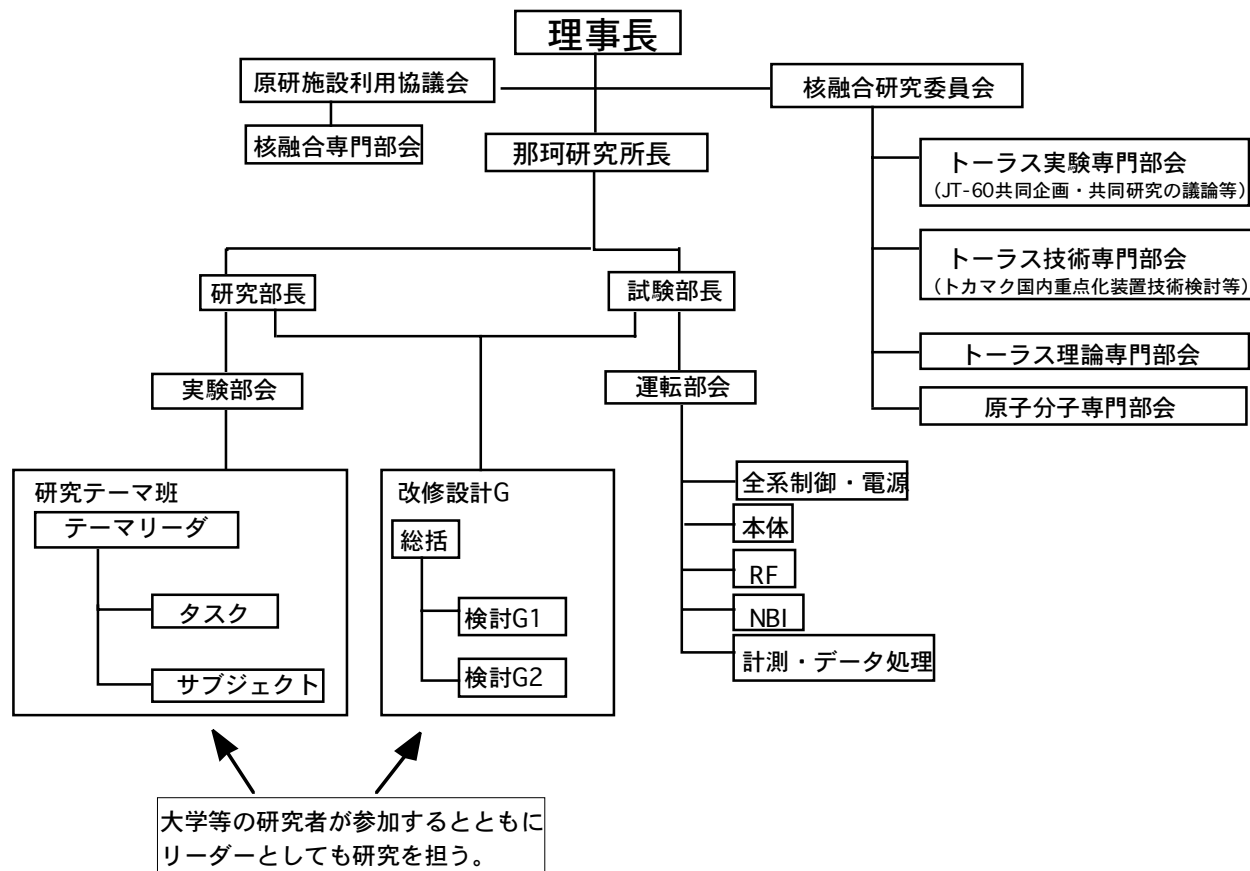
ジャイロトロンの長パルス化



JT-60EC加熱装置鳥瞰図



○ 共同企画・共同研究体制



吉田、小川専門部会長
後藤委員長

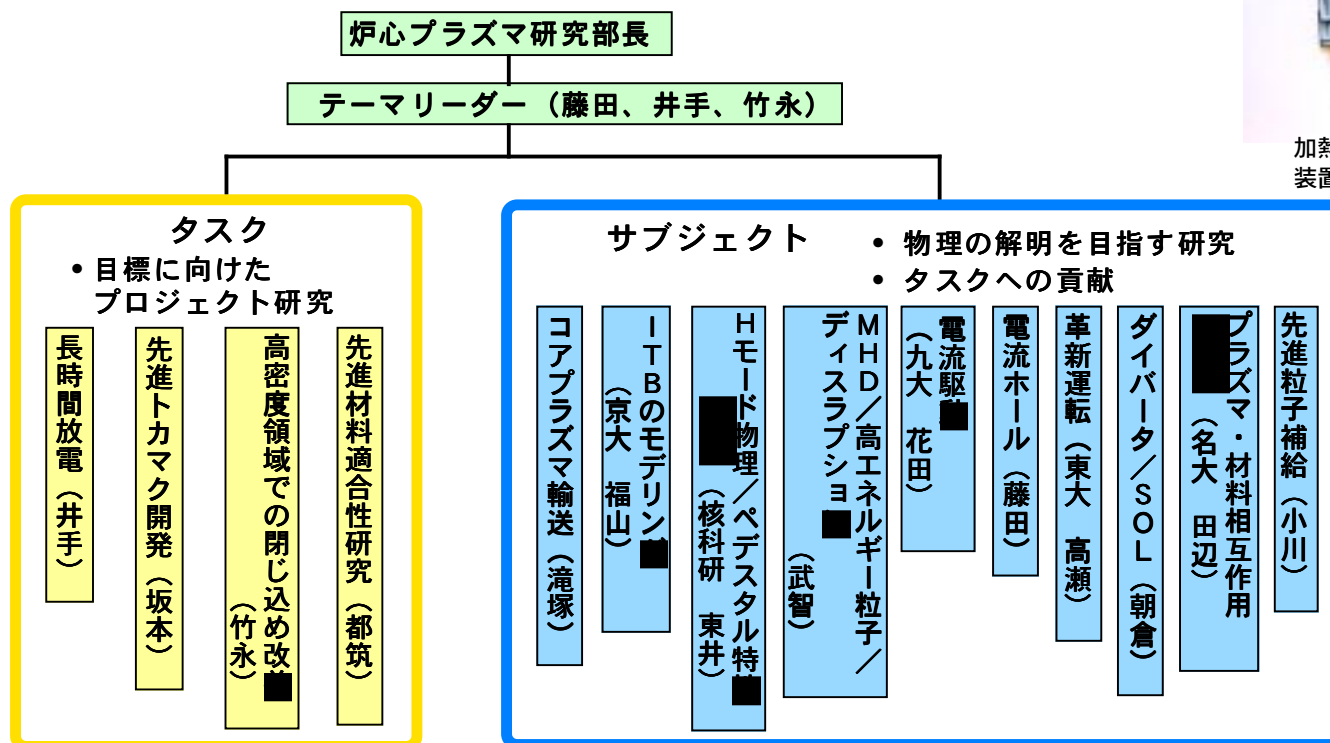
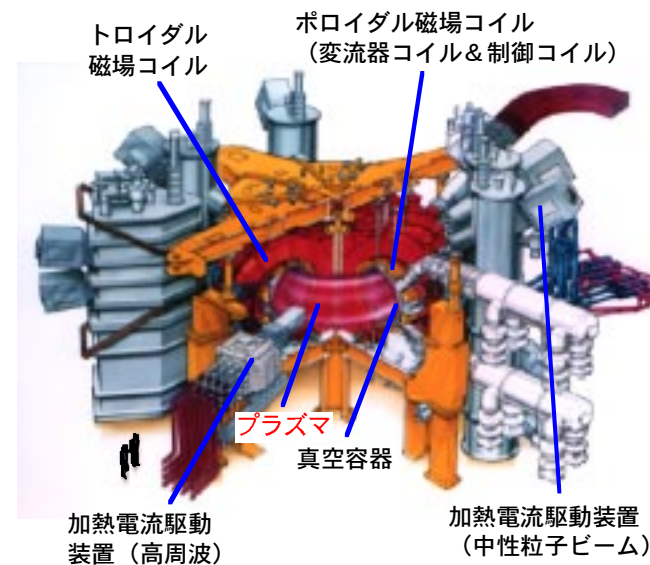
核融合研究委員会



トーラス技術専門部会

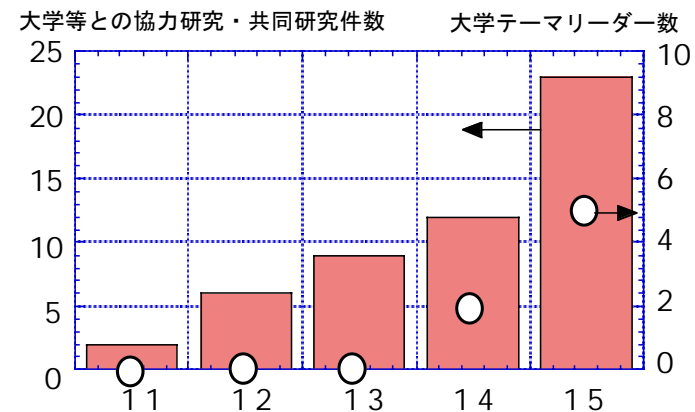
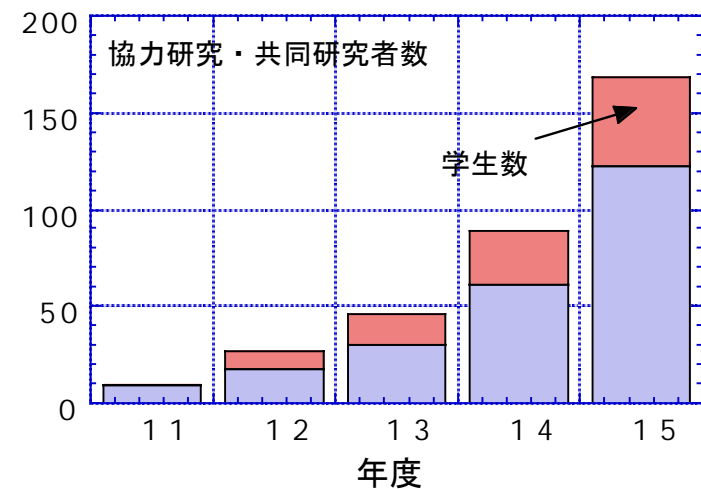
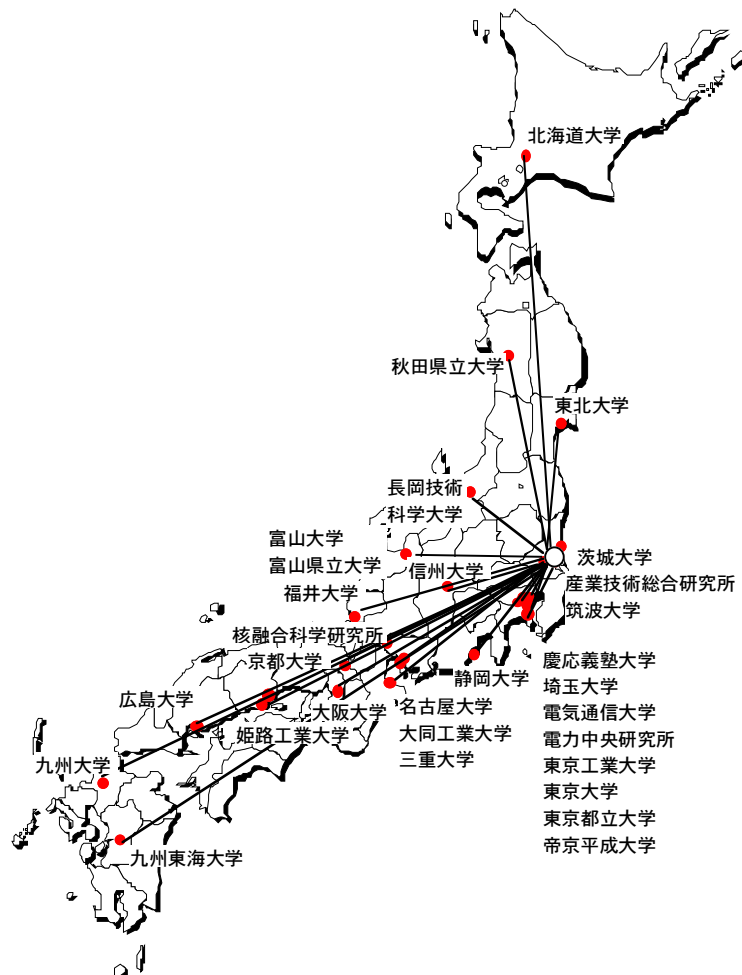
JT-60/JFT-2M 研究テーマ班の構成

開発研究（領域拡大、原理実証）；主にタスクで行う
物理研究；主にサブジェクトで行う
大学等の研究者がサブジェクトのリーダーを務める。



JT-60を用いた施設利用の協力研究の拡大

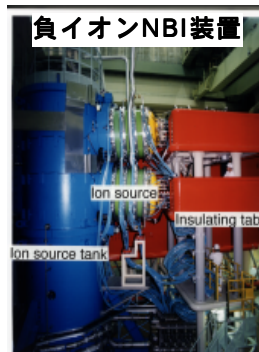
JT-60, GEKKO-XIIは改造までは、運転を継続し、共同研究重点化装置として核融合コミュニティに最先端の研究機会を提供



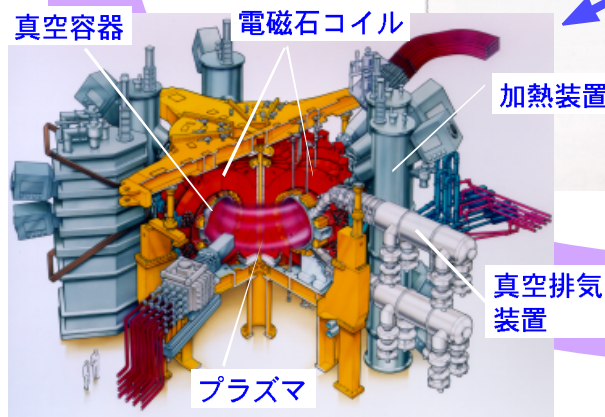
我が国の核融合研究の研究資産としてJT-60施設を有効活用



3つの周波数帯 (IC:
120MHz LH:2GHz, EC:
110GHz)で10MW以上の
パワーを入射する世界最
大級の高周波加熱装置

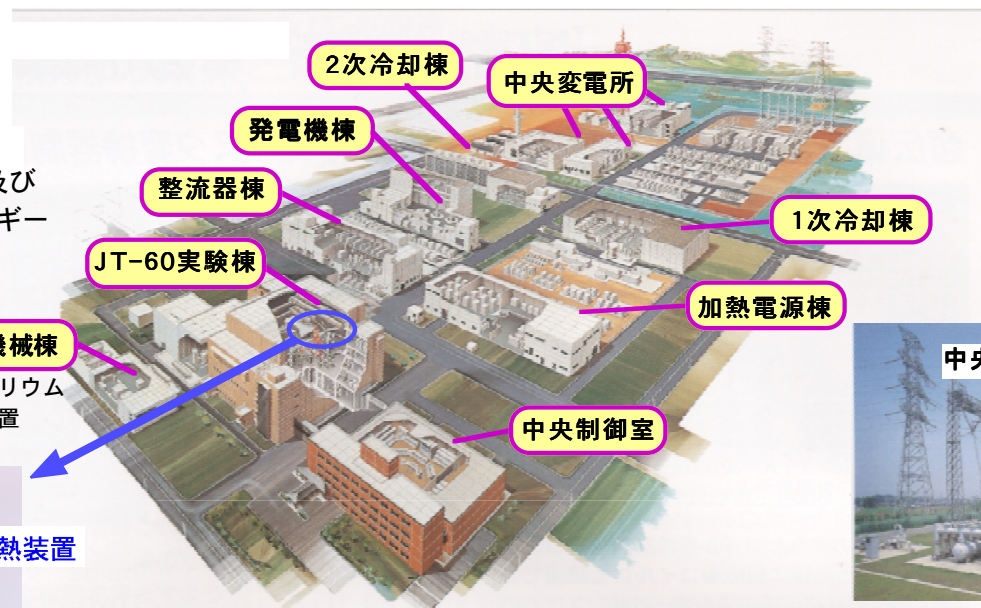


世界最大の入射パワー
40MWの正イオンNBI及び
世界最高ビームエネルギー
の500keV負イオンNBI

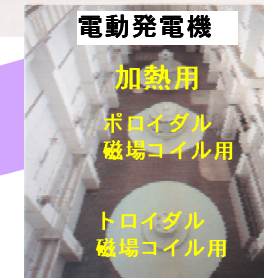


4 Tの磁場、3百万アンペアのプラズマ電流を
発生する世界最大規模のトカマク型実験装置

高圧ガス機械棟
大容量液体ヘリウム
製造・循環装置



最大130万kWの電力を
- 扱う電源設備

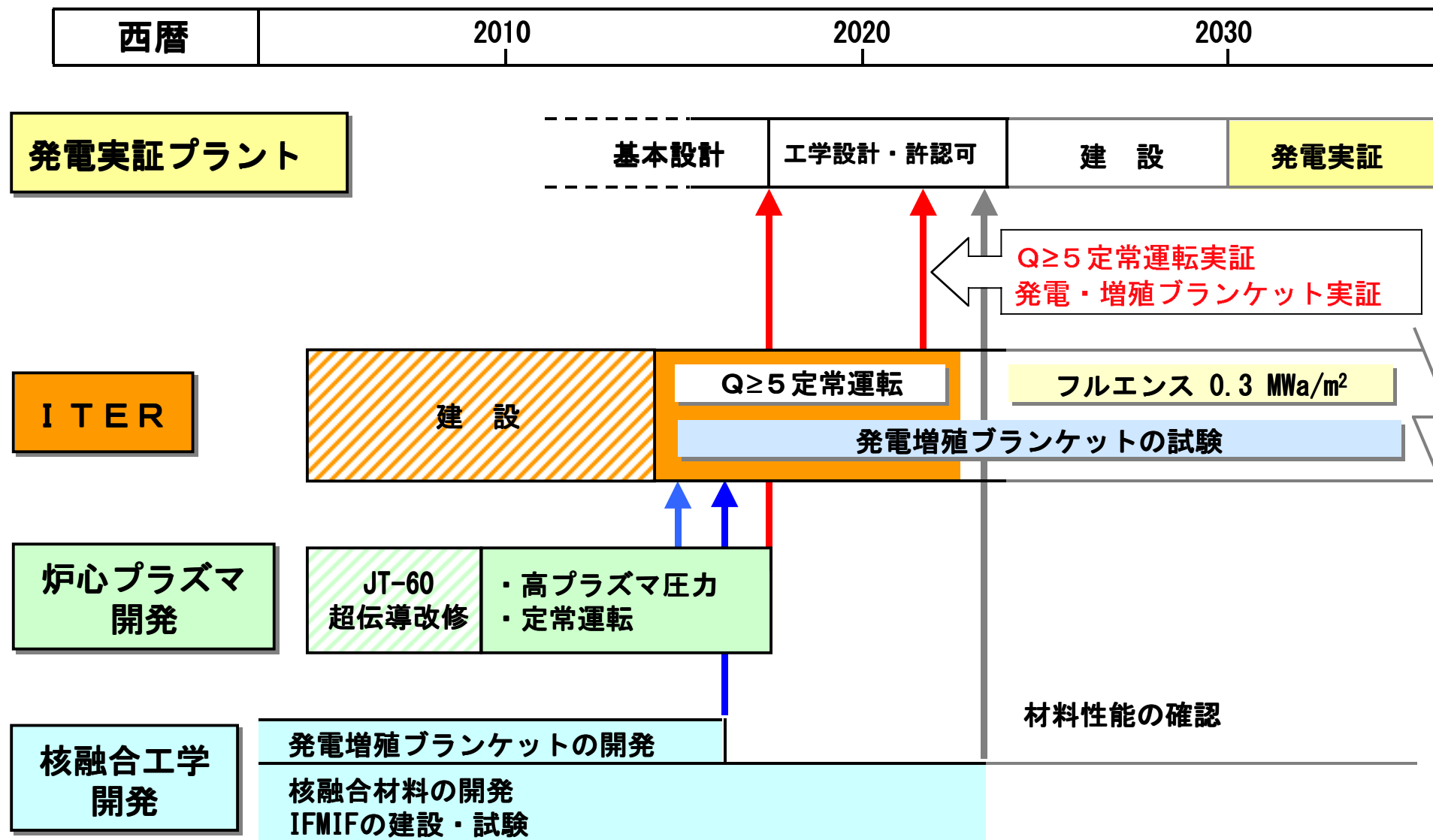


総発電量110万kWの世界
最大級の電動発電機



275kV系統の受電
設備

核融合エネルギー実現の道筋



原子力委員会核融合専門部会 技術ワーキング報告「核融合開発の加速促進」(12月6日)より

発電実証プラントへの道

- 1) ITERによる燃焼制御の実証、 $Q \sim 5$ 定常運転の実現
- 2) トカマク国内重点化装置による高ベータ定常運転の実現
- 3) IFMIFによる材料照射データの取得

が得られれば、トカマク型発電実証プラントの建設の判断が可能になると考えられる。

ITER共同設計チームによる評価

(M. Shimada et al., EPS 2003)

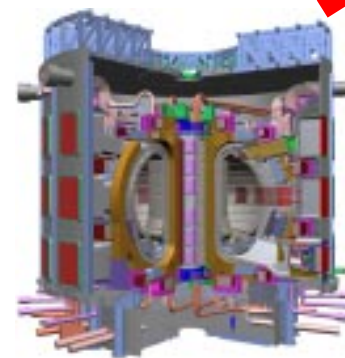
- ・ 中心電流駆動：負イオンビーム電流駆動 (N-NBCD)
パワー 47MW、エネルギー 1MeV
- ・ 周辺電流駆動：低域混成波電流駆動 (LHCD)
パワー 40MW、周波数 5GHz
- ・ エネルギー増倍率 $Q = 8$
- ・ 規格化ベータ値 $\beta_N = 3.6$

* : 現在LHRFは当初調達パッケージに入っていないので、上記シナリオの実現には追加投資が必要となる。

核融合エネルギーの早期実現
(出力200-300万kW)

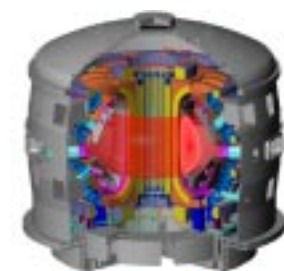


ITER



燃焼制御の実証
 $Q \sim 5$ 定常運転
の実現

経済性改善



トカマク国内重点化装置