

核融合研究開発推進の意義と将来展望
—持続可能な発展のためと、先端技術のシーズとして—

井上 信幸

京都大学エネルギー理工学研究所

原子力委員会長期計画策定会議 第四分科会 第4回

平成12年1月24日

1. 基本理念：核融合研究開発の意義

核融合研究開発の基本理念は、究極のエネルギー源を実現してエネルギー供給に関する問題を恒久的に解決し、さらに地球環境の保護／再生に貢献する一方、高度で総合的な科学技術の発展を通じて文明の進歩、教育、平和、国際協調、平等で民主的な社会などの理想を追求してゆくことにある。

核融合開発は、大別すれば以下の二点で我が国と人類社会に貢献するものである。

○ 人類の持続可能な発展と環境との調和を支えるエネルギー源を実現する。

核融合エネルギーは時間的にも地理的にも資源的制約がなく、安全性、環境適合性、社会への総合的な適合性に優れ、経済発展を支える基幹エネルギーとしての要件をみたす。

○ 先端技術の多彩なシーズを生み出す。

核融合は基礎科学から応用工学までの広範な科学技術分野の前線を常に広げており、学問の進歩、産業技術への応用、技術革新や人材育成に貢献している。

2. 核融合エネルギー源の特徴

核融合エネルギー源は以下の特徴を有する。

- 燃料資源：核融合の燃料資源である重水素とリチウムは地球上に豊富に存在し、地域的に偏在しないため、資源的制約はない。いくつかの希少元素を炉材料として使用するが、これらの資源量も世界の総発電量の数百年分以上を核融合だけでまかなうに十分と評価されている。したがって、核融合は少なくとも数世紀をこえる人類のエネルギー需要を十分に満たすことができる。我が国をはじめとする資源小国にとっては、自国で核融合発電を行うことにより国際情勢や市場動向に左右されることなく安定な国産エネルギーを得ることができる。その結果、エネルギー資源を巡る国際緊張は和らぐ。
- 低環境負荷：核融合炉はその製造過程、寿命期間中の運転を通して地球温暖化ガスの排出量が小さい。また炉の寿命中に産出する全エネルギーが炉の製造運転に必要なエネルギーにくらべて大きく、エネルギー消費や廃棄物発生等の社会や環境に対する負担も小さい。(図1—OHP5) 運転に伴い放射性廃棄物は発生するが、深地層での処分や1万年単位の厳重な管理は要さず既存技術で対応可能である。
- 安全性：核融合炉は連鎖反応によらないので原理的に制御不能に陥ることがない。核融合炉の持つ潜在的な放射性毒性は、施設に内在する放射性物質を環境放出が許

される濃度にまで希釈するために必要な空気や水の量で表現される。その値は核分裂炉の 1/1,000 以下である。また弱い放射能をもつ灰を大量に排出する輸入石炭を利用する火力発電所に比べても、核融合炉の潜在的放射性毒性は長期的にははるかに小さい。これらの安全上の特徴から、大規模な工学的対策を施さなくとも大量のエネルギーを安全に供給できる。エネルギーの需要地に近接しての設置も可能と期待される。

- 核不拡散：燃料、使用済燃料の国際管理は核分裂性物質が介在しないため不要であり、輸送に伴う事故やテロ対策の問題を回避できる。また燃料サイクルがサイト内で完結され、外から供給される重水素燃料やトリチウム増殖用リチウム、あるいは排出される反応生成物のいずれもが害がほとんどなく、燃料サイクルにかかるインフラストラクチャーである燃料工場、再処理工場、最終処分場などをサイト外や国外に必要としない。
- 集中型エネルギー源：核融合の利用上の特徴として、産業化社会に不可欠な、プラントで生成される集中大規模エネルギー源となることがあげられる。多くの再生可能エネルギー源と異なり、自然条件に影響されず、ベースロードに対して常時安定的に供給できる利点もある。また、太陽光や風力発電と異なり、電力ばかりでなく熱も利用できる。取り出される熱は軽水炉にくらべて高温にできるので、多くの工業プロセスに利用でき、エネルギー需要の相当大的な部分に対応できることになる。将来的には液体／気体燃料生産を通して、得られた合成燃料そのものの利用や、それを用いた燃料電池で分散型電源として利用するような未来型分散エネルギーシステムを構築する場合にも適合可能である。
- 経済性：初期の炉の発電コストは現在の技術ベースからの積算によって評価したところ原子力発電の 1.5～2 倍とみられ、二酸化炭素回収を行った時の火力発電の発電コストと競合できるレベルで実用化可能と見られている。この観点から、地球環境の保全再生を考慮に入れた時の主要エネルギーとして 21 世紀後半市場参入が可能と期待される。

核融合炉の以上の特徴は、従来屢々報じられた楽観的なイメージ「無尽蔵、安全、クリーン」とは若干のかい離があり、短所もあるが、一方、これを補ってあまりある長所もあることが確認された。その結果、核融合の持続可能な発展、環境との調和を満たす主要エネルギー源の候補としてもっとも相応しいものの一つとして、開発意義のあることが結論できる。

3. 核融合エネルギー実現の見通しと開発計画、体制

我が国では、核融合開発を段階的に推進している。各段階においては明確な目標を定め、次の段階へはその目標達成に必要な科学的技術的見通しが得られてから進むこととしている。核融合研究は、これまでの 50 年間で実現に向けたプラズマ性能の指標である温度、閉じ込め時間と密度の三重積を約 6 桁向上した。現在では 10MW レベルの核反応出力を達成すると共に、入力を上回る核反応エネルギー出力を発生する条件を実現している（図 2—OHP6）。次の目標は長時間の核燃焼を実現し、工学的な試験を実施する段階であり、原子力委員会はそのための装置であるトカマク型実験炉を中

核装置とする第三段階核融合研究開発基本計画を平成4年に策定した。国内の研究活動はこの計画のもとに実施されているが、その技術的な妥当性と合理性は変わっていない（図3—OHP7）。

現在、国際協力による ITER(国際熱核融合実験炉)計画で実験炉の設計と技術開発を進めている（図4—OHP8）。ITER は我が国の JT-60 をはじめとする世界の核融合実験装置の成果を集大成したデータベースを用いて設計され、その技術的成立性は信頼度がある。この装置の建設、運転は今後 10 数年我が国の核融合研究開発の一つの大きな柱となる。ITER の我が国への誘致、建設については現在国としての検討が進められているところであるが、核融合研究は我が国が世界をリードする立場にあるため、国内外の多くの核融合研究者は我が国が立地国として相応しいと考えている。

核融合発電の実証は、ITER やそれを補完する研究の成果に基づいて建設される、ITER の次の装置である原型炉で実現の見込みである。プラズマ物理では燃焼プラズマの特性と制御は ITER で初めて研究が可能であり、次の段階での定常、安定な核融合エネルギー発生を目指すとともに、国内の他のプラズマ装置を用いてより進んだ効率的なプラズマ閉じ込め、定常化と特性の理解を目指す。炉工学でも、燃焼プラズマを実現し、維持するためのさまざまな装置は ITER で初めてシステムとして統合され、核融合装置としての特性が研究されるが、さらに発電に向けては、エネルギー変換と燃料製造を同時に行うブランケットの開発が ITER およびそれと並行した計画で進められる。核融合発電を経済的に意味のある規模で行うためには低放射化、耐熱、耐中性子の特性を持った材料が必要であり、この研究には強力な中性子源が用いられる。原型炉は、ITER 計画とそれを補完する研究による第三段階核融合研究開発基本計画にそって、物理、工学、材料の研究を着実に進めることによって ITER 実現後に明確にその具体的な姿がみえてくる見通しである。

このように、今後なお長期間を要するが、トカマク型装置 ITER を中心とする着実な研究開発を進めることによって核融合エネルギーの実現はほぼ視野に入ってきたといえることができる。しかしさらにその後の経済性、市場性の獲得については現段階で見通すことは不可能である。経済性改善のためにも、トカマク型のさらなる改良、定常化、あるいはトカマクの持つ制約が原理的にない代替方式の開発研究により、今後とも革新的、先進的な概念を希求すべきである。

我が国の核融合研究開発は、原子力委員会核融合会議の総合的推進と調整のもと、大学、国立研究所、日本原子力研究所で分担協力して行っている。原研が中核装置である実験炉としての ITER 計画を中心としたトカマクの開発研究を担当する一方、大学と国研はトカマク並びに先進概念による代替方式を広く研究しており、特に核融合科学研究所では現在世界最大最高性能のヘリカル装置による実験を開始した。このように我が国においては、数多くの研究機関が核融合研究開発に多様な取り組みを行い、高い成果をあげているところである。今後核融合研究開発を一層効果的に推進していくためには、研究機関間の連携の強化が必要であり、昨年このような認識に基づき研究機関間の連携・協議の場が設けられたことは評価できる。また、我が国の核融合研究開発における中核プロジェクトである ITER については全日本体制で取り組んでいくことがプロジェクトの成功や我が国の核融合研究開発の水準の向上に不可欠である。（図5—OHP9）。

4. 核融合の拓く先端科学技術

核融合の研究開発は、高温プラズマ自体が従来この地上には存在しなかった全く新しい媒体であり新しい研究対象であるほか、使用する装置、方法の多くが先端技術が必要とする。このため、様々な理工学分野の発展と連係して進められ、広い範囲の学術を進歩、活性化する効果を持っている。核融合で実現された技術は、先端科学技術のシーズとして、産業技術の進歩や装置性能の向上に波及し、また他の先端科学技術分野にも影響を与えている（図 6—OHP11）。こうした分野は、例えば、電気工学、伝熱流動熱工学、機械工学、化学工学、金属工学、真空工学、計測工学、分析化学、計測制御工学、計算機工学等、工学のほとんど全ての分野に及んでいる。

これらは、特定分野の基礎的な研究を目的として行ったものではなく、核融合開発で必要となる先端技術を目的とした開発の過程で進歩がみられたものであり、今後、ITER の実機の製作、運転を行う段階でもさらなる進展が期待される。さらに、各種機器開発を行っている過程では複数の工学の境界や組み合わせも必要とされ、これにより膨大な学際分野の進展も誘発した。核融合炉の要素機器が技術開発の目標となることによって、個々の技術分野が進歩することの他に、科学技術全体のポテンシャルを高める効果もみられる。求心力のある巨大科学技術は、広範な学問の裾野を持ち、数多くの分野の進歩を促進するものである。

また核融合開発に伴い創出される技術は、多くの産業に転用されている。例えばプラズマ加熱用の中性粒子入射装置のイオンビームは、特に従来にない大電流、大面積であり、産業用の半導体や液晶製作に応用されている（図 7—OHP12）。またプラズマ加熱に使用されるミリ波帯の大出力電磁波源ジャイロトロンは、これまで難しかった複雑な形状のセラミックの接合、焼結の装置として商品化されており、今後は、半導体の材料や人工ダイヤモンドなど高機能新材料のプラズマ化学合成や表面加工、また将来的にはレーダーやエネルギー伝送への応用が期待できる（図 8—OHP13）。このような例は枚挙に暇がない。

核融合研究開発には、科学技術の振興、産業技術への波及効果のような直接の効果とともに、教育、研究および人材育成の観点からの効果も期待される。核融合研究開発自体が、従来技術を超えた性能をもつ装置や技術を要求するために、その研究開発に従事する大学、研究機関、産業界において技術者、研究者を育成しており、それらの人材は核融合分野のみではなく、広い分野に核融合で培った先端の工学、技術を浸透させることとなる。特に核融合研究は、ITER 活動に見られるように国際共同作業が活発であり、人材育成の面では技術力と共に国際性でも有効な分野である。我が国学会、産業界の国際交流、国際的な人的ネットワークの構築効果もあり、核融合分野は我が国が広範な科学技術分野において国際的な求心力を得る機会を与えるものと考える。

5. まとめ：今後の研究開発に向けて

以上みてきたように、核融合は21世紀後半の基幹エネルギー源の候補として利点が多く、長期的な計画のもとに着実に開発を進めるべきものである。これまでの数10年、基礎的な研究として大きな進展をみせてきたが、現在は核燃焼によるエネルギーの安定的な発生を行う装置—実験炉の建設に踏み切り、研究の質的な転換をはかる時期にきている。並行して先進的、補完的プラズマ技術開発、14MeV 強力中性子源による材料開発、工学開発、先進概念等を進め、技術的見通しをレビューして次の開発目標を定めるのが段階的開発戦略の主旨である。このような研究の着実な推進により、次の段階の原型炉で核融合エネルギーは実現するであろう。

一方、核融合研究は先端的科学的研究、極限技術開発として、広範囲の理学、工学の進歩と連係しており、基礎研究と開発型応用研究双方の側面をもっている。プラズマに関係した物理学のみならず、様々な分野において学問の進歩、教育、人材養成の効果も大きく、これまでに大きな成果をあげてきた。こうして実現した先端技術はまた、シーズとなる科学技術であり、産業界等で広く波及効果が期待される。

大きな投資が必要となりつつある先端科学技術分野は、今後も国際協力の重要性が高まっていく。企画、設計段階から多くの国が対等な立場で参画して進められてきたITERは、新たな国際メガプロジェクトのあり方の先例として、我が国科学界としてチャレンジする価値がある。核融合研究開発では、我が国は世界のトップランナーとして活躍しており、新たな知見を我が国が世界に発信できる分野のひとつである。この立場をキープし、国際協力をリードしていくことは我が国が世界の科学技術の進歩に大きく貢献する貴重なチャンスである。その開発成果は、我が国の弱点であるエネルギー小資源国からの解放、エネルギーセキュリティの確保、将来は世界の経済発展、地球環境の保全再生に大きく貢献しうる潜在力を持っている。これは今後の我が国の原子力が社会において果たし得る貢献を考える上で、極めて重要な視点である。

核融合研究開発推進の意義と将来展望

—持続可能な発展のためと，先端技術のシーズとして—



井上 信幸

京都大学エネルギー理工学研究所

原子力委員会長期計画策定会議 第四分科会

平成12年1月24日

視点：これからの社会に対して、核融合はどのような貢献ができるのか？

核融合研究開発は科学技術にどのような貢献ができるのか？

○人類の持続可能な発展と環境との調和を支えるエネルギーの開発

- ・ 核融合エネルギーの特徴：資源、安全性、社会への適合性。
- ・ 研究開発課題と見通し：技術的実現の見通しあり。21世紀後半の基幹エネルギーの候補。
- ・ 開発計画と体制：産官学協力、国際協力。

○科学技術の前線を広げる先端技術のシーズ

- ・ 核融合が広げる先端科学技術
- ・ 核融合技術の波及
- ・ 先端分野で活躍する人材育成

- ① 社会の関心：
 - ・ 経済（新産業の創出、他分野への寄与、繁栄等）
 - ・ 安全・環境（社会の受容性、安心、平和、セキュリティ）
 - ・ 未知へのロマン、人類社会への貢献、満足感
- ② 科学技術と社会の関係
 - ： ・ 科学技術の暴走への懸念
 - ・ 社会との対話の不足、未知への不安
- ③ 手法
 - ： ・ 「自由闊達な研究開発」（学問の自由、学際的な交流）
 - ・ 「国として重点を置く研究開発」
（重点分野の設定、産官学市民等広範な力の結集）

核融合エネルギー源の特徴 1

安全で環境と調和する国産エネルギー

- 燃料資源は無尽蔵：

燃料資源（重水素、リチウム）は地球上に豊富に存在し地域的に偏在しない。
炉材料資源も世界の総発電量数百年分以上存在。

資源小国でもエネルギーの安定供給が可能（エネルギーセキュリティ）。

- 環境適合性：炉の製造過程や寿命期間中の運転を通してCO₂の排出量が少ない。

放射性廃棄物は発生するが、既存技術で対応可能、長期管理不要。

- 安全性：原理的に連鎖反応はない。

放射性危険ポテンシャルは核分裂炉の1/1,000以下。都市近郊設置が可能。

- 核不拡散：燃料、使用済燃料の国際管理不要。輸送に伴う問題が発生しない。

燃料サイクルをサイト内で完結。

我が国と人類全体の持続可能な発展を支える主要エネルギー源の候補。

- 集中型エネルギー源：

産業化社会に不可欠。 安定供給。ベースロードに適する。

熱利用、工業利用、燃料生産にも利用可。

（同じ方式の炉心で電気と高温の熱エネルギーの利用が可能）

未来型分散エネルギーシステムにも適合可能。

- 経済性：当初の発電コストは原子力発電の1.5～2倍と予想。

二酸化炭素回収火力発電相当の発電コストと競合可能。

主要エネルギー源として21世紀後半に市場参入可能。

核融合の環境適合性

核融合炉は、ライフサイクルを通して二酸化炭素の排出が少ない

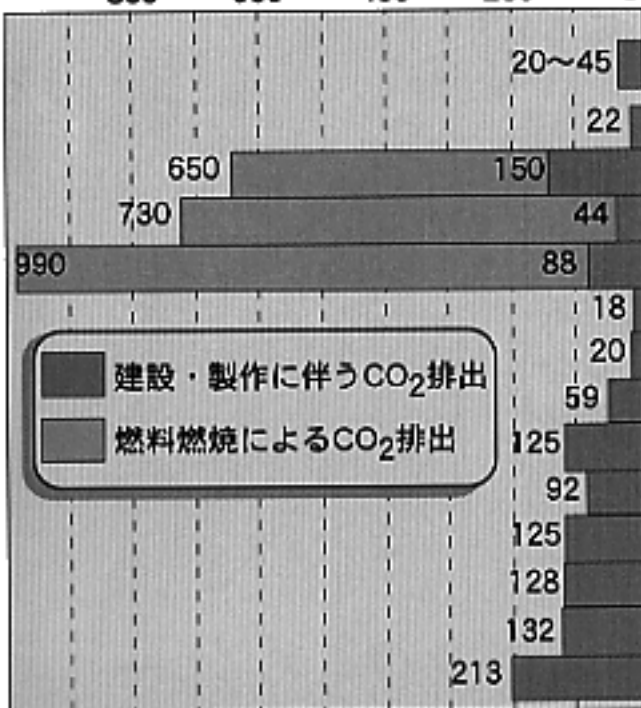
核融合炉は、保有する放射能の長期的な危険が少ない

CO₂排出量 [g/kWh]

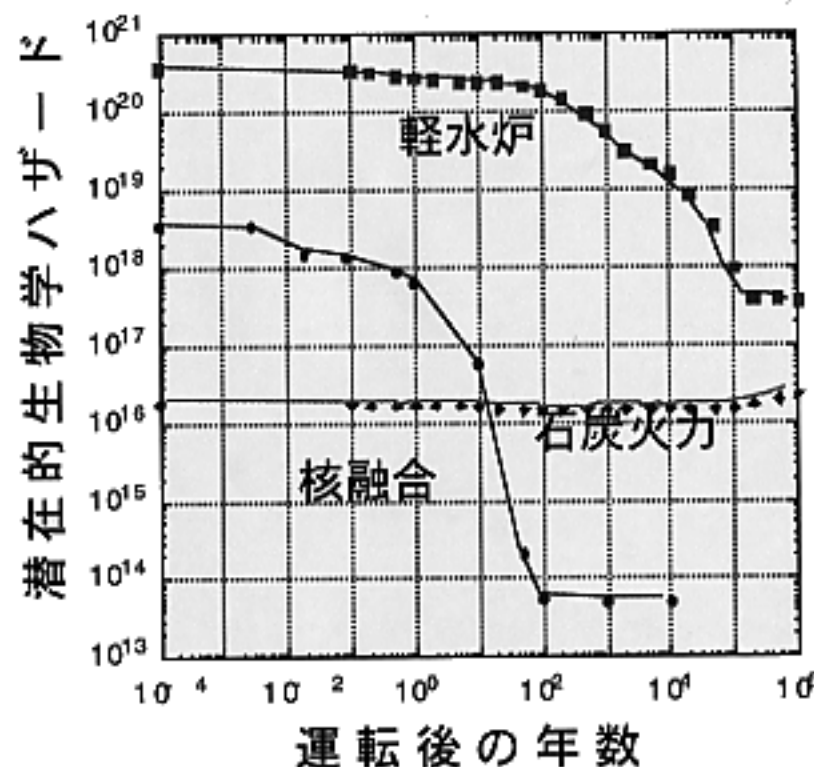
800 600 400 200 0

発電システム

核融合
原子力
LNG火力
石炭火力
石油火力
水素熱 (55 MW)
太陽光 (家庭用)
太陽光 (電気事業用)
波力 (海上式)
風力
潮流
海洋温度差
太陽熱 (タワー式)



各種発電システムのCO₂排出量の比較



発電法と潜在的生物学ハザードの比較

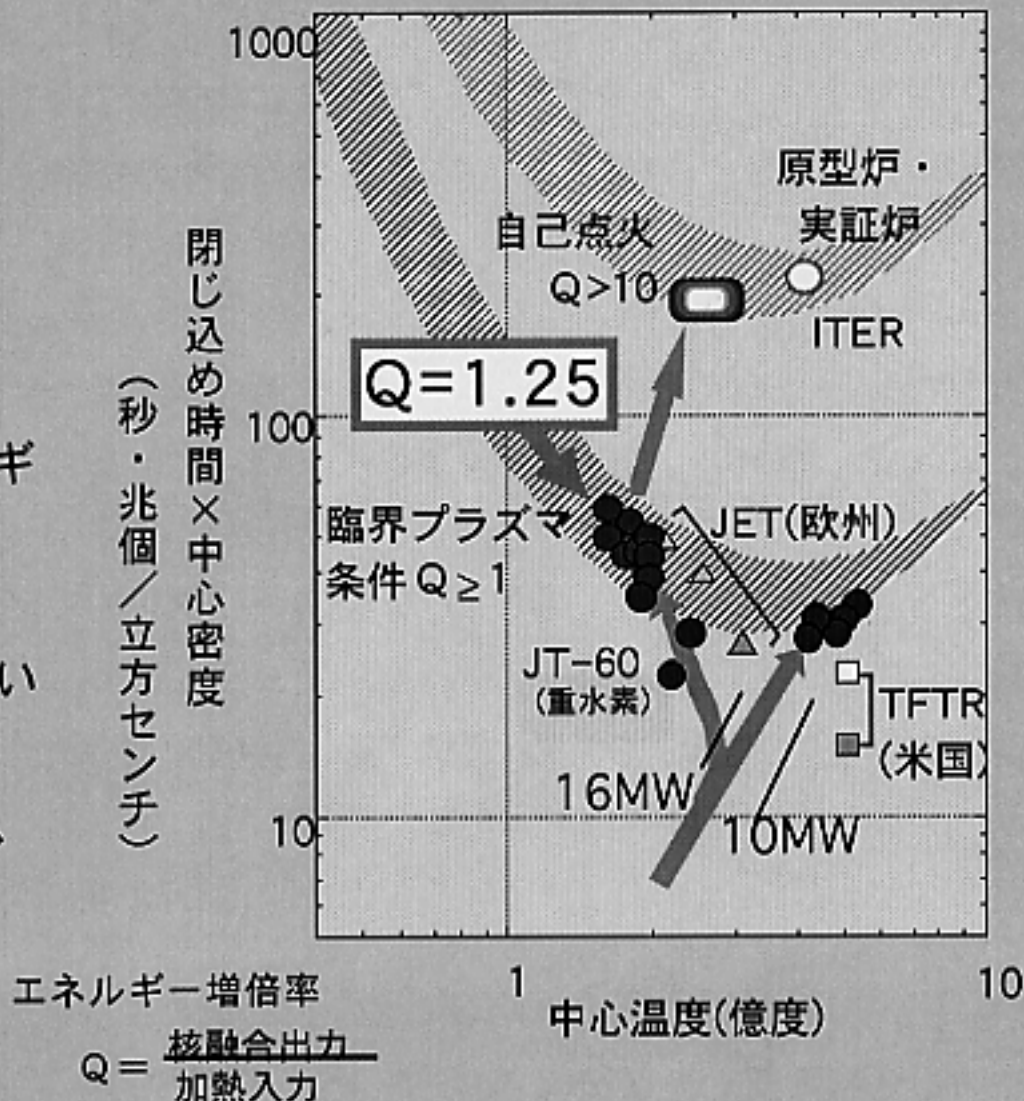
核融合実現の見通し

プラズマ性能の進歩：

- ・核融合研究で、プラズマの性能は40年で約6桁向上。

核融合実現の見通し

- ・核融合はすでに核反応によるエネルギーの発生を実現。
- ・現在、ITERを建設できる段階。
- ・発電の実証はITERなどの成果に基づいてITERの次の装置で実現の見込み。
- ・炉心プラズマの改良によって小型化、経済性の向上が期待される。



核融合研究の段階的開発計画

第二段階

第三段階

第四段階

炉心プラズマ
研究

中核装置

工学技術

代替／先進概念

閉じ込め向上
先進ダイバータ
定常運転

(先進・補完研究)

JT-60

実験炉 (ITER)

原型炉概念
決定

原型炉

定常発電
実証

実用炉

安全性確認試験
炉工学機器開発
(超伝導磁石、加熱・電流駆動
装置、プラズマ対向機器等)

発電・増殖ブランケット、高磁場・高温超伝導コイル
低放射化・耐中性子照射材料
先進材料

ヘリカル、トカマク、RFP、ミラー、慣性等

ITER計画

第三段階核融合研究開発基本計画の中核装置

目的

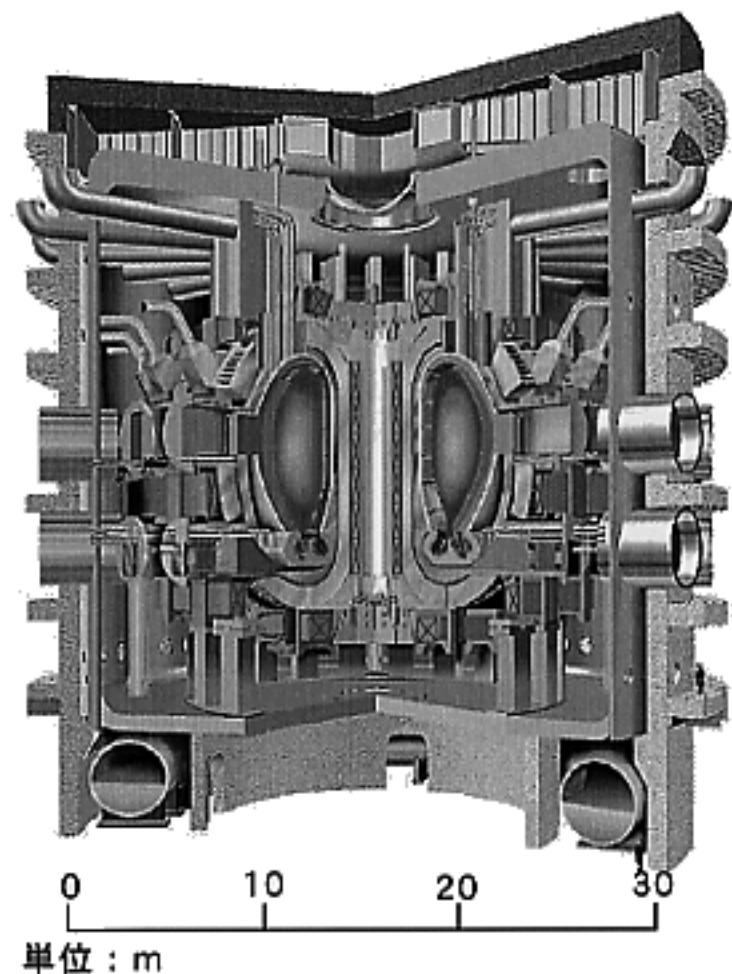
核融合炉の科学的・工学的実証

- ・ 重水素とトリチウムを用い制御された点火と長時間燃焼を実現。定常運転が最終目標。
- ・ 核融合炉工学技術の総合試験

意義

核融合エネルギー実現の見通しを得る

- ・ 核燃焼プラズマの閉じ込めと定常化の研究
 - ・ 総合システムの信頼性及び保守技術の実証
 - ・ 環境・安全性の実証
- 大規模な国際共同事業

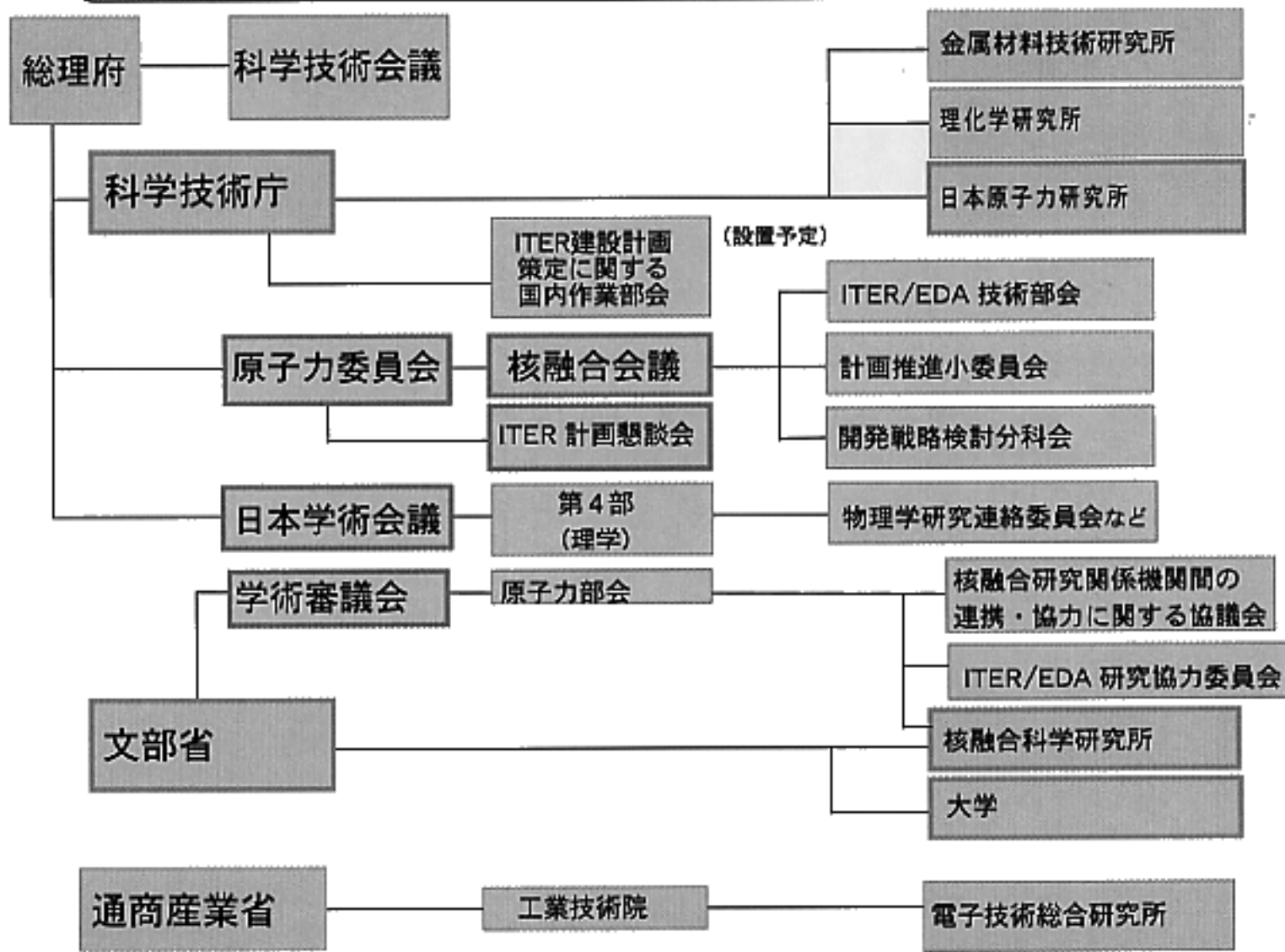


現在、国内誘致、建設を検討中

国内の研究体制

- 我が国では大学、国立研究所、日本原子力研究所、産業界で核融合研究開発。
- 原子力委員会核融合会議で計画の総合的推進、連絡調整。
(大学等の核融合研究は学術審議会立案検討)
- 第三段階核融合開発基本計画に沿って研究を推進。
 - ・ 原研は第三段階計画の中核装置であるトカマク型実験炉の開発研究。
ITER計画を担当。
 - ・ 大学と国研はトカマク並びに代替方式を広く研究。
- 省庁統合を前に連絡・協議のための協力委員会を発足。
 - ・ ITERにも全日本体制で取り組む。

我が国の核融合研究開発組織体制（2000年1月現在）



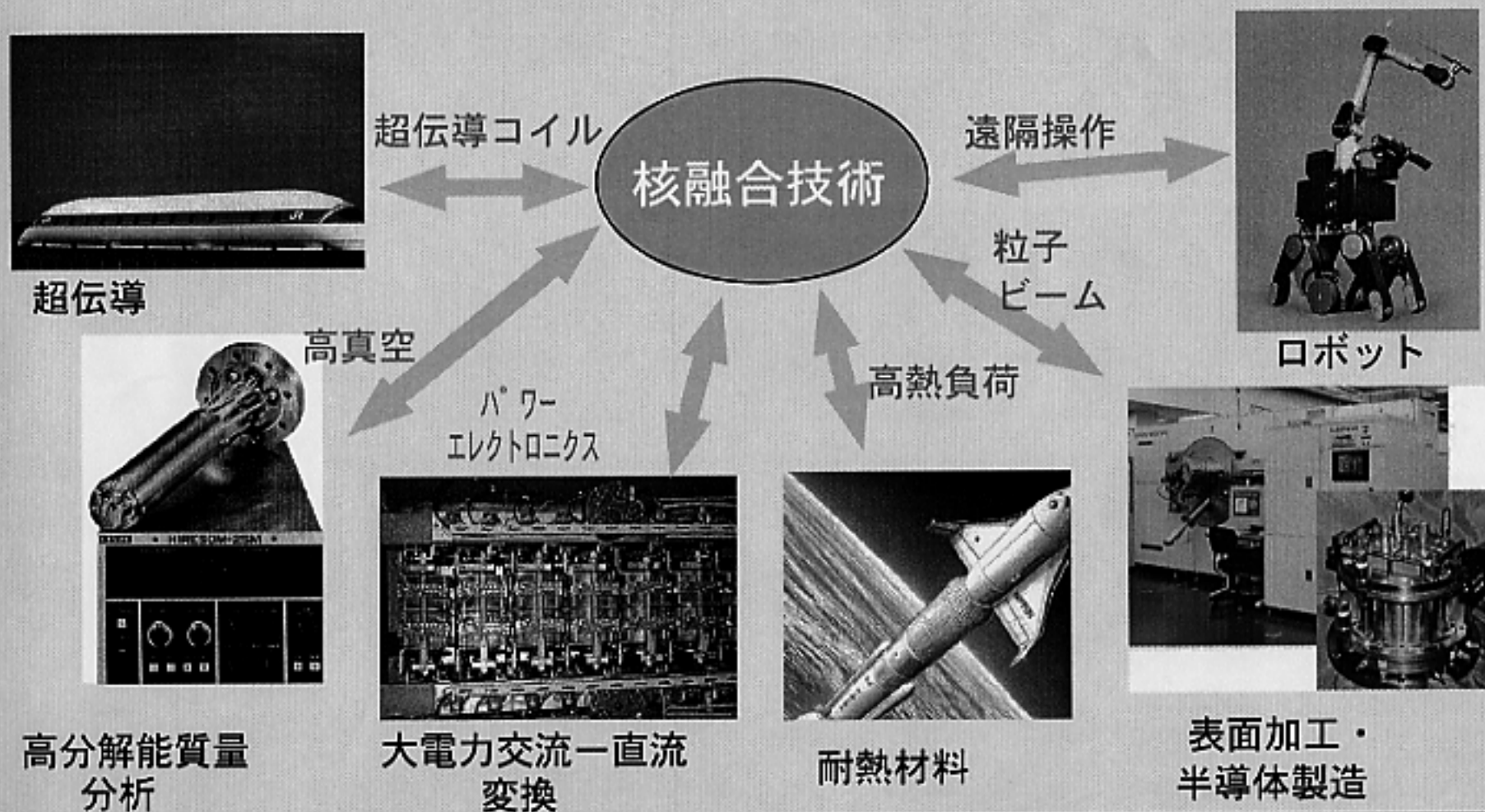
凡例：

政府組織

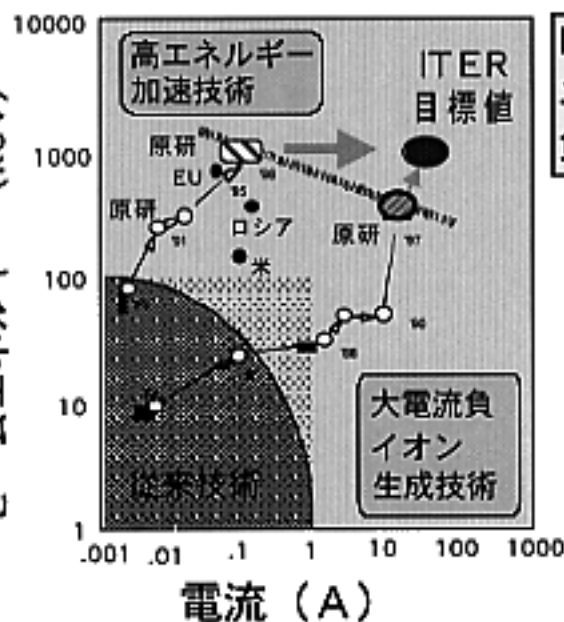
諮問委員会など

大学、研究機関など

先端技術のシーズとなる核融合技術

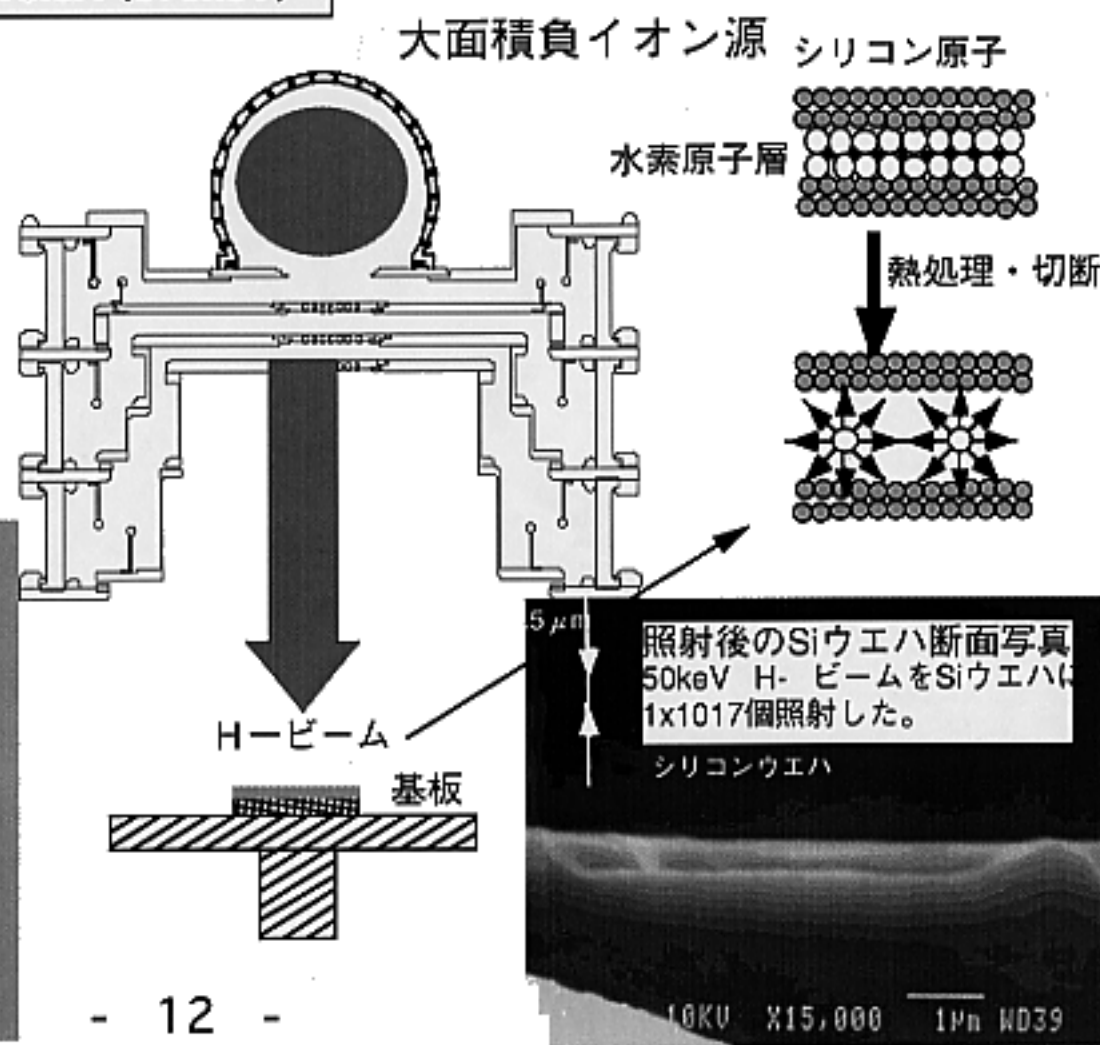


先端的核融合技術とその応用1 ー負イオン源ー



ITER用イオン源の達成性能
エネルギー： 1MeV (0.2A)
負イオン電流： 18.5A (370keV)

シリコン薄膜製造に応用



- ー大面積、一括処理
従来比、2－3桁アップ。
- ー高エネルギー
シリコンウエハ深部へのイオン注入、
10 μ mシリコン薄膜。
- ー超高速LSI用薄膜
SOI(Silicon on Insulator)
- ー次世代太陽電池 (10 μ mSi薄膜)

先端的核融合技術とその応用2 ージャイロトロンー

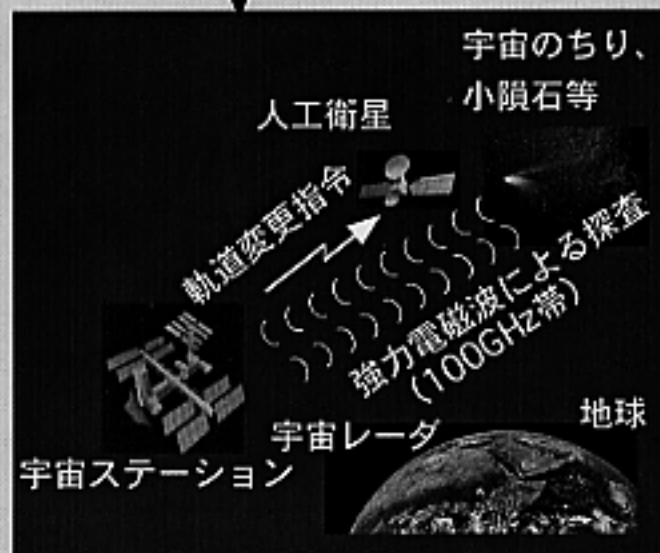
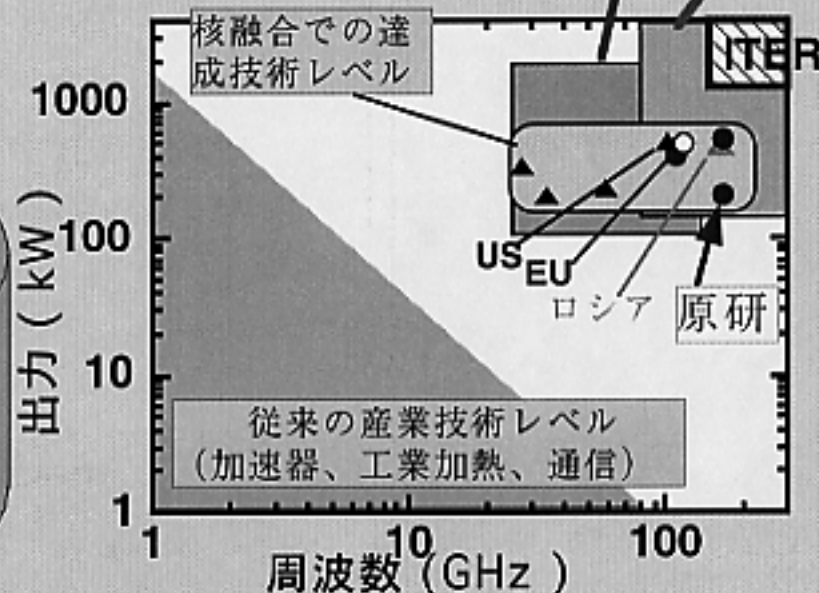
ITER用ジャイロトロンの開発

ミリ波帯
大電力 (1 MW)
長パルス (連続)

170GHz
高周波

波及効果

- 高機能セラミックスの焼結/接合、
高機能新材料合成、エネルギー伝送
- 高分解能レーダ
宇宙レーダ、環境保護



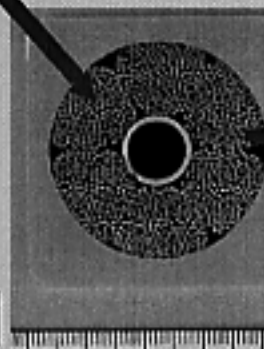
超伝導コイル技術の進歩

高性能ニオブ・スズ線

導体製作技術の達成

モデル
コイル
用導体

巻線



5cm角
の厚肉
コン
ジット

技術課題

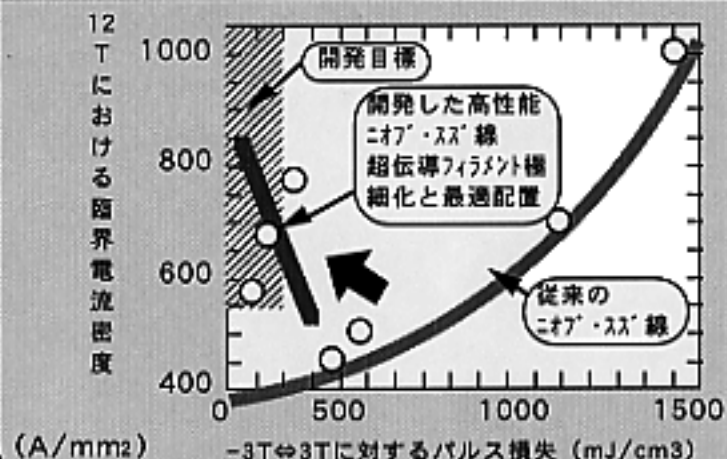
パルス動
作損失の
低減
(従来の
1/5)

高強度化
(6万トンの
コイル間
電磁力に
耐える)

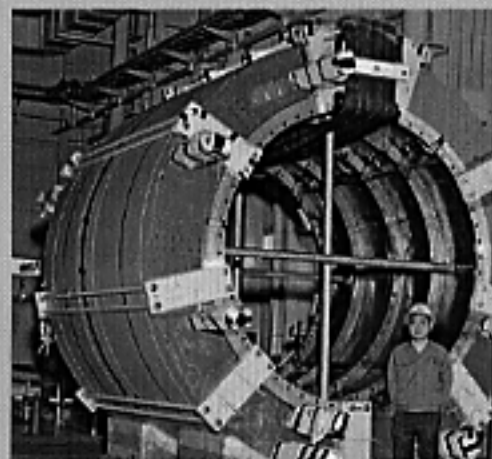
大電流化
(46kA)

高磁場化
(13T)

低パルス損失化の達成

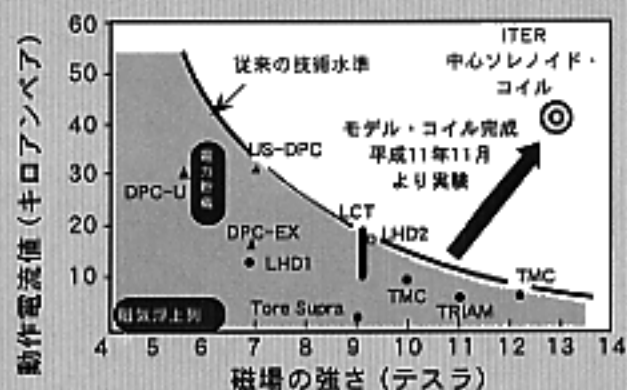


コイル製作技術の達成



ITERモデル・コイル(180トン)

今後の課題→モデル・コイル実験による目標性能
(13T,46kA)達成の確認



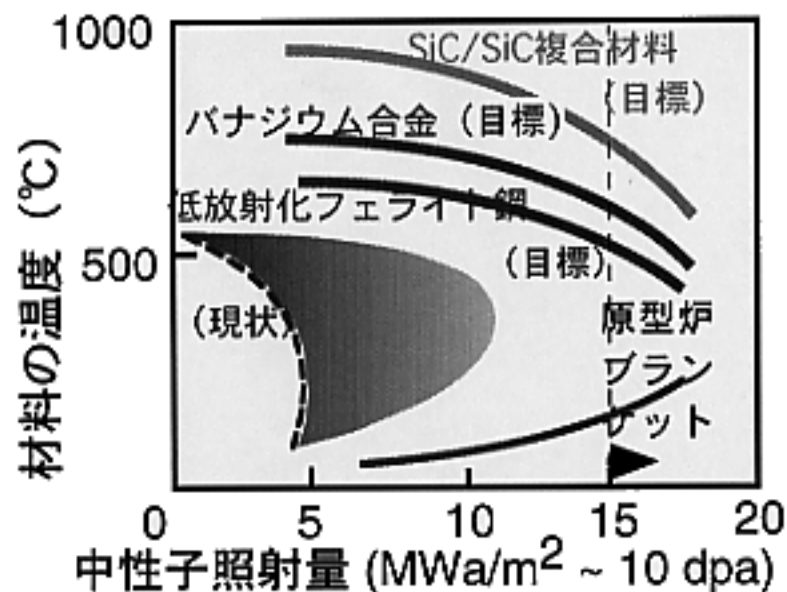
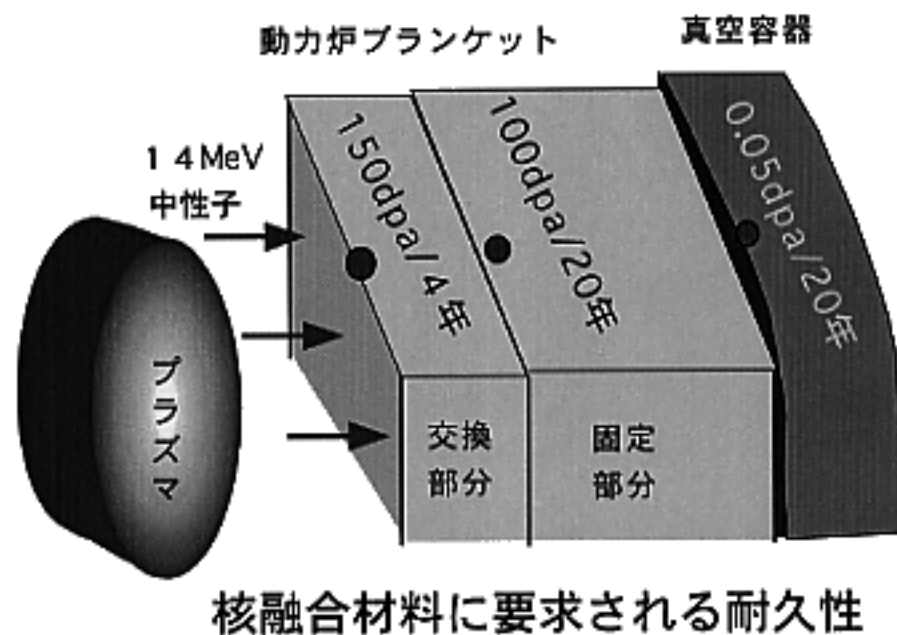
核融合材料開発

核融合開発の今後の課題：低放射化材料開発と強力中性子源

1. 14 MeV強力中性子源で照射
ITERテストモジュール材10~20dpa
原型炉材重照射~100dpaまたはそれ以上

2. TERで発電ブランケットの
テストモジュール試験
原型炉（発電実証用）候補材使用

3. 原型炉ブランケットの目標
交換部は4年毎（100~200dpa）
固定部は20年（~100dpa）



核融合材料の耐久性と耐熱性

1. 核融合炉は21世紀後半の基幹エネルギー源の有力候補のひとつ。

- エネルギー源として多くの利点がある。
- 核融合研究は今後数10年の長期計画。

物理、工学、材料開発の着実な実施を通して実現の見通し。

- 第三段階の中核装置としてITER計画を推進。
- 並行して14MeV強力中性子源による材料開発、工学開発。

2. 核融合では極限技術が多く、広範囲の工学分野の進歩と連携。

- シーズとなる科学技術が豊富。広く波及効果が期待される。

研究開発のあり方

① 国際的な枠組みのあり方へのチャレンジ

- ・ 大きな投資が必要な先端科学技術分野は、今後も国際協力の重要性が高まる。
- ・ ITERは、企画、設計段階から多くの国が対等な立場で参画。
ITER建設、運営は我が国が新たな国際メガプロジェクトに取り組むチャンス。

② 国際競争力

- ・ 現在、我が国は核融合研究の分野で世界のトップランナー。
- ・ 新たな知見を我が国が世界に発信できる分野。世界のトップランナーとしての立場のキープは、今後の我が国の研究開発のあり方として重要。