
QUEST プロジェクト

高瀬雄一
東京大学

QUEST 10周年記念 研究会
2018年7月20日
九州大学 応用力学研究所 2階会議室

QUEST発足の経緯と日本のST研究

全日本ST研究計画ホームページ

<https://nicollas.nifs.ac.jp/info/st/index.html> (nicollas password が必要)

核融合研究WG

- 報告書「今後の我が国の核融合研究の在り方について」(2003.1.8)

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1213875.htm

プラズマ境界力学実験装置検討会

- 九州大学「**プラズマ境界力学実験装置**」検討会報告 岸本委員長 (2005.2.9)
- 九州大学「**プラズマ境界力学実験装置**」報告書概要 (2005.3)
- 九州大学「**プラズマ境界力学実験装置**」報告書 (2005.3)
- **運営会議の審査結果** (2005.6)

全日本ST研究計画

- **全日本ST研究計画について** 高瀬代表 (2005.4.21)
- **核融合科学研究所双方向型共同研究推進専門部会** (ST専門部会) (2006.11.28)

全日本ST研究計画について (NIFS所長より)

<https://nicollas.nifs.ac.jp/info/st/index.html>

•科学技術・学術審議会・学術分科会・基本問題特別委員会に設置された**核融合研究ワーキンググループ**(WG)による審議結果を受け、大学における新たな研究活動の発展を実現するため、核融合科学研究所双方向型共同研究が発足しました。その最初の試みとして、九州大学から提案された新装置を審議するため、双方向型共同研究委員会のもとに「**九州大学プラズマ境界力学実験装置検討会**」(九大ST検討会)が設置され、全日本規模での活発な検討・議論が推し進められました。その結果、

- (A) WGの報告書の提言に従って、大学を中心とした先駆的球状トカマク研究をさらに発展させるために、**全日本的な連携による新しいST研究体制を構築すべき**である。
- (B) 全日本ST研究体制における主要装置として九大提案の「**プラズマ境界力学実験装置**」の建設を推進すべきである。

と結論されました。

- (A)を実現するため、「**全日本ST研究計画**」が発足し、その運営母体として全日本ST研究計画運営委員会が結成され、九大ST検討会の活動を引継ぎました。
- (B)の新装置はその後**QUEST**と命名され、**定常運転下におけるプラズマ壁相互作用の研究を担う装置**と位置づけられ、九大において平成17年度から3カ年計画でその建設が開始されました。

全日本ST研究計画について (NIFS所長より)

- 同時期に東大では、科研費により、プラズマ合体による超高ベータSTプラズマ生成および外部加熱によるその維持を目指した新装置UTSTが建設され、日本のST研究戦略の両輪である超長時間領域および超高ベータ領域への研究の発展が始まろうとしています。これらの研究を効率よく進めるためには、日本の大学が保有する特徴ある小型装置を活用した先駆的な研究、理論・シミュレーション研究との密接な連携および共同運用が必須であり、双方向型共同研究による支援が不可欠です。これらを可能にするため、スーパーSINETを利用した「全日本STバーチャルラボラトリー」のインフラ整備も着実に進んでいます。
- 平成18年11月には、双方向型共同研究委員会のもとに「双方向型共同研究推進専門部会」がSTの分野において初めて正式に設置されることとなり、全日本ST研究計画運営委員会の活動を引継ぎ、活動を開始しました。一方、日本にはない規模の大きなST装置(プラズマ電流にして1 MA以上の装置で、アメリカのNSTX、イギリスのMASTがあります)を国際協力で利用できる枠組みの整備も重要です。2007年2月20日には、STの研究協力に関する国際エネルギー機関(IEA)の実施協定が新たに発足しました。当初の参加極は、日本、アメリカ、EUですが、今後他のST研究を行っている国(ロシア、ブラジル、中国、イタリア)も参加してくるでしょう。このようにST研究は双方向型共同研究の支援のもと、大きな転機を迎えており、今後新たな展開が期待されます。

九州大学「プラズマ境界力学実験装置」検討会 検討結果報告

岸本 泰明¹⁾、検討委員メンバー

1) 京都大学大学院エネルギー科学研究科

検討会設立の経緯

九州大学応用力学研究所 から「核融合研 双方向型共同研究委員会」に提案:

- 現 TRIAM-1M のシャットダウン
- 「プラズマ境界力学実験装置」

低アスペクト比トカマク(球状トカマク(ST))配位をベースに製作

- ✓ ST の長時間放電実現の研究開発と学術基盤の構築
- ✓ ST の特性を生かしたプラズマ・壁相互作用研究の展開

提案の位置付け

- 核融合研究 WG 報告書 「今後の我が国の核融合研究の在り方について」
「**斬新な研究の展開による装置の提案**」(核融合研究計画の重点化の方策)

第1回検討会での議論

- 高ベータ・定常化研究
→ 「**球状トカマクによる高ベータ研究を大学レベルでの先駆的研究と国際協力を活用して展開**」(資料5「重点化計画の評価結果」)

委員会の目的・構成・開催日程

検討会設立の目的：

- 九大提案の「プラズマ境界力学実験装置」を学術的・技術的観点から検討
(含：WG 報告書との整合性)
- 計画の“目的”及び“意義”を全国共同利用の観点から検討

委員・オブザーバの構成：

- ST に関わる実験及び理論・シミュレーション研究者
(cf. 外国人委員：Dr. Martin Peng：NSTX program director)
- 定常化(含：ダイバータ/PWI)研究に関わる研究者
- 装置設計に関わる研究者

委員会の開催(計4回)：

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 第1回：平成16年 9月16日 | 第2回：平成16年10月6日 |
| 第3回：平成16年12月20日 | 第4回：平成17年 1月11日 |

検討内容に関わる背景

長時間・定常化研究の実績（核融合研究における九大の役割分担）

- 九大 TRIAM-1M による長時間・定常放電(5時間)とプラズマ制御技術の実績
- 長時間放電実現の鍵となるプラズマ・壁相互作用研究の実績
- LHDによる長時間放電・定常研究の進展

ST 研究の世界的な動向

- START(英国)が 40%トロイダルベータ値を実現
- 数MW の加熱を備えた本格的実験(NSTX、MAST)が開始
- 高性能核融合炉に向けた核融合開発の重要な一端を担う

日本におけるST研究の実績と現状

- ST 研究が初めて試みられたのは日本(東北大学)
- 目的・目標を特化した小型装置および理論・シミュレーションによる
独創性の高い研究実績

例 東大： 超高ベータ、プラズマ合体、電流立ち上げ、RF加熱・電流駆動(TST-2)

京大： 電流立ち上げ・高周波加熱・電流駆動

兵庫県立大： 同軸ヘリシー入射、先進燃料補給

新潟大・核融合研： STの平衡・安定性理論/MHDシミュレーション

日本のST研究・材料研究のポテンシャル

第2回検討会： 既存ST研究の現状・将来展望の報告（高瀬、前川、小野、永田）

第3回検討会： 理論・シミュレーション研究の現状・提言（林、石田）

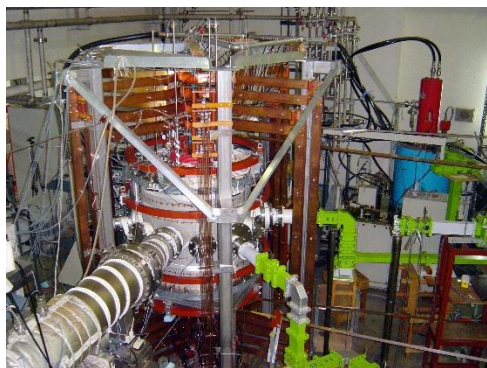
材料研究の現状・展望（吉田）



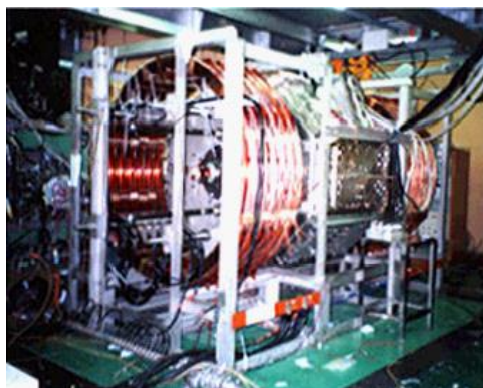
東大
TST-2



兵庫県立大
HIST

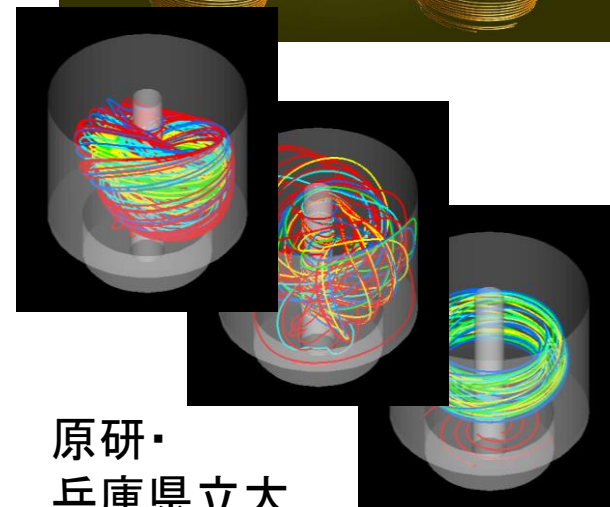
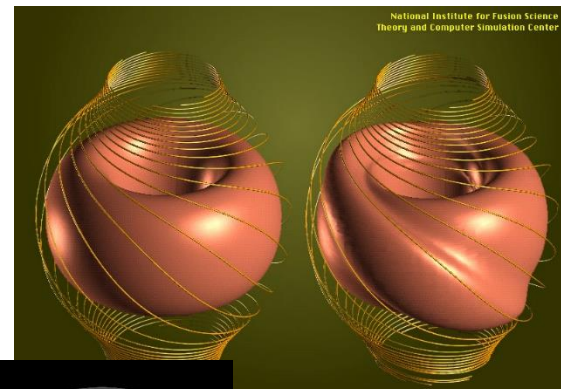


京大 LATE



東大 TS-4

核融合研



原研・
兵庫県立大

WG 報告書の視点

将来の競争力のある核融合炉実現に不可欠な2大要素研究

(A)高ベータ化研究 (B)長時間・定常化研究

- 中核装置：国内重点化トカマク装置（NCT/JT60 改修装置）
→ 高ベータ、長時間、高性能化の同時達成を目標
- 大学は独創的・革新的発想で2大要素に取り組み、学術基盤を構築
→ NCT で実現できない、より“高ベータ”、より“長時間” 運転領域の拡大と学術基盤の構築

命題：日本における ST 研究の展開 → 核融合開発の戦略上、極めて重要

- 日本における ST 研究の高いポテンシャルの維持・発展
- NSTX・MASTを中心に集約型の研究を進める欧米に遅れをとることなく、国際競争力のある目標の設定と研究プログラム(装置と体制)の構築が急務
- 「萌芽的・独創的なアイデアを積極的に伸ばす方策と人材育成の方策の確保」
「独創的なアイデアによる新たな可能性への挑戦の機会を生み出せるような仕組み・研究体制の構築」（核融合研究計画の重点化の方策）

主要な検討結果

NSTX・MASTを中心とした ST 研究の現状

- ST特有のMHD・輸送過程の理解・制御による高ベータ化研究が中心課題
- ST の長時間・定常化研究は未開拓領域



融合

- 大学等の小型装置で培った ST の基礎研究
- 九大において蓄積した長時間・定常化研究

- 高ベータ・定常化の学術基盤研究として、ST の長時間・定常化研究を今後の日本の中心課題の一つとして選択
- 全日本的な連携による新しい ST の研究体制の構築
- 既存のST装置、九州大学の新 ST 装置、ST研究者(実験、理論・シミュレーション、炉設計)の全ての研究資源を結集したST研究の全日本的なネットワークの形成により目標(STにおける高ベータ・定常)を達成する。

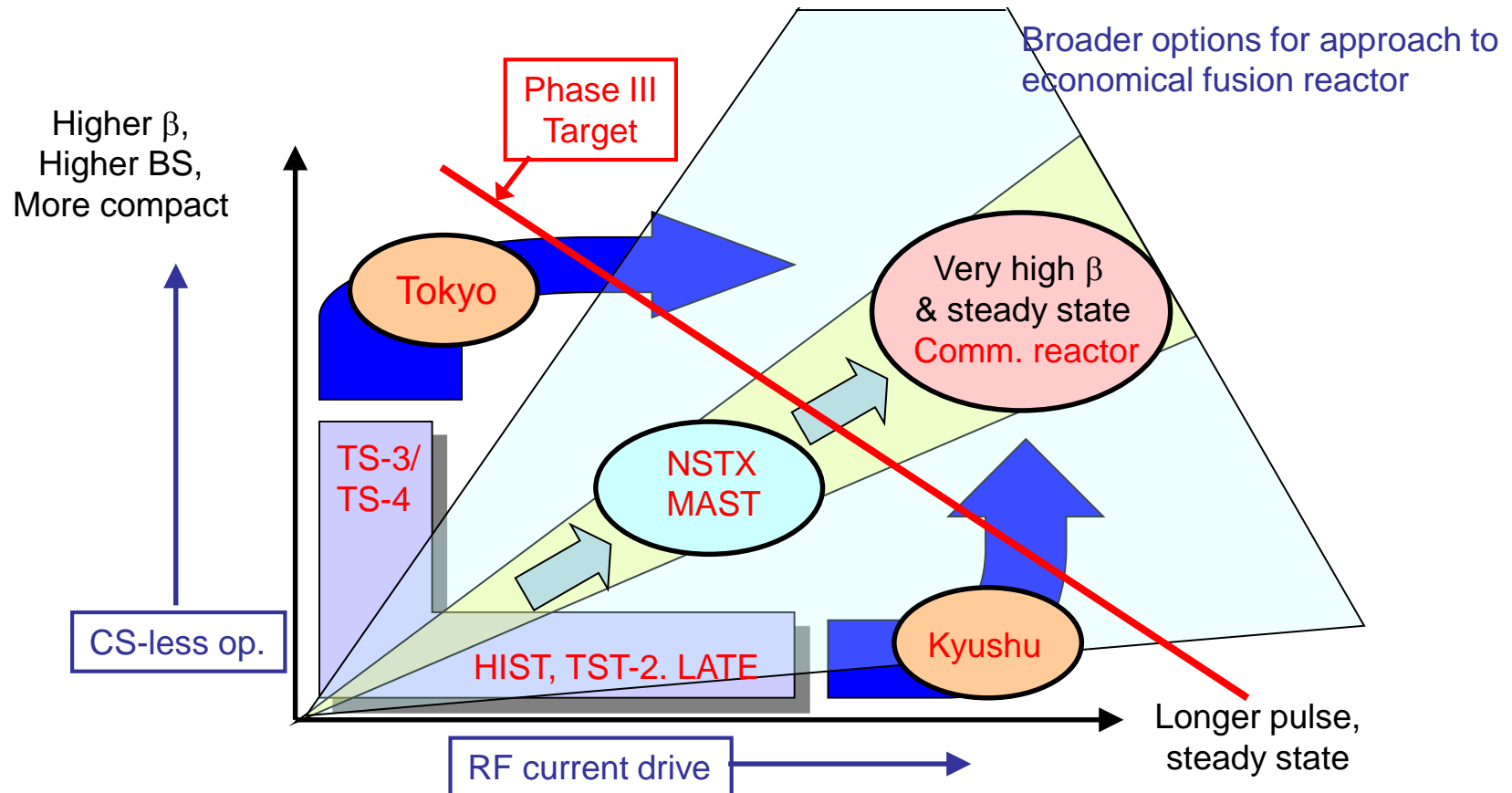
(コーディネータの設置: 東大/高瀬教授)

全日本ST体制の中での九大STの目標設定

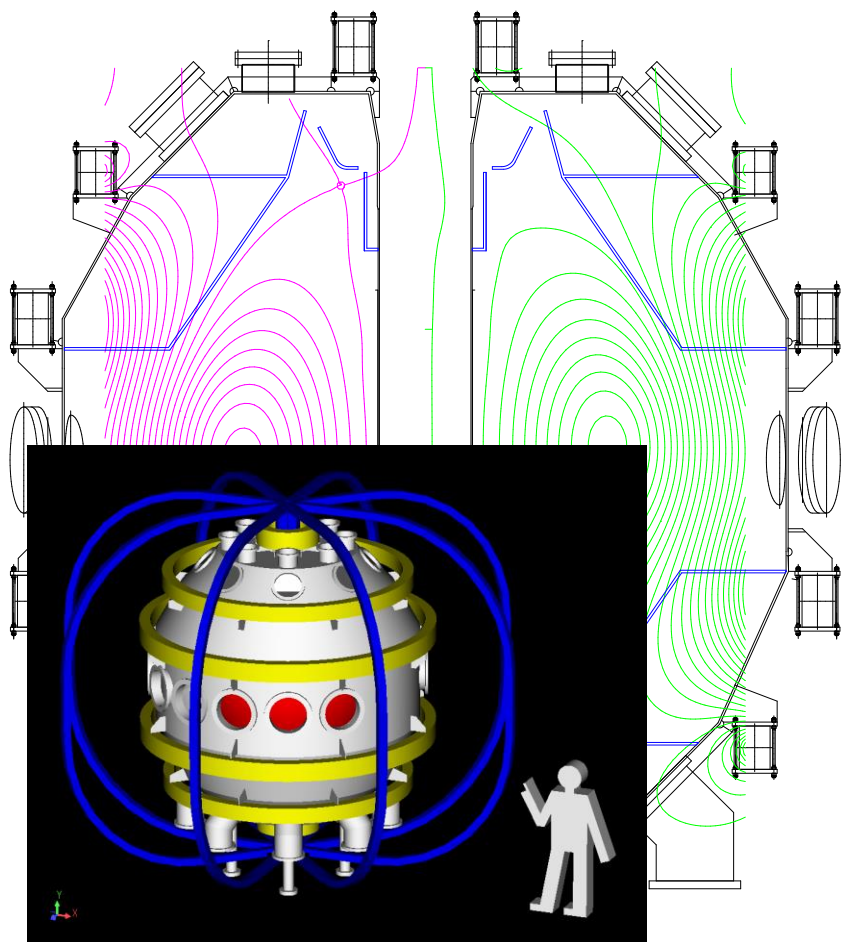
- ST の長時間プラズマ運転と定常化・制御、プラズマ生成に関わる物理の探求
- STの長時間運転におけるプラズマ・壁相互作用(PWI)とダイバータ物理の探求

Strategy of ST research in Japan

- 超高ベータの実現: $\beta=40-50\%$ 、自発電流主体、高 β 不安定性の検証・制御
- 超長時間の実現: プラズマ生成・定常電流駆動法、ST磁場に適合したダイバータ開発、長時間運転での粒子・熱負荷制御
- 高ベータ・定常プラズマの実現: CTF ($\beta=20\%$ 定常)



装置概要とパラメータ



ダイバータ板及び第一壁の形状・配置は現在設計中。

	第1期	第2期		最終目標
		(定常)	(パルス)	
大半径R(m)	0.64			
小半径a(m)	0.36			
アスペクト比	1.78			
真空容器半径(m)	1.4			
真空容器高さ(m)	2.8			
BT(T)	0.25	0.25	0.5	0.25
IP(MA)	0.02-0.03	0.1	0.3	0.5
Pinj(MW)	1	1	3	3
k	2.5	2.5	2.5	2.5
d	0.7	0.7	0.7	0.7
$\langle n_{e20} \rangle (m^{-3})$	-	0.04	0.3	0.3
$\langle T_e \rangle (keV)$	-	0.32	0.33	0.54
$\langle T_i \rangle (keV)$	-	0.32	0.33	0.54
$\tau_E (ms)$	-	2.5	6.8	10.8
$\beta (%)$	-	1.6	13	21
β_N	-	1.5	3.9	3.8
β_p	-	0.33	0.29	0.17
q95	-	25	8.2	5
$\Gamma_H (MW/m^2)$	-	6.5	10.1	13.6
$F_{rad} (%)$	-	20	40	40
$\Gamma_p (Pa \cdot m^3/s)$	-	17.5	50	31.1
f_{GW}	-	0.16	0.41	0.24
$I_{BS} (MA)$	-	0.008	0.022	0.021
$\eta_{CD} 10^{19} (A/W/m^2)$	-	0.026	0.19	0.32

装置の物理目標

第1期： H17－H21（2005－2009）

高周波による準定常運転を目指し電流駆動効率の最適化に目処

磁場：0.25T，加熱・電流駆動：0.4MW（8.2GHz）

電流立ち上げ・長時間維持 20-30kA 定常（低密度領域）

（CT入射による電流立ち上げ・粒子補給）

第2期： H22－H26（2010－2014）

金属壁による本格的な熱・粒子制御のためのダイバータを利用した定常STプラズマの実現を目指す。高ベータに向けた研究。

(1) 加熱・電流駆動パワー：1MW、プラズマ電流：100kA

準定常運転、密度： $0.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

(2) 加熱電源増設 NBI：2-3MW、プラズマ電流：0.3MA、

パルス運転（～1秒）、ベータ値：10%

最終目標 ベータ値20% 定常

（最終目標達成の時期は設定せず、個々の要素技術の向上を目指す）

ST理論・シミュレーション研究からの提言

林隆也・石田昭男委員

物理実験装置としての意義 (Mission+物理)

(閉じ込めの物理開拓、他分野を含めより広範な研究者の関心を得る)

物理開拓として意義があり、国内理論・シミュ研究の即戦力潜在パワーがある
課題例

1. 高速粒子駆動型不安定性の物理(核反応模擬)
2. 周辺局在モード(ELM)のダイナミクス(爆発現象)
3. 緩和現象・自己組織化・リコネクション(普遍性)
4. 乱流構造・輸送ダイナミクス(揺らぎの物理)

背景： 現状では、ST関連の国内理論・シミュ研究者層は薄い。
しかし、実験と理論・シミュ研究の連携は重要。
理論・シミュ研究者の自由な参加、世界的インパクトめざす。

要望： 理論・シミュとの比較のため、計測を充実してほしい。

運営会議の審査結果(2005.6.1)

- 自然科学研究機構 核融合科学研究所では、全国のプラズマ・核融合分野の研究活動の一層の活発化を図るため、平成16年度より「**双方向型共同研究**」を開始したが、この中において、九大から提案された新装置を審議するため、双方向型共同研究委員会のもとに「**九州大学プラズマ境界力学実験装置検討会**」を設置し、全国的規模での活発な検討・議論を推し進めてきた。
- その結果、九大提案の新装置「**プラズマ境界力学実験装置**」は、学術審議会のもとでの核融合研究ワーキンググループの報告書(平成15年1月8日)の提言の中の「**斬新な研究の展開の提案**」に対応するものであり、さらに、今後のわが国の球状トカマク研究の総合的推進にとっても重要であって『**提案として妥当である**』と結論づけられた。この結論を受け、双方向型共同研究委員会及びこれに続く共同研究委員会で審査を行った結果、双方向型共同研究の中心装置として建設することが妥当とされ、運営会議に提案された。
- 6月1日に開催された運営会議で、「**プラズマ境界力学実験装置**」研究計画は、**既存の球状トカマク装置実験と連携して双方向型共同研究体制の下で実施することが、全国共同利用の観点から適切であると判断され、最終的に承認された。**

全日本ST研究計画 第1回会合 (2005.4.21 @京大)

All-Japan ST Research Program
- A New Initiative in University Fusion Research -

Y. Takase
Graduate School of Frontier Sciences
The University of Tokyo

1st Meeting of the All-Japan ST Research Program
Kyoto University
April 21, 2005

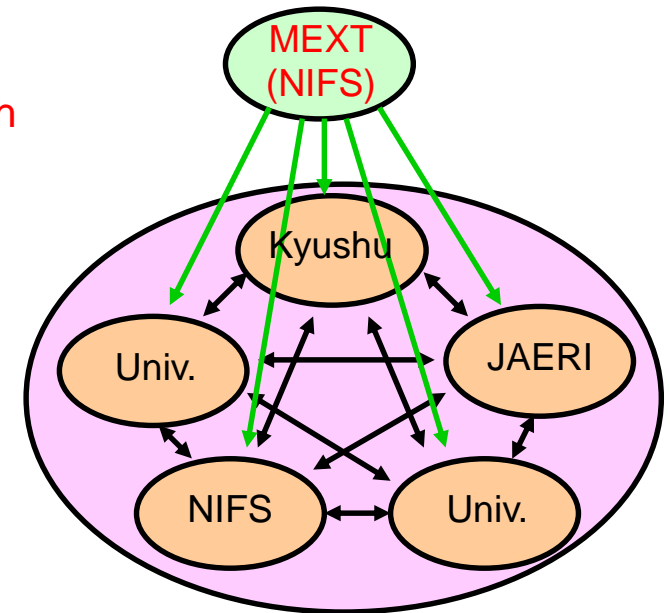
Mission of the All-Japan ST Research Program

- Role of university research in the prioritized tokamak program
 - establish the **scientific basis** for achieving **ultra-high beta** and **ultra-long pulse**
 - unique research through **creativity and innovation** on several fronts are necessary
 - complement the mainline tokamak research (JT-60, NCT) in contributing to the scientific and technical bases for practical and economically competitive fusion power
- Appropriate research elements for universities to focus on
 - physics of **very high beta** (order 1) plasmas
 - development of **start-up, current drive, and control** techniques
 - physics of **steady-state** operation

Elements should be developed on several devices optimized for each element
Integration should be demonstrated on an appropriately upgraded device in Phase III.
- Academic contributions
 - Prominent **plasma dynamics** due to low aspect ratio and high beta
 - Superiority of plasma as a **kinetic medium**
 - A **new framework** of theory and simulation which are qualitatively different
 - Strong impact on other branches of science, such as space and astrophysics
 - New opportunity for scientists from many disciplines to collaborate

Requirements of the National ST Research Program

- Must be internationally competitive
 - Significant contributions to international collaborations (IEA IA, US-J, ITPA)
 - Diverse innovative research contributions by universities
 - Continuation of innovative contributions can be guaranteed by small investment
- A new form of collaboration
 - Establishment of a **national network of ST research**
 - Collaboration must be **bi-directional**: sharing of personnel, research funds, information
 - Integration of **existing devices + new device + theory/simulation**
 - Utilize international collaboration in addition to domestic collaborations
- Transparent project management
 - Wide solicitation and fair evaluation of proposals
 - Prioritization based on nation-wide optimization
 - Appropriate evaluation of achievements



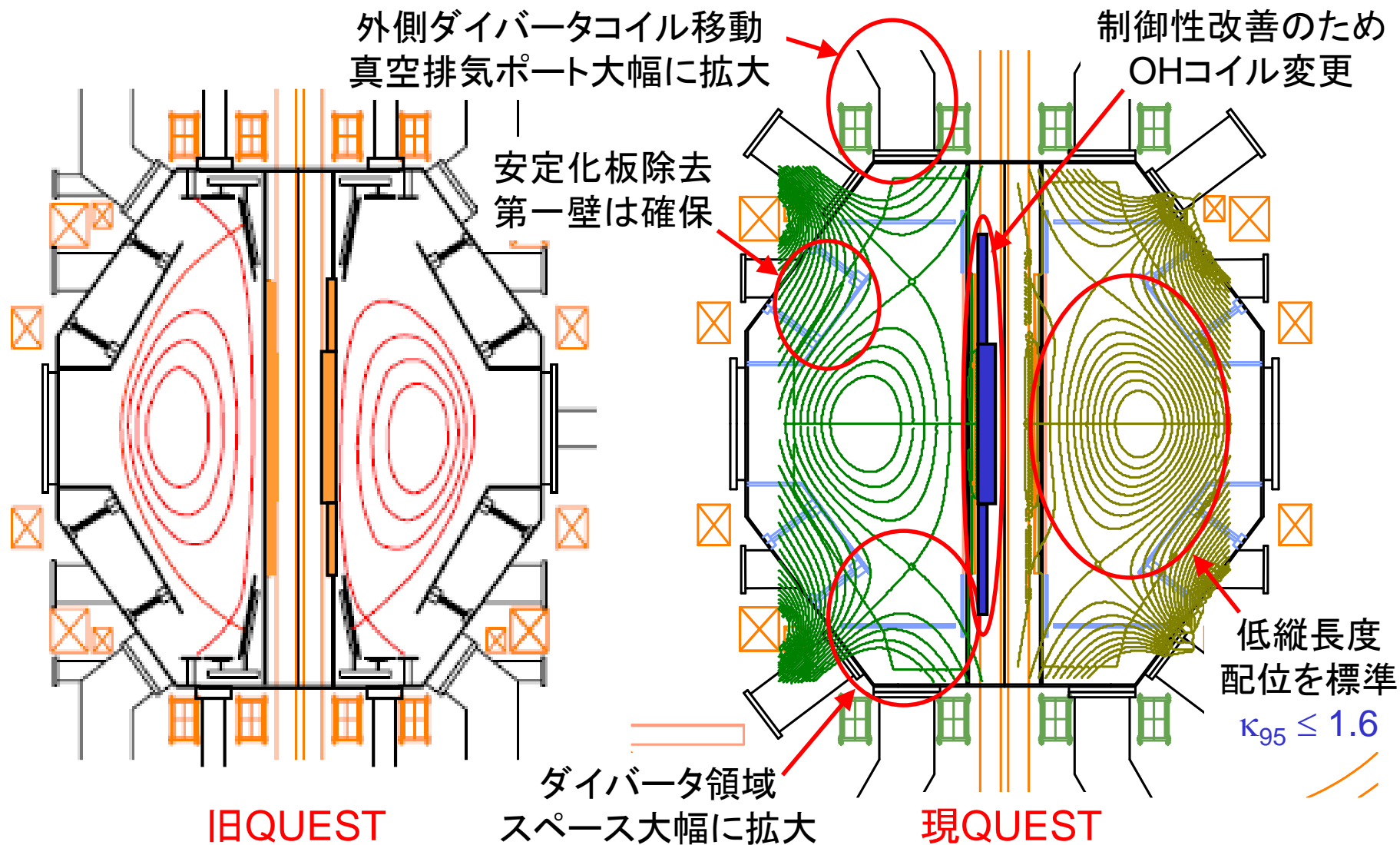
Proposed Mission of the Kyushu ST

“Plasma Boundary Dynamics Experimental Device”

- A Key Node of the All-Japan ST Research Program
 - Managed by the All-Japan ST Research Team
- Long Term Goal:
Develop the **scientific basis** for achieving a **steady state at high beta** (~20%)
- Scientific Goal:
Study steady-state issues (exceeding the **wall equilibration time**)
 - Non-inductive current drive
 - Heat and particle control
 - Divertor physics
 - Plasma-wall interaction
- Specific Goals:
 - Phase I (year 1-5): Establish the basis for sustained operation
 - at low n_e ($\leq 10^{19} \text{ m}^{-3}$) and low I_p (20-30 kA)
 - Phase II (year 6-11): Progress towards higher current and higher beta
 - 100 kA (steady state)
 - 10% β (short pulse)

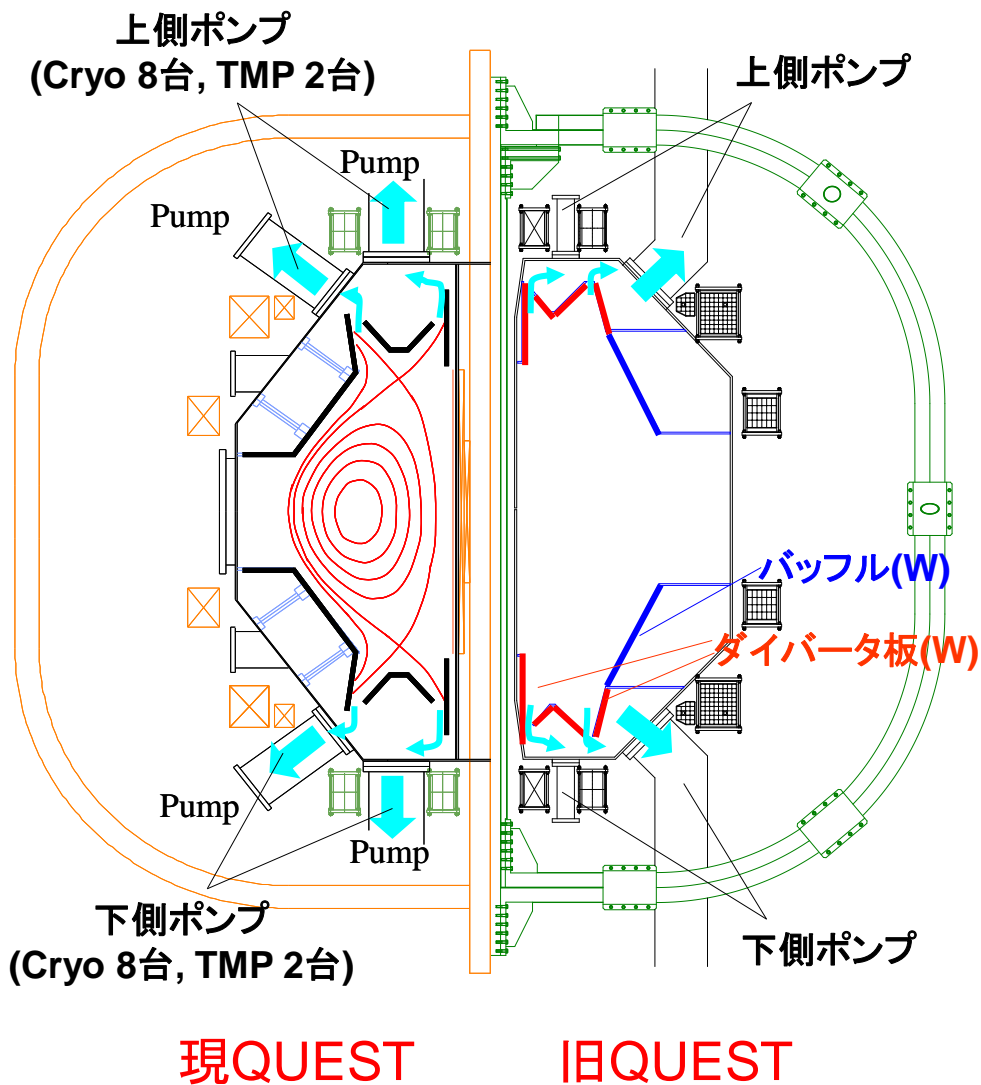
双方向型共同研究促進検討会 QUEST装置設計検討会

QUEST装置設計変更のまとめ



双方向型共同研究促進検討会 QUEST装置設計検討会

標準閉ダイバータ配位案



plasma	major radius R	0.68 m
	minor radius a	0.40 m
	aspect ratio A	1.7
	elongation κ_{95}	1.6
vac. ves.	diameter	2.8 m
	height	2.8 m
divertor	inner leg pol. length	0.43 m
	outer leg pol. length	0.44 m
	outer flux expansion	1.2

高温壁バッフル板(W)
(T: 300~500°C)

ダイバータ板(W)
第一期: Open (平板)
第二期: Closed
(T: ~500°C)

核融合科学研究所双方向型共同研究推進専門部会 (ST専門部会) 第1回会合 (2006.11.28@つくば)

28 November 2006 @ Tsukuba Kenshu Center

Agenda

- Establishment of Bi-Directional Collaboration Research Promotion Subcommittee (Komori)
 - Functions and responsibilities
- National activities (Takase, ...)
 - Encouragement of innovative research and collaborative research
 - TST-2, TS-3/4, UTST, LATE, HIST, Nihon U., CPD, QUEST, ...
- International activities (Peng)
 - Research on large ST devices and international collaborations
 - IEA Implementing Agreement
- Role of Subcommittee and future activities (Takase)
 - Strategy of Japanese ST research
 - Effective utilization of Bi-Directional Collaboration
- Others

Reorganization of Japanese ST Research Following Recommendations of Fusion Research WG

- A new form of collaborative research

All-Japan ST Research Program

Transformation from individual research to
nation-wide coordinated research

- Execution of Research

All-Japan ST Research Group (formed in 2005)

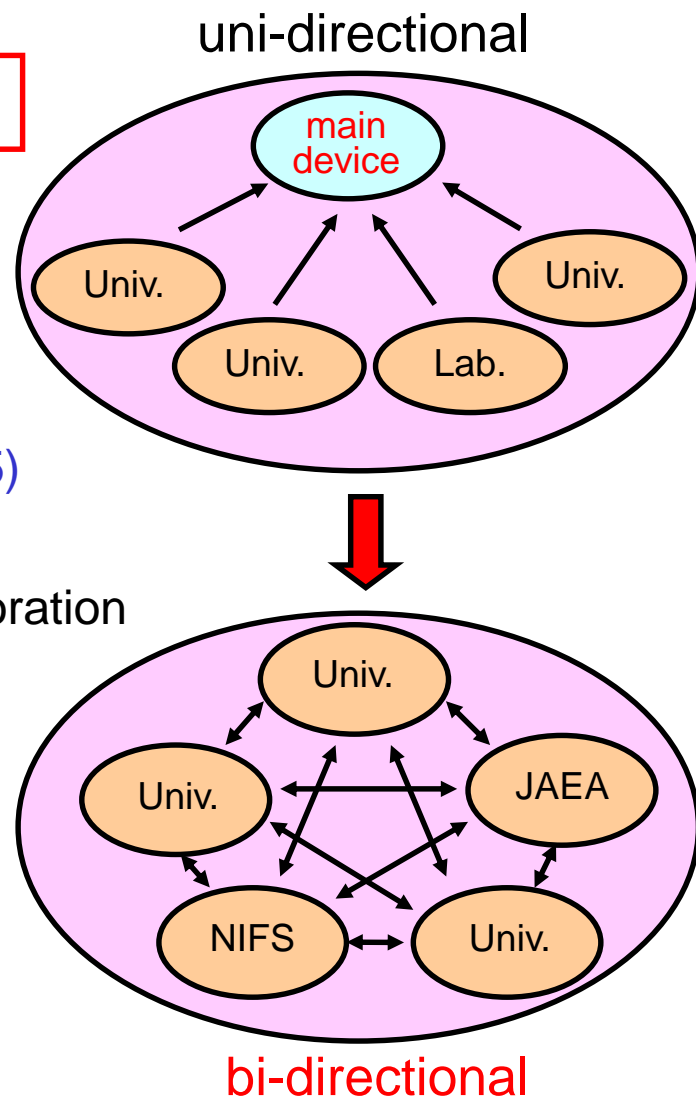
- All interested ST researchers
- Supported by Bi-Directional Research Collaboration

- Coordination of Research

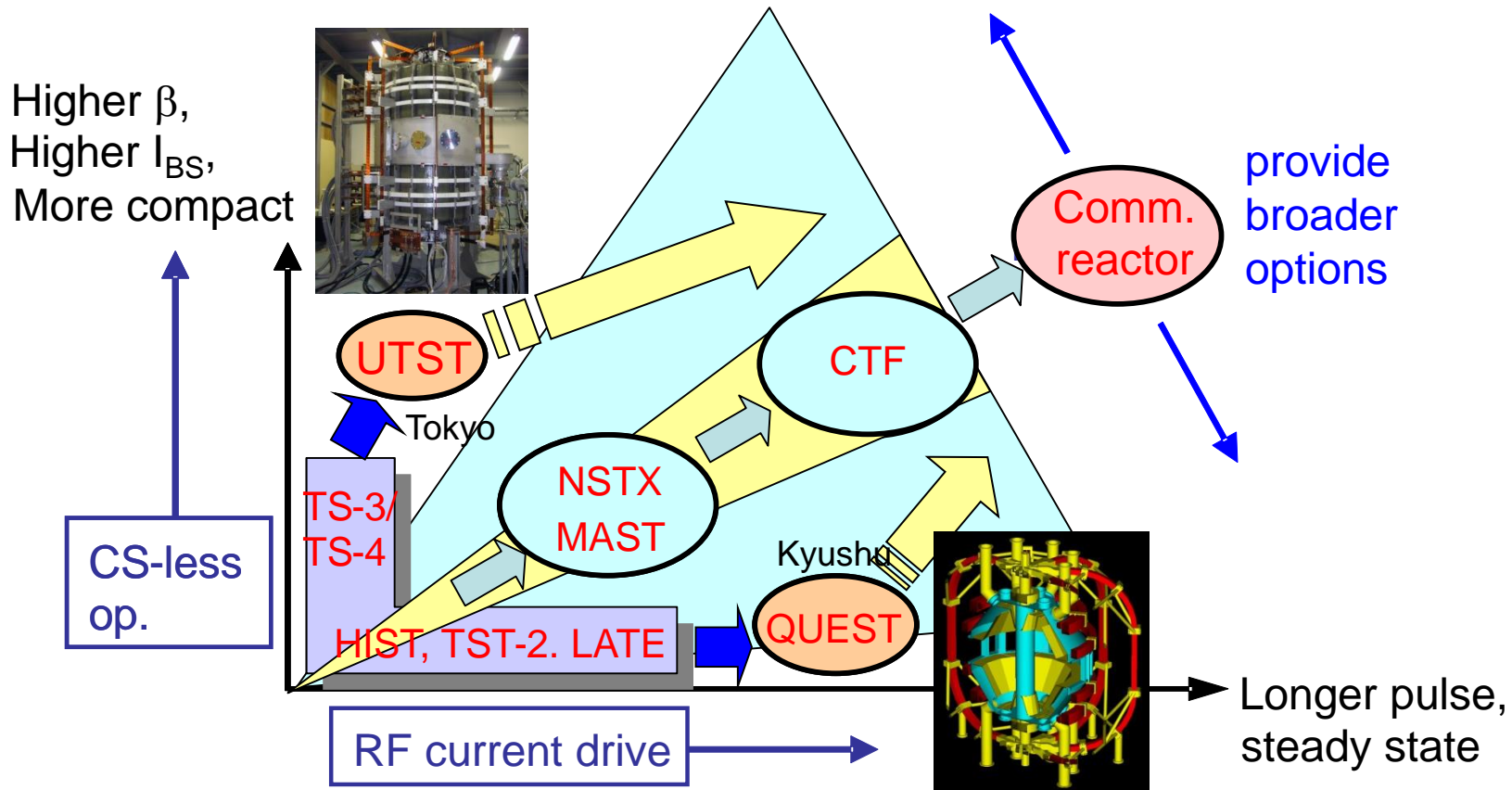
All-Japan ST Research Steering Committee

➔ Bi-Directional Collaboration Research
Promotion Subcommittee (formed in 2006)

- Representatives of ST research groups



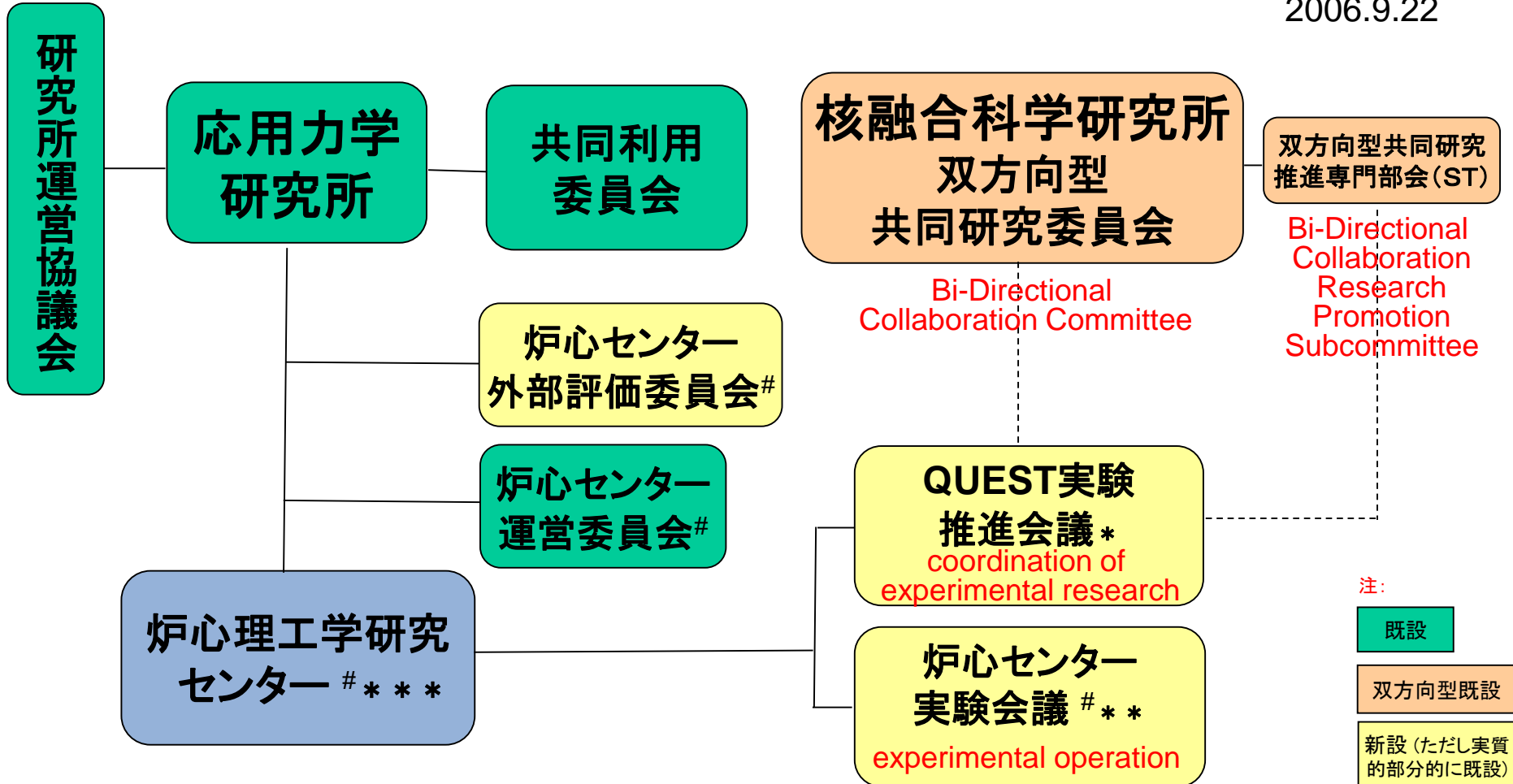
Strategy of the All-Japan ST Research Program



- **Japanese research** should concentrate on broadening future options by innovation
 - Ultra-high β (Tokyo)
 - Ultra-long pulse (Kyushu)
 - CS-less start-up, new current drive & fuelling methods (Kyoto, Hyogo, etc.)
- **International collaboration with NSTX and MAST**
 - Progress towards steady-state high-performance plasma

Kyushu University Bi-Directional Collaboration Research Promotion Organization Chart

2006.9.22



「炉心理工学研究センター」は、平成19年度より「高温プラズマカ学術研究センター」へと改組される。

* 「QUEST実験推進会議」は、全国のST・PWI・加熱電流駆動・計測・材料などの研究分野の研究者の協力の下に、センター内も含めて構成され実施される。主として、実験をコーディネートする。九大双方向型共同研究の外部代表者申請の審査も併せて行う。議長は学外研究者、幹事はセンターからとする。

** 「炉心センター実験運営会議」は、センター構成員ならびに全国の関連研究者の協力の下に構成され実施される。主として、双方向型共同研究の実験に係わる運用を行う。議長・幹事はセンターからとする。

注:

- 既設
- 双方向型既設
- 新設 (ただし実質的部分的に既設)

Summary

- ST makes key contributions to tokamak research
 - Need to train and supply tokamak scientists for JT-60SA and ITER
 - Innovative research at universities are crucially important
- All-Japan ST Research Program has started
 - A new form of collaboration (not centralized, but bi-directional) to realize the recommendations of Fusion Research WG, supported by Bi-Directional Collaboration of NIFS
 - Coordinated research utilizing existing devices, new devices, theory and simulation, and reactor design
- Mission of All-Japan ST Research Program
 - Main emphasis on ultra-high beta and ultra-long pulse regimes
 - Important research elements include plasma start-up, current drive, heat and particle control, and plasma-wall interaction.
- Approach
 - Unique research through creativity and innovation on several fronts
 - Complement the mainline tokamak research in contributing to the scientific and technical bases for practical and economically competitive fusion power
 - Both domestic and international collaboration should be fully utilized