

核融合エネルギーフォーラム 第3回全体会合

我が国における核融合研究開発の推進

～ITER計画、BA活動をはじめとする

我が国の核融合研究の現状を中心として～

平成21年3月26日

文部科学省研究開発局研究開発戦略官

千原 由幸



文部科学省

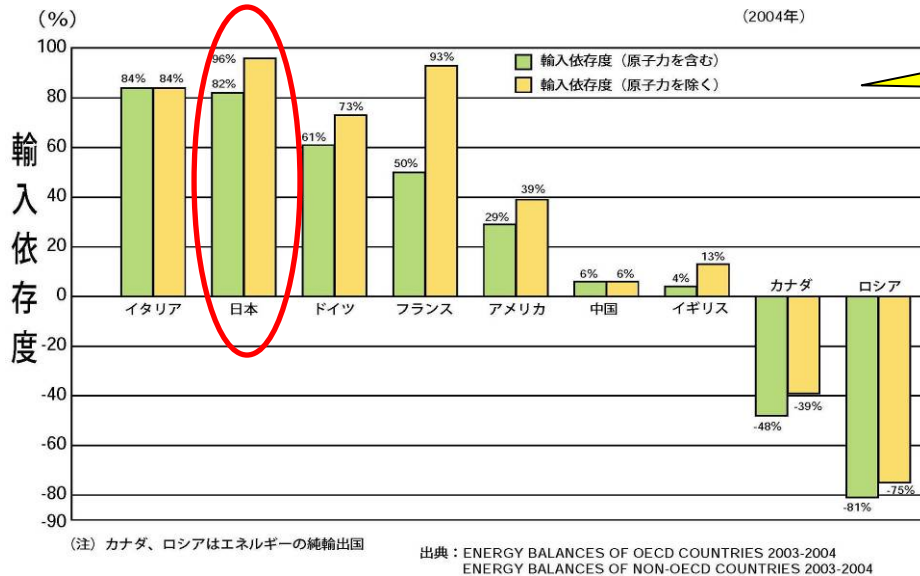
MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

1. 我が国及び世界の核融合研究

原子力分野の研究開発の重要性

＜エネルギー安全保障の観点＞

主要国のエネルギー輸入依存度



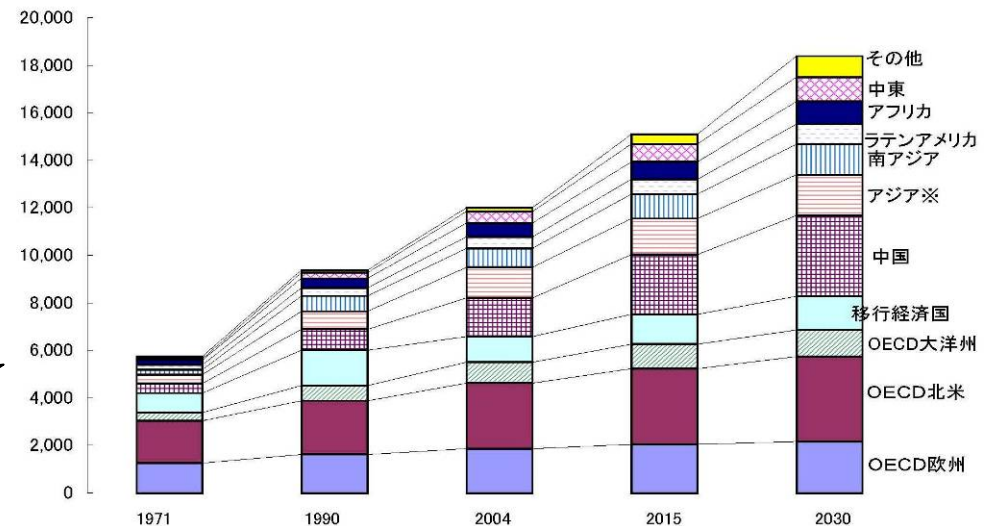
我が国のエネルギー輸入依存度は96%

世界のエネルギー需要は増加の一途

世界における一次エネルギー需要の見通し

世界における一次エネルギー需要の見通し

石油換算百万トン

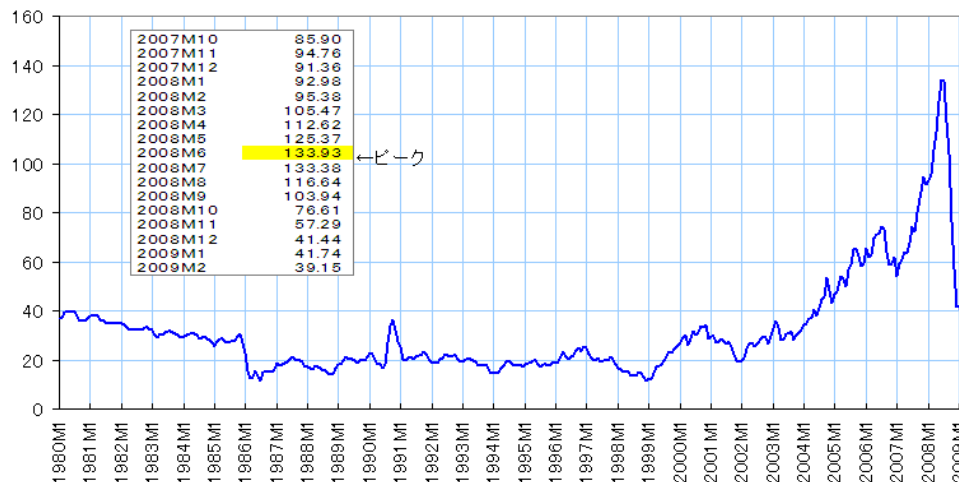


出典: IEA/WORLD ENERGY OUTLOOK 2006

原子力分野の研究開発の重要性

＜エネルギー安全保障の観点＞

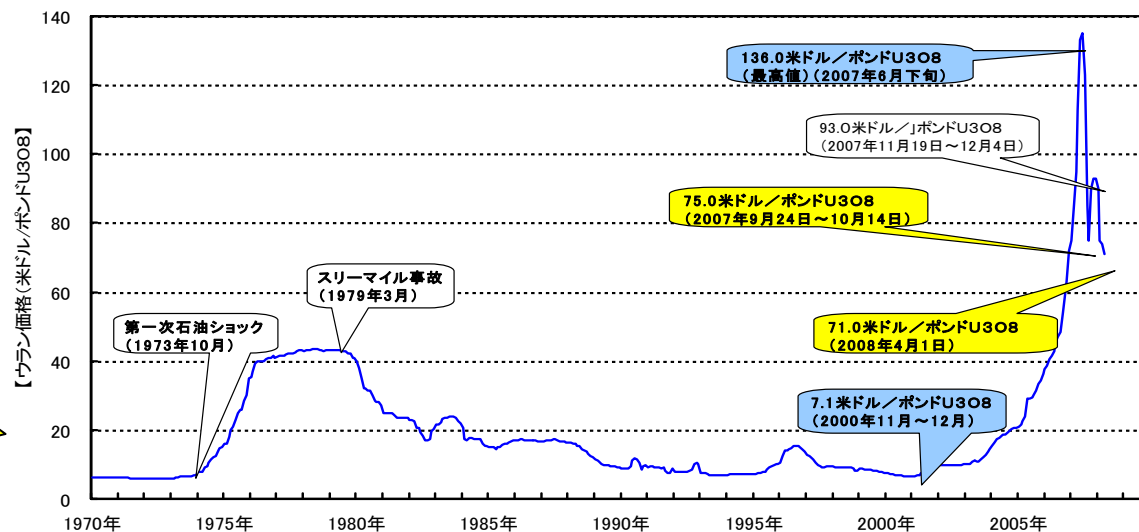
原油スポット価格の推移



近年の原油価格の急激な変動

ウラン・スポット価格の推移

US\$/lb
U3O8



欧米諸国での原子力への回帰、
BRICs諸国等における原子力への
期待
→ウラン価格の上昇

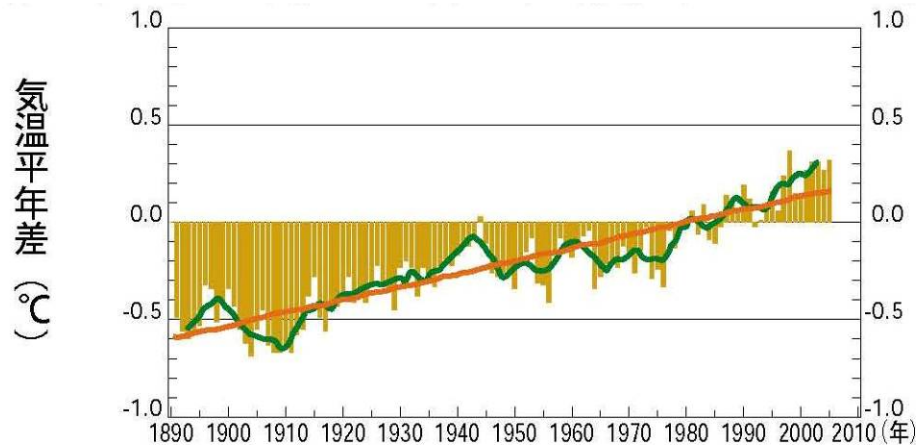
(U_3O_8 2008.5月末スポット価格 : 60.00 US\$/lb)

出典: エネルギー白書2008

原子力分野の研究開発の重要性

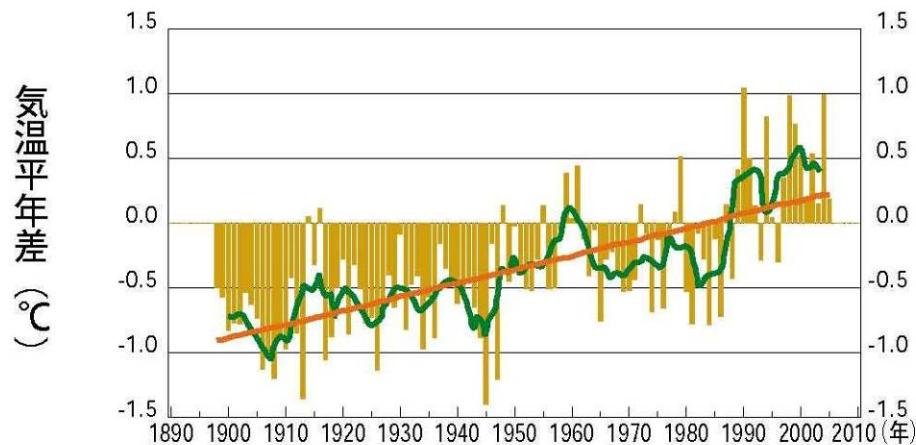
<地球温暖化対策の観点>

世界の年平均地上気温の平年差の経年変化 (1891～2005年)



棒グラフ：各年の平均気温値
折れ線：各年の値の5年移動平均
直線：長期的な傾向
(100年あたり0.66°Cの割合で上昇)
2005年解析地点 1200地点

日本の年平均地上気温の平年差の経年変化 (1898～2005年)



棒グラフ：国内17地点での年平均
気温の平年差(平年値と
の差)を平均した値
折れ線：各年の値の5年移動平均
直線：長期的な傾向
(100年あたり1.06°Cの割合で上昇)

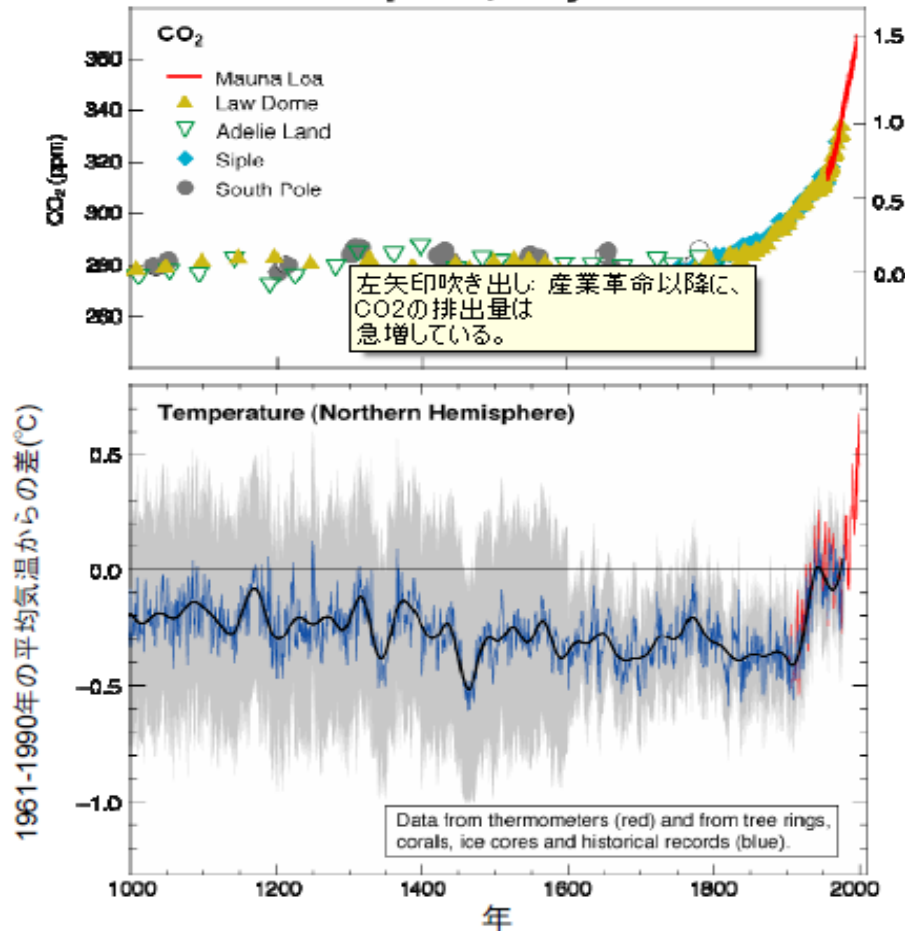
原子力分野の研究開発の重要性

＜地球温暖化対策の観点＞



4. 過去1000年前からのCO₂濃度のグラフ

The past 1,000 years



出典: IPCC第3次評価報告書

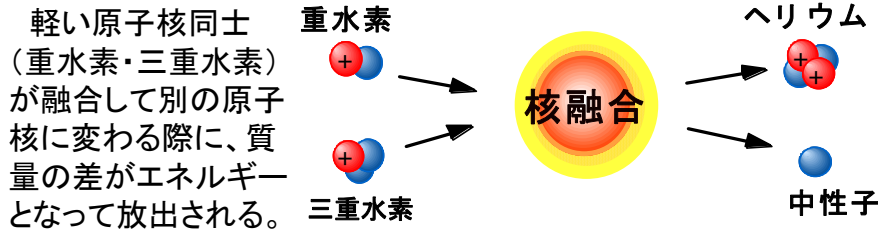
出典: 環境省作成資料

核融合研究開発の推進

【概要】

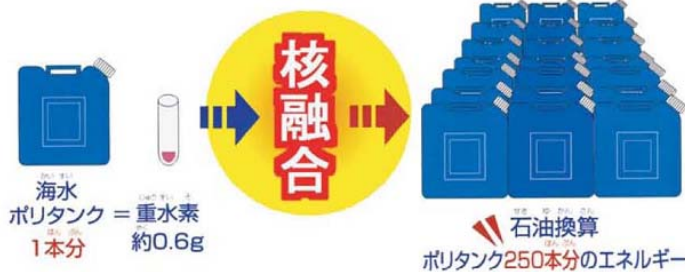
地球全体のエネルギー問題や環境問題を同時に解決する核融合エネルギーの研究開発を、長期的な観点から推進していくことが重要。

【核融合エネルギーの原理】



【核融合エネルギーの特徴】

豊富な資源



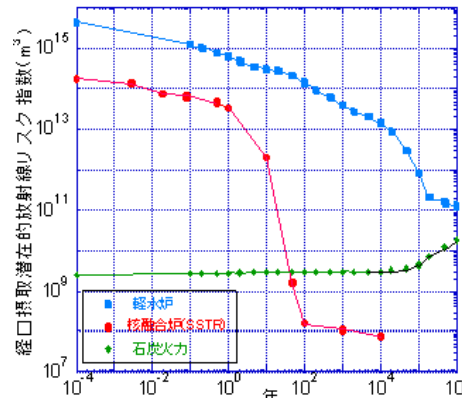
燃料資源の枯渇の恐れがない

- 燃料資源が海中に豊富に存在
- 少量の燃料から膨大なエネルギーを取得可能

※出典: 核融合科学研究所

高い環境保全性

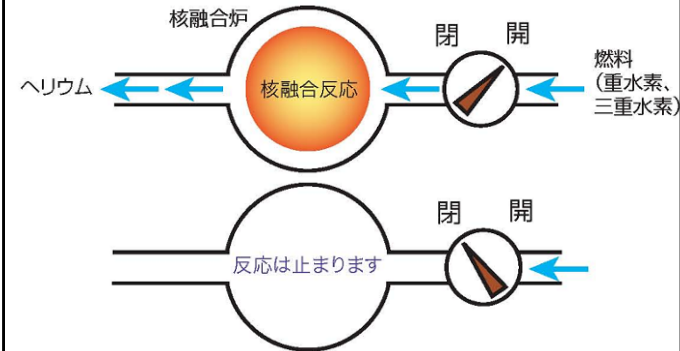
発電過程において**二酸化炭素の排出ゼロ**



※出典: 原子力委員会

高レベル放射性廃棄物が出ない

固有の安全性



核融合反応は暴走しない

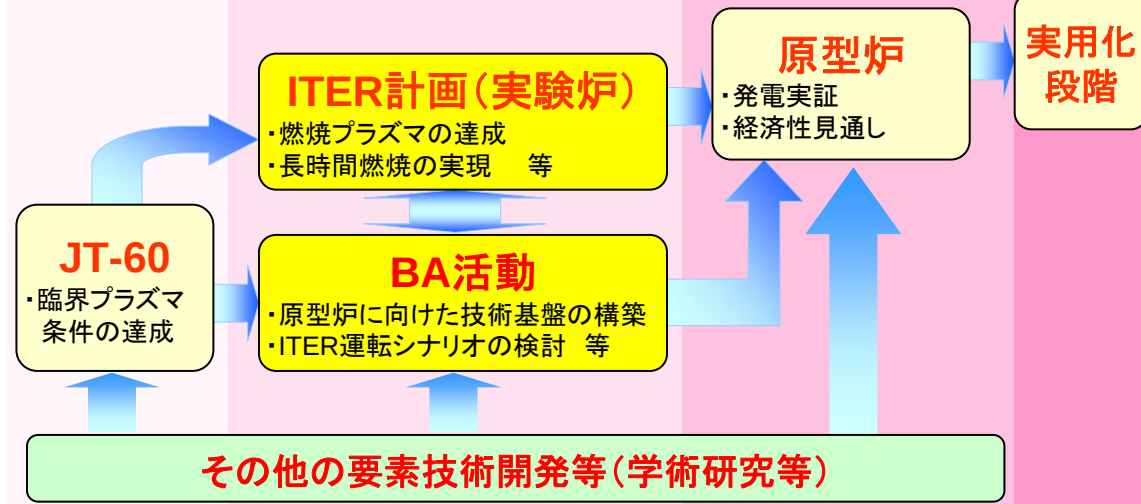
燃料供給を止めれば、自動的に反応が停止
(家庭用ガスコンロと同じ)

※出典: 核融合科学研究所

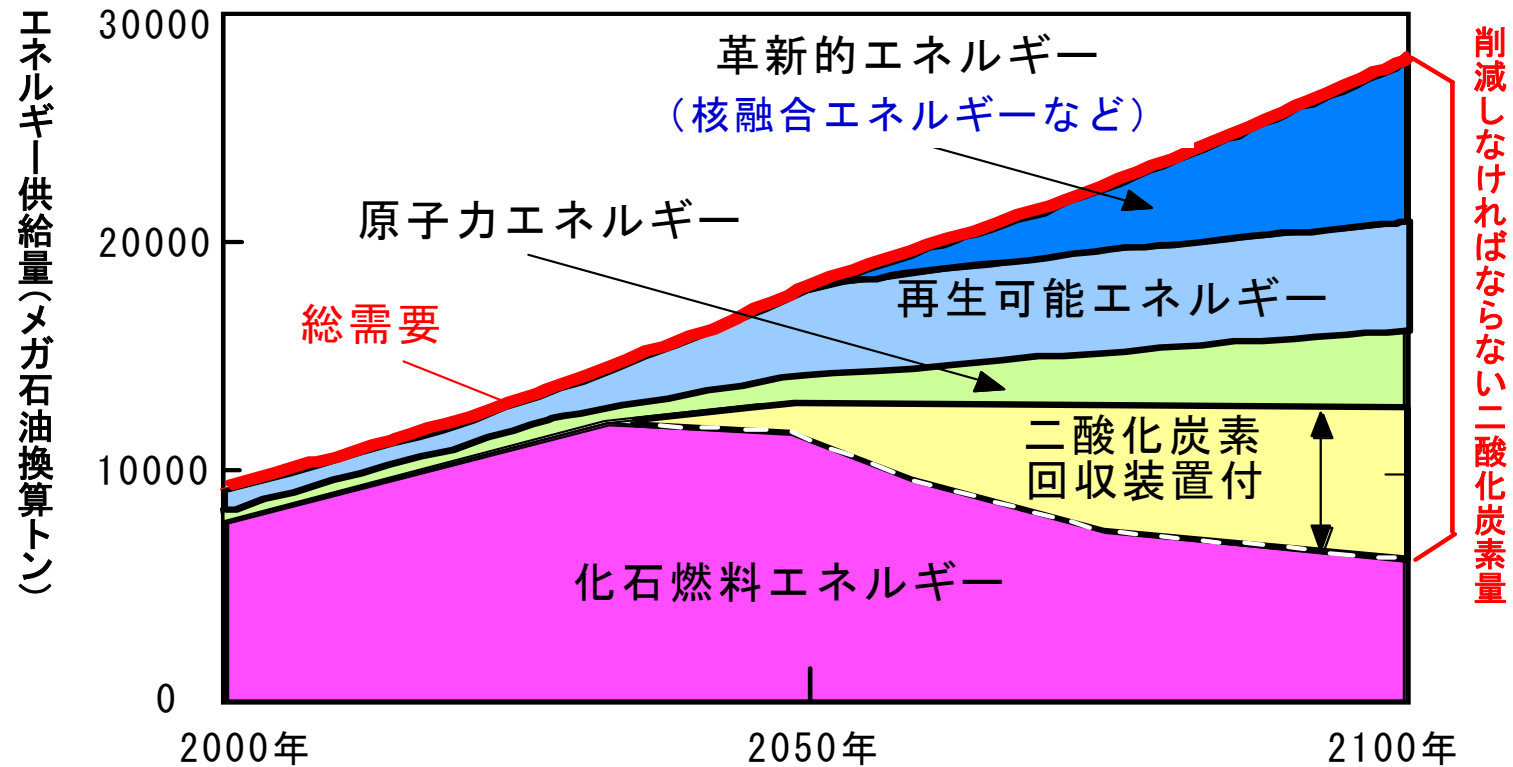
(科学的実現性)

(科学的・技術的実現性)

(技術的実証・経済的実現性)

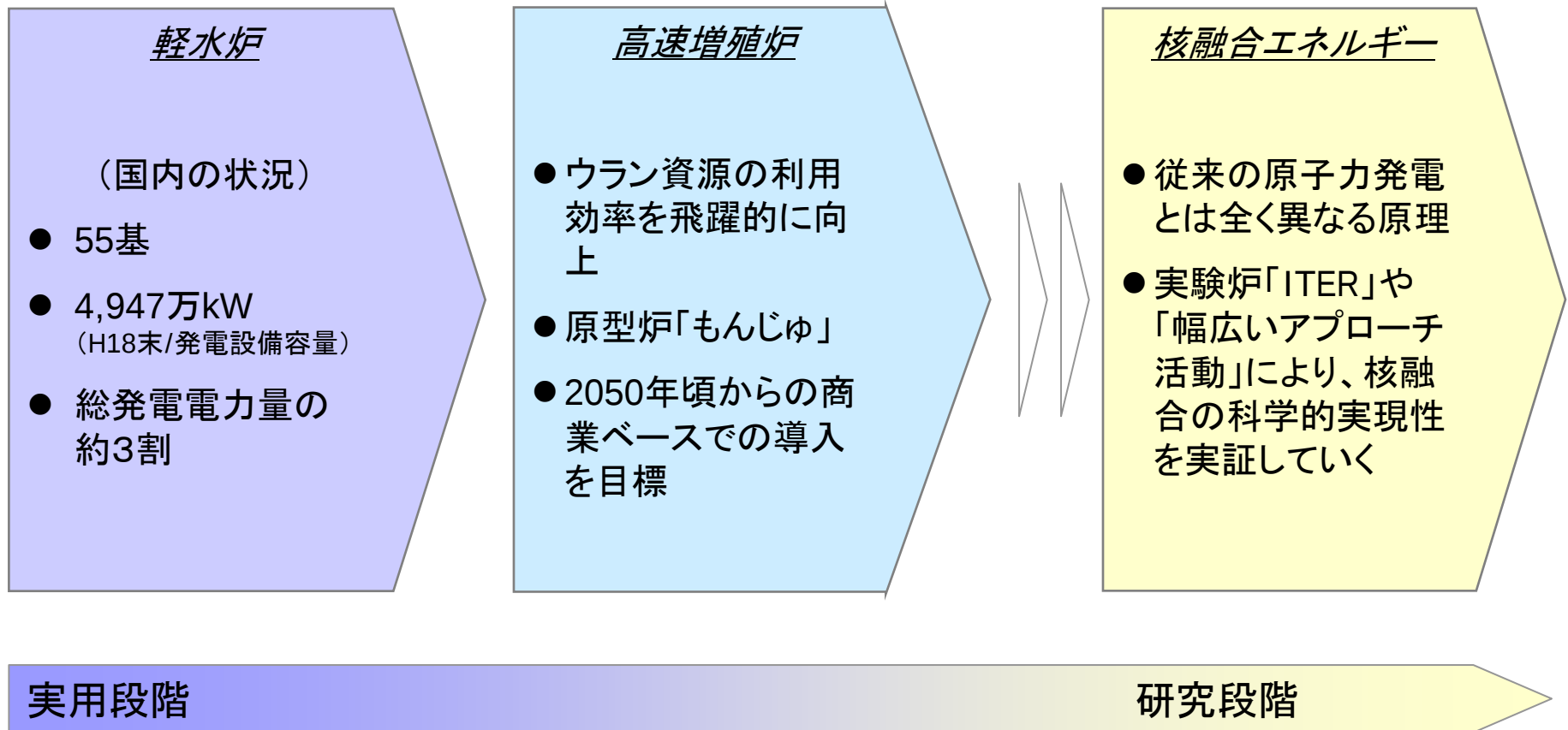


なぜ核融合？



- ・ 地球上の二酸化炭素濃度を550ppmに維持
- ・ 出典：NEDO/RITE 「地球再生計画」 (1998)

我が国の原子力エネルギー研究開発の方向性



核融合エネルギーの段階的研究開発

「2020年代初頭に原型炉段階への移行を行い、速やかに原型炉の建設を進めることができれば、2030年代から連続的な発電、安全性と経済性、運転信頼性の見通しを得ることを目的として原型炉による試験研究と改良を進めることが可能となり、今世紀中葉までに実用化の見通しを得ることも視野に入れることが可能と判断される。」－「今後の核融合研究開発の推進方策について」(平成17年10月26日)－原子力委員会核融合専門部会

技術的実証・経済的実現性

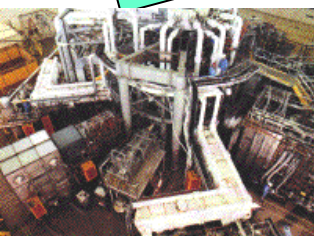
- ・発電実証
- ・経済性の向上

科学的・技術的実現性

- ・燃焼プラズマの達成・長時間燃焼の実現
- ・原型炉に必要な炉工学技術の基礎の形成

科学的実現性

臨界プラズマ条件の達成



JET (EU)

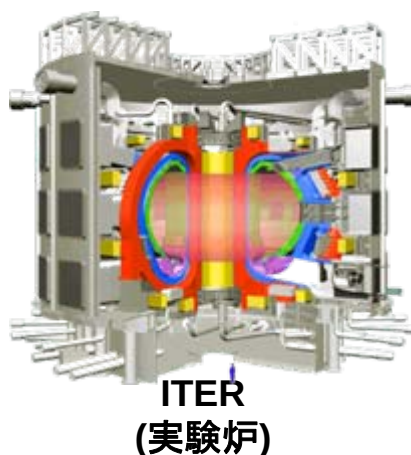


TFTR (US)



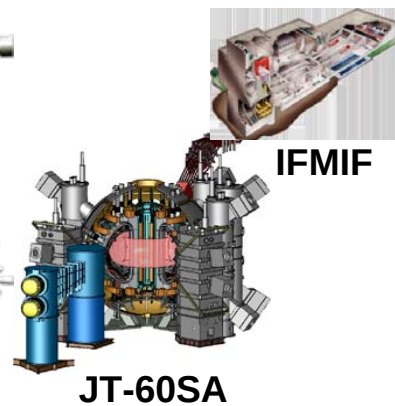
JT-60 (JA)

【主要実験装置】



ITER
(実験炉)

ITER計画



JT-60SA

BA 活動



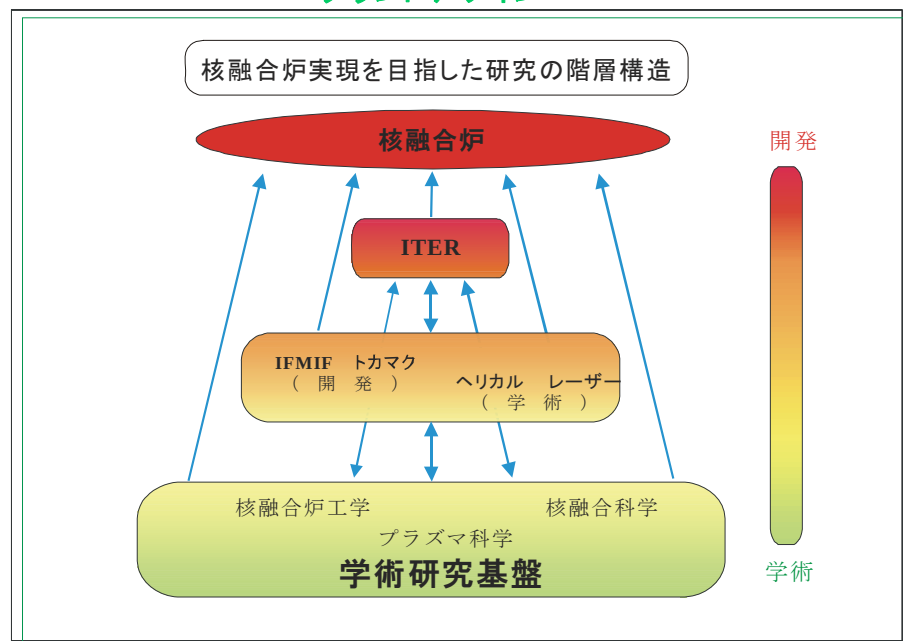
原型炉

核融合研究の基本方針

[今後の核融合研究の在り方]

今後の我が国の核融合研究の在り方について、文部科学省科学技術・学術審議会に核融合研究WGを設置し、今後10～20年先を見据えて、学術的評価に基づく核融合研究の在り方の方向性について平成15年1月に報告書を取りまとめた。

グランドデザイン



【報告書のポイント】

⇒核融合研究計画の重点化

トカマク (JT-60)

ヘリカル (LHD)

レーザー (GEKKO-X II)

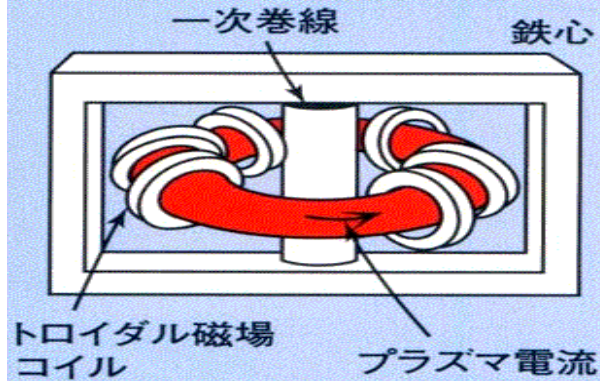
炉工学

⇒共同利用・共同研究の強化

⇒重点化後の人材育成の在り方

核融合の主な閉じ込め方式について

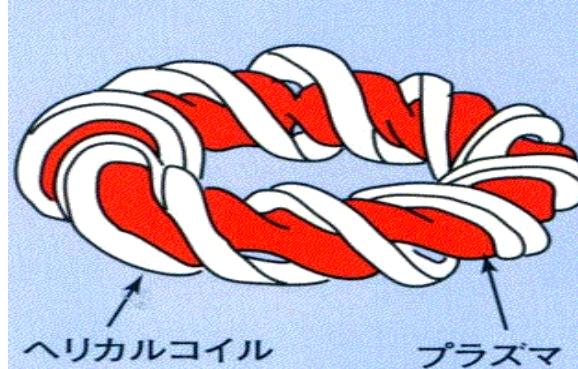
●トカマク型



- ドーナツ状の磁気のかごをつくり、その中にプラズマを閉じ込める。
- 旧ソビエトで考案され、世界が追随した方式→現時点で最も進んだ方式
- プラズマ中に電流を流して、ねじれた磁場を形成

JT-60
日本原子力研究開発機構

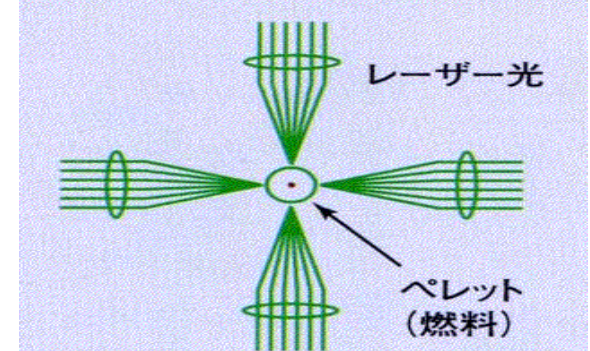
●ヘリカル型



- トカマク型と同様にドーナツ状のかごをつくるが、ねじれたコイルを使うのが特徴。
- 磁場は外部コイルで形成されるため、プラズマ中に電流を必要としない。→経済的な運転が可能
- 長時間プラズマ生成が可能

大型ヘリカル装置LHD
核融合科学研究所

●レーザー方式



- 左の2つの閉じ込め方式とは全く違い、燃料をレーザーで爆発的に加熱し、その圧力で閉じ込める。

激光XII号
大阪大学

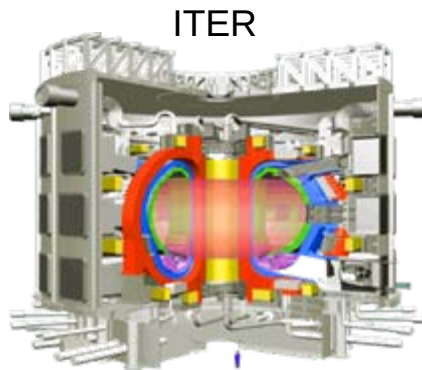
我が国における核融合政策の現状について

磁場閉じ込め方式

☆トカマク・ヘリカルともに原理実証段階を完了

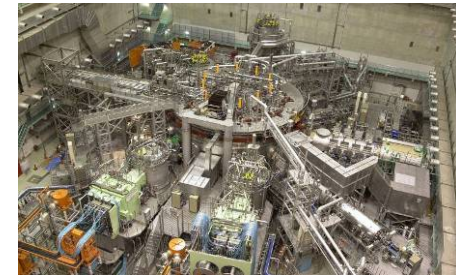
トカマク

- 工学的実証段階
- 現段階では最も進展しているとの国際的認識
→ 実験炉ITER、JT-60



ヘリカル

- 工学的実証を目指す段階
- 基本部分はトカマクと共通(閉じ込め方式の部分のみの違い)
- トカマクとは異なる長所 → 原型炉段階で採用される可能性
(プラズマの安定性)
- 我が国独自のアイデアに基づく
LHD(核融合科学研究所)



知見を反映

レーザー方式

☆原理実証を目指す段階

- 原理実証を目指す段階
- 当面はFIREX-I計画を推進、最終段階(2010年)で評価し、次のステップを判断
- 欧米では、主に軍事研究で強力に推進するため、国際協力は困難
- 磁場閉じ込めと質的に異なる方式 → 将来の技術的代替性がある
- 他分野への応用が広範

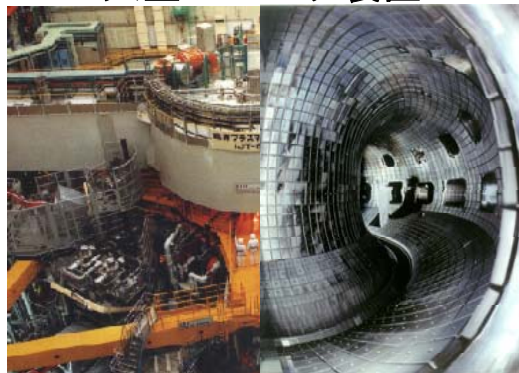


激光XⅡ号
(大阪大学)

国内重点化装置

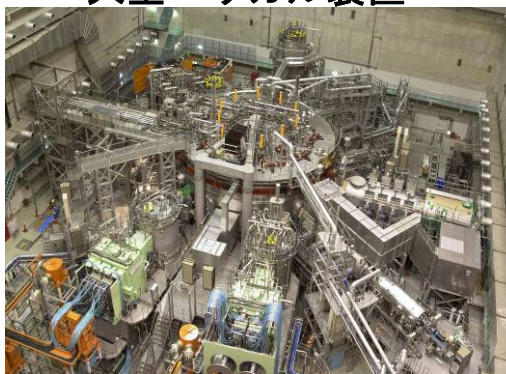
我が国の核融合研究開発は、日本原子力研究開発機構、核融合科学研究所、大学等の連携・協力により研究開発を実施。特に、トカマク、ヘリカル、レーザーについては世界でも有数の装置を有し、世界をリードする成果を輩出。

大型トカマク装置



JT-60(日本原子力研究開発機構)

大型ヘリカル装置



LHD(核融合科学研究所)

レーザー核融合実験装置



GEKKO-X II(大阪大学)

世界をリードする実験成果

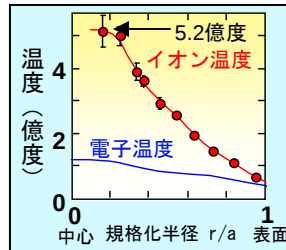
臨界プラズマ試験装置JT-60

- ★等価核融合エネルギー増倍率
1.25 (世界記録)

- ★5.2億度 (世界記録、ギネス

ブック登録) 右図

- ★世界最高の核融合三重積を実現
- ★高圧力・高閉じ込めプラズマを28秒間維持 (世界最長)
- ★高効率定常運転法の確立
- ★内部輸送障壁、電流ホールの発見

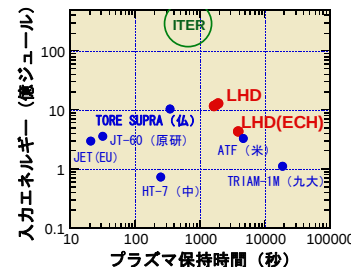


大型ヘリカル装置LHD

- ★入力エネルギー値 1.6億ジュール、
入力パワー約500kwで54分28秒の放電を達成 (世界記録)

- ★ベータ値 4.8% (世界記録)

- ★1.5億度
- ★能動的な
周辺プラズマの制御に成功

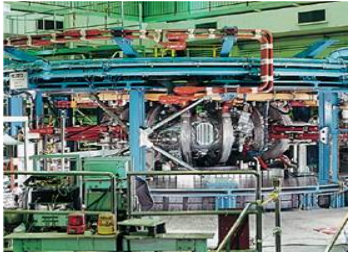


レーザー核融合実験装置

- ★1億度とレーザー核融合中性子
10兆個 (世界記録)
- ★固体密度の600倍 (600g/cc) の圧縮密度を達成 (世界記録)
- ★先進レーザー核融合方式である
高速点火を発案。世界最高出力の
ペタワットレーザーによりプラズマ
追加熱を初めて実証
- ★高速点火原理実証 FIREX I期計画
を実施中

日本の核融合研究

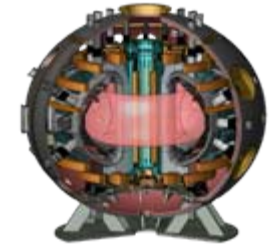
Heliotron J ヘリカル型
京都大学エネルギー理工学研究所



JT-60U トカマク型
日本原子力研究開発機構



JT-60SAへの転換



ガンマ10 ミラー型
筑波大学プラズマ研究センター



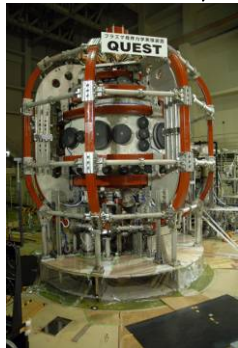
共同研究分野

原子分子
プラズマ基礎物理学
プラズマ応用
高温プラズマ物性
周辺プラズマ物理学
プラズマ制御
プラズマ加熱工学
プラズマ計測学
シミュレーション科学
炉工学
炉システム学
プラズマ材料工学
材料シミュレーション学
放射線工学
超伝導工学
極低温工学
マイクロ波応用 など

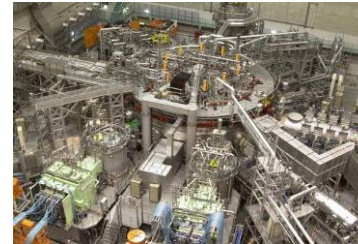


激光X II号 レーザー型
大阪大学レーザーエネルギー学
研究センター

高速点火 FIREX-I へ展開



QUEST 球状トカマク型
九州大学応用力学研究所



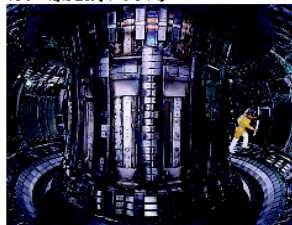
LHD ヘリカル型
核融合科学研究所

世界の核融合研究

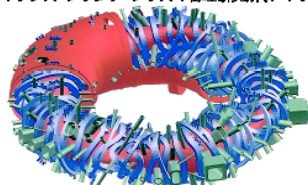
ITER(国際熱核融合実験炉)計画

- ・日欧米露中韓印 7極による国際プロジェクト
- ・2007年10月ITER協定発効

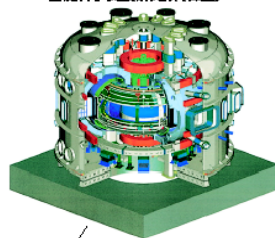
JET
カラム研究所(イギリス)



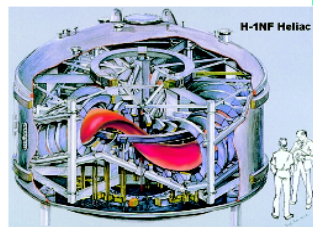
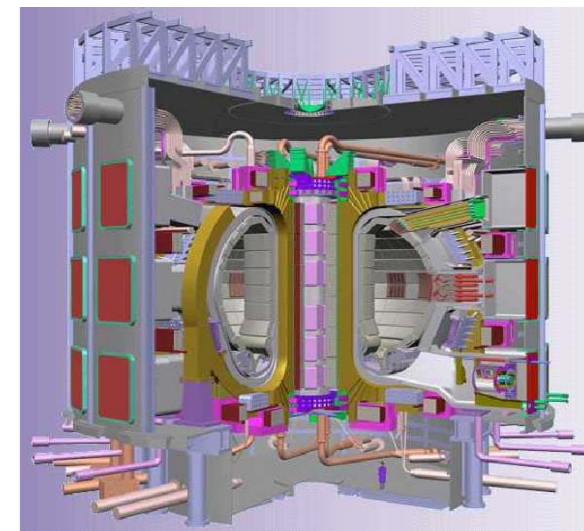
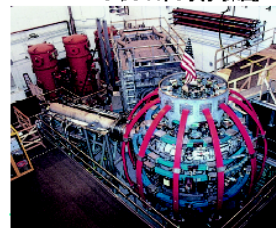
W7-X
マックス・プランク・プラズマ物理研究所(ドイツ)



KSTAR
基礎科学支援研究所(韓国)



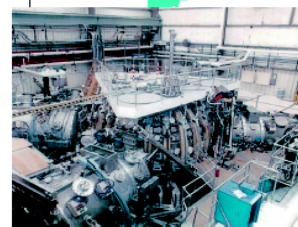
NSTX
プリンストン大学(米国)



H-1NF Heliac
オーストラリア国立大学(オーストラリア)



HT-7
等離子体物理研究所(中国)



DIII-D
ジェネラル・アトミックス社(米国)

米国:

DIII-D, Alcator C-Mod, NSTX, 等

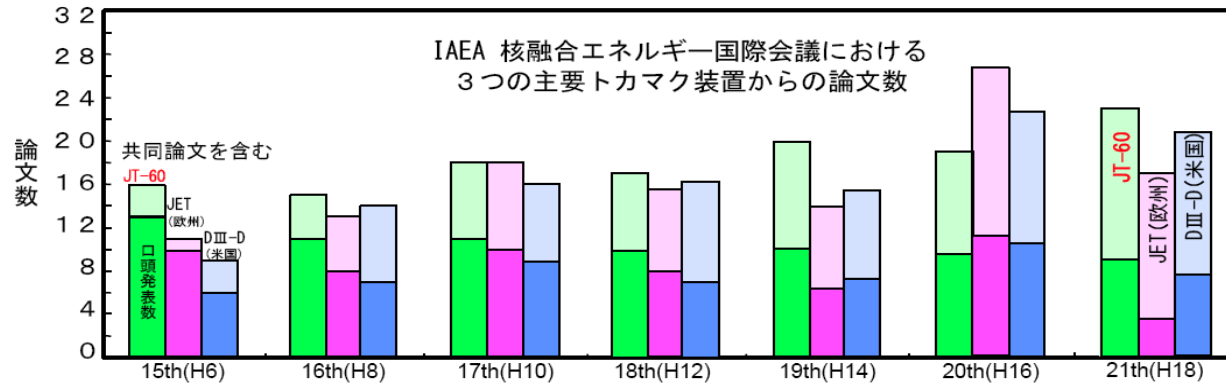
欧州:

JET, ASDEX-UG, W7-X, LMJ 等,

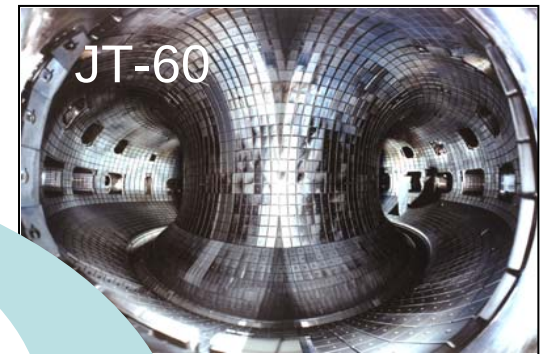
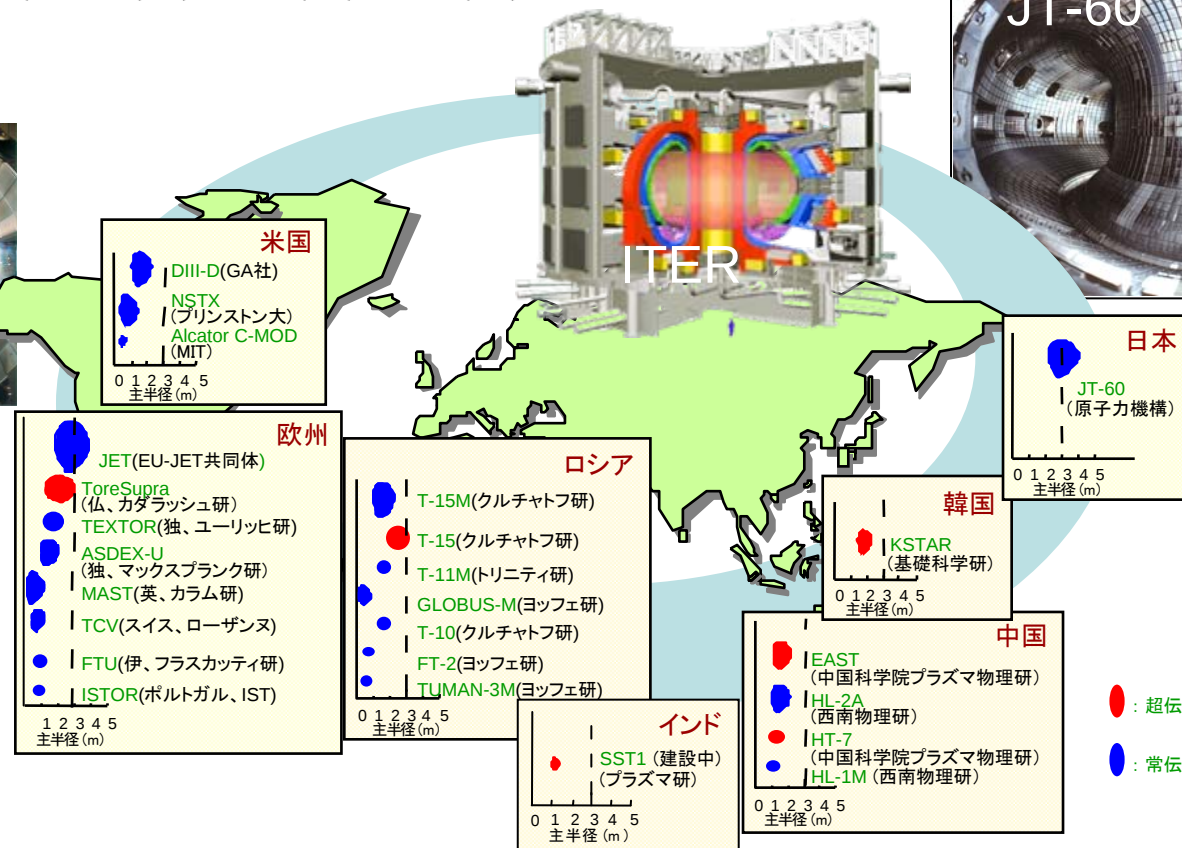
中国: EAST

韓国: K-STAR

世界のトカマクを先導する高い国際競争力



「核融合研究のオリンピック」である
IAEA主催国際核融合エネルギー会
議において、
欧米をリードするJT-60



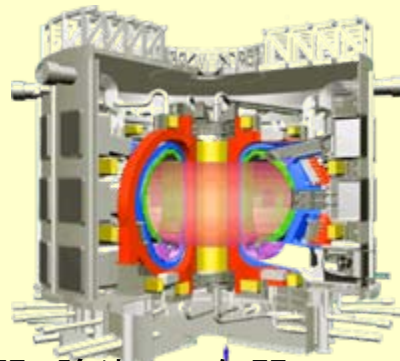
2. ITER計画・幅広いアプローチ(BA)活動

ITER(国際熱核融合実験炉)計画等の推進

- 人類究極のエネルギーである核融合エネルギーの実現を目指して、ITER計画と幅広いアプローチ活動を戦略重点科学技術として推進
 - 〔ITER計画 : 核融合実験炉の建設・運転を通じて、科学的・技術的実現可能性を実証
 - 〔幅広いアプローチ活動 : ITER計画と並行して補完的に取り組む先進的核融合研究開発
- イーター協定は、2007年10月24日に発効
- 幅広いアプローチ協定は、2007年6月1日に発効

ITER計画

- 参加極: 日、欧、米、露、中、韓、印
 - ※第2回ITER理事会(H20.6)にて、カザフスタンの加盟について正式に調整されることとなった。
- 建設地: フランス・カダラッシュ
- 総経費: 約1兆7千億円(2006年10月末時点で換算)
- 核融合熱出力: 50万KW(発電実証はしない)
- ITER機構長: 池田要氏
- 日本の分担割合:
 - 建設期: 9.1%
 - 運転期: 13%
- 計画(予定):
 - 建設: 10年間 運転: 20年間 除染: 5年間

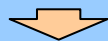


幅広いアプローチ(BA)活動

- 実施極: 日、欧
- 実施地: 青森県六ヶ所村、茨城県那珂市
- 総経費: 920億円を日・欧で折半(2005年5月時点で換算)
- 計画: 10年間
- 実施プロジェクト
 - ①国際核融合エネルギー研究センター
 - ・原型炉設計・研究開発調整センター
 - ・ITER遠隔実験センター
 - ・核融合計算機シミュレーションセンター
 - ②国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動
 - ③サテライト・トカマク計画(予備実験等の実施によるITER支援)

ITER計画に関するこれまでの経緯

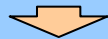
1985年11月 米ソ首脳会談で核融合開発研究推進の共同声明 レーガン・ゴルバチョフ



1992年 7月～2001年 7月 ITER工学設計活動（日本、欧州、米国、ロシア）
※1999年に米国は工学設計活動から撤退



2001年11月～ 建設に向けて政府間協議を開始（当初日本、カナダ、欧州、ロシア）



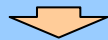
2005年 6月28日 閣僚級会合 サイト地が欧州（仏・カダラッシュ）に決定



2006年11月21日 ITER協定署名、ITER協定の暫定適用、第1回暫定理事会（パリ）



2007年10月24日 ITER協定発効、ITER機構正式発足、
国内機関として日本原子力研究開発機構を指定）



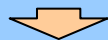
2007年11月27日 第1回ITER理事会（カダラッシュ）、池田要ITER機構長就任



2008年 6月17, 18日 第2回ITER理事会（青森県青森市）



2008年11月19, 20日 第3回ITER理事会開催（カダラッシュ）



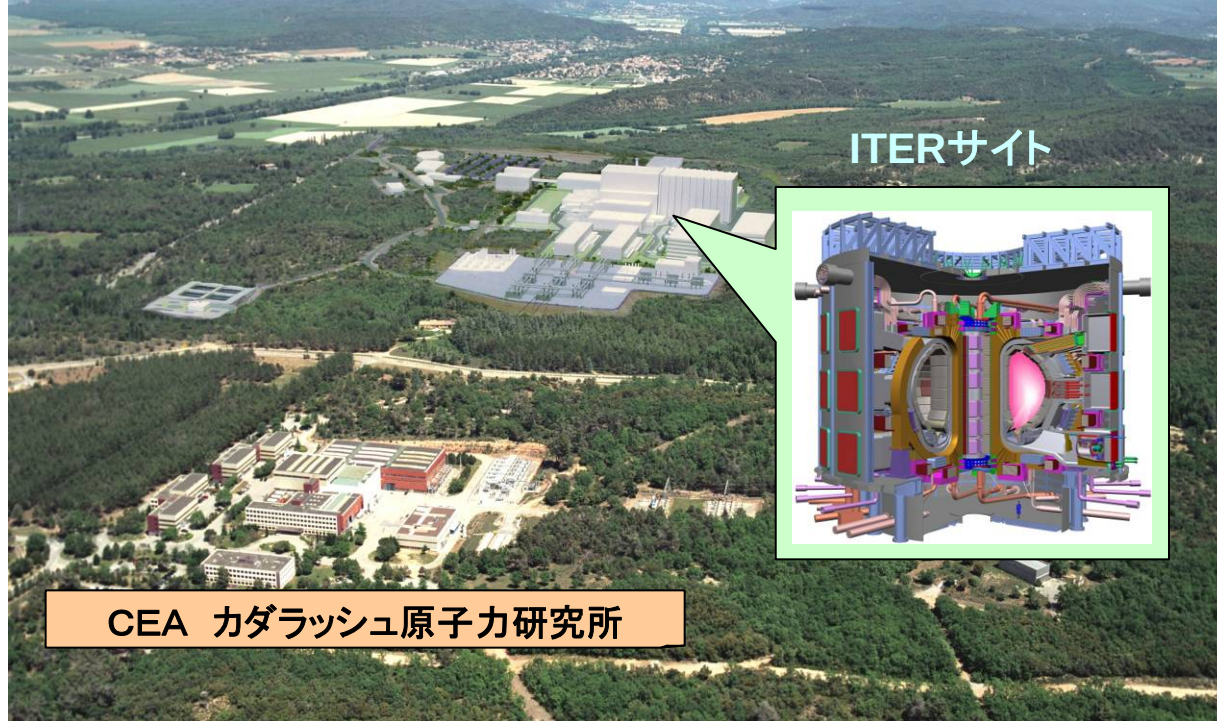
今後の予定

2009年 6月17, 18日 第4回ITER理事会（茨城県水戸市）

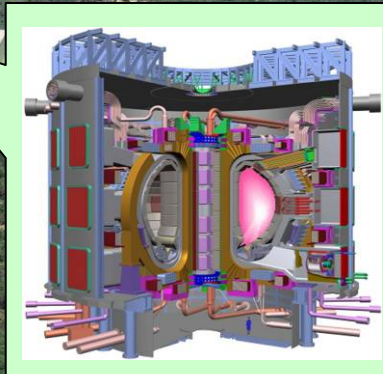
ITERサイト(フランス・カダラッシュ)

カダラッシュ

- ・マルセイユ市(人口120万人)から約70km
- ・エクサン・プロバンス市(人口15万人)から約40km



ITERサイト



CEA カダラッシュ原子力研究所



ITERサイトの現状

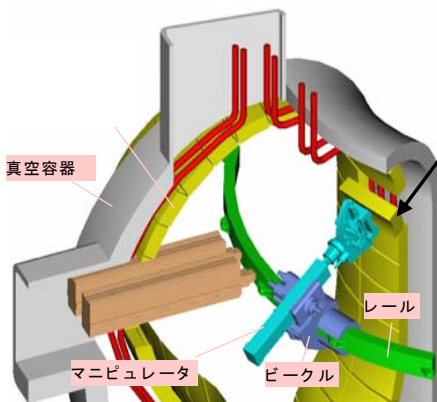


「ITER News Line」(2008年10月6日)より(<http://www.iter.org/newsline/issues/52/ITERnewsline.htm>)

ITER計画において我が国が分担する装置・機器

ブランケット遠隔保守機器

ブランケットの保守・交換作業を行う遠隔操作機器



ブランケット (EU割譲分)

核融合で発生する中性子を遮蔽し、熱を取り出す機器

ダイバータ

核融合で発生するヘリウムや不純物粒子を排出する装置

中心ソレノイドコイル (EU割譲分)

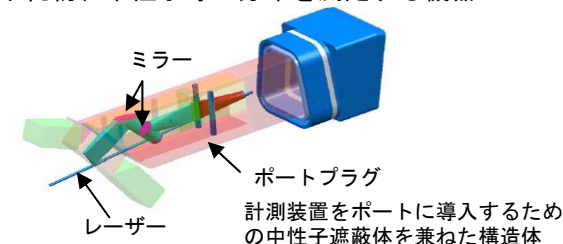
プラズマの立ち上げ、燃焼、立ち下げの制御に必要な磁束を発生する超伝導コイル

超伝導コイル

高温のプラズマを閉じ込めるための磁場を発生する機器

計測装置

プラズマ中のイオンと電子の密度や温度、不純物、中性子等の分布を測定する機器



高周波加熱装置

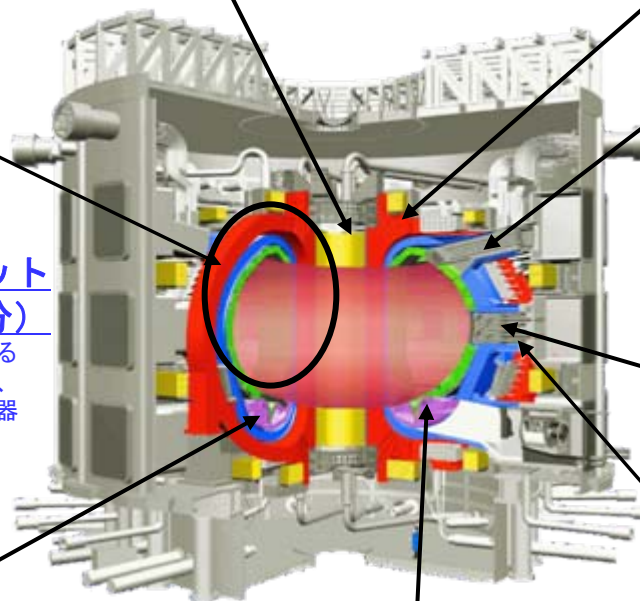
電子レンジの原理で電磁波でプラズマを加熱する装置

中性粒子入射加熱装置 (EU割譲分)

高エネルギーの中性粒子をプラズマに入射させてプラズマを加熱する装置

トリチウムプラント設備 (EU割譲分)

燃料であるトリチウムの分離回収、精製、処理及びプラズマへの再注入を行うための設備



ITER建設スケジュール

2007年10月24日

ITER協定発効

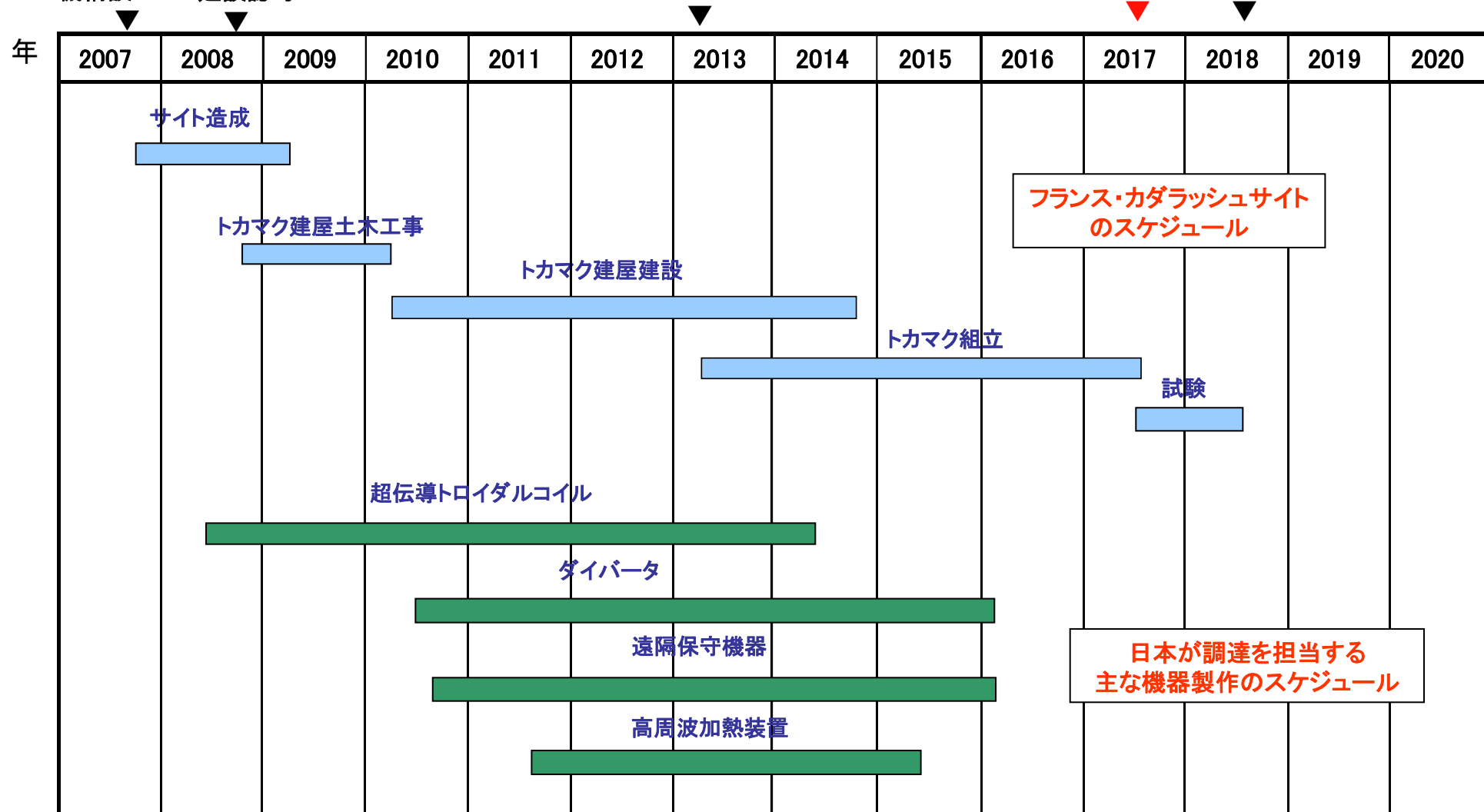
ITER機構設立

建設認可

トカマク組立開始

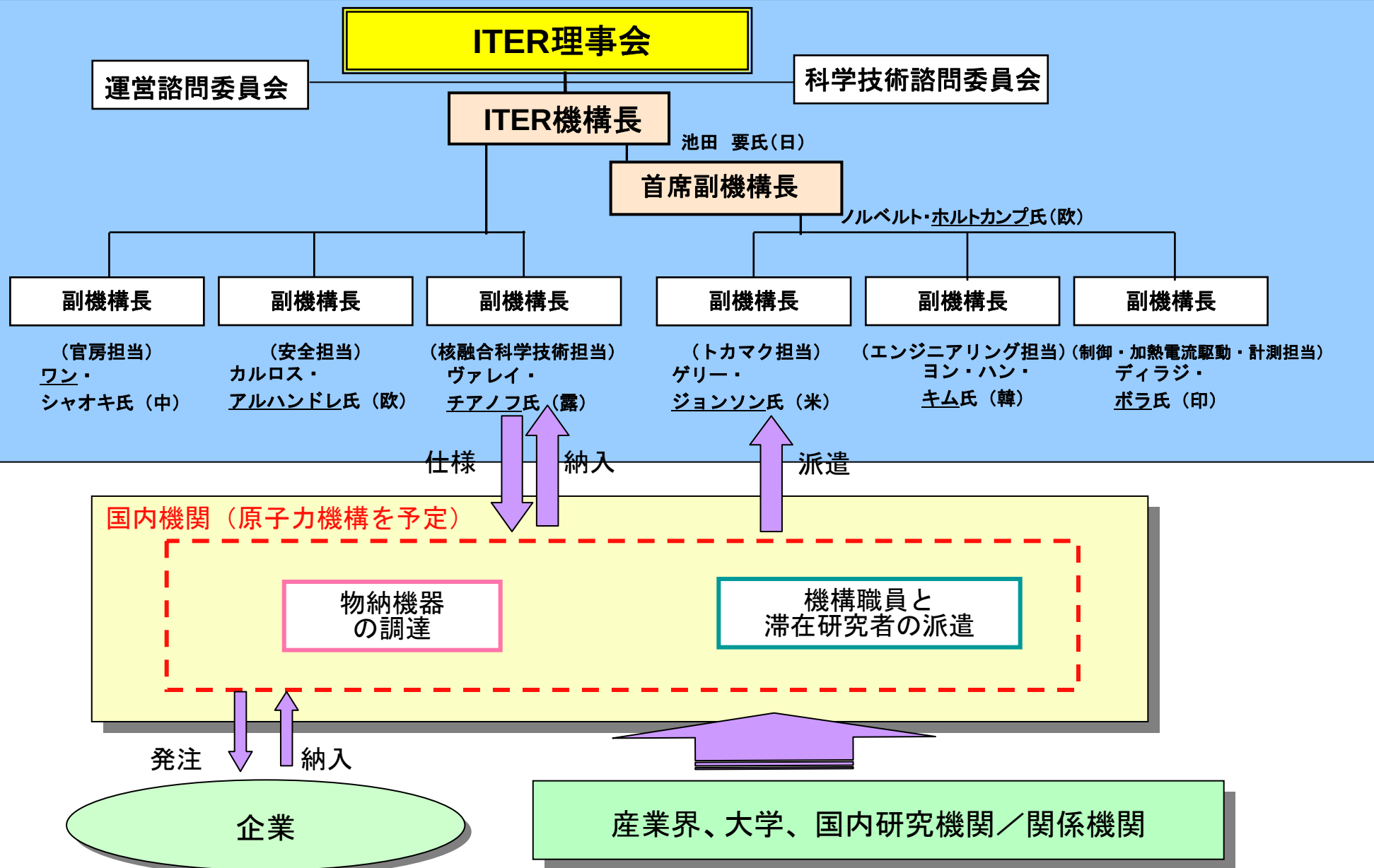
トカマク組立完了 初プラズマ

初プラズマ

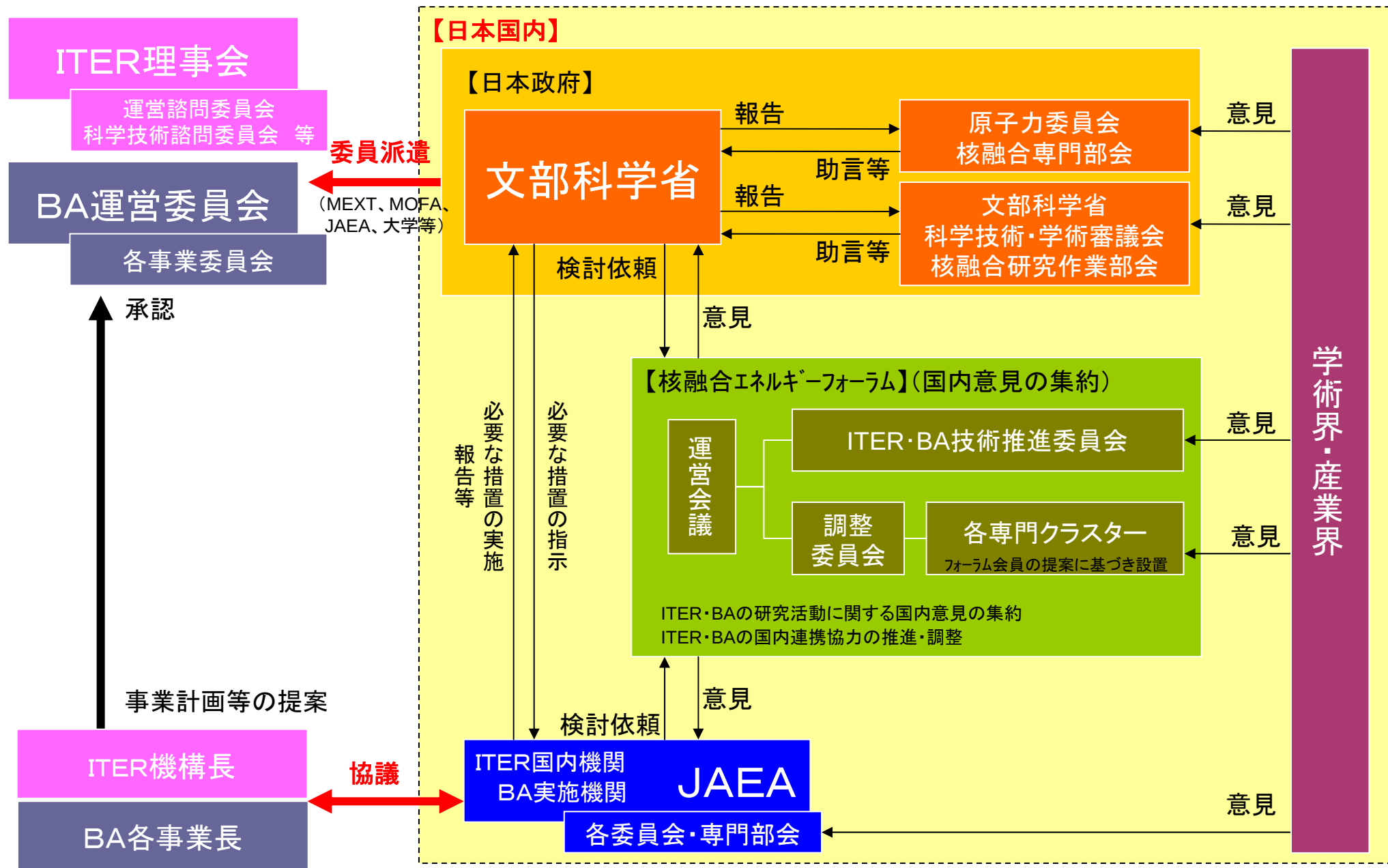


※本スケジュールは、ITER機構が2008年6月の第2回ITER理事会で提案したスケジュールに基づくものである。

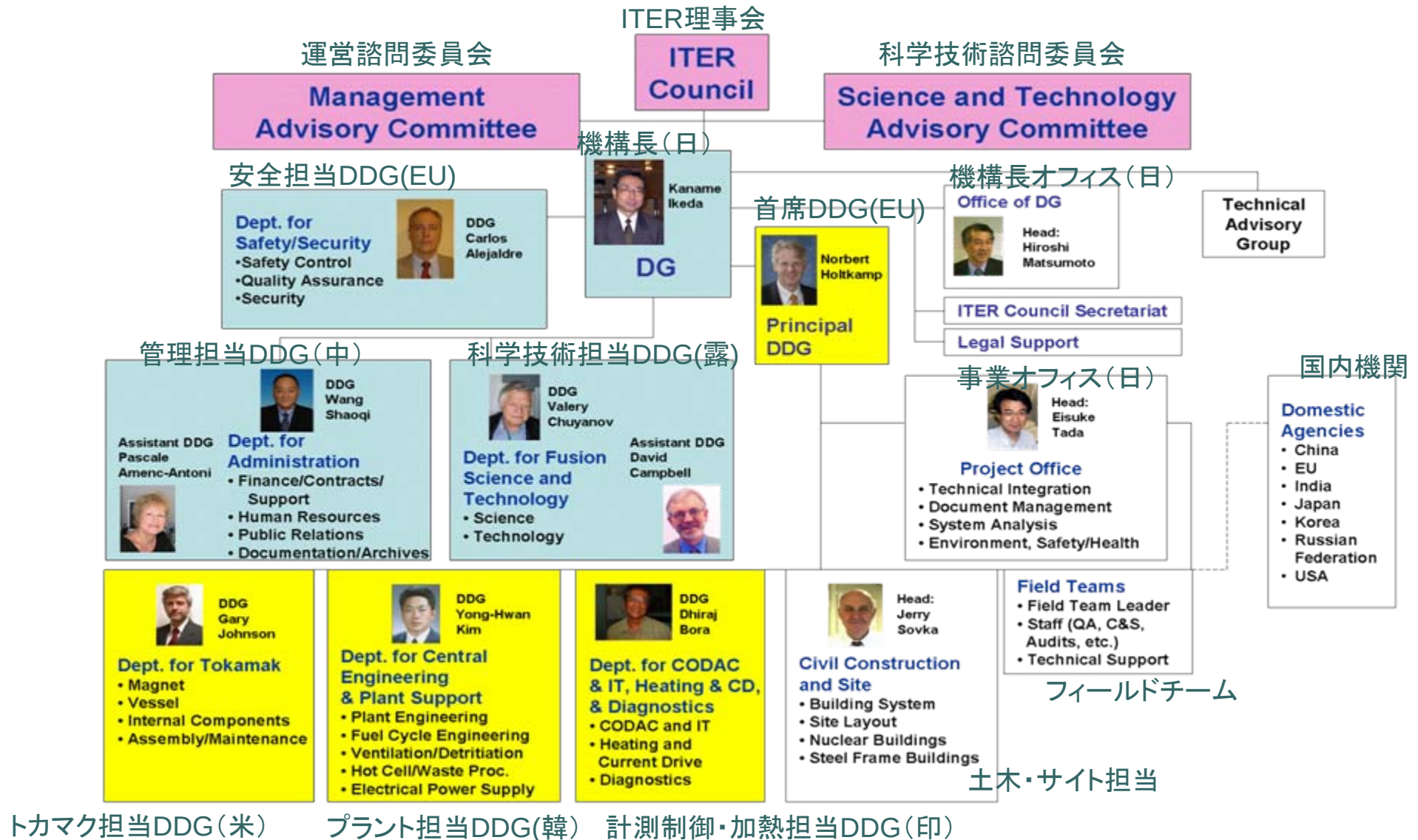
ITER建設段階の実施体制



ITER計画・BA活動における国内連携体制について



ITER機構の運営体制



ITER計画の実施状況

◎ITER協定の発効(平成19年10月)後、国際的合意で定められたスケジュールに基づき、計画を着実に推進。

ITER計画

- ITER機構の体制整備
ITER機構専門職員217名中、我が国からは池田機構長をはじめ20名の人員を派遣（2008年10月末現在）
- フランス・カダラッシュ建設サイトを着実に整備中、ITER機構本部ビルの開所
- 各極とITER機構による機器調達に係る取決めに順次締結
日本は、他国に先駆け、2007年11月に超伝導コイルの調達取決め(JAEA-ITER機構)を締結し、製作を開始。また、2008年11月には、トロイダル磁場コイル巻線及び構造物の調達取決めに締結。
- 第3回ITER理事会(2008年11月)にて
 - ①ITER機構と各極国内機関の連携強化によるコストの合理化や運営の効率化について了解。
 - ②各種専門家会合(輸出管理、知的財産等)からの報告を聴取。



(←)2008年11月 ITER本部ビル開所



2008年11月 第3回ITER理事会

核融合エネルギーの実現に向けた「幅広いアプローチ(BA)活動」

目的

核融合エネルギーの早期実現のため、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の実証を行うITER計画への支援とともに、実験炉ITERの次の発電実証を行う原型炉に向けた先進的研究開発を実施する。

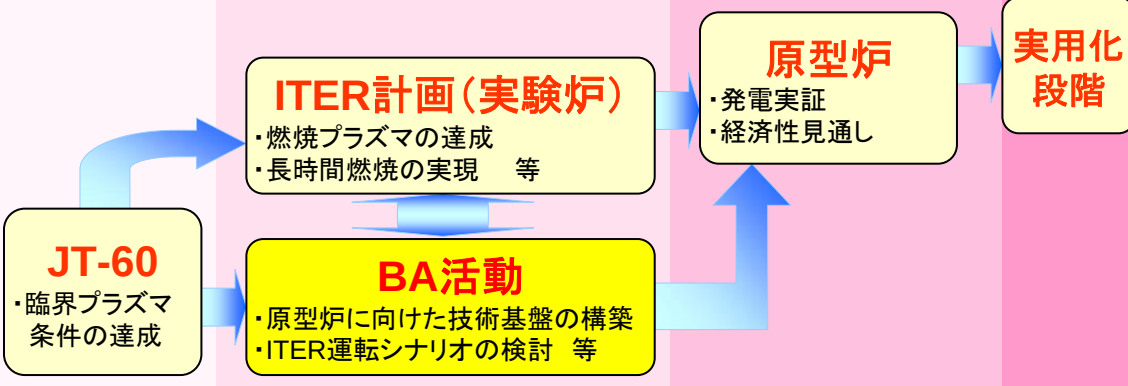
概要

- 実施極：日本・欧州(※他のITER参加極の事業への参加が可能)
- 総事業費：約920億円相当を日欧で折半(2005年5月時点の価額換算)
- 計画：10年間(※2007年6月1日BA協定発効)
- 以下の3つのプロジェクトを実施

(科学的実現性)

(科学的・技術的実現性)

(技術的実証・経済的実現性)



青森県六ヶ所村

国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA)

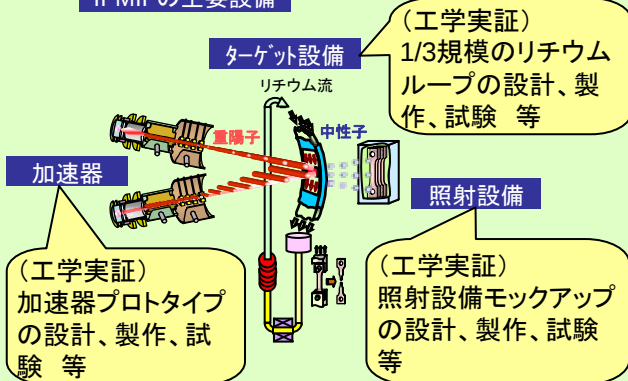
【目的】

原型炉に必要な高強度の新材料の開発を行う国際核融合材料照射施設(IFMIF)の工学設計及び建設判断に必要なデータの取得、構成設備の安定的運転の実証。

【概要】

IFMIFの工学設計及びIFMIFを構成する設備の製作プロセス開発や性能実証を実施。

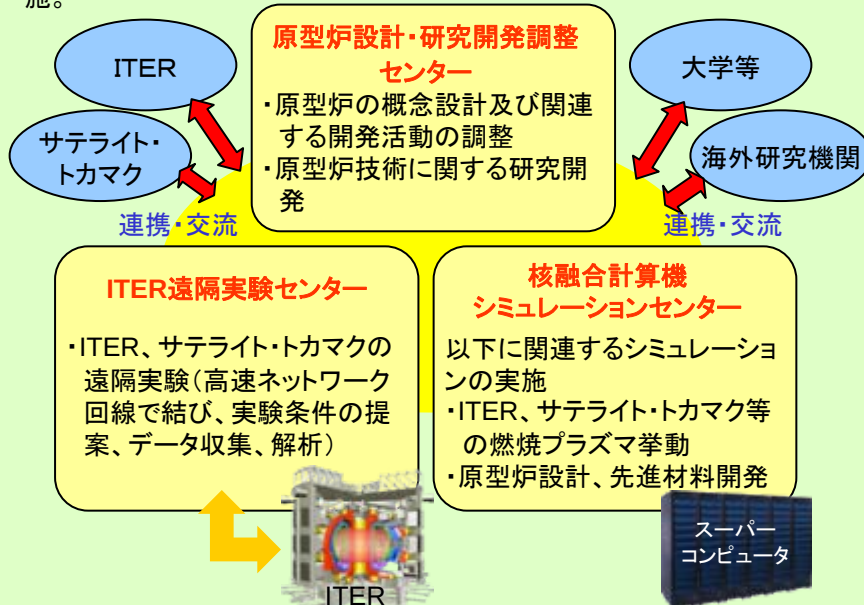
IFMIFの主要設備



国際核融合エネルギー研究センター (IFERC)

【目的】 原型炉の早期実現を促進するための国際的な核融合研究を先導。

【概要】 国内外の研究機関等と連携・交流しながら、以下の3つのタスクを実施。



茨城県那珂市

サテライト・トカマク計画

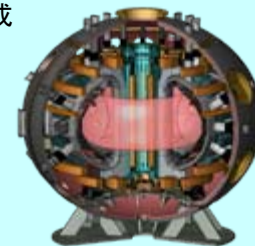
【目的】

ITER及び原型炉に関する重要な物理的課題の検討。

【概要】

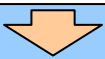
JAEAが所有する臨界プラズマ試験装置JT-60の超伝導化改修を行うことにより、以下を実施。

- ・ITER運転シナリオの検討・最適化
- ・ITER改造の事前試験
- ・原型炉に必要な定常プラズマ運転の長時間化の研究
- ・原型炉に必要な先進プラズマ領域(高密度・高圧力)の研究
- ・人材育成

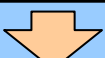


JT-60SA

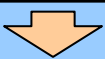
幅広いアプローチ(BA)活動に関するこれまでの経緯と今後の予定



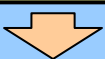
2006年11月22日 BA協定案仮署名（ブリュッセル）



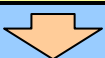
2007年 2月 5日 BA協定署名（東京）



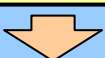
2007年 6月 1日 BA協定発効、実施機関として日本原子力研究開発機構を指定



2007年 6月21日 第1回BA運営委員会（東京）



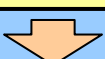
2007年11月15日 第2回BA運営委員会（バルセロナ）



2008年 5月15日 第3回BA運営委員会（青森県六ヶ所村）



2008年12月10日 第4回BA運営委員会（独、カールスルーエ）



今後の予定

2009年 5月12日 第5回BA運営委員会（青森県六ヶ所村）

幅広いアプローチ(BA)活動六ヶ所サイト(青森県六ヶ所村)



幅広いアプローチ(BA)活動六ヶ所サイトの現状と建屋完成予想図



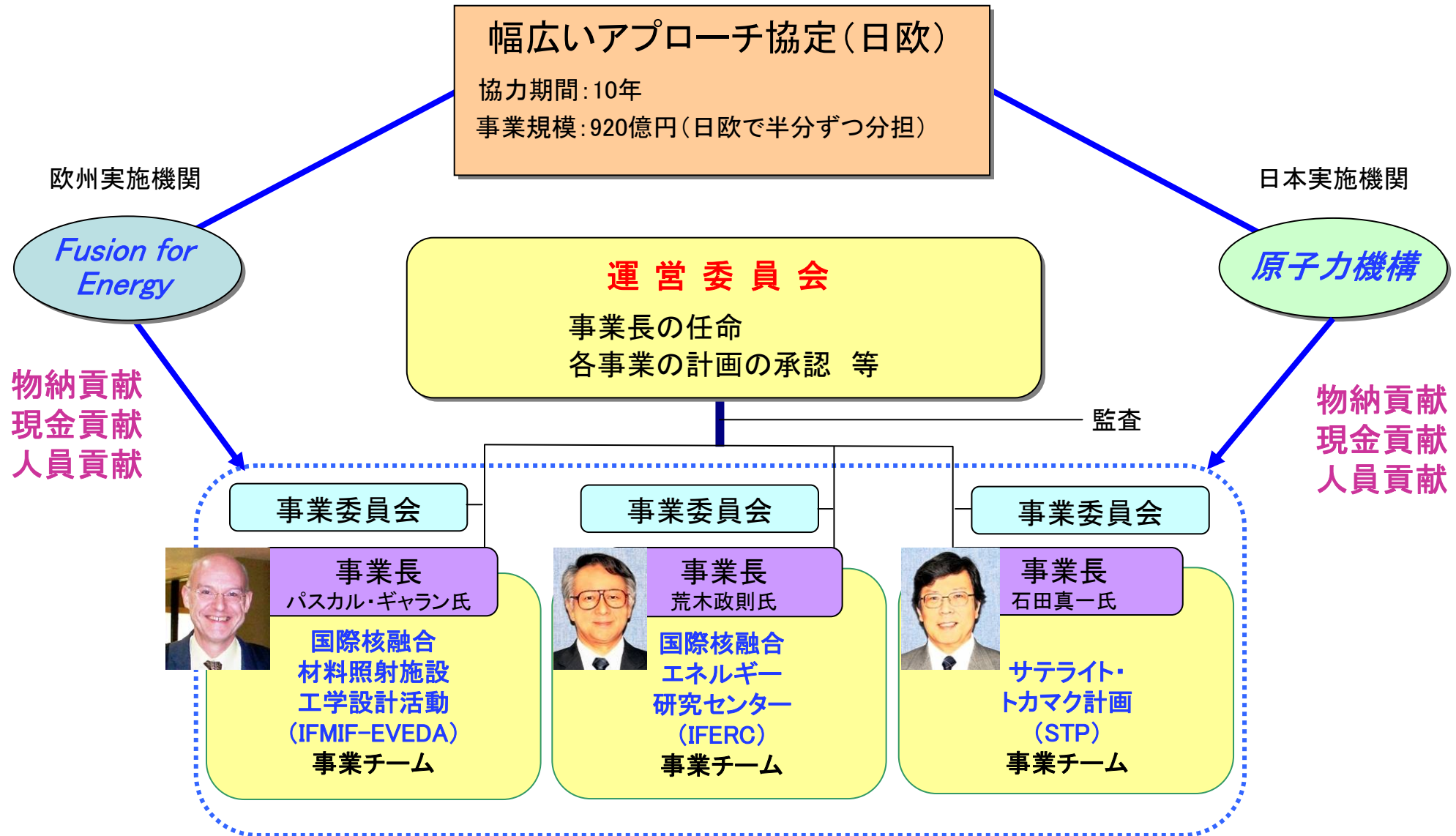
※管理研究棟、中央変電所監視建屋は、平成21年3月完成予定。他の棟は、平成22年3月完成予定。

幅広いアプローチ(BA)活動のスケジュール

年		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
国際核融合 エネルギー 研究セン ター事業 (IFERC)	計算機シミュレーション センター	サイト整備、建屋建設											
			計算機機種選定・ベンチマークソフト選定、調達				計算機の運転						
	原型炉設計研究開発 調整センター	サイト整備、建屋建設											
		ワークショップ・技術会合		原型炉の概念設計及び研究開発									
	ITER遠隔実験センター	サイト整備、建屋建設											
			技術会合		システム設計、ITERとの整合性検討								
	管理研究棟	サイト整備、建屋建設											
国際核融合材料照射施設の工学実証 及び工学設計活動(IFMIF/EVEDA)		サイト整備、建屋建設											
				IFMIFプロトタイプ加速器の製作・輸送・据付・運転等									
サテライト・トカマク計画事業				JT-60の改修						JT-60SAの運転			

▲2007年6月1日BA協定発効

幅広いアプローチ(BA)活動の実施体制



研究活動には、日本国内とITER参加極から幅広く参加を求める。

幅広いアプローチ(BA)活動の実施状況

◎BA協定の発効(平成19年6月)後、国際的合意で定められたスケジュールに基づき、計画を着実に推進。

BA活動

○国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)

- ・ 原型炉設計検討等、予備的R&Dを推進
- ・ 核融合計算機シミュレーションセンターに導入する高性能計算機の機種選定のための技術仕様の検討を推進

○国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計(IFMIF/EVEDA)

- ・ 超伝導加速器の採用を決定
- ・ 各設備の設計・製作に関する予備的R&Dを推進
- ・ 我が国が担当する機器の調達を推進

○サテライト・トカマク計画

- ・ 設計報告書を完成
- ・ 真空容器等、我が国が担当する機器の調達を推進

○六ヶ所サイトの整備を推進

管理研究棟は平成21年3月完成、
その他の研究棟は平成21年度末に完成予定

○他のITER加盟極のBA事業への参加ガイドラインを決定、

ITER理事会や二国間・多国間核融合協力の会合において参加を要請



2008年6月第2回ITER理事会後のBAサイトツアー
(他極にBA事業への参加を呼びかけ)

青森県、六ヶ所村の外国人研究者への滞在支援 ー青森県、六ヶ所村からの協力ー

- 生活支援要員の配置
- 国際交流ラウンジの開設、日本語教室の開催、各種生活情報の提供
- 大家族研究者用村営住宅の建設
- 国際学校の開設



国際交流ラウンジ



国際学校(京都国際ナショナルスクール青森キャンパス)



3. 核融合関連予算の概要

平成21年度核融合関連政府予算案

【ITER計画・BA活動関連】

ITER計画 ・ITER機構の分担金 ・ITER機器製作や試験、国内機関の活動、人員派遣等	51億円(47億円) 13億円(13億円) 38億円(33億円)
幅広いアプローチ活動 ・国際核融合エネルギー研究センター(青森) ・国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動(青森) ・サテライト・トカマク計画(茨城)	60億円(56億円) 22億円(28億円) 18億円(11億円) 20億円(17億円)
総額	111億円(103億円)

※四捨五入の関係で、合計が合わない場合がある。

※()内は、前年度予算額。

【上記以外】(いずれも運営費交付金等において実施)

- ・日本原子力研究開発機構 (臨界プラズマ試験装置JT-60の解体・改修)
- ・核融合科学研究所 (大型ヘリカル装置による研究等)
- ・大阪大学 (レーザー方式による研究)
- ・その他、大学等における基礎研究

ご静聴有り難うございました。