

核融合研究開発の状況とITER計画について

核融合研究開発について	1
核融合炉の特殊な位置付け	2
核融合工学研究開発(段階的な研究開発)	3
ITER計画について	4
ITER工学技術開発概要	5
ITERの建設運転計画	6
我が国の核融合研究開発について	7
核融合工学研究開発の現状と今後の課題	8
核融合工学研究開発の現状と今後の課題	9
核融合工学研究開発の現状と今後の課題	10
ITER計画の進展状況	11
ITER計画の進展状況	12
ITER計画の進展状況	13
ITER計画の進展状況	14
ITER計画の進展状況	15
ITER計画の進展状況	16

核融合研究開発

- エネルギー問題は、地球環境問題と同じく、人類の共通的な課題。
核融合エネルギーは、将来のエネルギー源の一つの選択肢。

核融合エネルギー

- ・豊富な資源：燃料となる重水素は海中に豊富に存在し、三重水素（トリチウム）は埋蔵量の多いリチウムより生成可能であり、地域的な偏在がない豊富な資源。
少量の燃料から膨大なエネルギー。
- ・固有の安全性：核的暴走がなく、核分裂と比べ安全対策が比較的容易。
- ・高い環境保全性：地球温暖化の原因となる二酸化炭素の発生が少ない。
低レベル放射性廃棄物は発生するが、従来技術で処理処分が可能。

(核融合の原理と発生エネルギー)



- 重水素-トリチウム燃料1gは、およそ石油8t分に相当。
- 重水素は、水30リットル中におよそ1gの割合で含まれる。

核融合炉の特徴

「止める」ことは容易
(暴走しない)

「冷やす」ことは容易

・プラズマが良好に閉じ込められて初めて燃焼する。
- 燃えすぎると閉じ込めが悪化して反応が止まる。

反応生成物は
ヘリウム

・高レベル廃棄物がない
・崩壊熱が小さい

反応停止

プラズマ消滅

不純物の混入

性能悪化

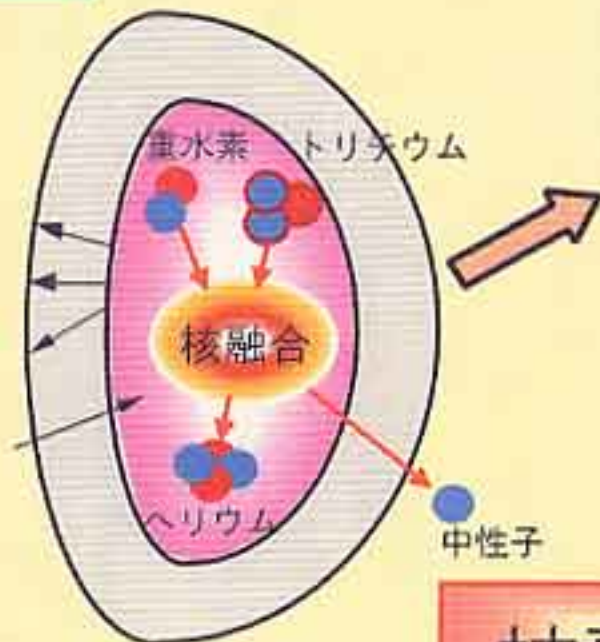
過剰な反応

核融合燃料

・重水素
・トリチウム

放射性物質が分散して
広範囲に存在

「閉じ込め」が重要



核融合反応

核融合エネルギーの位置付け

○未来エネルギーの選択肢の幅を広げ、その実現可能性を高める観点から核融合の研究開発を推進する。

（「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（平成12年11月）」より抜粋）

○化石燃料はここ100年程度の範囲では枯渇は予想されないが、化石燃料消費に伴う温室効果ガスの排出による地球温暖化現象が人類にとって大きな課題。

○この様な認識の下、将来のエネルギー予測における環境対策を重視するシナリオ（右図）では、21世紀末には、エネルギー需給の主要部分は、核融合などの革新的エネルギーを含む非化石エネルギーで占められる可能性がある。

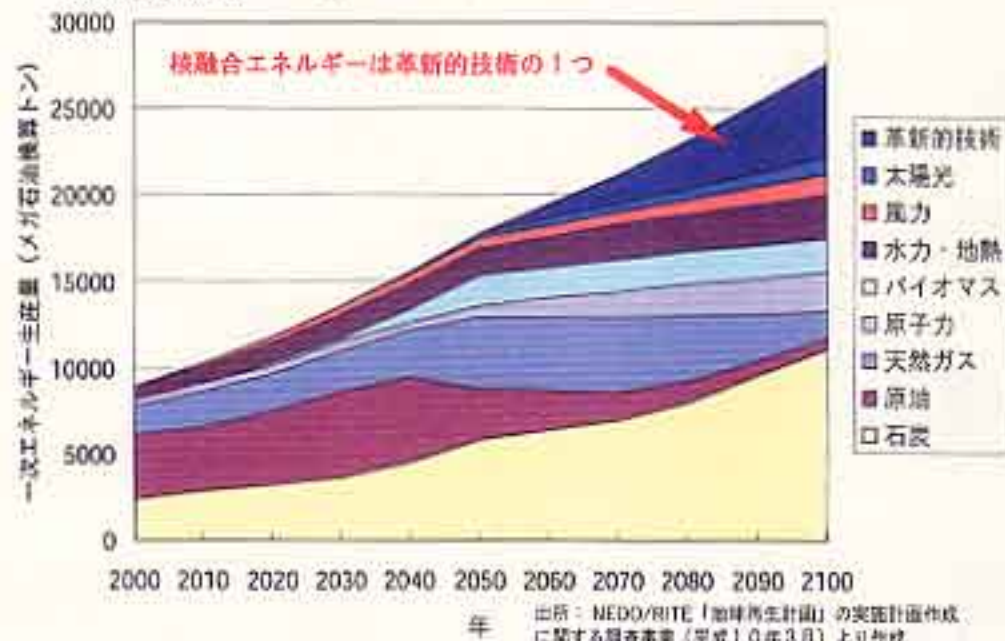
（「エネルギー需給及び代替エネルギーのフィージビリティに関する検討報告書（平成12年6月）」より要約）

○核融合は様々な産業・学問への波及効果を行う、革新的エネルギーの有力な候補の一つであり、着実な開発が望まれる。

- ・実現すれば高いレベルの脱炭素化が可能な大規模基幹エネルギーとしてエネルギー供給の中核を担う可能性を有する。
- ・燃料資源は、海水中に豊富に存在し、技術的見通しがある。
- ・放射性物質は扱うものの、安全対策は比較的容易であり、需要地近接立地の可能性がある。
- ・現段階では、発電が実証されていない。今後、原型炉を経て実用化段階に至る計画の中で、ITERを核燃焼プラズマ制御と工学的実証を行う実験炉として位置付け、核融合エネルギー開発を推進する。

（「核融合エネルギーの技術的実現性、計画の試みと視野としての基礎研究に関する報告書（平成12年5月）」より要約）

図2 CO2制約を課したシナリオの例(2:消費) 550ppm安定化ガス(CO2処分量、革新技术有)



環境制約（二酸化炭素濃度規制）を行った場合の将来エネルギー予測

核融合研究開発

○核融合エネルギーは将来のエネルギー源の一つの有望な選択肢。段階的な研究開発の推進が必要。

科学的実証

臨界プラズマ条件の達成



JET (EU)



JT-60 (日本)



TFTR (米)

工学的実証

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



実験炉 (ITER)

発電実証

原型炉

実用段階

プラズマ中心密度×閉じ込め時間 (個/cm³・秒)



国際熱核融合実験炉(ITER)計画の概要

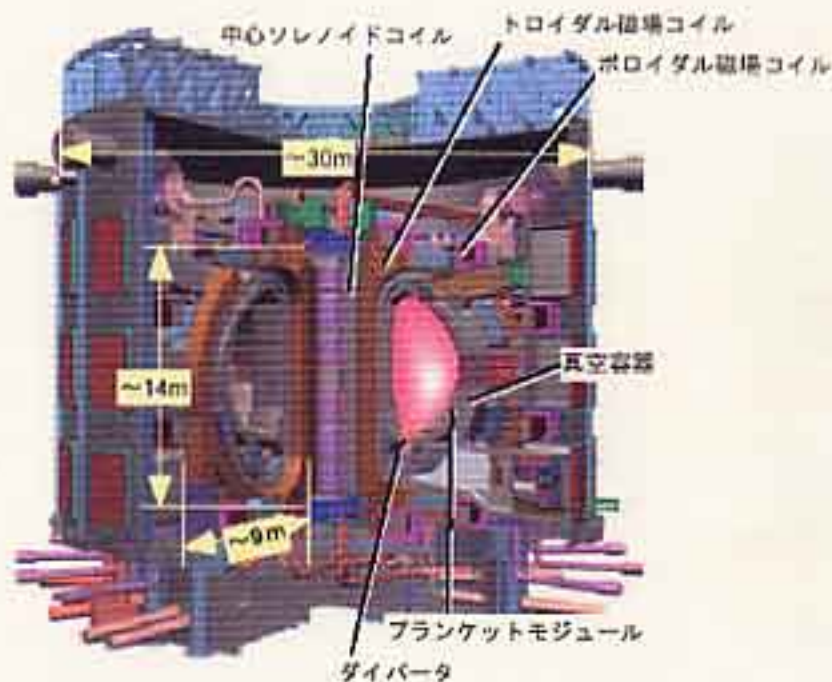
●概要

- 核融合エネルギーは、将来のエネルギー源の一つの有望な選択肢。
- 我が国の核融合研究開発は「第三段階核融合研究開発計画」に基づき進められており、ITERはこの中の実験炉に位置付けられている。
- ITERにより、核融合エネルギーの科学的及び技術的実現可能性を実証。
- 日本、EU、ロシアの3極による国際共同プロジェクト。

●経緯・計画

- 1985年11月の米ソ首脳会談が発端
- 1988年～2001年7月 設計活動を実施
- 2003年 建設開始(10年間)(予定)
- 2013年 運転開始(20年間運転)(予定)

ITER本体概要図



主要諸元

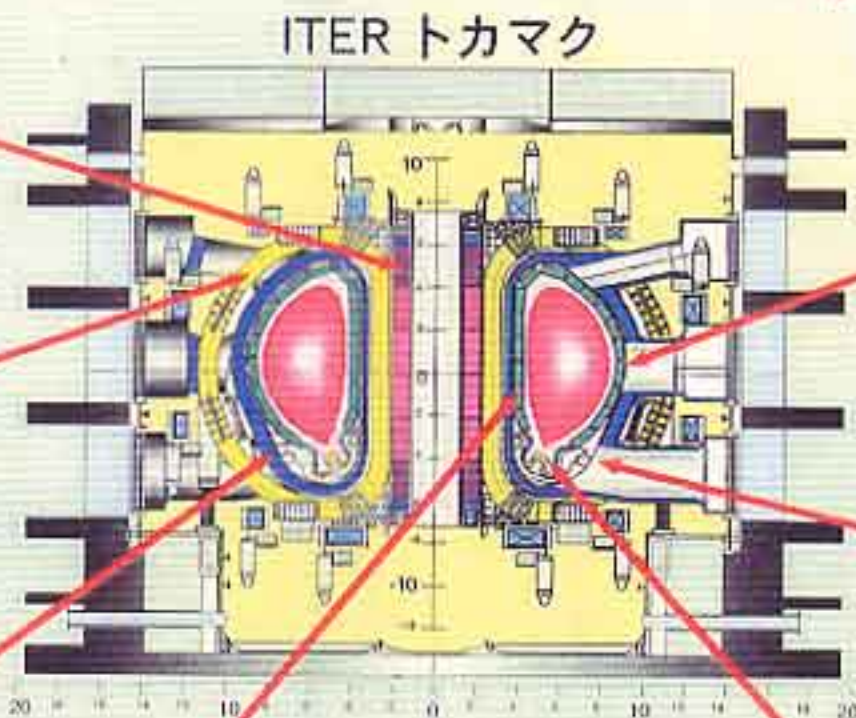
核融合出力	: 50万kw※1
プラズマ主半径	: 6.2m
プラズマ副半径	: 2.0m
プラズマ電流	: 1500万A※2

※1：70万kwまで運転可能 ※2：1700万Aまで運転可能



ITER 工学技術開発

大型R&Dを実施して、ITERを建設する上で基幹となる工学技術を確立し、製作性を実証。



ITERの建設運転計画

コスト負担の考え方

○建設段階（約10年間）

- ・実験炉本体建設費：約5,000億円
約3/4 超伝導コイル等主要機器 → 可能な限り均等負担
約1/4 建屋・機器組立等 → ホスト国負担
- ・運営費（ITER事業体の運営費）：約700億円
→ 本体建設費の分担と同様に締約国で負担
- ・サイト整備費（用地代等）：建設サイトに依存
→ ホスト国負担

○運転段階（約20年間）：約300億円/年

→ 本体建設費の分担と同様に締約国で負担

○廃止措置段階：廃止措置はホスト国の責任。

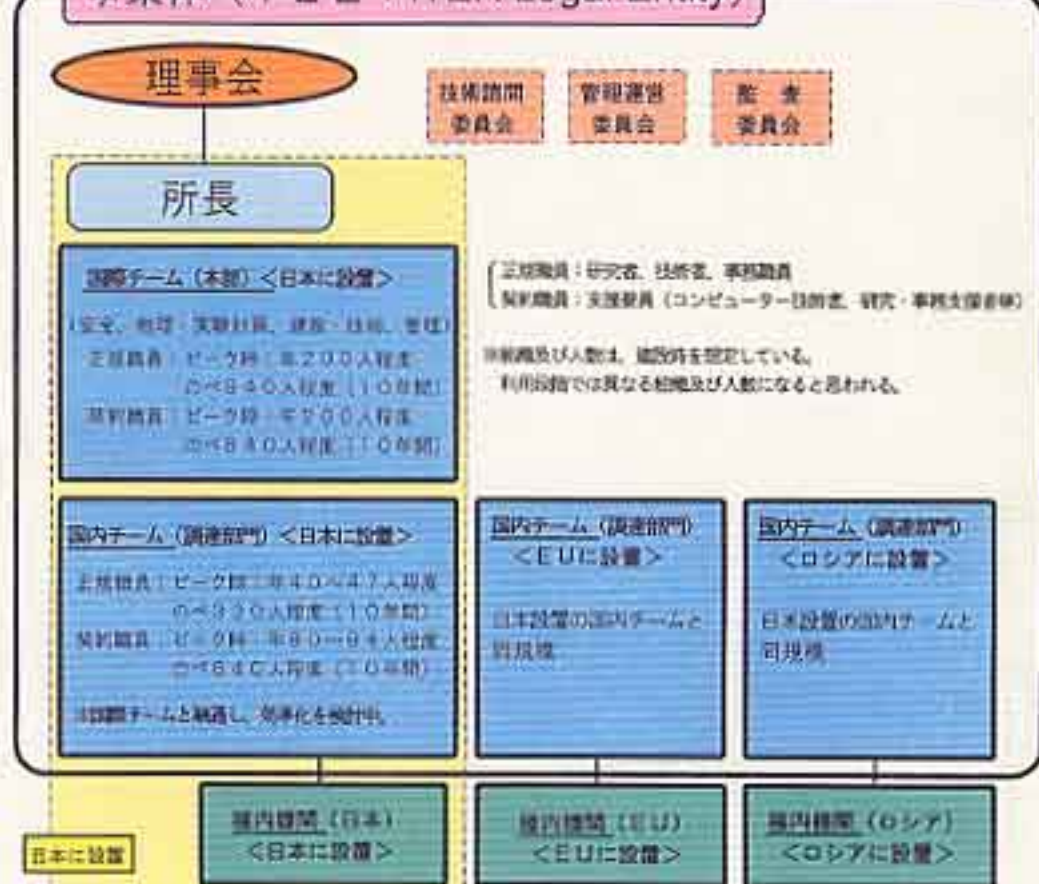
ただし廃止措置費用は各国により運転段階に積み立て

スケジュール

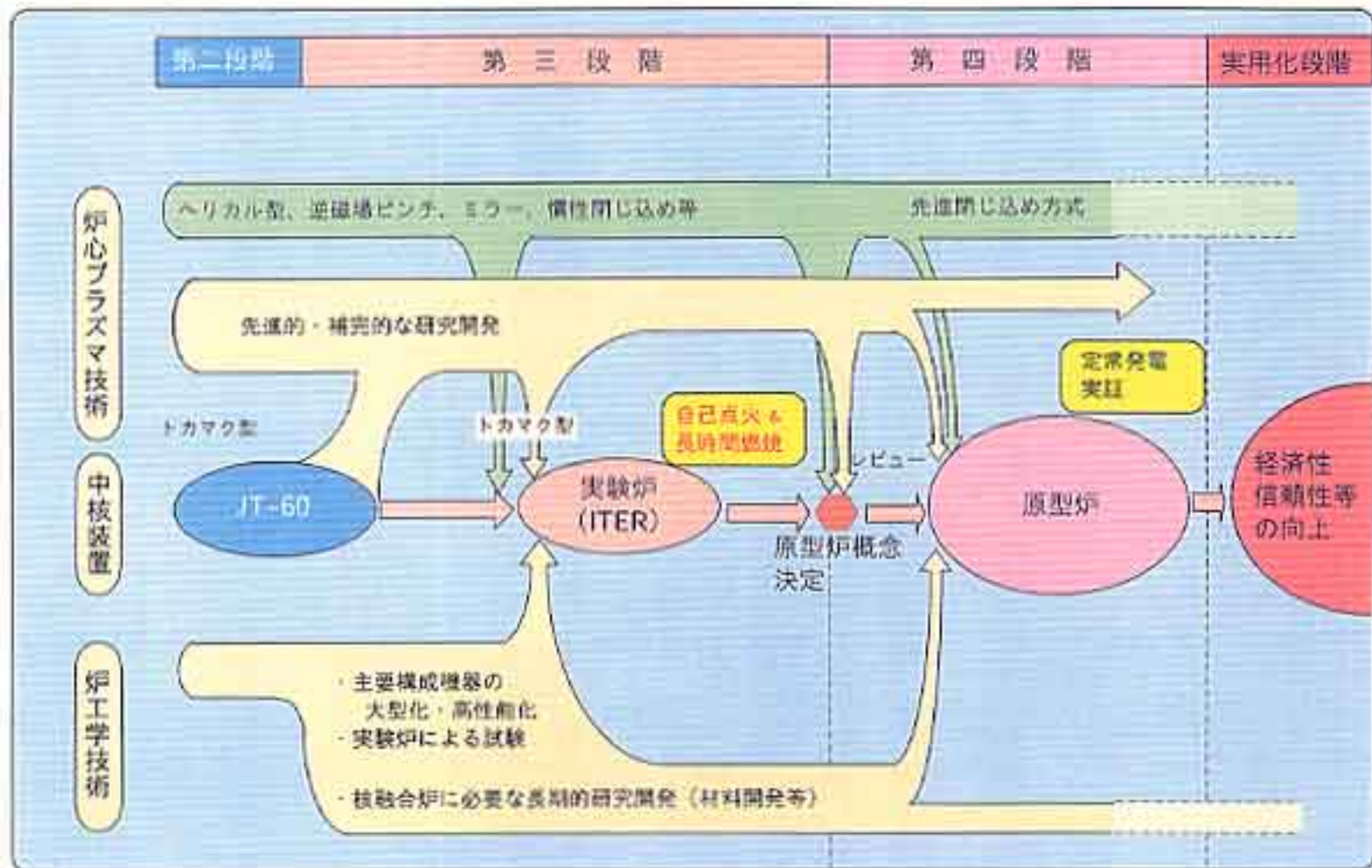


日本誘致時のITER建設段階の実施体制（素案）

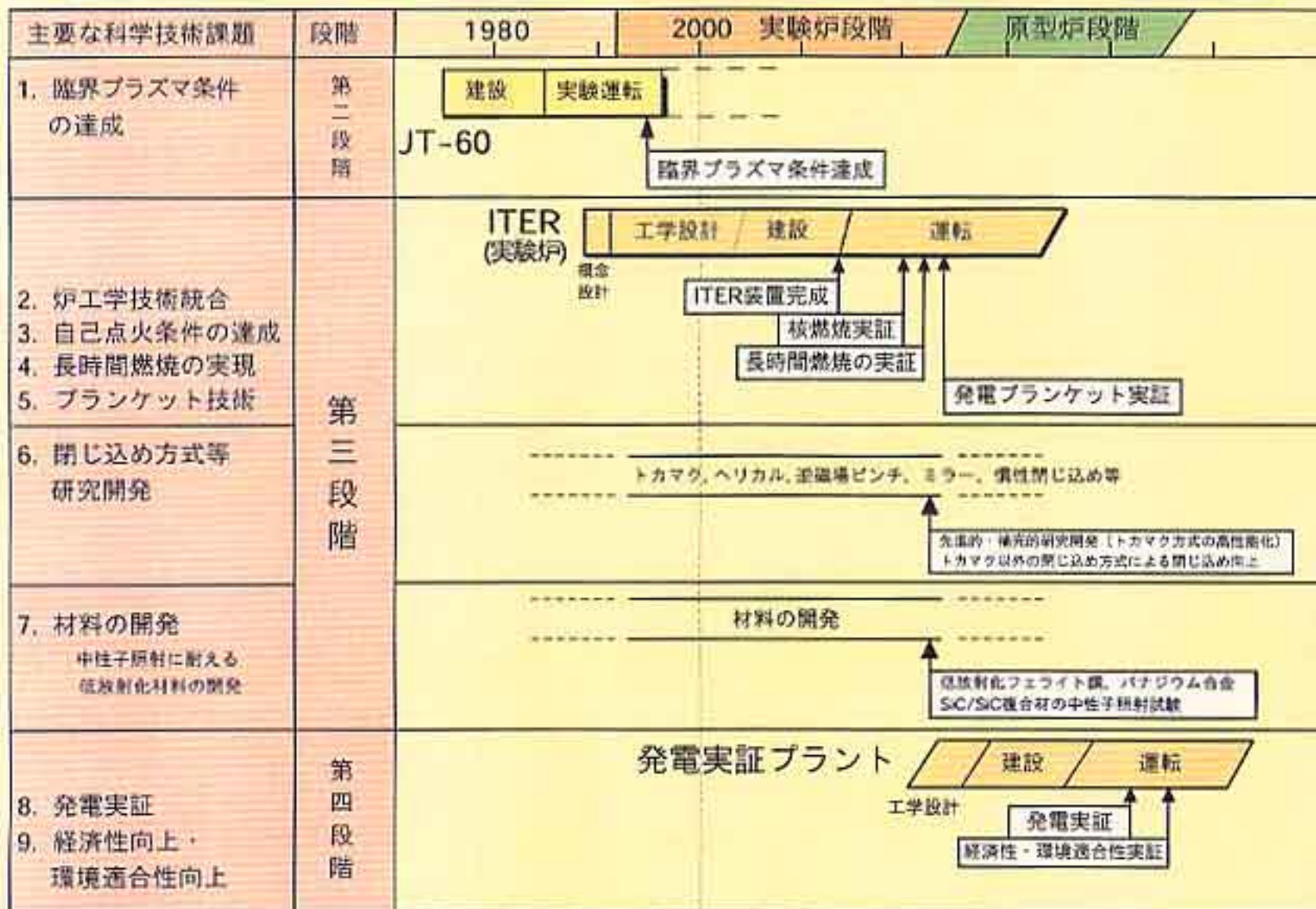
事業体（ILE: ITER Legal Entity）



核融合エネルギー研究開発と実用化への道



核融合エネルギーの実現に向けた主要な科学技術的課題



核融合研究における各種閉じ込め方式の分類

主な核融合装置の方式

磁場閉じ込め方式

慣性閉じ込め方式

トカマク型 ——— 代表的国内装置：JT-60 (日本原子力研究所)



原理：
 プラズマ中に流す電流（プラズマ電流）が作る磁場とトロイダル磁場コイルが作る磁場とが合成してできる軸対称のらせん状磁力線によってドーナツ状容器内にプラズマを閉じ込める方式で、最も高いプラズマ性能を実現しており、世界で最も研究が進んでいる

ヘリカル型 ——— 代表的国内装置：大型ヘリカル装置LHD (核融合科学研究所)



原理：
 ヘリカルコイルが作る非軸対称のらせん状の磁力線によってプラズマを閉じ込める方式で、プラズマ中に電流を必要としない等磁場形成の方式がトカマク型と異なる

逆磁場ピンチ型 ——— 代表的国内装置：TPE-RX (産業技術総合研究所)



原理：
 トカマク型と同様な方式でプラズマを生成した後、プラズマの中心部と周辺で磁場の向きを反転させてプラズマの性能向上を図る方式

ミラー型 ——— 代表的国内装置：GAMMA-10 (筑波大学)



原理：
 プラズマ両端を閉塞した筒状の磁力線によって円筒状容器内に閉じ込め、端部からの損失防止のため電界の効果を用いる方式

レーザー型 ——— 代表的国内装置：激光XII号 (大阪大学)



原理：
 強力なレーザー光を球殻状の燃料ペレットに照射し、これを固体密度の千倍程度に圧縮して瞬時に核融合反応を起こし、その繰り返しで核融合エネルギーを取り出す方式

平成4年6月9日

原子力委員会

第三段階の核融合研究開発は、次に示す基本計画に基づき実施するものとする。

1. 研究開発の目標

第三段階の研究開発は、自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現並びに原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を主要な目標として実施する。これを達成するための研究開発の中核を担う装置として、トカマク型の実験炉を開発する。これらの研究開発により、第四段階以降の研究開発に十分な見通しを得ることを目標とする。

2. 研究開発の内容

上記1.に示した研究開発の目標を達成するために実施すべき具体的な研究開発の内容は、次のとおりとする。

(1) 炉心プラズマ技術

炉心プラズマ技術に関して、以下の研究開発を行う。

1) トカマク型の実験炉による自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現を目標とした研究開発

(i) 自己点火条件

自己点火条件（エネルギー増倍率が20程度）を達成することを目指し、高性能プラズマの閉じ込めの改善、全プラズマ加熱入力に占める高エネルギー・アルファ粒子による加熱入力の比率の向上等に関する研究開発を行う。

(ii) 長時間燃焼

定常炉心プラズマへの見通しを得るために必要と考えられる長パルス運転（1000秒程度以上）を実現することを目指し、高効率電流駆動法、ダイバータ板への熱負荷軽減法、ヘリウム排出法、ディスラプション回避法等に関する研究開発を行う。

2) その他の研究開発

(i) トカマク型装置

実験炉による研究開発だけでは十分解明できない炉心プラズマ技術分野の課題を解明するための補完的な研究開発及び実験炉を含む各段階の中核装置に新技術等を取り入れる前に確認・実証等を行うための先進的研究開発を行う。

(ii) トカマク型以外の装置

トカマク型以外の装置は、今後の研究開発の成果によってはトカマク型を上回る閉じ込めを実現する可能性を有していること、トカマク型装置による研究開発への貢献が期待されること

等から、これらの研究開発を進める。ヘリカル型装置については、大型装置による計画を着実に推進し、高性能閉じ込め状態の定常維持及び高ベータ値の達成に努め、ヘリカル型装置における閉じ込め比例則の信頼性を高める研究開発を進める。また、逆磁場ピンチ型装置、ミラー型装置、コンパクト・トーラス型装置及び慣性閉じ込め装置についても引き続きその研究を進める。

(2) 炉工学技術

実験炉の開発に必要な主要構成機器の大型化・高性能化を図るとともに、原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を図るため、実験炉による試験等を含めた研究開発を進める。さらに、核融合炉の実用化のために必須の炉工学技術であって、その実現までに長期間の研究開発を必要とするため早期に開始する必要があるものについて、その研究開発を進める。

このため、大型・高磁界の超電導コイル、遠隔保守技術とその適用が可能な炉構造機器、高熱負荷に耐える高い除熱性能を有するプラズマ対向機器、大出力・長時間動作の加熱・電流駆動装置、トリチウムの製造・増殖・取扱い技術、ブランケット技術等の研究開発を進めつつ、これらの装置・機器の統合・集約化の技術を確立する。また、高いフルエンスの中性子照射に耐える構造材料、ブランケット材料、計測・制御機器及び低放射化材料の開発を進めるとともに、中性子照射による材料特性等のデータの蓄積を行う。

慣性閉じ込めの技術については、高いエネルギー変換効率と繰り返し動作頻度を持つ高出力ドライバを開発する。

(3) 安全性に関する研究

核融合炉の安全性の向上に資する観点から、トリチウム等の放射性物質の炉内外における挙動の把握、機器・設備の工学的安全性、核融合炉の安全性評価手法等の研究開発を進める。

(4) 核融合炉システムの設計研究

核融合動力炉を含む核融合炉システムの具体的な構想を策定し、その設計研究を進める。

3. 研究開発の分担

実験炉に係わる開発、試験及び研究については、日本原子力研究所が担当する。実験炉以外の研究開発は、大学、国立研究機関及び日本原子力研究所が相互の連携・協力により進める。これらに当たっては、産業界の積極的参加が得られるよう十分配慮して研究開発を進める。

4. 研究開発の期間

第三段階の研究開発は、平成4年度から開始し、実験炉による研究開発が終了し、かつ、次期中核装置と考えられる原型炉による研究開発が開始される段階、又は第四段階核融合研究開発基本計画の策定が行われた段階のいずれか早い時点において完了するものとする。

ITER誘致地点に係るサイト適地調査の実施

○目的

ITERを我が国に誘致する場合には、候補地点の選定が必要となるため、文部科学省において、候補地点の有無及びサイトとしての適性についての調査を実施（平成13年7月4日～10月18日）。

○調査の概要

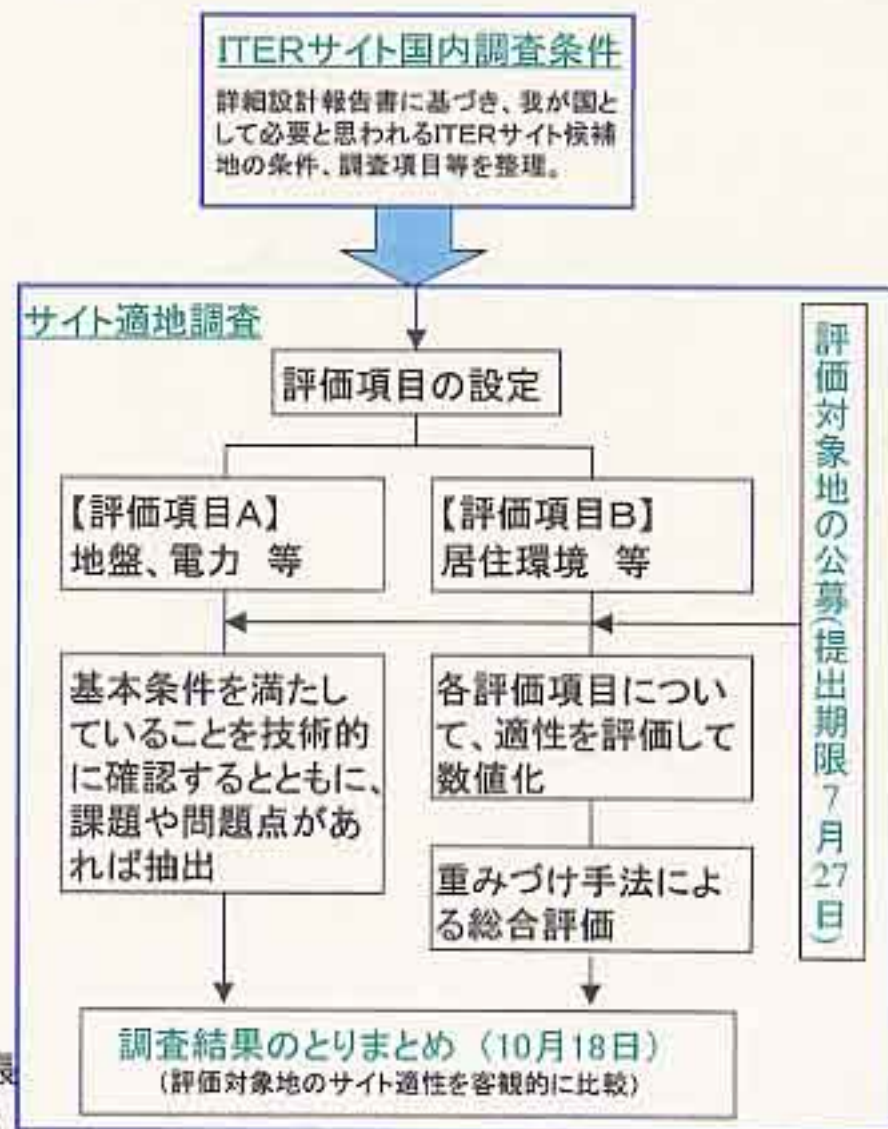
学識経験者等の協力を得て客観的に評価。

- (1) 誘致の希望を公募。
- (2) 誘致を希望する都道府県知事から「ITERサイト国内調査条件」に示す「調査項目」に沿った「提案書」を受け付け、北海道、青森県、茨城県から提出（7月27日）。
- (3) 「提案書」の内容に基づき「ITER国内サイト調査条件」への適合性等について、学識経験者の協力を得て評価。（ヒアリング等を実施。）

○サイト適地調査の協力者

座長	秋山 守	(財)エネルギー総合工学研究所理事長
	井上 信幸	元原子力委員会核融合会議座長
	下平尾 勲	福島大学経済学部教授
	下村 安夫	ITER副所長
	田中 靖政	学習院大学法学部教授
	谷口 治人	(財)電力中央研究所狛江研究所 研究コーディネーター
	刀根 薫	政策研究大学院大学教授
	西 好一	(財)電力中央研究所我孫子研究所副所長
	野口 和彦	三菱総合研究所安全科学事業推進部長
	翠川 三郎	東京工業大学総合理工学研究科教授

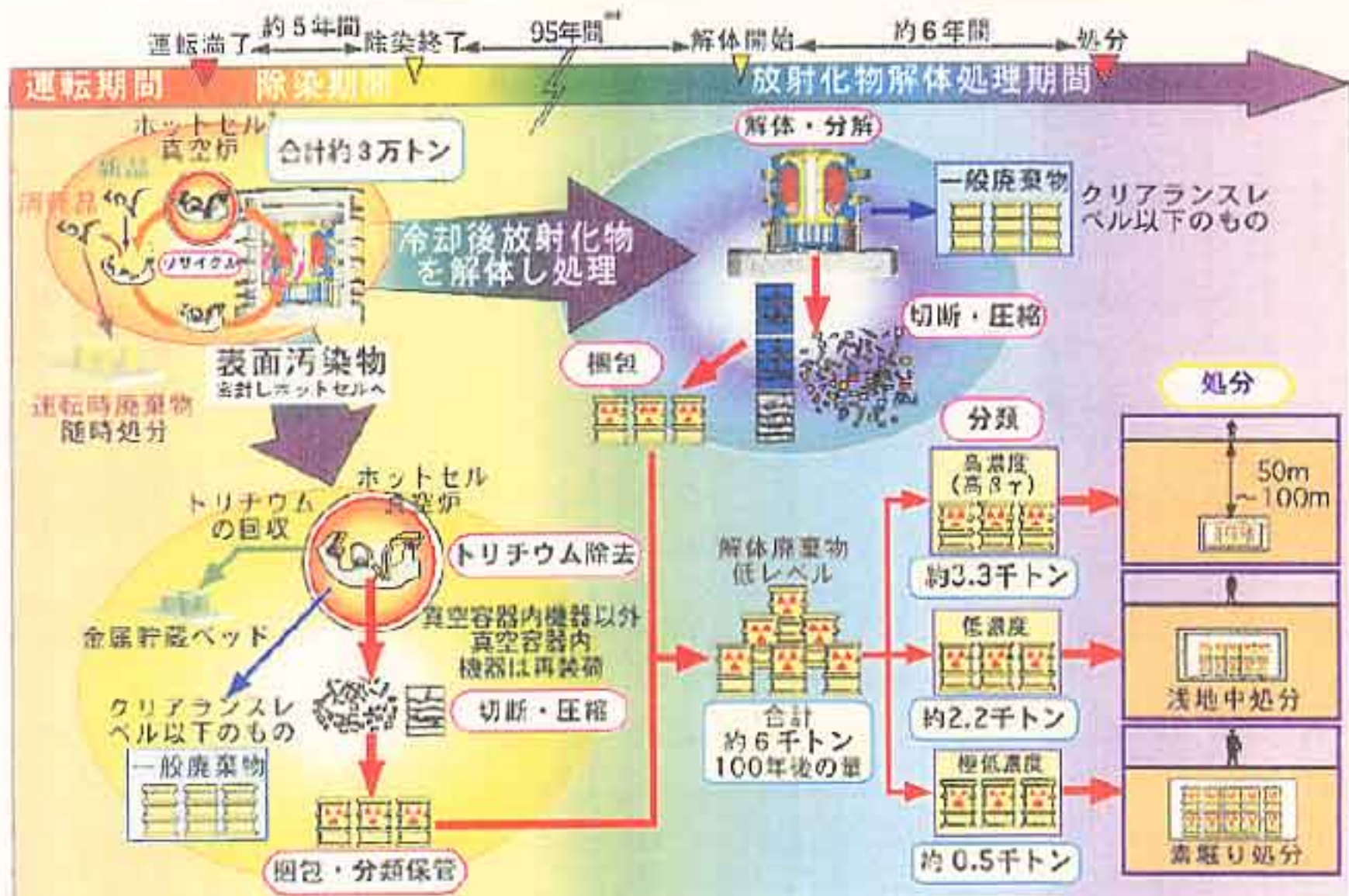
○ITER国内サイト適地調査手順



ITERサイト適地調査報告書の概要

	評価項目A	評価項目B		
	→ITER設置の基本 条件 例：用地面積、地盤、電力 地元の理解と協力等	→ITERの適性条件 (専門家による数値評価) 例：自然災害要因、生活 環境、研究環境等	サイト整備費 (試算) (億円)	総合評価
茨城県 那珂町	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤等の土地条件 ・用地造成済 ・送電線等整備済 ・地元の理解と積極的な 協力 等 	<p>4. 3点 (5点満点)</p>	674~705	候補地点として十分な適性を有する。
青森県 六ヶ所村	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤等の土地条件 ・用地提供、送電線整備 ・廃棄物の県内処分 ・地元の理解と積極的な 協力 等 	<p>4. 1点 (5点満点)</p>	872~878	候補地点として十分な適性を有する。
北海道 苫小牧市	<ul style="list-style-type: none"> ・軟質地盤の土地条件 ・大規模電力貯蔵用電池の 開発等の必要性 ・地元の理解への一層の 努力の必要性 等 	<p>3. 5点 (5点満点)</p>	1701 ~2407 以上	候補地点として選定する積極的理由に乏しい。

放射性廃棄物の発生から処理までの流れ（例）



* Hot Cell: ダイバータ等の補修を実施するための大型気密空間 ** 95年間という保管管理の期間は未定。それにより廃棄物量も変化する。

ITERに関する検討について

①科学者による科学技術的な助言(科学的意義や将来研究成果が得られる見通しを得る)

・原子力委員会核融合会議(1988/1～2001/3)

- 一核融合研究開発に関する計画の総合的推進の観点から、ITER計画について、ITERを実験炉として位置づけること、ITER最終設計報告書案等についての技術的検討が行われた。
- 一審議の状況は、インターネット等を通じて公開されており、情報提供されている。
- 一主な結論
 - ☆ITERを実験炉として位置づけるという結論(1996/8、1998/11)
 - ☆ITER工学設計活動最終設計報告書案の国内評価を行い、設計が妥当と結論(2001/3)

・ITER計画検討会(2001/2)

- 一大学、核融合科学研究所、日本原子力研究所及び国立試験研究機関等の核融合研究者(約350人)が自発的に参加し、その代表者によってITER計画の意義を明確にし、その実現可能性に関して科学技術的見地から検討された。

②有識者による幅広い観点からの提言(大型計画の実施は、国民社会に対し大きな影響を与えるため)

・原子力委員会ITER計画懇談会(1996/12～2001/5)

- 一ITER計画の進め方について、核融合の専門家以外にも経済、国際政治等の様々な分野の専門家による社会・経済的側面を考慮した広範な検討が公開で行われた。
- 一審議の状況は、インターネット等を通じて公開されており、情報提供されるとともに、パブリックコメントを求めた上で報告書が取りまとめられた。
- 一結論
 - ☆ITER計画懇談会報告書において、「我が国がITER計画に主体的に参加するだけでなく、設置国になることの意義が大きいと結論」「今後関係者によって、誘致の適地の有無、財源の確保の問題などについて検討を行った上で、総合的に判断を行うことが必要」との報告書が取りまとめられた。(2001/5)

③我が国の科学技術の推進という全体的な視野の中で、プライオリティを判断

- ・総合科学技術会議における審議及び判断

④科学技術に限らない我が国の活動全体という広い視野における判断

- ・政府の判断(文部科学省から発議して閣議レベルでの判断)

核融合会議委員（平成13年1月）

座長	井上	信幸	京都大学エネルギー理工学研究所教授
	阿部	勝憲	東北大学大学院工学研究科教授
	石野	栗	東海大学工学部教授
	伊藤	智之	九州大学応用力学研究所附属炉心理工学研究センター長
	川村	隆	（社）日本電機工業会原子力政策委員会委員長
	岸本	浩	日本原子力研究所理事
	児玉	皓雄	経済産業省工業技術院電子技術総合研究所長
	佐々木	康人	放射線医学総合研究所長
	宅間	正夫	（社）日本原子力産業会議専務理事
	玉野	輝男	前筑波大学プラズマ研究センター教授
	苔米地	顕	（財）電力中央研究所名誉研究顧問
	中井	貞雄	大阪大学大学院工学研究科教授
	藤原	正巳	核融合科学研究所長
	宮	健三	東京大学大学院工学系研究科教授
	宮崎	慶次	滋賀職業能力開発短期大学校長
	本島	修	核融合科学研究所大型ヘリカル研究部研究総主幹
	吉川	允二	日本原子力研究所顧問

ITER計画検討会 幹事会構成員

犬竹 正明	東北大学 教授	
高村 秀一	名古屋大学 教授	
田中 知	東京大学 教授	
松田 慎三郎	日本原子力研究所那珂研究所	所長
森 雅博	日本原子力研究所那珂研究所	主任研究員
吉田 直亮	九州大学 教授	

ITER計画検討会参加者（平成13年2月10、11日開催）

大学（核融合科学研究所を含む）	209名
原研（ITER中央共同チームを含む）	95名
その他	45名
合計	353名

I T E R 計 画 懇 談 会 構 成 員

座長	吉川 弘之	日本学術会議会長
	荒木 浩	東京電力(株)会長 (第 11 回より)
	飯田 経夫	中部大学経営情報学部教授
	飯吉 厚夫	中部大学学長
	伊藤 正男	理化学研究所脳科学総合研究センター長
	井上 信幸	核融合会議座長
	猪口 邦子	上智大学教授
	今村 治輔	(社)経済団体連合会国土・住宅政策委員会共同委員長 (第 11 回より)
	井村 裕夫	科学技術会議議員 (第 11 回より第 14 回まで)
	大河原 良雄	(財)国際協力推進協会理事長
	大田 弘子	政策研究大学院大学助教授
	木田 宏	新国立劇場運営財団顧問
	草間 朋子	大分県立看護科学大学学長
	クラーク グレゴリー	多摩大学学長
	伊達 素行	大阪大学名誉教授
	苔米地 顕	(財)電力中央研究所名誉研究顧問
	豊田 章一郎	(社)経済団体連合会会長 (第 10 回まで)
	中里 良彦	(社)日本電機工業会会長 (第 10 回まで)
	那須 翔	東京電力(株)会長 (第 10 回まで)
	西室 泰三	(社)日本電機工業会会長 (第 11 回より)
	平田 賢	芝浦工業大学教授
	平山 郁夫	日本画家
	藤原 正巳	核融合科学研究所所長 (第 11 回より)
	増本 健	(財)電気磁気材料研究所長
	宮 健三	東京大学教授
	宮島 龍典	核融合会議座長 (第 10 回まで)
	村上 健一	日本原子力研究所理事長 (第 11 回より)
	森 直	科学技術会議議員 (第 10 回まで)
	吉川 允二	I T E R 理事会共同議長