



臨界プラズマ試験装置 JT-60 チェック・アンド・レビュー

科学技術・学術審議会 核融合研究作業部会
重点化に関するタスクフォース
平成18年8月21日

(独) 日本原子力研究開発機構
核融合研究開発部門

1. JT-60について

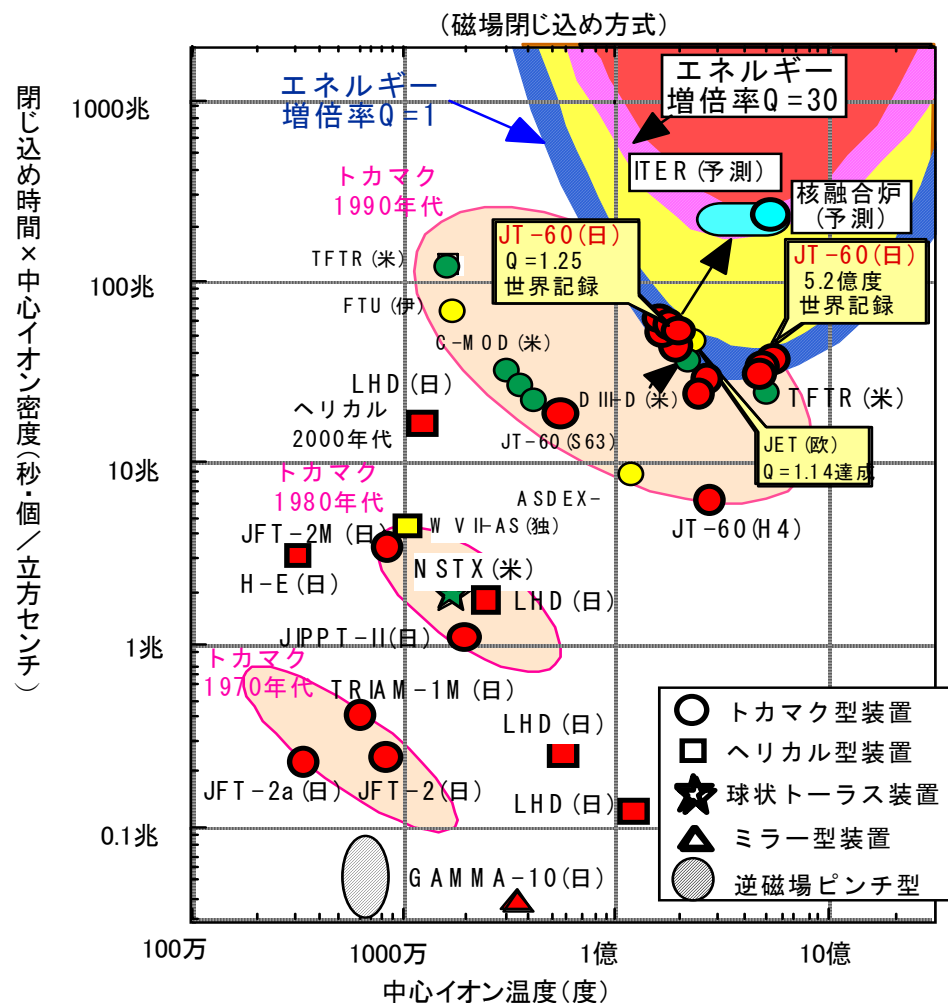
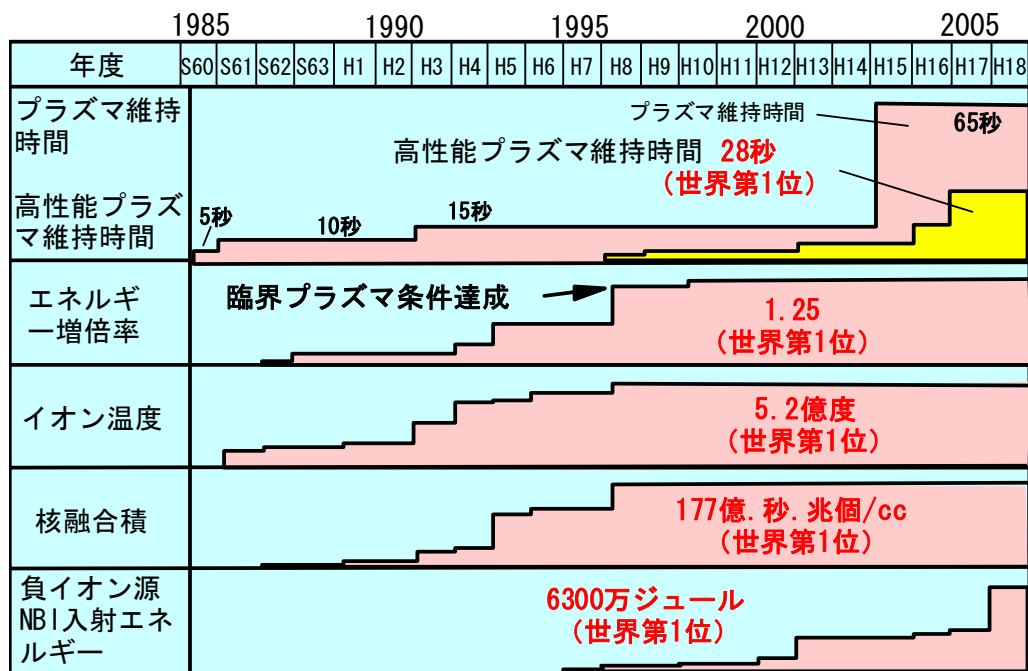
世界最高の性能を達成

平成 8年：臨界プラズマ条件達成、イオン温度5.2億度

平成10年：エネルギー増倍率1.25

平成18年：ITER相当の高性能プラズマの長時間維持（28秒間）

負イオン源NBI入射エネルギー
6300万ジュール（3.2MW, 19.7秒）





2. 重点化後の研究の進展

重点化前後の研究内容の変化

重点化前

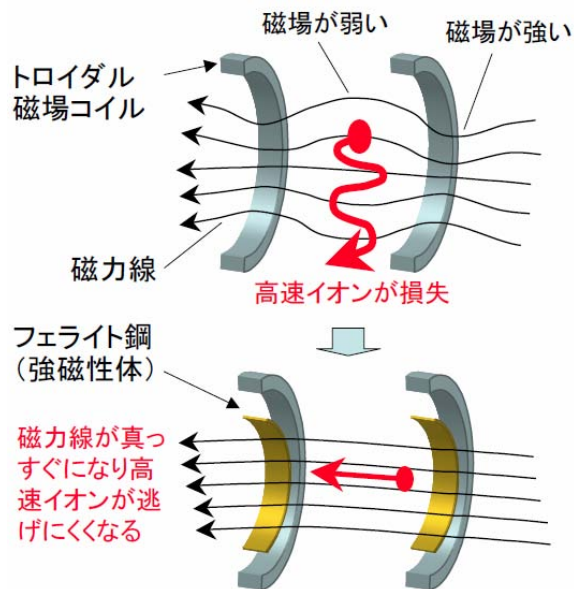
- ・JT-60の性能向上
(臨界プラズマ条件の達成、世界最高温度等)
世界のトカマク研究に追いつき追い越した時代
- ・定常トカマク炉を目指した研究開発
(自発電流割合80%の非誘導運転(<3秒)等)
原研の構想に基づく先進的な研究:世界が後追い
- ・ITER物理R&D
(He排気の実証、ディスラプション緩和等)
世界と同等の有為な貢献
- ・JT-60の超伝導化検討

重点化後

- ・高ベータ定常化研究(JT-60)
 - ITER相当プラズマを28秒間維持(世界記録)
改修の開始まで一層高いプラズマ圧力の維持を目指す。
 - 原型炉用高自発電流割合80%運転の伸張(8秒)
改修の開始まで長時間化を目指す。
- ・トカマク国内重点化装置計画(JT-60SA)
 - 原型炉で必要となる高出力密度連続運転法の開発
 - ITERではカバーできない特徴を持つ超伝導装置
 - 国内トカマク装置の重点化を踏まえ国内共同企画
 - 日欧の幅広い計画を踏まえ日欧共同製作

2.1 高ベータ定常化研究 (JT-60)

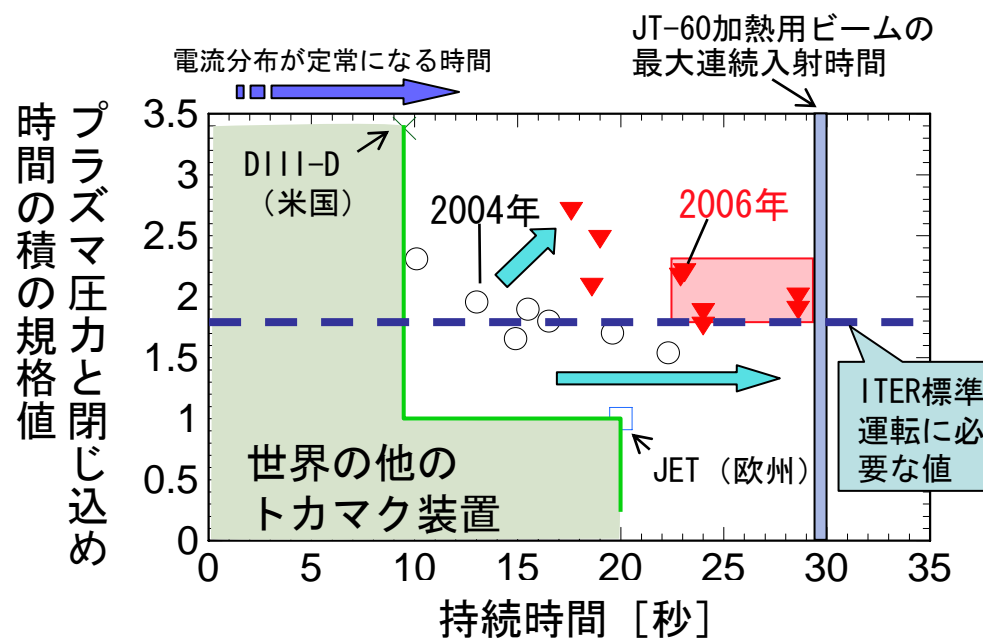
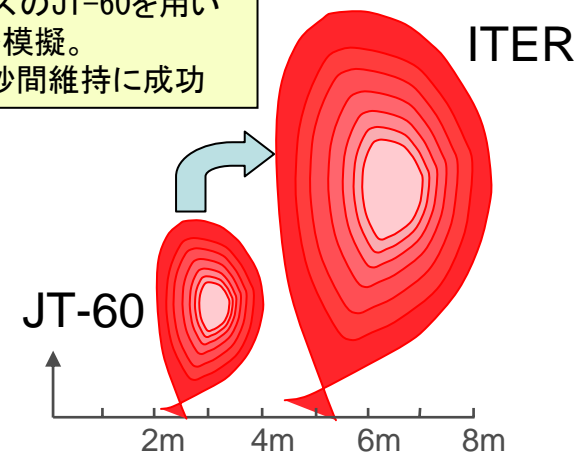
[1] ITER相当高性能プラズマを28秒間維持



強磁性体であるフェライト鋼をJT-60真空容器内に設置し、磁場形状を改良

※ 本成果は 2006.5.10のNHKニュースで放映されるとともに、読売新聞1面に掲載された。

概ね1/2のサイズのJT-60を用いてITERの運転を模擬。
⇒ 世界最長28秒間維持に成功



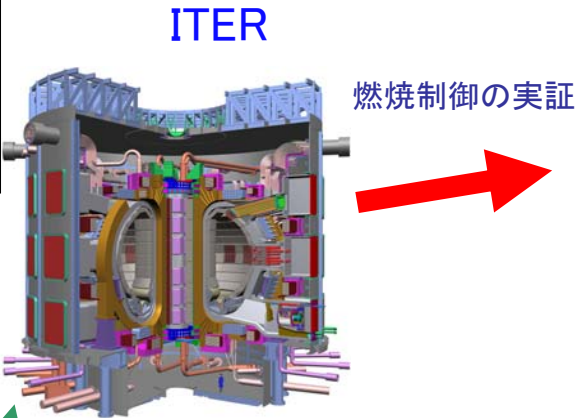


2.2 トカマク国内重点化装置計画(JT-60SA)

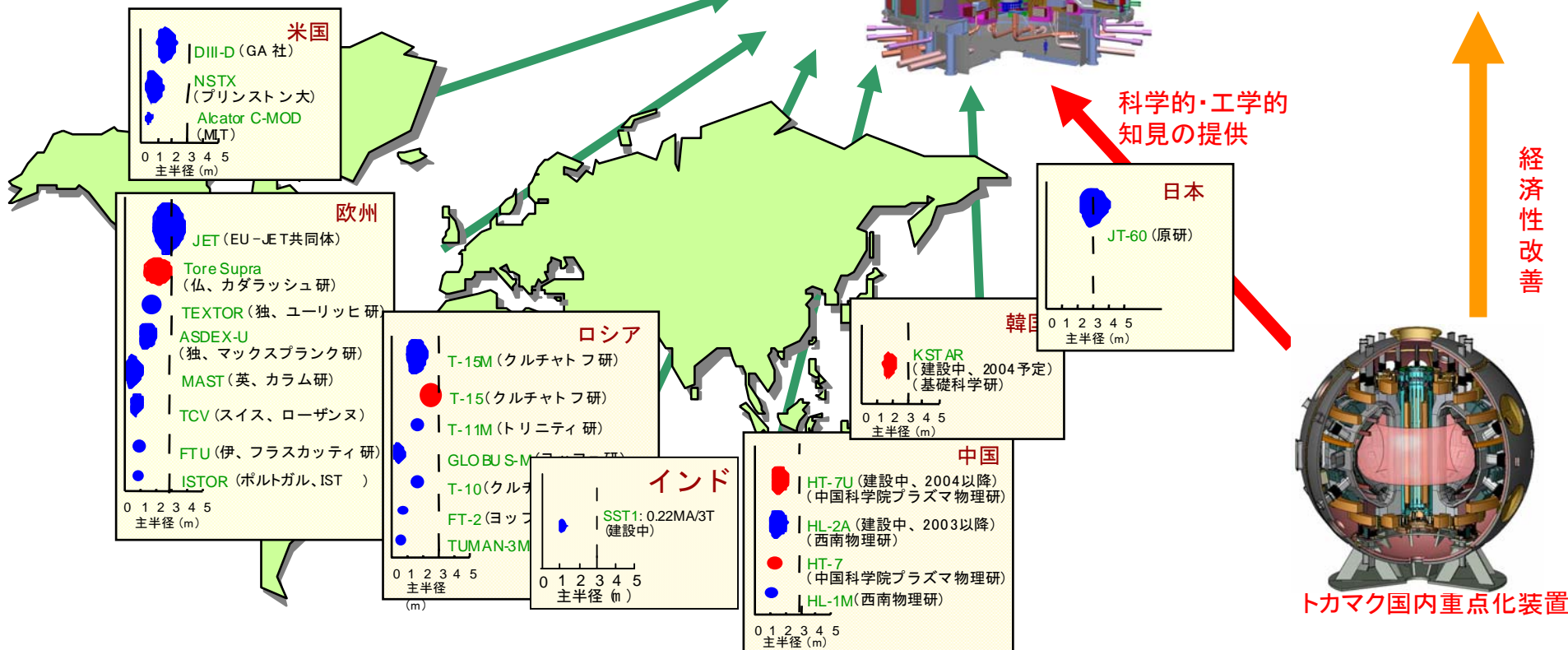
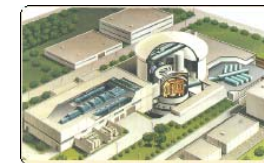
2. 重点化後の研究の進展

[1] 必要性:他極が複数のトカマクを保有する中でJT-60のみに重点化

- 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



核融合エネルギーの早期実現
(出力200-300万kW)



H15～H16年度：トーラス技術専門部会(吉田部会長)

- ・核融合研究WG報告書に盛り込まれた装置性能に基づき、装置設計案を物理的及び工学的観点から総合的にレビューし、装置パラメータを取りまとめた。

大学等の研究者を始めトカマク研究の専門家が一堂に会して、JT60SAの研究戦略、プラズマ性能、装置設計について討論

H15年度 トーラス技術専門部会における、重点化装置のレビューに関する討論風景





2.3 日欧サテライトトカマク計画(JT-60SA) [1] サテライト・トカマクワーキンググループ

2. 重点化後の研究の進展

座長：松田慎三郎執行役

EU委員：F. Romanelli(CP), J. Pamela, D.Campbell, S.C. Lorenzo, C. Sborchia, J.J. Cordier

JA委員：菊池満(CP), 高瀬雄一(東大)、三浦幸俊、松川誠、桜井真治



第1回SA-WG (那珂)：平成17年10月5-6日



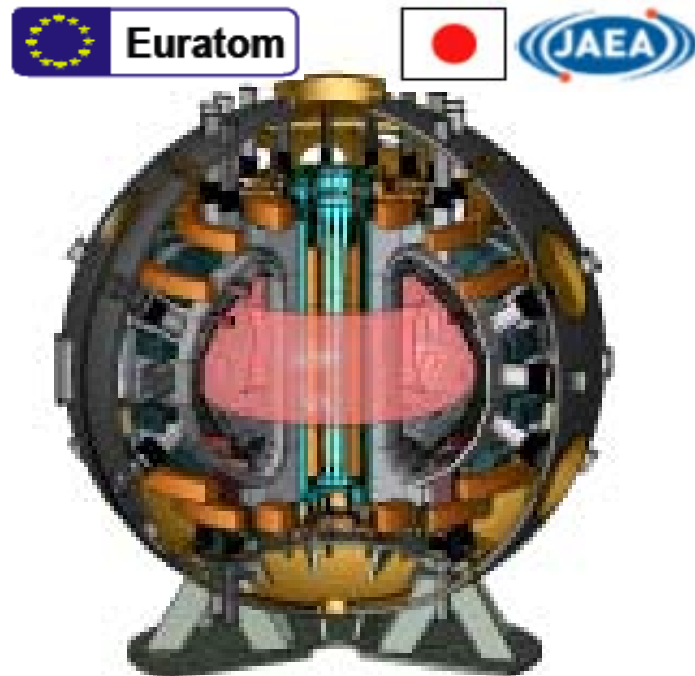
第2回SA-WG (ガルヒン)：平成17年11月3-5日



2.3 日欧サテライトトカマク計画(JT-60SA)

[2] 日欧サテライトトカマクWGの協議に基づく装置パラメータの変更

1. 加熱入力の増強
2. 中性子発生量の増加
3. 遠隔保守装置の追加
4. ダイバータ除熱の強化



プラズマ電流 (MA)	5.5 / 3.5
大半径 (m)	3.01 / 3.16
小半径 (m)	1.14 / 1.02
非円形度 κ_{95}	1.83 / 1.7
三角形度 δ_{95}	0.57 / 0.33
トロイダル磁場 (T)	2.72 / 2.59
表面安全係数 q_{95}	3.77 / 3.0
フラットトップ	100 s (8 hours)
加熱電流駆動パワー	41 MW x 100 s
垂直 NBI	16 MW
接線 Co NBI	4 MW
接線 CTR NBI	4 MW
負イオン NBI	10 MW
ECRH	7 MW
PFC熱負荷	10 MW/m ²
中性子発生量 (年間)	4 x 10²¹

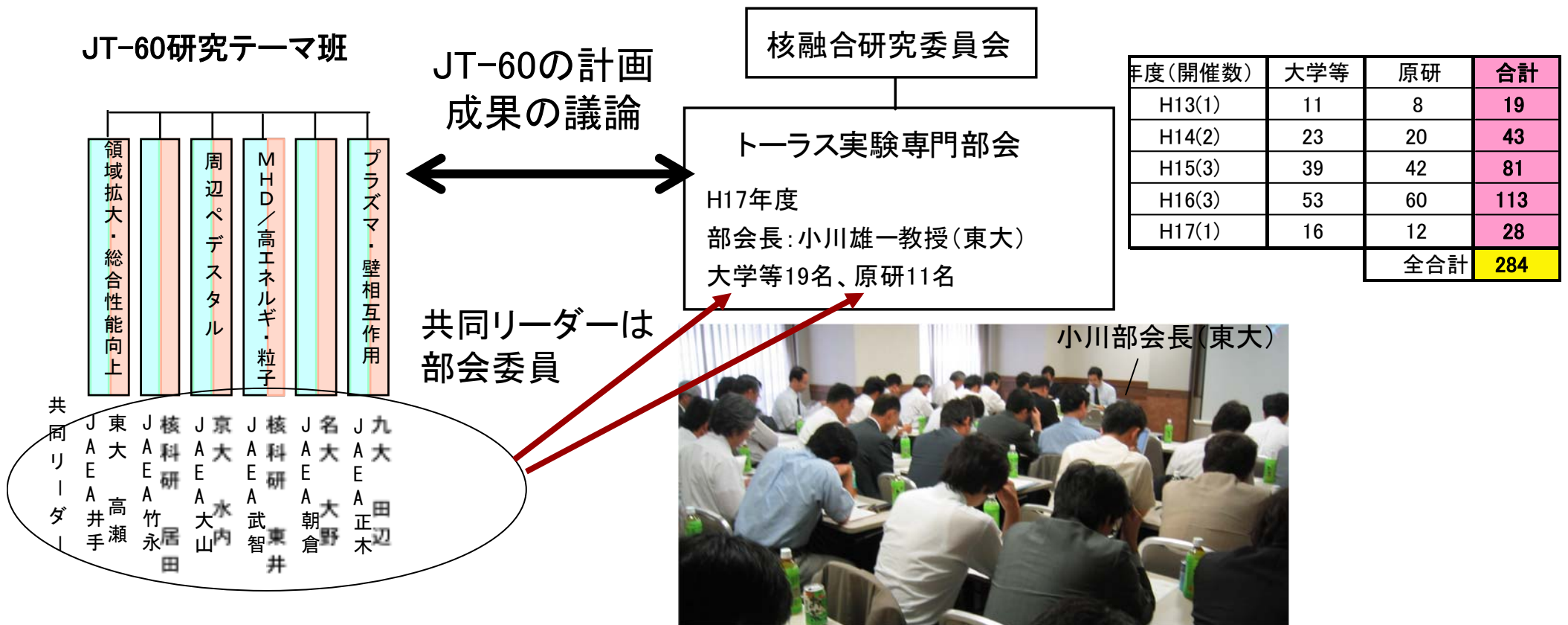


3. 共同企画・共同研究の強化

3.1 共同企画・共同研究の運営体制の構築

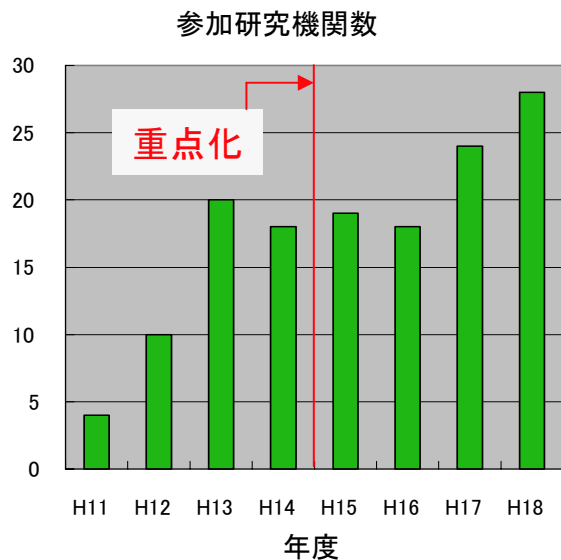
[1] 核融合研究委員会 トーラス実験専門部会

戦略的共同企画・共同研究の具体化の検討を行い、核融合研究委員会に提案する。
 具体的には、JT-60及びそれに続くトカマク国内重点化装置を用いた
 共同企画・共同研究、双方向的共同研究、及び連携研究の進め方と
 形態の検討、共同研究促進措置の具体的検討、人材育成の進め方の検討を行う。

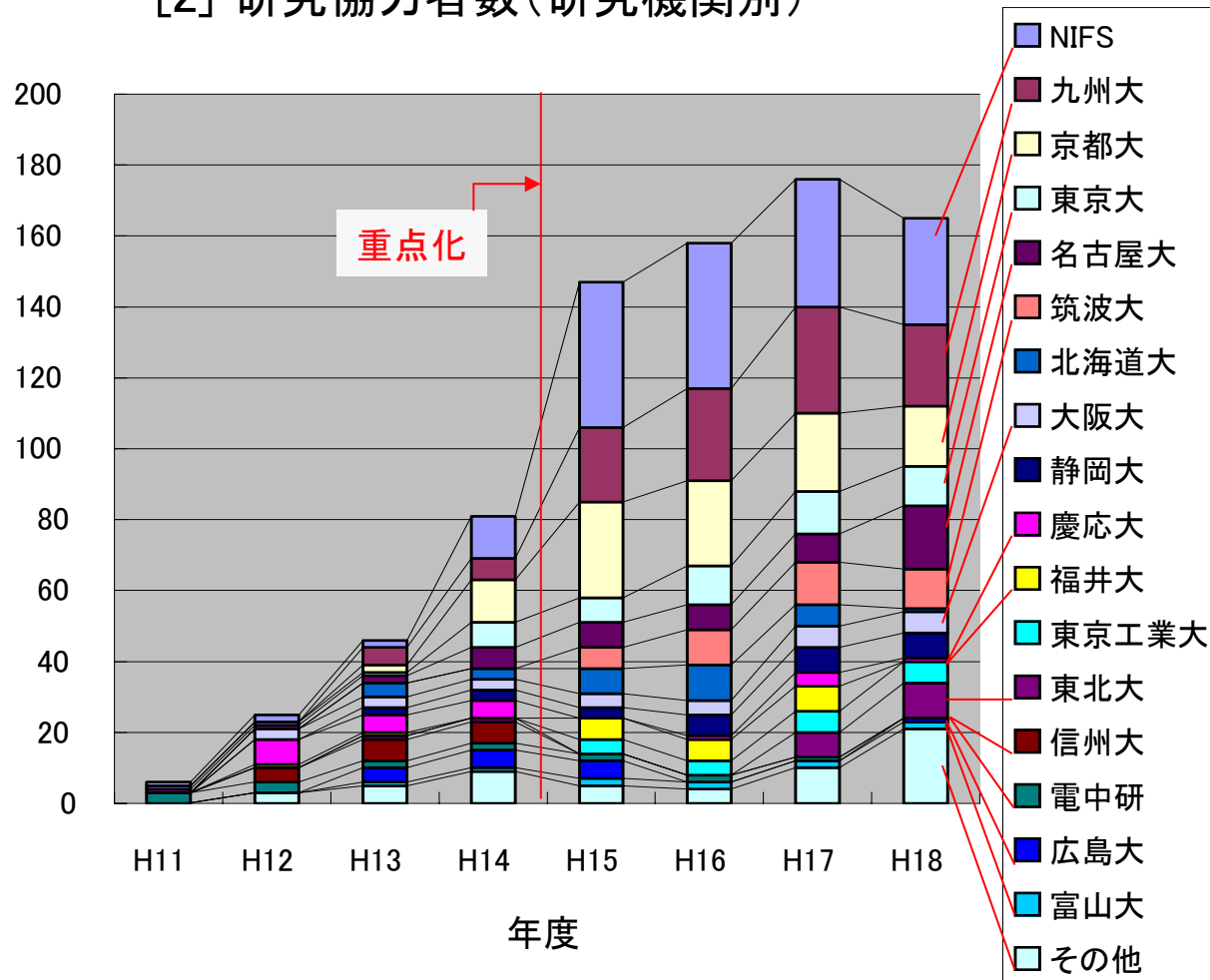


[1] 参加する研究機関

•参加する研究機関は核融合科学研、九州大、京都大、東京大、名古屋大、筑波大、北海道大をはじめ、全部で28機関に及ぶ（H18年度）。



[2] 研究協力者数(研究機関別)

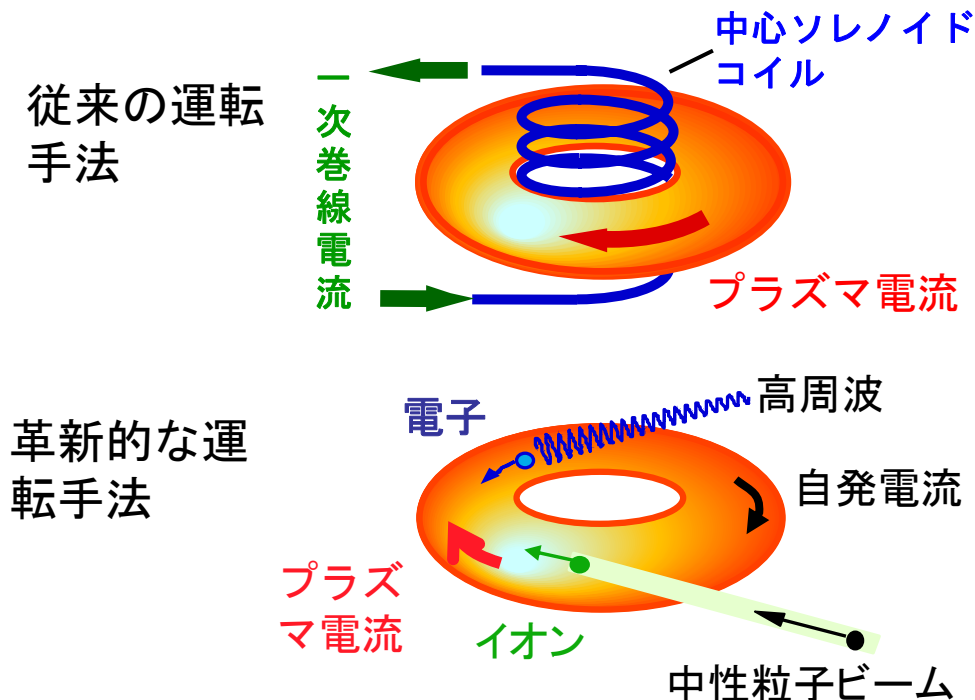


- NIFS
- 九州大
- 京都大
- 東京大
- 名古屋大
- 筑波大
- 北海道大
- 大阪大
- 静岡大
- 慶応大
- 福井大
- 東京工業大
- 東北大
- 信州大
- 電中研
- 広島大
- 富山大
- その他

3.3 共同研究の主な成果

(1) 中心ソレノイドなし運転の開発

- トカマク型装置に従来必要と考えられていた中心ソレノイドコイルを用いずに、プラズマ電流を生成し、高いエネルギー閉じ込め性能のプラズマを効率的に生成・維持する、革新的な運転手法を世界で初めて実証（平成14年7月プレス発表）。
- 東京大学、京都大学、九州大学、九州東海大学、原研の実験グループ（リーダー 東京大学教授 高瀬雄一）による本格的な連携協力のもとに達成。
- 中心ソレノイドコイルを省略できれば、トカマク型核融合炉において大幅な機器の簡素化が期待でき、小型化・高出力密度化による経済性の向上につながる



革新運転研究グループ
(リーダー高瀬東大教授)

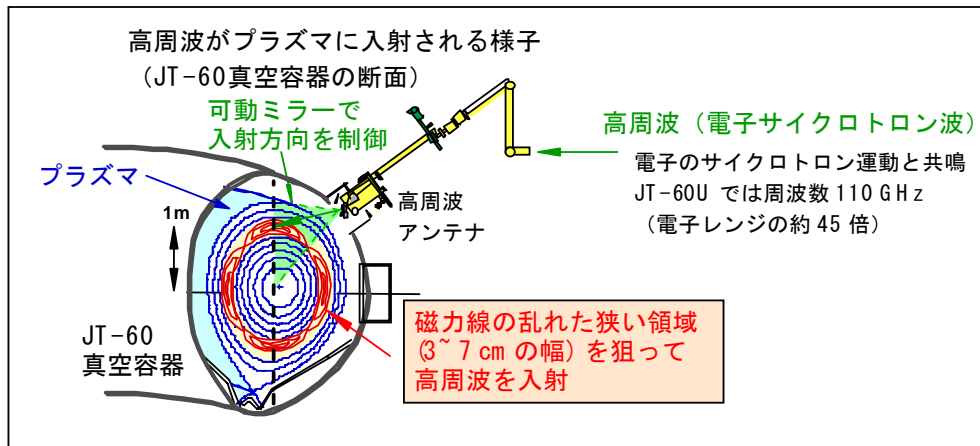
S. Shiraiwa et al., Physical Review Letters, 2004, "Formation of advanced tokamak plasmas without the use of an ohmic-heating solenoid".

京都大学との共同研究(代表:長崎百伸助教授)

大学と原子力機構の共同研究による成果の相乗効果

プラズマ中に乱れが発生すると圧力が低下
 →乱れの抑制手法を確立することが重要

- ・ 実時間で乱れの発生場所を検知して高周波を入射
- ・ 実時間でのミラー駆動方式による抑制：世界初



- ・ 乱れ発生前の高周波入射がより効果的であることを実証
- ・ 予防的手法による乱れの発生の抑制：世界初

長崎論文：Nuclear Fusion誌ダウンロード数第4位。



共著論文・発表



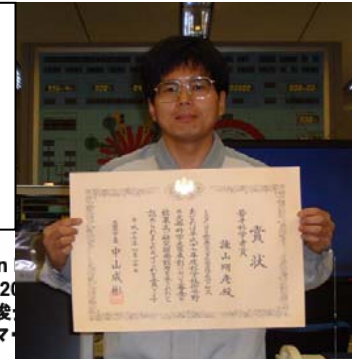
共著論文

1. K. Nagasaki, A. Isayama, S. Ide and JT-60 team, "Stabilization effect of early ECCD on a neoclassical tearing mode in the JT-60U tokamak", Nucl. Fusion 43 (2003) L7-L10
2. A. Isayama, et al., "Achievement of high fusion triple product, steady-state sustainment and real-time NTM stabilization in high-βp ELMy H-mode discharges in JT-60U" Nucl. Fusion 43 (2003) 1272-1278
3. N. Hayashi, A. Isayama, K. Nagasaki and T. Ozeki, "Numerical Analysis of Neoclassical Tearing Mode Stabilization by Electron Cyclotron Current Drive" J. Plasma and Fusion Research, Vol.80 (2004) 605
4. A. Isayama and the JT-60 team, "Steady-state sustainment of high-β plasmas through stability control in Japan Atomic Energy Research Institute Tokamak-60 Upgrade" Phys. Plasmas 12, 056117 (2005).
5. K. Nagasaki, A. Isayama, N. Hayashi, T. Ozeki, M. Takechi, N. Oyama, S. Ide, S. Yamamoto and JT-60 Team, "Stabilization of Neoclassical Tearing Mode on JT-60U Tokamak", submitted

発表

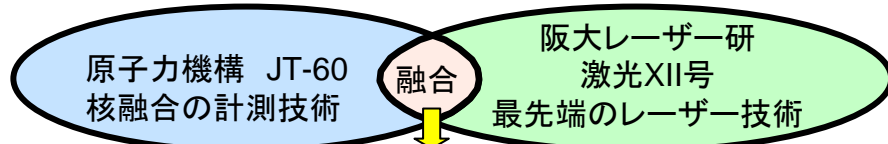
1. 長崎百伸、諫山明彦、井手俊介「EC早期入射の安定化効果」、日本核学会第21回大会、2005年11月、京都府立総合技術センター
2. K. Nagasaki, A. Isayama, S. Ide, "Achievement of high fusion triple product, steady-state sustainment and real-time NTM stabilization in high-βp ELMy H-mode discharges in JT-60U" Nucl. Fusion 43 (2003) 1272-1278
3. A. Isayama, K. Nagasaki, S. Ide, "Stabilization of Neoclassical Tearing Mode on JT-60U Tokamak", 15th Topical Conf. on Fusion Energy, 2005, San Francisco, USA
4. K. Nagasaki, A. Isayama, N. Hayashi, et al., 20th IAEA Fusion Conference, 2005, Kyoto, Japan
5. K. Nagasaki, A. Isayama, N. Hayashi, et al., ITPA, Nov. 8-10, 2005, Kyoto, Japan
6. 長崎百伸、諫山明彦、林伸彦、武智学、大山直幸、小関隆久、井手俊介「EC入射による新古典ティリングモードの安定化」、第21回プラズマ物理学会大会、2005年11月、京都府立総合技術センター

諫山(原研)が
 文部科学大臣
 表彰若手科学
 者賞を受賞



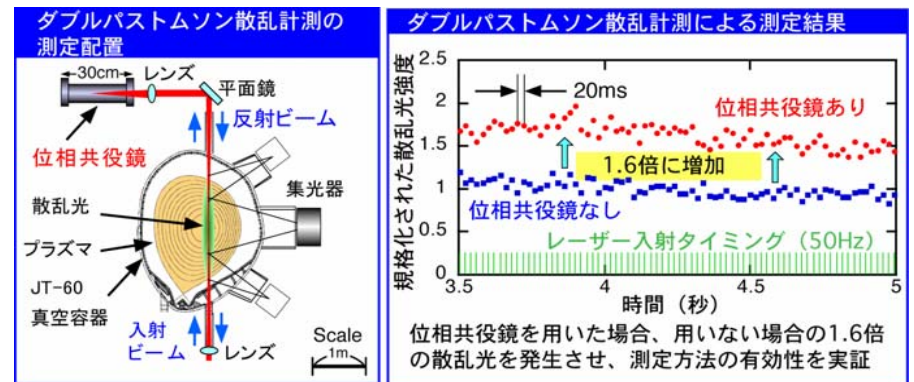
- **トムソン散乱**はレーザーによる電子の散乱光を分光分析することにより、プラズマの電子温度・密度を測定する手法
- 測定性能のさらなる改善を図るためには、新しいテクノロジーの導入が必要
- 世界の最先端を行く阪大の**位相共役鏡**を、JT-60のトムソン散乱計測に世界で初めて応用

- レーザービームを位相共役鏡で折り返し、約2倍の散乱光を発生させる**ダブルパストムソン散乱計測法**を考案し、JT-60においてその有効性を世界で初めて実証
- 一対の位相共役鏡の間にレーザー光を閉じ込め、測定性能をさらに向上させる**マルチパストムソン散乱計測法**を考案し、特許を取得(日本国特許第3699682号)

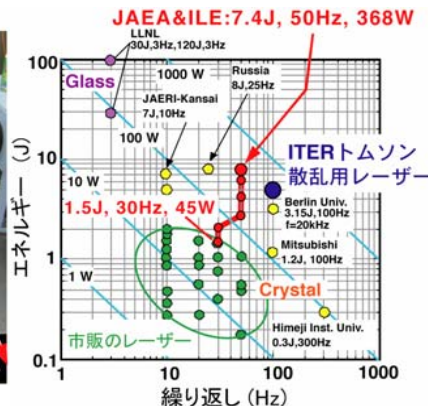
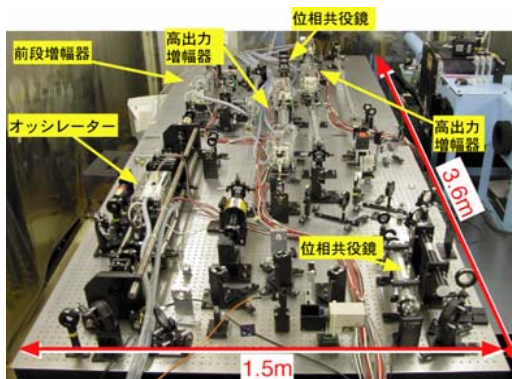


トムソン散乱計測の測定性能の改善

- 既存のレーザーシステムに位相共役鏡を組み込み最適化を行った結果、高出力レーザー増幅器で誘起される**波面の乱れを完全に補正し、当初の8倍を超える出力**を得た
- 世界最高レベルのレーザー性能を達成し、トムソン散乱測定精度を改善



平成17年11月30日、プラズマ・核融合学会賞「第10回技術進歩賞」を受賞。



• この受賞は、原子力機構と大阪大学との協力の成果が結実したものであり、位相共役鏡を世界で初めてトムソン散乱計測に応用した成果が評価された。



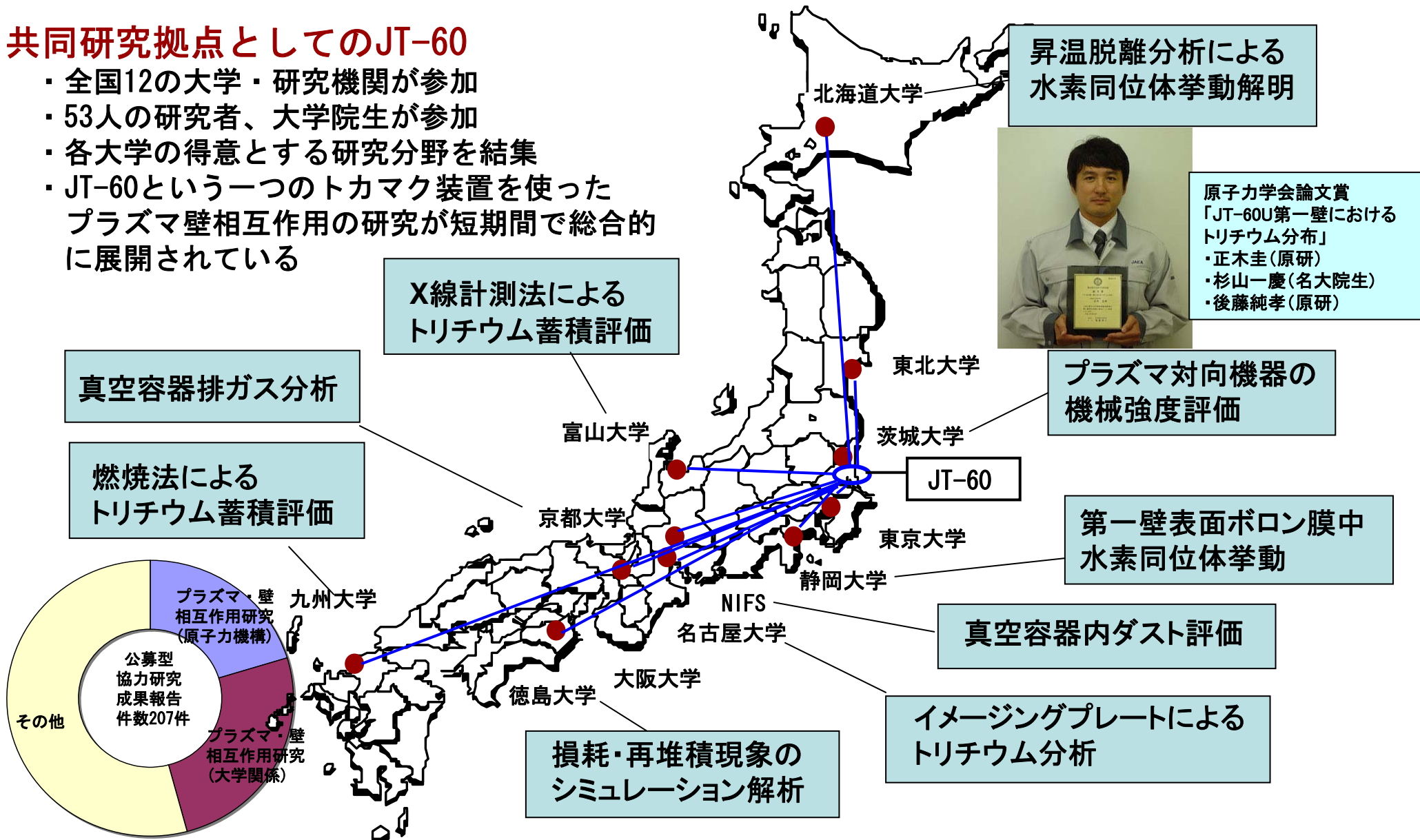
吉田(阪大) 波多江(原子力機構) 中塚(阪大)

3.3 共同研究の主な成果

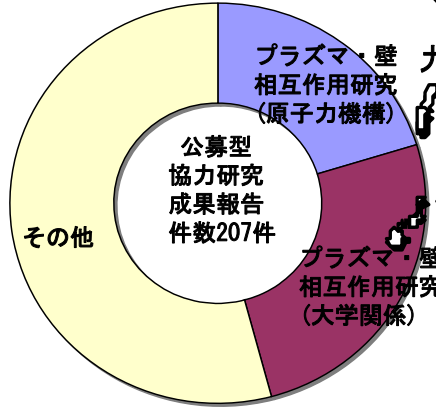
(4) プラズマ・壁相互作用研究 (STL: 田辺哲朗 名大/九大教授)

共同研究拠点としてのJT-60

- ・ 全国12の大学・研究機関が参加
- ・ 53人の研究者、大学院生が参加
- ・ 各大学の得意とする研究分野を結集
- ・ JT-60という一つのトカマク装置を使ったプラズマ壁相互作用の研究が短期間で総合的に展開されている



原子力学会論文賞
「JT-60U第一壁におけるトリチウム分布」
・ 正木圭(原研)
・ 杉山一慶(名大院生)
・ 後藤純孝(原研)





4. 重点化後の人材育成

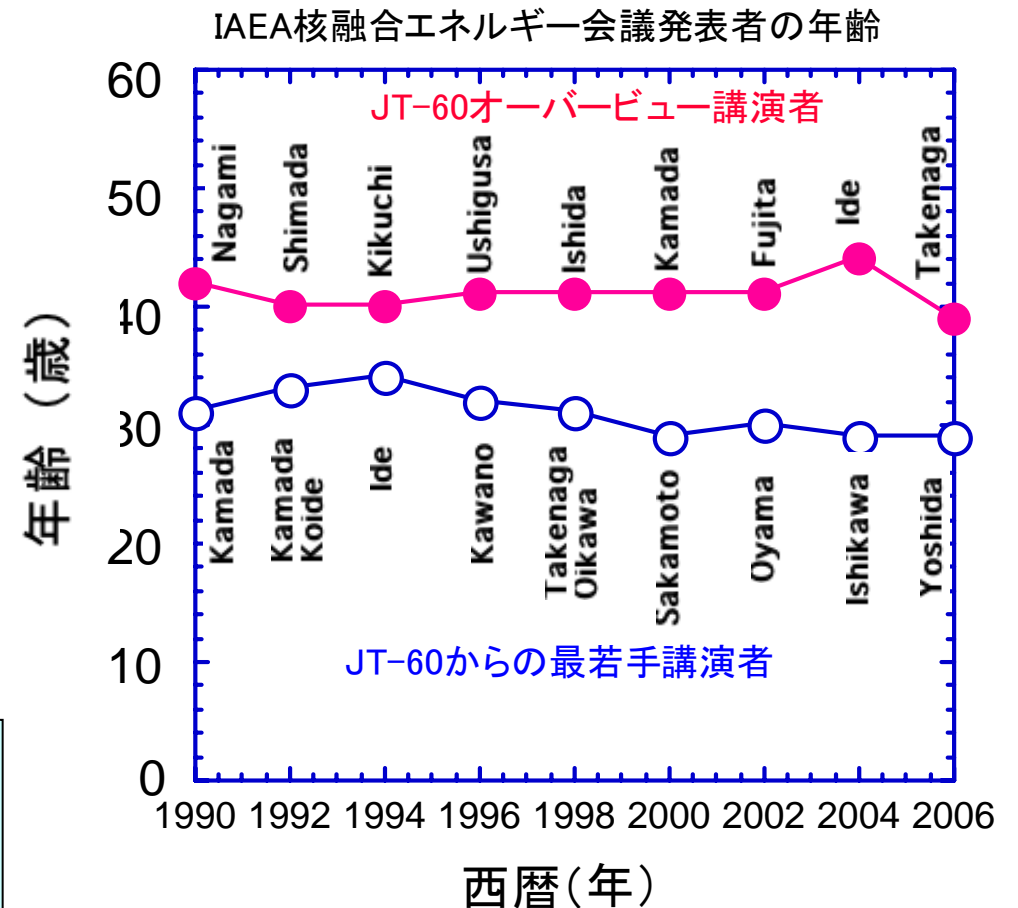
4.1 若手研究者に機会を付与

○ IAEA会議でのJT-60オーバービュー講演者（当該時期のテーマリーダー）は40歳前後。毎回交代し、多くの人材に機会を付与。

○ 成果次第で、博士研究員であってもIAEA会議で発表（第20回(2004)、第21回(2006)）

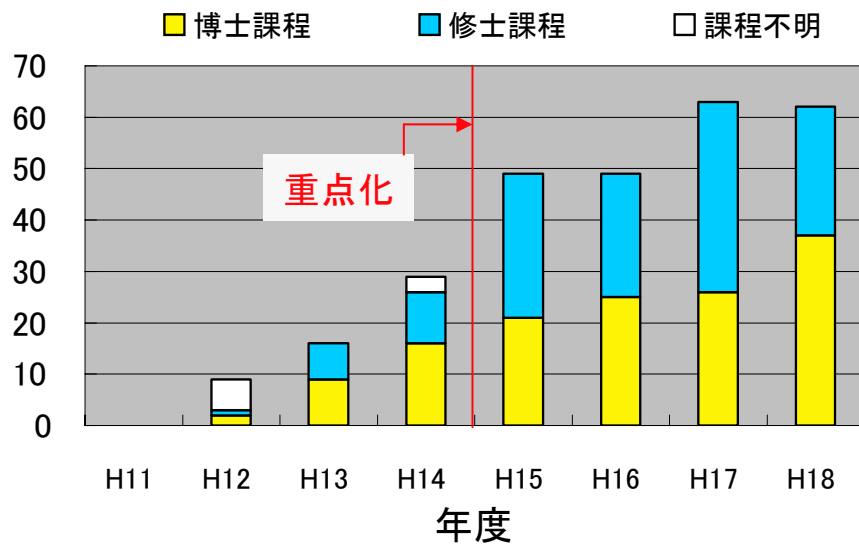
○ ITERを見据え、ITPA委員に若手を登用
仲野友英（33歳）、浦野創（32歳）

○ 実力のある若手研究者を研究班リーダーに
例：H17-18年度JT60研究テーマ班(就任時)
周辺ペデスタル班 大山直幸 33歳
プラズマ壁相互作用班 正木 圭 34歳

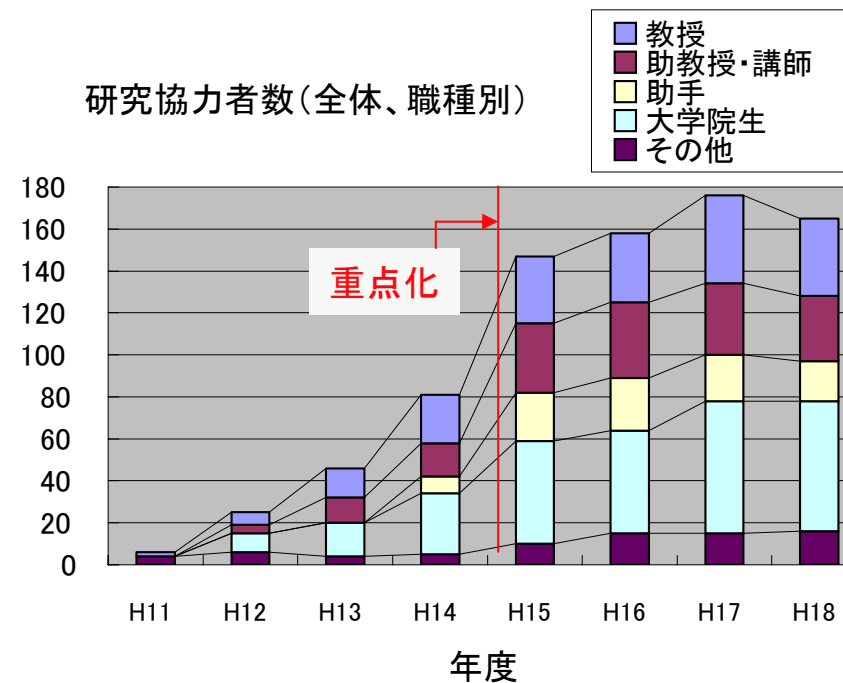


- 重点化後のJT-60公募型研究協力の進展に伴い、参加する大学院生の人数も増加。平成17-18年度は約60名。博士課程と修士課程の比率は同程度。

研究協力に参加する大学院生の数



研究協力者数(全体、職種別)

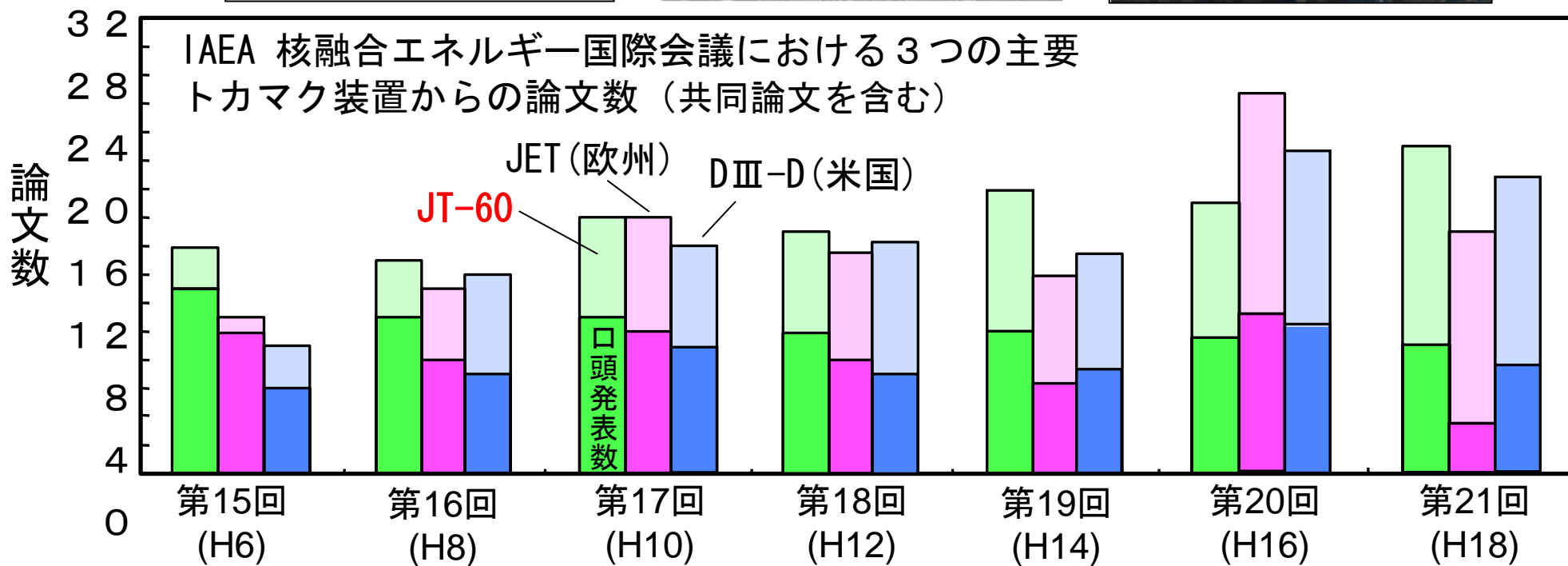
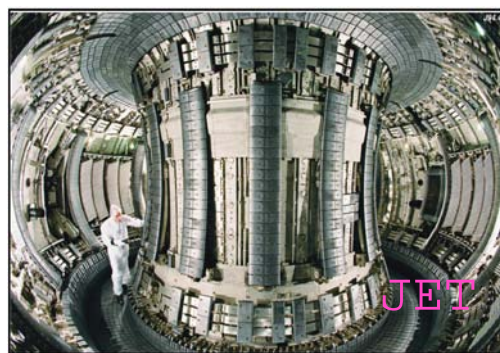
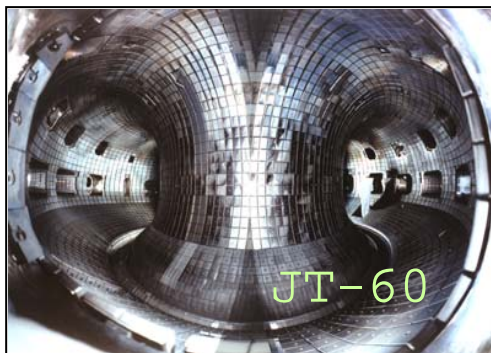




5. 国際的視点からの寄与

5.1 IAEA主催核融合エネルギー会議に最大の寄与をするJT-60

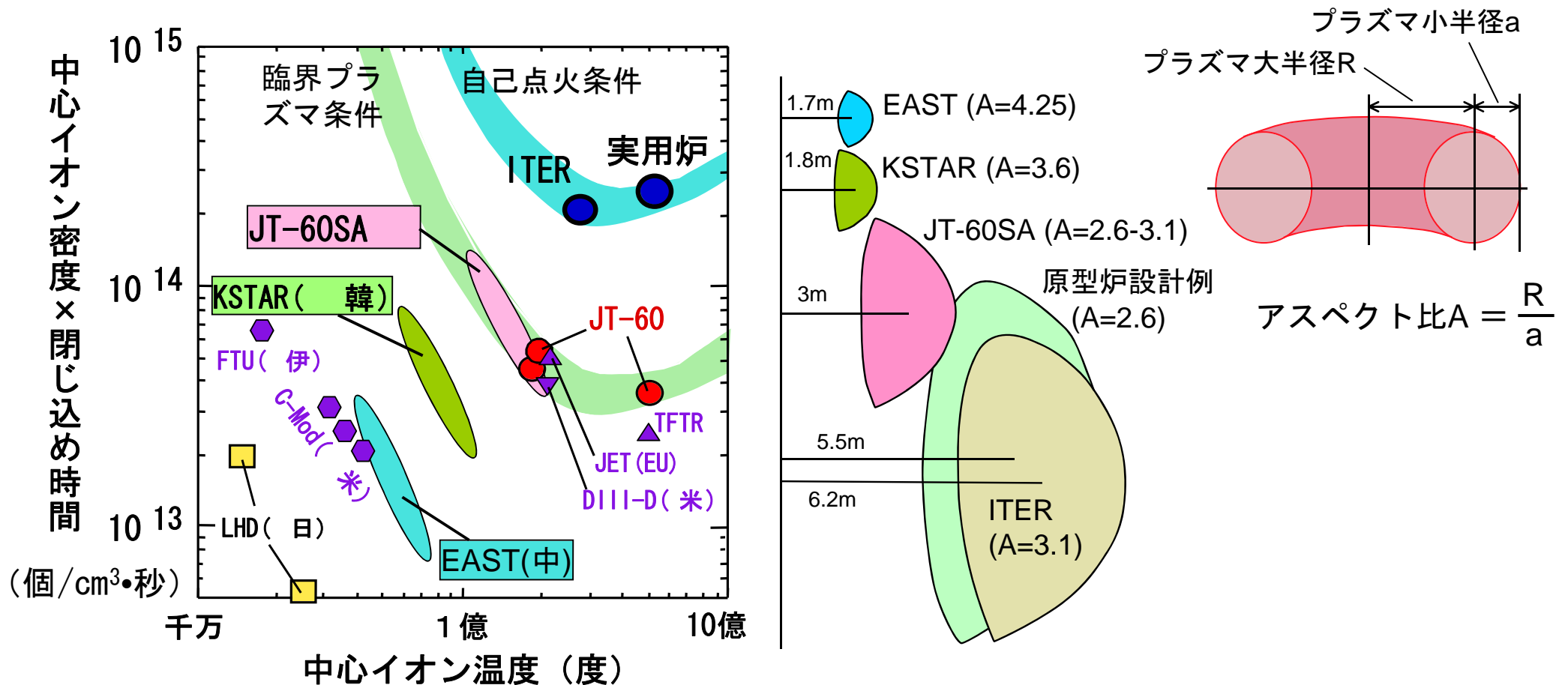
2年に1度世界中の核融合研究者が集まるIAEA核融合エネルギー会議(核融合オリンピック)で、ここ14年間で開催された7回の会議中6回で論文数最大(特に、重要で注目度の高い口頭発表件数が多い)。



5.2 JT-60SAの国際的寄与(独自性、補完性)

ITER支援研究：JT-60SAは、ITERを除く世界の他の超伝導トカマク装置より高いプラズマ性能を有し、ITERに対して最も大きな貢献が可能。

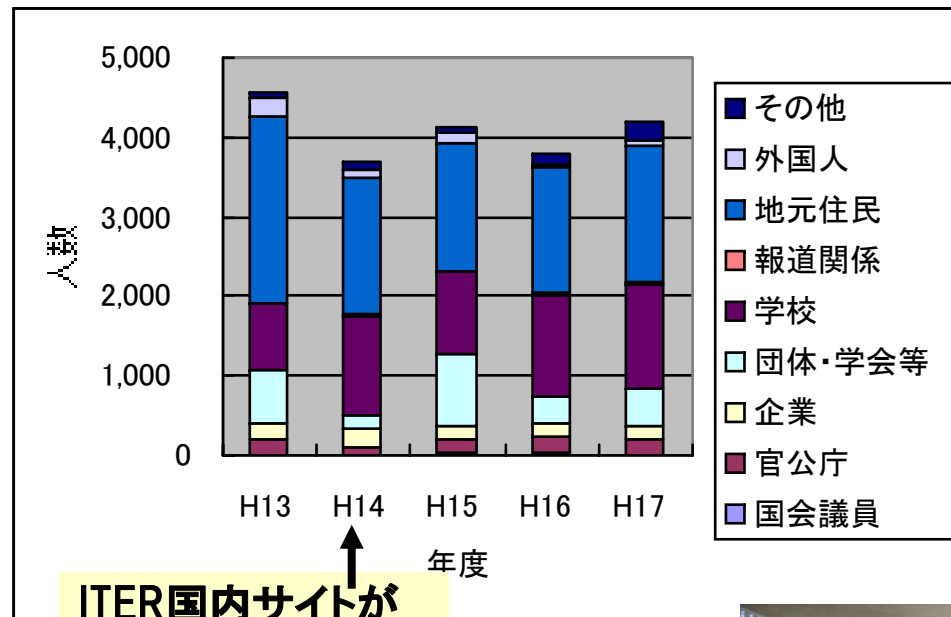
ITER補完研究：JT-60SAは、原子力機構提案の原型炉設計に最も近いプラズマ形状(アスペクト比)の超伝導トカマク装置で、それに対して最も大きな貢献が可能。



6. 社会的視点からの寄与

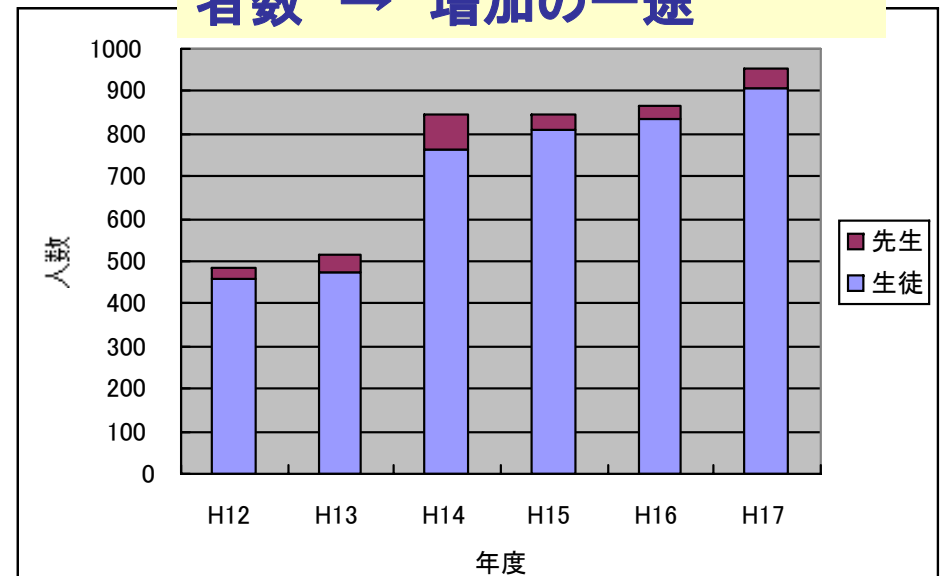
6.1 社会への説明責任を果たす形態と実績(1) —JT-60施設への見学者受入れ—

JT-60の見学者へ現場の研究者が最新説明。社会への説明の一環。
見学者総数の推移→堅調



ITER国内サイトが六ヶ所村となり
 地元見学者減少

小中高の生徒と先生の見学者数 → 増加の一途



施設の安全を確保して、土日の見学者も積極的に受け入れ。



研究者による中学生への説明