

I T E R 計画懇談会報告書（案）

－ 国際熱核融合実験炉（I T E R）計画の 進め方について －

平成13年5月18日

原子力委員会 I T E R 計画懇談会

(目 次)

要旨

はじめに

1. 地球環境問題、エネルギー問題の位置づけと科学技術
2. 長期的なエネルギー需給の見通しと核融合エネルギーの役割
3. 核融合エネルギーの技術的見通し
 - (1) 核融合エネルギーの特徴
 - (2) 核融合の安全性
 - (3) I T E Rの技術と状況・今後の計画
 - (4) 核融合炉開発研究と計画の拡がり、今後必要となる投入努力・予算と技術
4. 我が国としての I T E R計画の進め方
 - (1) 国際的役割
 - (2) 科学技術的潜在力
 - (3) 日本社会の倫理性からの評価
 - (4) 安全面での配慮
 - (5) 投資面からの評価
5. 計画具体化にあたっての考察
6. 結言

(参考資料)

1. I T E R計画懇談会の設置、構成員及び審議経過
2. 核融合エネルギーの研究状況
3. 核融合エネルギーの位置付け
4. 各種電源別の二酸化炭素排出量
5. 核融合エネルギーの資源量
6. 核融合の安全性の特徴
7. 核分裂と核融合
8. トリチウムとは?・I T E Rでのトリチウム安全取扱い・設計上想定する事故事象
9. I T E Rの廃棄物・放射性廃棄物の分類とその処理
10. 世界における代表的核融合装置
11. 核融合研究開発のこれまでの展開とこれからの見通し(磁場閉じ込め方式)
12. 国際熱核融合実験炉(I T E R)計画の概要
13. I T E Rの廃棄物の特徴
14. I T E R工学R&D、工学R&Dの分担
15. 新旧I T E Rの比較

16. ITER建設のための国際協定に関する非公式政府間協議
17. 核融合エネルギー研究開発と実用化への道
18. 核融合材料技術
19. IAEA核融合エネルギー会議における各国の論文数
20. 核融合研究者の構成と推移4
21. 我が国のエネルギー研究に占める核融合研究開発の推移
22. 我が国の核融合研究開発実施体制の推移
23. 日本が参加している主な多国間国際共同研究プロジェクト
24. 核融合技術の波及効果
25. ITER施設の安全確保の基本的な考え方について
26. 核融合エネルギーの実現に向けた総合的な開発戦略について

要旨

(エネルギーと核融合)

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であって、問題の理解を共有し、協調の方法を開発する努力を怠ってはならない。

核融合エネルギーは、

資源的には地域的な偏在がなく量的にも制約は予想されていない。

核融合反応は核分裂と比べて安全対策が比較的容易である。

低レベル放射性廃棄物は発生するが、高レベル放射性廃棄物の処理処分の必要がない。

国際的な緊張を引き起こさず、エネルギーの逼迫を防ぐ。

等の特徴があり、将来のエネルギー源の一つとして有望な選択肢である。

核融合の実用化に向けて、我が国をはじめ世界各国において、多様な方式で多くの研究開発が進められてきている。この核融合の研究開発において、今後取り組むべき重要課題は、核融合反応により燃焼するプラズマを制御する技術を確認することであり、このため、国際協力により多額の経費を分担して行う「国際熱核融合実験炉 (ITER)」の建設が計画されている。

当懇談会としては、研究者の自発性の中で進む科学の進展と科学技術による人類への貢献との幸福な一致を保ちながら、核融合に関する研究開発を推進することは有意義と考えされており、国際協調の下、我が国がITER計画に主体的に参加していくことを期待する。

(我が国としてのITER計画の進め方)

我が国のITER計画への取り組み方を検討するに当たっては、我が国の現状を認識するとともに、今後のあるべき姿を展望する必要がある。

①国際的役割

21世紀の我が国は、世界に誇れるような研究のインフラとなる施設を持ち、世界の研究者にそれを公開して我が国の存在意義を高めるとともに、相互依存の関係を維持していくべきである。

②科学技術的潜在力

我が国の核融合に関する研究開発力は、その人的な研究開発能力や産業力から国際社会でも高く評価されており、我が国は十分な科学技術的潜在力を有している。我が国が世界で唯一のITERを主導的に建設することにより、この分野の科学技術力及び産業技術において我が国の科学技術的潜在力を長期間維持できる可能性がある。

③日本社会の倫理性からの評価

核融合エネルギー開発は、現世代の人々に直接的な利益をもたらすのではないが、未来の

人類を思う公共的意識を社会的に顕出させるものとなりうる。また、これまでの我が国の原子力平和利用の実績は国際的に高く評価されており、我が国が核融合エネルギー開発を主導することを諸外国から受容される条件が整っている。

④安全面での配慮

トリチウムの輸送が必要である。また、核融合反応により中性子が発生するため金属が放射化する。更に、放射化金属等の廃棄物を処理処分することが必要となる。安全性の問題に対しては、国民の理解を得つつ、適切に対処していくことが求められる。今後の課題としては、放射化金属等の発生を低減化を図るために低放射化材料の開発が必要である。

⑤投資面からの評価

研究開発に対する国の資源配分を考えた場合、国民全体という見地からの広義の安全保障、国家という規模で行われる国際的機能は、プライオリティの高いものと考えられ、ITER計画はこの範疇に入っている。また、核融合炉実現までに必要な費用の推定を正確に行うことは困難であるとともに、それ以上に核融合炉実現によって得られる利益の大きさについてはほとんど推定不可能である。当懇談会としては、核融合エネルギーに対して行う投資は、あたかも人類の将来の自由度を保障する保険料と見做すべきと受け止めている。

このような観点から、当懇談会は、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した。

大規模な科学技術計画の進め方について判断をするためには、①科学者による科学技術的な助言、②有識者による幅広い観点からの提言、③科学技術におけるプライオリティの判断、④科学技術に限らない我が国の活動全体というより広い視野による判断という、各段階毎のそれぞれの責任による判断が行われるべきである。当懇談会においては、②の有識者により幅広い観点から検討を行った。検討を通じ、今後ITER計画を進めるにあたって留意すべき点が指摘された。

ITER計画を進めるに当たっては、技術目標と開発リスクとコストのバランスをとりつつ計画の費用を最小化することが不可欠の条件であるとともに、意義や利益を最大化するよう努力することが最も重要な条件である。

また、国民に対して安全性を含めた正確な情報の提供を十分行う等国民の理解を得るための不断の努力や、ITER計画を牽引していく指導的な役割を果たす人材が必要であるとともに、安全規制体系の整備等については、行政において着実な実施がなされることを望む。

更に、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今後検討を行った上で、総合的に判断を行うことが必要と考える。

はじめに

当懇談会は、我が国として今後の国際熱核融合実験炉（ITER）計画の進め方について、社会的・経済的側面を考慮し、長期的展望に立った国際社会の中での役割も見通した幅広い調査審議を進めるために設置された。

当懇談会は、ITER計画について、1992年から進められてきている工学設計活動（EDA）が終了する予定であった1998年7月頃に建設段階への進展があるとの見通しの下に、1997年2月から調査審議を開始した。しかしながら、当時、国際的に工学設計活動をさらに3年間延長する方向で話し合いが進んだこと、また、国内的には財政構造改革を背景として、1997年6月に、今世紀（20世紀）中の集中改革期間内はITERの国内誘致を行わないことが政府の方針として決定されたことなどの諸情勢の変化により、建設段階への進展は、従来想定された時期より遅くなる見通しとなった。こうした状況を考慮し、ITER計画に対して我が国のとるべき対応についての結論のとりまとめは、今後の適切な時期に行うことが適当であるとの判断に至った。このため、当懇談会としては、それまでに議論してきた事項について論点の整理を行い、1998年3月に報告書「懇談会における論点の整理と今後の課題について」をとりまとめた。

同報告書においては、いずれ人類を襲うであろうエネルギー問題を前提とし、現在生きている世代はこれから生まれてくる世代の歩む道に対する制限を最小化する義務を負っているとの理念のもとでの技術、社会等の考察を通じて、我が国がITERの設置国となることの意義の大きいことを理解した。同時に、エネルギー問題の持つ本質的不確実性やITERを取り巻く諸情勢などにより、我が国がITERの建設への移行も含め、設置国になることに名乗りを挙げるか挙げないかを決断するために明らかにしなければならない6つの課題（①エネルギーの長期に亘る需給調査、②代替エネルギーのフェージビリティスタディ、③核融合エネルギーの技術的実現性、④計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究、⑤研究の資源配分、⑥国際関係）を示した。

その後、ITER計画については、近年の核融合研究の進展を踏まえながら設計の合理化を図るために、1998年7月から3年間延長して国際共同で工学設計活動が行われている。この結果、2001年2月には最終設計報告書（案）がとりまとめられ、それまでのITERの設計よりコンパクトになったITERの設計が公表されるとともに、本年7月には工学設計活動は所期の目的を達して終了する見通しとなっている。一方、2000年4月からはITERの建設、運転、利用、廃止措置に関する共同実施に向けた非公式政府間協議が開始され、同年12月には共同実施協定に盛り込まれ得る事項について基本的考え方がとりまとめられた。これに基づいて、現在のEDA参加極及び他の関心を持つ国による公式

政府間協議が開始され、2001年中頃には誘致を希望する極からサイトの提案がなされる見通しである。

当懇談会は、2000年7月以降、このような状況の変化を考慮し、報告書「懇談会における論点の整理と今後の課題について」において示した懇談会としての結論のとりまとめに向けた議論の方向性と道筋とを踏まえ、更に、今後議論すべきとした6つの課題を中心として、審議を行い、我が国がITER計画に対する対応を決定するに当たっての提言をとりまとめた。

近年、ITER計画のような極めて規模の大きな計画については、国内の幅広い賛同の下に進めていくことが必要条件になっている。まず、①科学者による科学的な助言が必要である。これにより、当該計画の科学的意義や将来研究成果が得られる見通しが、科学的観点から明らかにされる。次に、②有識者による幅広い観点からの提言が必要である。これは、大型の科学技術計画の実施は、国民社会に対し大きな影響を与えることによるものである。更に、③当該計画について、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する必要がある。最後に、④科学技術に限らない我が国の活動全体というより広い視野における判断が必要となる。

当懇談会は、このような本格的な合意形成を目指すプロセスの指針を示す役割を担っていると考えられ、このような認識の下に、上述の②の有識者による幅広い観点からの提言として、懇談会におけるこれまでの議論の経過を可能な限り幅広く含めて、それらを論理的・客観的な流れの中に構築することに力を注いだ。我が国がITERの建設への移行も含め、設置国になることに名乗りを挙げるか挙げないかについては、当懇談会の提言を踏まえ、関係者により今後検討すべき事項について更に検討を行った上で、総合的に判断を行うことが必要と考える。

1. 地球環境問題、エネルギー問題の位置付けと科学技術

全ての問題を地球の問題として考えることが必要となった。このことは現代を特徴付ける最大の課題である。間違いなく増加する地球人口のもとで、すべての人類が安全で豊かに生活できること、そのためにすべての国家や地域は、固有の文化や制度、生活習慣を護りながら、一方で地球の維持という人類全体としての目標を達成するために協調することが不可欠である。

地球環境問題は、このような協調が必要なものとして急速に浮上した代表的な課題である。各国固有の環境政策や環境問題への対処を通じ、また世界的な討議の場としてのリオデジャネイロでの地球サミット（1992年6月、環境と開発に関する国連会議）や、地球温暖化防止京都会議（1997年12月、気候変動枠組み条約第3回締約国会議（COP3））などを経験することによって、この意味での協調が、従来の民間交流や政府間協定に基づく交流などの国際的協調とも、また経済の地球化と呼ばれる企業の国際化とも、全く異なる新しい国際的な協調でなければならないことを、私たちは理解し始めたのである。

第一にそれは、基本的に、対処すべき問題が地球的な拡がりを持つものであり、対処行動の効果は局地的なものに止まり得ず全地球的なものとなり、したがって各国、各地域が自らの利益を目標として立案する政策や、企業が自由競争市場で利益追求する方策によっては解決できない内容を持っている。

第二に、進行する変化が地球全域に亘るだけでなく、進行は漸進的であり、しかもほとんど不可逆的であることである。したがって、即効的、あるいは対症療法的な政策や手段によっては解決できない。

第三に、その内容が人類にとって未経験のものであり、現有の科学的知識のみでは解決できない場合が多いことが挙げられる。したがって問題への対応は科学上の基礎研究を伴うことを不可欠とすることになる。

第四に、その問題は人類が豊かになるために行動したことが、長年の蓄積を経て現出するという性格を持つことである。したがって、その解決には新技術の開発によって一気に解決されるというものでなく、人類の行動の広範囲な軌道修正が必要であると考えなければならない。

これらの特徴についての理解を背景としながら、問題の解決は企業の自由競争による市場原理のみに頼ることは出来ず、また公費負担による基礎研究の研究者間競争のみに頼るこ

ともできず、またそれらにおける協調の適用によっても解決できず、問題の理解の共有と、全地球的な協力による有効な手段の共同開発とその実施という、新しい協調が必要であるという認識に、私たちは今到達した。そしてそれは、前述の地球環境関連の国際会議などに見られるように、次第に行動に移され始めたと言ってよいであろう。そして行動がまた新しい理解を生む。このように、理解と行動とが連動する段階へと、環境問題が前進したのは明らかである。

冒頭に、全ての問題は地球の問題であると述べた。地球環境問題がその典型であり、代表的なものであることは言うまでもないが、今や、国家の政策、企業の活動、そして個人の行動さえも、地球の問題と独立に考察することが許されない例が急増していることに注意する必要がある。そしてそれらの幾つかは、地球環境問題と同じ水準の、新しい考えに基づく協調が必要になってきたと考えるべきである。それらは資源問題であり、食糧問題であり、そしてエネルギー問題である。

むしろ、ここで問題とするエネルギー問題は、地球環境問題と同等の水準の人類の協調課題であると言ってよいであろう。しかし、エネルギー問題は、政治的には極めて過敏な性格を持ちながら、現実には自由市場経済に委ねられているという、矛盾した状況に置かれ、地球的な展望を世界的に共有するには程遠いのであって、その共有の方法すら明らかにされていないと言ふべきであろう。しかしエネルギー問題は前述したような、新しい協調を必要とする課題が持つ根拠を全て持っているのであって、問題の理解を共有し、協調の方法を開発する努力を怠ってはならない課題である。

このような課題の解決に取り組む上で、科学技術の果たす役割は大きい。また、科学技術の人類への寄与については、緊要性と根本性の観点から見ると、情報技術や生命科学・技術とエネルギー技術では全く性格が異なる。エネルギー問題は、短期的な優先順位の議論では、情報技術や生命科学・技術に比べ軽視されがちであるが、人類の生存や持続的安定的発展という意味において根本的な重要性がある。たとえまだ問題が現実的に表出していないとしても、エネルギー問題が持つ後戻りできないという性質からいって、その努力の開始は早ければ早い程よいと言ふべきである。

2. 長期的なエネルギー需給の見通しと核融合エネルギーの役割

当懇談会が議論する I T E R は核融合エネルギーの利用を目指すものであるが、核融合エネルギーが未来における実用化を期待するエネルギーである以上、我が国の政策を考察する場合、前節に述べたような、未来に亘る地球的課題としてのエネルギー問題の文脈の中で論じるべきものである。エネルギー問題に関する世界的な理解の共有化についての展望を描きつつ、同時にその中で我が国の取るべき道を探究することが必要となる。

長期的なエネルギー需給の見通しは、技術、政策、社会構造、ライフスタイル等の選択に依存して変化する。石油、天然ガス、石炭などの化石燃料が有限であるとの認識は共通であるが、ここ 100 年程度の範囲ではこれら化石燃料資源の枯渇は予想されていない。一方、化石燃料の消費に伴う地球温暖化に代表される環境制約はより深刻な問題と認識されており、人類にとって資源制約よりも切迫した制約要因になると考えられる。

このため、将来のエネルギーは燃料の炭素依存から脱却して、なんらかの形で大気中に放出する二酸化炭素を低減し、地球規模でその濃度を安定化させる方向へ向かう必要がある。今後、経済発展とエネルギーの安定供給、地球環境保全の要求を同時に満たすために、相対的に資源的な制約が少なく、経済性、環境安全性や供給安定性に優れ、供給容量も十分なエネルギー源の開発と普及が求められる。

環境的な制約が資源的な制約よりも切迫した状況では、21 世紀末には省エネルギー化が進展する一方、エネルギー供給の主要な部分は、今後開発を進める再生可能エネルギーや原子力などの革新的な代替エネルギーで占められ、化石燃料からの脱却が図られることとなる。従って、各種の代替エネルギー源の開発を広範に進め、それらの中から、環境への配慮と経済性、ライフスタイルや社会的価値観により、それぞれ最適なエネルギー供給構成を「ベストミックス」として選んでいくことになる。核融合エネルギーは実現すればこの革新的な代替エネルギーのカテゴリーに含まれる。

代替エネルギーのうち核分裂反応を利用した原子力は、資源制約、環境制約がともに少なく、安定供給が可能である。今後、高速増殖炉などの技術開発も進むと思われる。社会的な受容性を更に向上し、立地と使用済燃料の再処理や高レベル放射性廃棄物の処理処分を円滑に進めることが求められている。

水力、地熱、太陽光、風力、バイオマス等の再生可能エネルギーについては、程度の差こそあれ、ほとんどがその技術的な実現性と供給可能性がほぼ確認できている。水力については、建設を含めた寿命期間中の二酸化炭素発生量が非常に少なく負荷追従性にも優れている

るが、開発地点が限られており今後の立地に多くを期待できない。地熱は潜在的供給量やコスト面で良好であるが、開発地点が限定される。太陽光、風力については、資源、環境制約条件が少なく、分散電源としても将来の有望な代替エネルギーとして期待が大きい。しかし、安定供給が困難であるため、利用拡大には電力貯蔵等の新たな技術課題の克服が必要と考えられている。バイオマスも潜在的資源量、環境適合性に優れ、技術的困難も少なく、代替エネルギーの主力としての期待があるが、エネルギー作物を栽培してこれを資源化するという方式は土地の有効利用やエネルギー効率の観点から現実的でないとの見方がある。

核融合エネルギーは、資源的には地域的な偏在がなく量的にも制約は予想されていない。核融合反応の原理的な性質により、核分裂と比べ安全対策が比較的容易である。低レベル放射性廃棄物は発生するが、高レベル放射性廃棄物の処理処分の必要がなく、燃料サイクルが簡便である。また、国際的な緊張を引き起こさず、国際協力の下で研究開発を進めることによりエネルギー逼迫を防ぐこととなる。しかし、その実用化の時期が各種代替エネルギーと比較しても十分見極められていないこと、現時点ではその技術的実現性が実証されていないことから、他の代替エネルギーと同列に論じることは必ずしも適当でない。

核融合を含め、実用化の可能性が今後の研究開発の進展に大きく依存するような新しいエネルギー源の開発については、最新の情報に基づいた実用化の時期や規模、安全性、社会的受容性、経済性等の評価を厳正に行い、将来のエネルギー需要や地球環境対策といった観点からその意義を確認しつつ、様々な可能性を幅広く模索しつつ弾力的に開発を進めていくことが重要である。

3. 核融合エネルギーの技術的見通し

前節に述べたように、代替エネルギーを探る努力を払うことが不可欠である。しかし、代替エネルギーのあるものは実現可能性は確実であっても供給量が十分ではないと推定され、またあるものは潜在的供給量は大きいと推定されるものの実現可能性が未知であるなど、決定的に将来のエネルギー源を定めることが出来ない。従って、各種の代替エネルギー源の開発を広範に進め、時代に応じて最適なエネルギー供給構成を「ベストミックス」として選んでいくというのが現在許される将来の見通しに関する考察の限界である。

このような状況から言えば、基本的にひとつのエネルギーに人類が頼らなければならないという論理的帰結は本質的に導出し得ないのであって、核融合エネルギーについてもその例外ではなく、将来のエネルギー源の一つの選択肢（オプション）である。しかしながら、核融合エネルギーは有力な選択肢としての特長を有していると考えられることから、その実現可能性等を十分検討しておくことが、今後の我が国の政策を決定する上で必要不可欠なことである。

(1) 核融合エネルギーの特徴

核融合エネルギーの燃料となる重水素とトリチウムを生成するためのリチウム（リチウムは核融合炉内で核融合燃料のトリチウムに転換される）は、海水中にほぼ無尽蔵に採取可能な量が存在する「地球上に偏在しない豊富な資源」という大きな特長を持っている。それゆえ、それが実用化されるならば、人類の安定的で恒久的なエネルギー源となる大きな可能性を有している。

また、核融合そのものの特質として、原理的に反応が暴走しないうえ、少量の燃料から膨大なエネルギーを取り出せることから大規模なエネルギー源として安定的に利用することが期待できること、核融合反応の過程で二酸化炭素の発生がなく地球温暖化等の原因にならないことなど、優れた特長を有している。

(2) 核融合の安全性

核融合エネルギーの優れた特長については前述のとおりであるが、それでは実際に核融合エネルギーを取り出す装置の安全性がどうなっているかということは極めて重要な点であり、この核融合の安全性の問題に関する取り組みの現状、今後の課題等を明らかにすることが必要である。

核融合の研究開発にあたっては、必要な要素技術開発とならんで、一般公衆や作業従事者の安全を確保するとともに環境に影響を及ぼさないことに配慮して設計することが最重要

課題である。一般に核分裂の場合は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」が安全の原則と言われているが、核融合の場合には、このうち、「止める」、「冷やす」については、核融合炉に備わっている原理的な安全上の特長により容易に達成可能であるといえる。「閉じ込める」については、燃料のトリチウム（三重水素）を外部に出さぬようにすることで達成できる。また、高レベル放射性廃棄物は発生しない。しかしながら、低レベル放射性廃棄物は発生するので、その処理処分が必要である。

現在、設計が進められているITERにおいては、反応が暴走しないという原理的な安全上の特長を踏まえつつ、機器は本質的には故障するものであるとの前提に立って、これまでの原子力施設で培われた深層防護の考え方を取り入れるとともに、施設の耐震性についてもその設計の妥当性を評価することが必要であり、鋭意検討が行われている。特に、放射性物質であるトリチウム（三重水素）を燃料として利用することから、適切な「閉じ込め」を実現できる設計となるよう考慮されている。

(3) ITERの技術と状況・今後の計画

1960年代から世界的に行われ始めた核融合炉の研究開発は、磁場を利用してプラズマを閉じ込めるトカマク方式の発明により、プラズマ制御技術が飛躍的に向上した。これまでは、核融合出力が外部からの加熱入力に等しくなるようなプラズマの発生・閉じ込め技術を確立することが主な目標であった。この目標は、欧州のJET（Joint European Torus）と日本原子力研究所の臨界プラズマ試験装置（JT-60）によって達成された。

ITERについては、自己点火条件の達成と長時間燃焼の実現を目指して、1992年から、我が国、米国、欧州連合（EU）及びロシアの四極の国際協力により、工学設計活動（EDA）が実施されてきた。均等貢献の原則に基づいて、我が国、米国及びEUの3ヶ所に設置された共同中央チームによる設計作業並びに各極のホームチームによる工学的な研究開発（工学R&D）が順調に進められてきた。「はじめに」で述べたとおり、1998年の段階でとりまとめられたITERの設計は建設費が約1兆円であったこと等から建設段階への移行を判断できないとの各国の状況を踏まえ、工学設計活動の期間を3年間延長し活動が続けられている。

核融合の研究開発においては、世界的な共同作業によりプラズマ物理の知識基盤、データベースも充実し、ITERの目標とする長時間の核燃焼あるいは定常燃焼の実現を見通せる状況にある。また、これらの研究と並行して、国内外の大型トカマク装置や大型ヘリカル装置の製作等で培われた技術蓄積や、国際共同で進められた工学設計活動によって、大型超伝導コイル技術、遠隔保守技術、高熱負荷プラズマ対向機器・材料、ブランケット技術、大量トリチウム取り扱い技術、加熱・電流駆動技術等が大きく進展し、ITER建設の技術的

な基盤が確立した。ITERの建設は、これらの技術成果の統合化を図ろうとするものでもある。

特に、ITERの設計については、JT-60をはじめとする最新の研究成果に基づいて我が国が提案したコンパクトな装置概念が国際的に認められ、本体建設費は従来の半分の約5,000億円と見込まれている。この他にサイト整備費等の費用も見込まれている。新しい設計の考え方は、従来のエネルギーをできるだけ多く取り出すことを標準的な運転状態とする設計から、将来の実用炉を念頭に、エネルギーの取り出しは抑えるものの制御性と定常運転性の高い状態を標準的な運転状態とする設計としたものである。これにより、核融合反応に必要なプラズマの体積が減少し、装置全体の小型化が可能となり、結果としてコストの低減に貢献するとともに、将来の定常発電プラントにより直接的につながる概念の装置となっている。

ITERでは本格的な発電は行えない。しかし、ITERによって得られる科学的知見や技術の大部分が発電炉に応用可能である。ITERや併行する先進方式の研究開発と適切な材料開発が順調に進展した場合には、本格的な核融合発電の実証を目的とする原型炉の建設が可能になると見られている。但し、その実現時期については、今後の研究開発の進捗に依存する。

科学技術により安定的なエネルギーの確保を目指すという人類の挑戦において、核融合エネルギーのもつ大きな可能性とその実現性を考えた場合、核融合研究開発は着実に進めるべき価値がある。また、核融合研究開発の基礎となっている幅広い学術分野においては、プラズマ燃焼の長時間の実現や定常なプラズマの制御や強く非線形、非平衡なプラズマの研究が現在の最先端の研究課題であり、新たな知の地平を拓くことが見込まれている。科学技術による人類への貢献と学術の本来的な進展の方向が、核融合分野においては他の学術研究のみならずITER計画においても幸福にも一致している。このため、我が国としてITER計画に主体的に参加していくことには十分な意義があると考えられる。なお、国際協力の観点からは、現在のITER工学設計活動への参加が先進的な核融合技術を有することを前提にしているのに対し、必ずしもこのような国に限定した閉じた枠組みをとすべきではなく、将来、エネルギー消費量の大幅な増大が見込まれるアジア諸国を積極的に取り込んでいくというような考え方や、アジア地域の先進国として核融合の分野で我が国の果たすべき役割などについても十分検討しておくことが必要であろう。その際、負担と受益の関係を明確化することが重要である。

(4) 核融合炉開発研究と計画の拡がり、今後必要となる投入努力・予算 と技術

核融合炉の実用化にあたっては、核融合炉発電システムとしての技術を確立するとともに、

実用システムとして他の実用エネルギーシステムと市場で競合できるような経済性を有する必要がある。

I T E Rの目標のひとつは、核融合炉システムとして工学的に実現可能であることを実証することであり、核融合炉実現に向けての大変重要なステップであるが、一方、核融合炉への開発ステップにおけるひとつのステップでしかない。I T E R以降において、核融合炉の発電プラントとしての工学的実証を目的とする原型炉の開発を経て経済実証の段階に進む必要が生じることに留意する必要がある。

核融合炉について、I T E Rは、発電システムの有無を除き炉に直接活用できる知識を与える。更に技術的、経済的性能を高めたり、環境整合性を高めるなどの努力も重要である。原型炉等の開発に向けて、以下のような課題がある。炉心プラズマ技術に関しては、I T E Rを用いて定常的な燃焼プラズマの長時間維持に関する知見を蓄積するとともに、併行してI T E R以外の装置を用いて先進的方式の研究を積極的に進めることが重要である。工学技術に関しては、トリチウム増殖及び発電に用いる高温の熱の取り出しを行うブランケットモジュールの開発が重要である。また、運転・保守作業を容易にするとともに、部品交換や施設解体時の廃棄物処理を容易にするため、中性子照射に伴う放射化が少ない材料の開発が必要である。このような材料としては、低放射化フェライト鋼やバナジウム合金及びSiC/SiC複合材等の先進的な材料が有力な候補として研究開発が進められている。また、建設費の低減につながるような、新しい高温超伝導材料の開発が重要である。この他、プラズマ加熱、電流駆動等の様々な関連装置の経済性向上も今後の技術課題である。

核融合研究開発を推進するためには、長期的視野に立って幅広い核融合研究の体系化された学理を構築することが、研究成果を確実なものとするとともに、広く社会・学界に理解してもらうためにも重要である。

I T E R計画を含む核融合の研究開発については、これまでに多くの検討が行われてきた。第三段階核融合研究開発基本計画（平成4年 原子力委員会決定）では、核融合研究開発の目標として、「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。これを実施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。」としている。また、原子力委員会核融合会議では、「I T E R計画を「実験炉」として位置付け、開発することが適当であるものとする。」（平成8年）と結論づけている。更に、現在進められているI T E Rの設計が第三段階の研究開発目標を達成できるものとなっているかどうかに関し、核融合会議において随時検討が行われている。最新の検討としては、平成13年2月にとりまとめられた最終設計報告書案に対して検討が行われ、3月には「設定された

技術目標を満たしうるものである。」との評価が得られている。

また、実験炉による研究開発以外の研究開発に関しては、第三段階核融合研究開発基本計画において、①実験炉による研究開発だけでは十分解明できない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トカマク型装置で行う、②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、トカマク型以外の装置の研究開発を進める、としている。これを受け、大学、研究機関等において研究開発が進められてきている。

このため、ITER計画を推進すると同時に、核融合炉の先進方式、関連する炉工学やプラズマ物理学を併行して体系的に研究することが必要である。我が国の核融合研究開発については、大学、研究機関等において、トカマク、ヘリカル、ミラー、逆磁場ピンチ、慣性閉じ込め等の幅広い方式の研究や多方面の核融合工学技術開発が展開されている。その成果は、数多くの論文として発表されるなど、プラズマ物理の理解、物理と工学の両面での学問的な体系化、あるいは基礎基盤研究の形成において、国際社会でも高く評価されている。また、核融合を支えることとなる幅広い学問分野、例えば、超伝導工学、核安全工学、機械工学、システム工学、品質工学などをみてもその研究水準は高い。

更に、人材の育成を継続的に重視するべきであり、それは基礎・基盤・開発・システム・技術等、若人の教育から熟達した技能の伝達まで行う必要がある。ITER計画を含む核融合研究開発の全体的な構想については、これまでも原子力委員会及び学術審議会において審議が行われてきた。その結果、大学や核融合科学研究所、日本原子力研究所等において、科学・技術・開発にわたり、様々な成果を上げ現在に至っている。今後更に、こうした研究開発について戦略的に重点化を図りながら推進していくことが求められる。

なお、これら諸段階において必要とされる経費については、今後の諸技術の開発・実用化の進展とも深く関わることであるが、今後、中長期的かつ継続的に相当な投資を必要とするものであると考えられるが、効率的、効果的な資源配分が重要である。また、核融合炉の建設から運転段階を経て、廃棄物処分も含めた廃止に至るまでのライフサイクルコストも視野に入れておくことも重要である。

4. 我が国としてのITER計画の進め方

先に述べたように、各種エネルギー源の将来性と、核融合エネルギーの持つ実現可能性の程度とを勘案すると、核融合エネルギーは、人類にとって無視することのできない、一つの有望な選択肢であることが確実である。すなわち、現在に生きる我々が、これから生まれてくる人類のために果たすべき一つの責任として考えるとき、核融合エネルギー開発を推進することに十分な意義があり、また、我が国の核融合エネルギー開発を推進するためにITER計画に参加することが必要である。

このことを前提としつつ、更に、我が国がITERの設置国として名乗りを挙げるべきかを判断するには、そのための根拠を別に検討することが必要となる。検討の結果を以下に列記する。

(1) 国際的役割

我が国が国際貢献により大きな努力を投入すべきであることが指摘されてからかなりの時が経過した。しかし、貢献の理念的検討は必ずしも十分に行われてこなかったことから、実績は醸金などの経済的なものに止まっているという意見がある。

そのような意見は、我が国の経済的成長が、欧米諸国が先陣をきって多大な投資と研究開発努力を行ってきたことによる恩恵を受けつつ、高品質低価格の工業製品の製造能力を半ば保護経済の中で育成し、タイミングよく経済を開放して輸出を開始し、その後も市場における競争力を向上しつつ長期に亘って工業製品の市場を拡大して来たことを中心的な根拠としている。

現在、世界が国際的に抱える問題を自ら発掘し、日本固有の潜在力と方策とをもって寄与するという能動的指向の道を見出すことは、国際社会に対する我が国の責務とでもいうべきものであり、また、それは、恐らく大多数の日本人が支持、と言うより期待していることでもある。

すなわち、我が国が今日目指すべき国際的役割とは、単なる経済的な貢献というものであってはならず、知識・知見の創造、国際的な問題解決のための積極的な技術の提供といった、新しい姿に脱皮していくことが求められている。

この観点が、科学技術基本法の制定や、科学技術研究費の増加の背景の一つともなっていることは、当然のことであり、また高く評価されるべきことである。

すでに、米国は宇宙開発で、また欧州は大型加速器を用いた素粒子研究で中心的役割を果たしつつ、世界をリードしてきている。我が国では国立天文台がハワイにすばる望遠鏡を設置し、各国の研究者の利用に供している。今後、多くの分野で国際協力が進み、我が国の研究者が他国の施設を活用して研究開発を進めるケースも多くでてこようが、我が国も世界に誇れるような研究のインフラとなる施設を設置し、世界の研究者にそれらを公開して我が国の存在意義を高めるとともに、相互依存の関係を維持していくべきである。世界の研究者が研究に献身できるような環境を我が国に持ち、研究においてもリーダーシップを発揮することにより人類の知的資産の蓄積に寄与し、国際社会に大きく貢献するべきである。

核融合エネルギー研究開発をこの観点から見ると、資源小国の我が国がその中で主要な役割を果たすことの意義は十分に大きい、と理解されるのである。

(2) 科学技術的潜在力

前項に述べたように、広い意味での国際貢献は我が国にとって固有の意義を持っている。その中で科学技術的貢献は単なる経済的剰金を超える大きな重要性を持ち、したがって、そのような考え方の延長線上において核融合エネルギー研究開発への積極的参加が、日本にとって大きな意義を持つ可能性が十分にある、と言える。

しかし、それが可能性を超えて現実のものとなるためには、条件がある。それは、この技術が、科学的にも未知のものを含み、しかも多くの未開拓技術の集合体であることから言って、我が国がそれを推進する主役として相応しいかどうか、という点である。

我が国の核融合エネルギー研究開発については、3.(4)で述べたように、大学、研究機関等において研究水準は高く、またそれに応じた教育も行われている。ここで培われた研究者、技術者の存在、あるいは裾野の広さは、システム統合としてのITER計画を実現たらしめる原動力であり、我が国は、十分なポテンシャルを有している。

さらに重要なことは、これら研究及び教育の水準のみならず、それらに支えられた産業技術が高い水準にあることである。この点については二重の意味で意義がある。

第一は、核融合エネルギー技術は、数々の装置産業が提供するシステムによる電力供給産業を構成するのであるが、それが安全で低価格で可能になるためには、我が国が経済成長を成し遂げる上で重要であった製造業の高水準化と類似の技術体系および産業経営が必要なのである。したがって我が国の製造業における実績は、核融合エネルギーを実用化するための貴重な財産であると言えることができる。

我が国が経済成長を遂げたことの根拠としての技術を活かすことによって国際的に役割を果たすことができるとすれば、そのこと自体が第二の意義となる。

核融合エネルギーの実現が将来のものであることを考えたとき、研究者及び技術者の存在、裾野の広さ、さらには産業技術の高い水準の維持もまた、長期的な視野で捉えておく必要がある。現在の我が国は、十分なポテンシャルを有しており、近い将来にそのポテンシャルが失われITER計画を支えられなくなると疑う根拠は見あたらない。むしろ、世界で唯一のITERを主導的に建設することにより、国際プロジェクトの取りまとめに主導的役割を果たすという貴重な経験の機会が得られるとともに、システム統合技術の習得や、最先端技術の成立過程の観察、重要な技術情報の蓄積等を通じて、この分野で世界をリードするまでに至った我が国の科学技術力及び産業技術がより一層進展し、更に、そこで得られた有形、無形の成果、ノウハウが標準的な事例として将来に継承されていくことから、我が国のポテンシャルの高さを長期間維持できる可能性があることの意義が大きい。

核融合研究開発は、1955年当時、制御核融合の見通しが20年以内に得られるであろうと予想されてから、既におよそ半世紀という年月を必要としてきている。核融合反応を行うプラズマの理解と制御に当初の予測を超える多くの努力が必要とされてきたからである。このため、核融合研究開発は段階的に進められている。この段階的開発戦略は、各段階において明確な目標を定めつつ進むものであり、一つの段階から次の段階へは、まず次の目標が適切かについて吟味し、改めて設定した目標の達成に必要な科学技術の見通しが十分に得られていることを確認して進むとするものである。段階的開発戦略は、核融合のような大規模システム開発を着実に進め、かつリスクを最小化する目的で適用されてきているが、他の研究開発に比し格段に長い年月と大規模な開発コストを必要としていることに留意する必要がある。

(3) 日本社会の倫理性からの評価

核融合エネルギーのような巨大技術の研究開発の主役に、ある国がなるためには、国としての倫理性が問われるのは当然である。宇宙開発にしても、原子力開発にしても、我々は国家の倫理性と切り放せないことを経験的に知っている。そして、この倫理性は二つの側面を持つ。ひとつは、国の内部に関わることであり、もう一方は国際的なものである。

我が国が抱える困難な問題の多くは、我が国の国家としての目標が曖昧になったことと関係があると言われる。恐らく国家としての経済的成長は、いわばどの開発途上国においても合意された目標になり得るのであって、その意味で途上国に目標喪失の悩みはない。しかし、ある程度経済成長を達成すれば、人々が持つ本来の多様性が、生活様式や思想に現れることとなり、その中で公共的なものとしての国家のアイデンティティあるいは目標を創出

することは、その国の文化に根差した固有の政策的配慮を必要とすることになる。とくに東西の対立が解消した以上、その配慮は各国の固有な責任である。とくに私的利益を中心とする経済活動のみを社会の中心に据えたとき、私的関心の肥大化と公共的意識の衰退とが進行すること等により社会的問題を引き起こす例を私達は歴史的に知っているし、また現在の我が国の諸問題が、このことと関連することが既に指摘されている。

したがって、現在の我が国にとって、経済活動の活力を殺ぐことなしに、公共的意識を社会的に顕出させることは必要なことである。巨大技術の研究開発は、多くの場合現世代の人々に直接的な利益をもたらすものではない。核融合エネルギー開発は、既に述べたようにその代表的な例である。したがって、その実施が政策として支持されるためには、私的利益を離れて未来の人類を想う公共的な理解が必要なのである。

そこには、このような計画が社会的に受容されるか否かによって、その社会に属する人々の公共的意識が測られるという面がある。勿論、その場合支持は強制されたものであってはならず、十分に民主的な手続きを経て、人々が自発的に支持するものでなければならないのは当然である。しかもその支持と実行とは、公共的意識の計量だけでなく、その行為を通じて人々が公共的意識を社会的に発現して行く過程になることも重要である。

このような観点からは、核融合エネルギー開発が前項に述べた国際的役割を積極的に果たすという国家的倫理感にもとづく行為であることと重なって、一人一人が有意義な公共的計画であるとの理解を示しつつその支持を判断する課題となり得ると考えられる。

一方、国際的な見地からすれば、このような巨大技術に関して一国が先導することについての倫理的条件が当然問われることとなる。既に、エネルギーは、国際的には政治的過敏性を持つ技術であって、国際的セキュリティと深く関係している。その意味から言って、先導する国の倫理性は、国際社会において重大な関心事である。

この点において、我が国は、国際的に一定の信頼感を得ているのではないかと考えられる。第一に、我が国の憲法は、国際的に見て我が国のどんな行動も国際緊張を引き起こさないことが基本的な条件となっている。第二に、我が国が製造技術や生命科学等の分野で、実際の活動として世界への先端技術・科学の拡散・普及・支援努力という経験を積み重ねてきている。第三に、原子力エネルギーの開発と利用に関わる原子力平和利用の原則を立て、それを確実に守って来た実績によって、国際的に大きな信頼感を勝ち得る結果となった。その他、我が国の民生主体の産業展開なども、国家的倫理性という見地から高く評価されるのである。これらの観点から言って、国家の倫理性に関し、国内的には必要条件として、国際的には十分条件として、我が国が核融合エネルギー研究開発を主導することには矛盾なく受容

される条件が整っていると考えられるのである。

(4) 安全面での配慮

I T E Rでは、トリチウムはカナダから輸送する必要がある。また、核融合反応により高いエネルギーの中性子等が発生することから、その遮蔽のための炉構造材が脆化したり放射化したりする。その結果として発生する放射化金属等の廃棄物は、運転中と運転停止後の廃止措置に当たって処理処分が必要である。このように安全性の問題は、我が国においては特に国民の理解を得つつ、適切に対処していくことが求められる。今後の課題としては、その発生の低減化を図る低放射化材料の開発が必要であり、国際エネルギー機関で検討が進められている高エネルギー中性子照射施設計画などの着実な実施が重要である。I T E R計画においても、I T E R以降の原型炉等に必要な材料開発を目指して中性子照射試験等の必要性が認識されている。

(5) 投資面からの評価

我が国にとって前述のように、国際的役割や国家的アイデンティティという点で積極的な意義があり、しかも科学技術の水準や国際的信頼感からいって条件を満たしているとしても、I T E Rの設置国になるためには、現在のI T E R工学設計活動によりとりまとめられている最終設計報告書（案）（2001年2月）において約5,000億円と推計されている本体建設費の相応分とその他に見込まれているサイト整備費用への投資が必要となることについて十分な考察を欠くことは許されない。

まず我が国が設置国になることとは別に、絶対確実とは言えない、しかも一つの選択肢としての核融合エネルギー開発にかなりの額の投資を当てることの意義は何かを明確にしておく必要がある。結論的に言えば、その金額の妥当性について明確な定量的判断を下すことは現時点では無理である。確かに、核融合エネルギーの実験炉I T E Rのコストは見積もられている。さらにそれに続く原型炉、実用炉のコストの定量的推定がなされており、他のエネルギー源と競争力を持ちうる範囲にあると見積もられている。しかしながら、現在実現されていない科学技術が本質的に持つ不確実さとして、そこには多くの技術開発の必要性があり、そのような推定を正確に行うことは困難である。それ以上に核融合炉の実現によって得られる利益についてはほとんど推定不可能だからである。例えば、仮に核融合炉が技術的に実用化して電力生産を開始したとき、化石燃料、原子力などによる電力がどの位の価格になっているか推定を正確に行うことは困難である。また仮に、化石燃料が尽き、核分裂エネルギーが使用できなくなったときや環境問題等により社会的必要性が高まった時に核融合エネルギーが使えるものであるとすれば、それはコストが高くても使わざるを得ないことになるであろう。先に述べたように、各種の代替エネルギー源の開発を広範に進め、それらの中から、環境への配慮と経済性、ライフスタイルや社会的価値観により、それぞれ最適なエ

エネルギー供給構成を「ベストミックス」として選んでいくことが、選択の問題として求められているのである。

結局、核融合エネルギーが、エネルギー市場で競争力を持つかどうかを、現時点で議論するのは困難と言うことである。それは、この投資が、経済的時間軸で言えばかなり未来のことであり、現在の経済的枠組みの存続すら言及できない時期に効果が表れることを期待するものだからである。しかしエネルギーの供給という時間軸で言えば、例えば現在の化石燃料や軽水炉などが使用不可能になったときに直ちに期待される技術なのである。

このような観点に立てば、幅広い意味での環境負荷や大規模エネルギーとしての供給安定性、原理的な安全性の面などで優れる核融合エネルギー研究開発に対して行う投資は、あたかも人類の将来の自由度を保証するためのものであり、例えば保険料のようなものであると見做すべきことになろう。

すなわち、人類存続のために、未来に起こる可能性としての現有エネルギー源の枯渇を考えると、そこに生じる混乱の回復に必要であると予想される巨大な費用を緩和することを目的として、現代の人々が負担すべき保険料が、現時点でITERの本体建設費と推計されている約5,000億円ということであり、ITERが国際的な資金分担で建設されることを考えれば、我が国がこの中のどの程度を負担するかということである。

したがってこの投資は、未来の人類社会をエネルギー多消費型に誘導するという意味を全く持つものではないと解釈されるのであって、他方で、人類社会は、少資源型のライフスタイルを誠意をもって希求すべきなのである。そして仮に、新たなエネルギーを必要としなくなったら、核融合エネルギーは技術的に完成していたとしても実用化されることはないであろう。その時人類は、この投資を無駄な投資で損をしたとは思わない。何故ならそれは保険料だからである。生命保険を掛けて、死ななかったから損をしたと思わないのと同様に、それは正当な投資である。言い換えれば、核融合エネルギー開発とエネルギー少消費型社会とは全く異なる選択肢であるが、それらは同時併行して追及されてよいものなのである。

また、エネルギー資源の大半を外国に、しかも、石油についてはほとんどを中東地域に依存している我が国にとって、この保険料は、他国とは異なり、経済安全保障という観点においても重要な意味合いをもつと考えられる。

以上で述べたような、ある研究開発投資を未来への保険として捉えるという考え方は、これまでには見られなかったものかもしれない。しかしながら、今や、資源を始めとする地球環境による制約を念頭に置いて未来を考えなければ、人類の存続すら危ぶまれることが認

識される時代、いわば地球環境時代が到来している。このような時代にあっては、こうした新しい考え方が必要とされるのであり、その重要性は今後ますます強まっていくものと考えられる。

従って、未来への保険としての可能性を有する研究開発投資に関して、その意義や具体的な推進のための手法、定量的最適化等を検討し深めていくことに対して、社会全体で取り組んでいく姿勢が不可欠となろう。

I T E R 計画に対して我が国のとるべき対応について検討を行ってきた当懇談会としての議論を以下に述べる。

国民全体という見地からの広義の安全保障、国家という規模で行われる国際的機能は、プライオリティの高いものと考ええる。I T E R 計画はこのような範疇に入っている。

国際協調で行われる科学技術的計画の形態は、ヒトゲノム計画のように一つの大きな設備を要しない分散型のものから宇宙ステーション計画のように一つの大きな設備を作り上げようとする一極集中型のものまでである。その責任分担も、科学・技術的なもの、資金的なもの、プロジェクトマネージメント的なものなどがある。参加している国々の貢献の方法や程度については、当該計画に対する熱意、経済力、政治的判断など様々な要因が働く。

I T E R 計画は、国際協調で行われる一極集中型の計画であり、その責任分担は、今後行われる国際協議の中で交渉により定まっていくこととなる。また、責任分担には、経済的な利益・不利益のみでは測り切れない重要なものもある。すなわち、成果を人類全体が享受する場合、我が国が科学技術の先進国として、その地位に相応しい責任を果たしていくという、倫理的な動機も働く余地がある。

従って当懇談会としては、例えばI T E R の本体建設費が約5,000億円であるとして、それが適当であるかどうかを現時点で厳密に判断することはできないというしかない。しかし未来の人類のための保険料という意味で、当懇談会としては、価値がありかつ意義のある投資であると受け止めている。

5. 計画具体化にあたっての考察

さて、以上に述べてきたように、エネルギー問題の特徴、その中での核融合エネルギーの意義、そしてITER計画の実現可能性などの技術的側面と、日本の国際的役割、国家的アイデンティティ、日本社会の倫理性・公共的意識などの社会的側面とを勘案して、日本がITER計画の実験炉の設置国として名乗りを上げることの妥当性が認められたとしても、私たちはこの計画が成功したときと失敗したときに起きるであろう影響について、ここで言及しておく必要があるであろう。

まず考えるべきことは、成功と失敗とのカテゴリーである。考えられる概括的な分類は以下のようなになるであろう。

(1) 技術的に完成し、エネルギー源として競争力があり実用化する。この場合、研究開発に主役を演じた日本は尊敬され、経済的には計り知れない利益を生むことになるであろう。

(2) 技術的には完成するが、競争力がなく実用化しない。この場合は投資の回収ができないという打撃はあるが、人類がエネルギーの将来について高いセキュリティを獲得したという意味で決して無駄ではない。

(3) エネルギー需要が縮小し、新エネルギーは不要となり、計画の目的が消失して、技術的に完成しても意味を失う。このような状況は突然生じるものではなく、むしろ新エネルギー開発の実現との相互関係として社会のエネルギー消費傾向が決められるとすれば、やはり開発過程には意義がある。

(4) 技術的に失敗する。現在のところ、本質的に困難な問題は指摘されていないが、どんな技術でもその実現可能性が100%であることは有り得ず、その意味で実現できない場合も考えておくべきである。これは、確かに失敗であるが、単なる失敗とは言えない。むしろ人類のあり方についての制約が、失敗の事実から導出されるという意味では、極めて大きな意義を持つ成果であると考えられるべきかもしれない。

上述のような起こり得る事例は、より詳細な検討によってもっと多くの場合に分類される可能性があり、その各々についての影響をより細部に亘って明らかにしておく必要があるだろう。しかし既に述べたように、現行エネルギーが枯渇する時期の、環境、経済、国際関係などを今から予測することが困難である以上、どの分類に行き着くかを議論することにはあまり意味はない。そうではなく、起こり得るどの場合においても、それが保険料として決して高価でないと認識することのできる内容を計画は持つべきなのである。おそらくそのような

内容を持つとき、そしてその時に限り、このような利益の予測が本質的に不可能である計画に肯定的な判断を与えることが許されるのだと考えた方がよい。

その意味で、保険料であるとは言っても、計画の費用は最大関心事の一つであることになる。したがって計画の成功、失敗に拘わらず、プラスの評価が与えられるかどうかことが重要である。それは、核融合エネルギー開発過程において行われる基礎研究や要素技術開発が、より広く基礎科学一般の深化と広範な産業分野の技術進展とに寄与するという波及効果や、高度な技術開発の国際協力を通じて得られるより一般的な協力方法についての学習効果等が重要である。更に世代間を通じる協力は、人類社会にかけがえのない信頼感を生むことになろう。これらのプラスの評価を最大化する可能性を計画に内在させることは不可欠の条件である。

一方同じ意味で、計画の費用を最小化することも最重要な条件である。ITER計画のように、目標と基本手法とが明確に定まっている場合には、計画の経営、研究開発管理などは他の一般の研究開発の経営管理とは異なる独自のものであるべきで、そのための手法開発の努力を怠ることは許されない。その点からすれば、計画は核融合エネルギーを専門とする科学技術者を中心としながらも、費用低減を使命とする経営管理の専門家も計画に参加して重要な役割を果たし、技術目標と開発リスクとコストのバランスがとれた計画として構成されることが必要である。

核融合エネルギーの実現を目指し、我が国がITER計画の建設段階に参加する場合にも、計画の出発を決断する際には、成功か失敗かのリスクは本質的に回避できない。しかし、計画の費用を最小化することとともに、その結果に依存しない意義と利益とを投入費用に対して最大化することの努力が重要である。

6. 結言

当懇談会は、我が国が I T E R 計画に主体的に参加するだけでなく、設置国となることの意義が大きいと結論した。それはいずれ人類を襲うであろうエネルギー問題を前提とし、現在生きている世代はこれから生まれてくる世代の歩む道に対する制限を最小化する義務を負っているという理念のもとでの技術、社会等の考察を通じた理解である。

当懇談会は、「はじめに」に述べたとおり、I T E R 計画のような極めて規模の大きな計画に関し、国内の幅広い賛同の下に進めていくことが必要条件となっていると認識し、我が国が I T E R 計画に対する対応を決定するに当たっての提言を示した。しかしながら、I T E R 計画の実現にあたっては、今後判断していかなければならない事項が残されている。具体的には、I T E R を立地する地元との関係や財源確保など我が国が I T E R の設置国として名乗りを挙げるにあたり国として総合的に判断すべき事項、あるいは、研究者の参加・協力体制の確立、安全規制法令の整備、国際交渉における利害の調整など I T E R 計画を進めるにあたって考慮すべき事項が挙げられる。このような事項に関する判断は、当懇談会が行うべきことではない。しかしながら、国として判断を行うにあたり、このような問題に対する留意事項を提示しておくことも十分に意味があると考えられることから、以下に述べる。

我が国が I T E R の設置国として名乗りを挙げるか挙げないかについて、国として総合的に判断を行うにあたっては、以下の点に考慮すべきである。

I T E R の設置国となることは、後戻りの困難な投資を引き受けることであり、如何なる国内・国際環境変化に関わらず、I T E R 計画推進に中心的な役割を担い続けることを意味する。また、我が国に対し、長期間に亘り海外から数千億円の投資を受け入れるとともに、家族も含めて多くの研究者や技術者を我が国に受け入れるということであり、より大きな責任を国際社会に対して負うことを意味する。また、資金的にも他国と比較して多くの貢献が期待されている。そのため、設置国として、その責任を全うする強い意志を継続することが不可欠でありその責任は、設置する国にある。

本懇談会は、我が国が I T E R 計画に主体的に参加するだけでなく、設置国となることの意義が大きいと結論した。一方、推進に当たって、我が国の科学技術計画全体を考えた際にもどのような位置づけを与えられるかの検討は別途必要である。また、我が国の厳しい財政状況下での巨額な財政負担について、国民の理解を得つつ、国として財源措置を講ずるべきかを判断する必要がある。

I T E Rを我が国に誘致することは、設置する国の政府のみならず、誘致する自治体にとっても重要な意味を持つ。また、国内の立地候補地の選定に際しては地元の理解が特に重要であり、このため、格段の努力が必要となる。政府がI T E Rを誘致する立地候補地を決めて国際的に誘致を提案する場合には、選定に関する公正かつ速やかな立地候補地選定のための作業を直ちに開始することが必要である。その際、地元の理解については十分調査確認した上で作業を行うべきである。

I T E Rの設置国として名乗りを挙げる場合、他にも設置国として名乗りを挙げるであろう有力な競争相手の存在を十分に考慮する必要がある。

我が国は、これまで、科学技術分野において本格的な国際共同事業を国内で推進した経験がない。他国から、多数の研究者、家族を受け入れることから、文化、教育、言語等の面で国際社会に適した研究や生活環境を整備することが重要である。

I T E R計画を推進するにあたっては、以下の点にも考慮すべきである。

国際協調で進められる計画においては、各国の利益のぶつかり合いの中で調整を行うことや慣習の違いによる意志疎通の難しさが考えられる。現在進められているI T E R工学設計活動では米国が途中で撤退するという事態となった経験を有しており、I T E R計画に参加する諸外国の政策判断が、I T E R計画の推進そのものに大きな影響を与える可能性も忘れてはならない。参加国の撤退などにより、我が国のみが過度の負担を負うような事態に立ち至るようなことがあってはならない。また、研究開発の過程においては多くの技術的困難に遭遇する可能性もなしとはいえない。我が国がI T E Rを建設することとなった場合、このような様々な状況においても主導的な役割が求められることに留意する必要がある。

核融合エネルギーの実現は、既に何十年もの歳月をかけて世界各国が国家的に取り組み、今後も取り組みを続けようとしているものであり、投下される資源や費やす年月が大きくなる。スピード化する今日の経済社会において、何十年もの歳月を要するプロジェクトに対して支持を得続けることは容易なことではない。国民の十分な理解を得られなければその推進は困難であり、安全性を含めた正確な情報の提供を十分行うなど、不断の努力が必要である。

国際協調で行われるI T E R計画に関しては、広く我が国国民に対して果たすべき努力のみならず、立地される地域の住民に対し果たすべき努力を含み、さらにはI T E R計画へ参加している国の努力や現在I T E R計画に参加していない国を参加させる努力をも含むものである。特に、現在I T E R計画に参加していない国については、I T E R計画をより多

くの国が参加する計画に成長させていく観点からも重要である。なお、その場合には負担と受益の関係を明確化することが重要である。

I T E R計画の推進に当たっては、当然のことながら安全性の確保が大前提である。我が国に立地される場合には、I T E Rが、我が国として受け入れられるレベルの安全性を有しているかどうかを確認すべきである。必要に応じ、我が国として受け入れられる安全性の考え方そのものをも検討し、その結果により安全規制法体系の整備が必要となるかもしれない。この安全性の考え方は、I T E Rが世界で唯一の実験炉として建設されることから、今後の核融合研究開発の先鞭をつけるものであり、国際的にも更には将来にわたって評価を得られるものであることが望まれる。

I T E R計画のような国際協調計画においては、計画の運営や科学・技術の面において、組織や関係者を牽引していく指導者的な役割を果たす者が必要である。I T E R計画の実施組織は今後の国際交渉の中で選定されていくこととされており、未だ定まっていないが、優秀な人材を選定することが決定的に重要である。仮に我が国がI T E R計画において主導的な役割を果たしていこうとするのであれば、このような者を今からでも選定、あるいは将来に向けて育成していく必要がある。更に、プラズマについて一定レベルの理解と実験の企画立案能力あるいは解析能力を有する人材が必要である。また、核融合装置を熟知した高い研究開発能力を持つ人材を確保するのみならず、産業界に多く存在している機械、電気、情報、建築、土木等それぞれの専門的経験を有する人材が必要である。この際、女性研究者、技術者の育成や幹部への積極的な登用を推進すべきである。

I T E R計画は核融合エネルギーの実用化に向けての一つのステップである。材料開発の課題のほか、核融合研究開発に特有の問題ではないが、放射性廃棄物の処理処分の課題も残されている。先進方式の研究、炉工学研究や基礎研究も含めた包括的な研究が必要である。

また、このような努力を行うに当たっては、長期的な視点に立って計画を支える人材の継続的な育成が不可欠である。核融合研究開発は、多くの学問・技術の分野にまたがることから、他分野の研究者、技術者も含め、広く産学官の協力体制が構築されることに配慮すべきである。特に産業界については、I T E R計画においては各国から機器・装置が搬入され、設置国において検査、組立、統合化が図られる必要があることから、研究者との連携の下に大きな役割を担うこととなる。また、I T E Rに多くの資金を投入する一方で、トカマク以外の方式を含む大学等における幅広い核融合研究への資金投入が減少し、その結果、核融合研究の基盤を損なうようなことになってはならない。なお、核融合研究の推進にあたっては、戦略的に重点化を図りながら推進体制を構築することが重要である。核融合研究の発展に必要な効率的効果的な資源配分が不可欠であり、資源の確保が図られるかが課題である。こ

の資源問題を考えるに当たっては、科学技術全般における核融合研究の位置付けについて判断が必要である。

核融合研究開発に限らないが、研究開発を着実に進めるためには研究評価は重要である。特に、ITER計画のような大型プロジェクト研究に対しては、厳正な研究評価が求められる。政策評価体系における客観的な評価とともに、ITER計画は国際共同プロジェクトとして進められることから、国際協議においてITER計画の実施体制を整備していくにあたり、厳正な研究評価体制が実現されるよう努めることが強く望まれる。

參考資料

I T E R 計画懇談会の設置について

平成 8 年 12 月 20 日

原子力委員会決定

1. 開催の目的

国際熱核融合実験炉（I T E R）については、日、米、EU及び露の協力により、平成 4 年より工学設計活動が進められ、本年 12 月には詳細設計報告書が提出されるなど平成 10 年 7 月の取りまとめに向け、計画が進められているところである。

ついでに、我が国として今度の国際熱核融合実験炉（I T E R）計画の進め方について、社会的・経済的側面を考慮し、長期的展望に立った国際社会の中での役割も見通した幅広い調査審議を進めるため、I T E R 計画懇談会（以下、「懇談会」という。）を設置する。

2. 審議事項

- (1) 国際熱核融合実験炉（I T E R）計画の進め方
- (2) その他

3. 構成

別紙のとおりとする。

4. 運営等

- (1) 懇談会は、必要に応じ懇談会構成員以外の者の意見を聞くものとする。
- (2) 懇談会は、検討に当たり、核融合研究開発に関する計画の総合的推進等に関し調査審議を行う「核融合会議」と十分な連携を図るものとする。
- (3) 懇談会の活動は、当面 2 年間とする。
- (4) その他、懇談会に関し必要な事項は、座長が懇談会に諮って定める。

(別紙)

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 宗行	大阪大学名誉教授
苫米地 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 龍興	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 亘	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

ITER 計画懇談会審議経過

回	日時	議題
第1回	平成9年2月10日 (月)	1. 座長の選出について 2. 核融合研究開発について 3. ITER計画の概要について 4. 今後の検討の進め方について 5. その他
第2回	平成9年4月9日 (水)	1. ITER計画に関する主な論点について 2. 今後の検討の進め方について 3. 核融合の魅力とITERの技術的見通し 4. その他
第3回	平成9年5月9日 (金)	1. 国際協議の状況等について 2. 核融合の意義について 3. ITER計画の主な論点について 4. 当面の検討スケジュールについて 5. その他
第4回	平成9年5月26日 (月)	1. 核融合の意義について 2. その他
第5回	平成9年6月17日 (火)	1. 核融合の意義について 2. その他
第6回	平成9年8月1日 (金)	1. 最近の国際的な話し合いの状況について 2. ITERの安全性について 3. 論点の整理について 4. その他
第7回	平成9年10月8日 (水)	1. 国際協力としてのITER 2. ITER計画懇談会における議論とまとめ(案) 3. その他
第8回	平成9年12月1日 (月)	1. 最近の国際的な話し合いの状況について 2. 中間とりまとめについて 3. その他
第9回	平成10年2月10日 (火)	1. 懇談会における論点の整理と今後の課題について 2. その他
第10回	平成10年3月4日 (水)	1. 懇談会における論点の整理と今後の課題について 2. その他
第11回	平成12年7月24日 (月)	1. ITER計画懇談会の審議の再開について 2. エネルギーの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について 3. 核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書について 4. その他
第12回	平成12年9月8日 (金)	1. 研究の資源配分と国際協力の責任分担に関する検討報告書 2. ITERを巡る最近の状況及び非公式政府間協議の状況について 3. その他
第13回	平成12年11月8日 (月)	1. ITER施設の安全確保の基本的考え方 2. 日本のサイト候補地の状況 3. これまでの議論の整理 4. その他
第14回	平成12年12月25日 (月)	1. 更に検討すべき論点に関する議論・とりまとめ 2. その他
第15回	平成13年3月14日 (水)	1. これまでの議論の経過について 2. ITER理事会の結果報告について 3. ITER計画懇談会報告書骨子(案)について 4. その他
第16回	平成13年3月30日 (金)	1. ITER計画懇談会報告書(案)について 2. その他
第17回	平成13年5月17日 (木)	1. ITER計画懇談会報告書(案)について 2. その他

核融合エネルギーの研究状況

文部科学省研究開発局
核融合開発室

1932年、英国のコッククロフト、ウォールトンによるリチウム-水素の核反応実験によって初めて核融合反応に伴い膨大なエネルギー（核融合エネルギー）が放出されることが発見された。その後、ワイゼッカーとベータにより太陽（星）の中で生まれるエネルギーは水素の核融合反応によるものであることが理論的に示され、第2次大戦以降、人工太陽を地上に作ろうという核融合反応を用いたエネルギー源の開発研究が米国、旧ソ連、英国で開始され、その後先進各国で行われるに至った。

我が国においても、日本原子力研究所、国立試験研究機関、大学、核融合科学研究所（大学共同利用機関）などにおいて各種研究が行われてきている。

核融合研究は、磁場閉じ込め核融合研究（以下、磁場核融合という。）と慣性核融合研究とに大きく分類される（別紙1参照）。磁場核融合は、磁場を利用して高温プラズマを安定に閉じ込め、そのプラズマに核融合反応を起こさせようとするものである。一方、慣性核融合は、強力なパルスレーザーを照射して、球殻状の燃料を超高密度に圧縮加熱し、瞬間的に核融合を起こさせるものである。以下に、それぞれの研究の現状と課題を簡単に紹介する。

1. 磁場核融合研究の状況

磁場を用いてプラズマを閉じ込めるにあたり、閉じ込め磁場の形状は別紙1に示すようにドーナツ状の磁場を用いるトーラス磁場方式とミラー磁場方式とに分類される。トーラス磁場では、ドーナツ状に沿った磁力線を捻ることが必要となるがその捻りの作り方によってさらにトカマク方式、ヘリカル方式、逆磁場ピンチ方式等に分類される。

(1) トカマク方式

トカマクは、1950年頃に旧ソ連で考案された方式であり、トーラスに沿ったトロイダル磁場とプラズマ中をトーラス方向に流れる電流が作る磁場で軸対称のプラズマを閉じ込める方式である。当初は、専ら旧ソ連で研究されていたが、1968年にT-3トカマクが他の方式の成果を大幅に上回る性能を有することが英国の研究チームによって確認されるに至って世界的に注目され、米国、欧州、日本などでも研究されることとなった。

我が国においては、プラズマの安定な閉じ込めを目標として、原子力委員会の策定した第一段階核融合研究開発基本計画の遂行にあたり、中核装置としてトカマク型装置が選択され、JFT-2が設置された。JFT-2では、当時世界最高の閉じ込め時間の達成や世界初の高周波による電流駆動等の成果をあげた。

その結果を踏まえ、臨界プラズマ条件の達成を目標とした第二段階の核融合研究開発基

本計画の遂行においても、トカマク型装置による臨界プラズマ条件の達成を目指すことを中核の計画とした。米、欧、露においてもトカマク型装置を建設し、臨界プラズマ条件の実現を目指す計画がほぼ並行して進められるようになった。

特に、三大トカマク装置と呼ばれる我が国の J T - 6 0 (1 9 8 5 年完成)、EU の J E T (1 9 8 3 年完成)、米国の T F T R (1 9 8 2 年完成) が建設され、実験が進められ、閉じ込め性能の向上、電流駆動やダイバータ研究、各種のプラズマ現象の解明などが進み、炉心プラズマ物理の研究が飛躍的に進展した。これらトカマク装置で得られた主な成果としては、イオン温度 5.2 億度、閉じ込め時間 1.2 秒、数多くの改善閉じ込めモードの発見、高周波による駆動電流 360 万アンペア、高自発電流率 (70 ~ 80 %) 高性能完全電流駆動プラズマの実証、負イオン NBI による加熱・電流駆動の実証、ダイバータによる熱・粒子制御の実証などがある。また、定常化については九州大学の超伝導装置 T R I A M - 1 M にて、高周波による 2 時間の定常電流駆動が実現されている。これらの結果、核融合炉の運転に必要なデータベース及びプラズマの制御方法が確立された。また加熱技術の耐高熱負荷材料等の工学技術開発も大きく進展し、第二段階基本計画の目標であった臨界プラズマ条件 * 1) を J T - 6 0 と J E T で達成した。また、T F T R や J E T では、実際の核融合炉用燃料となる重水素-トリチウム (三重水素) を使った実験が行われ、1600 万ワットというエネルギーの発生を実証するなど、他の閉じ込め方式による研究に比べ飛躍的に進展した成果をあげることとなった (別紙 2 及び別紙 3 参照) 。

これらの物理研究を通じて蓄積された炉心プラズマ研究成果、炉心プラズマデータなどを基に比例則が導かれ、また、大型装置の建設を通じて蓄積された技術的知見を踏まえ、物理的にも工学的にも臨界プラズマ条件の次段階である自己点火条件 * 2) の達成を見通せる段階に至った。

我が国においても、第三段階の核融合研究開発基本計画が策定され、自己点火条件 (エネルギー増倍率が 2 0 程度) の達成及び長時間燃焼の実現などを目指して、良好な成果と豊富なデータを有するトカマク方式による実験炉開発の推進が決定した。また、その時点で、その他の核融合炉研究については、トカマク方式を相補する役割を果たすとともに、引き続きそれぞれの方式の優位性の可能性を探る研究開発を行うこととなった。

こうした状況を背景として、日、EU、米、ロシアの 4 極の国際協力の下に、核融合エネルギーの科学的・技術的な実現可能性を実証するためにトカマク方式による国際熱核融合実験炉 (I T E R) 計画が進められることとなった。

I T E R 計画は、①実際の核融合燃料を用いた制御された点火と、最終的には定常状態を目標とする長時間燃焼の実証、②核融合炉に必要な技術を総合システムで実証、③核融合エネルギーの実用化のために必要な機器の総合試験、を通じて核融合エネルギーの技術的可能性を実証することを計画的な目的として定めた。概念設計活動 (C D A) に引き続いて、1992 年からは機器の詳細な設計や工学技術に係る研究開発を行い、建設に必要な主要な技術情報を整えることを目的とした工学設計活動 (E D A) を実施している。E D A は当

初6年間の予定で実施されたが、参加極が建設の判断を行うには至らず3年間の延長を行い設計の見直しを行っている。そこではトカマク研究の進展を踏まえて、計画目標を保ったまま技術目標の見直しを行い、無限大から有限値のエネルギー増倍率の実現を目指す選択に重点を移すことによって大幅なコスト低減を図っている。2001年2月には当初設計に対してコストを約50%まで低減した最終設計報告書案がとりまとめられた。ITER計画では、建設に約10年、運転に約20年を見込んでいる。ITER以降の計画としては、ITERの建設、運転結果を踏まえて核融合によるプラント規模での定常発電を実証する段階（原型炉）に進むことになる。

なお、ITERに関しては、比較的中性子の積算発生量が少ないため、実験炉容器等の材料としては十分な実績を有し、中性子照射データが他に比べて十分蓄積されているオーステナイトステンレス鋼が選定されている。ITER以降の核融合発電プラント等では、さらに中性子の積算発生量が多くなることから、1000~1500万ワット年/平方メートル*3)の中性子照射に耐え、かつ放射化の少ない新材料の利用が必要である。このような低放射化材料の開発には長い期間が必要となるため、ITERの開発と並行した開発が急務となっている。

(2)ヘリカル方式

ヘリカル方式は、トーラス状の容器に沿ってらせん状に巻き付けたコイル（ヘリカルコイル）によってできる非軸対称のらせん磁場によってプラズマを閉じ込める方式である。ヘリカル型装置による研究は、1950年代初頭に米国プリンストン大学でステラレータ研究がはじめられ、我が国においては、1960年代初頭に京都大学で独自のアイデアによるヘリオトロン研究がはじめられ、現在核融合科学研究所等に引き継がれて研究が行われている。

ヘリカル方式は、プラズマの閉じ込めにプラズマ電流を必要としないため、電流破壊不安定が起こらないこと、外部電流駆動源が不要であること、さらには還流するエネルギーが少なく効率的であること、定常運転が容易であることを特長としており、経済性の高い炉形式になる可能性を有している。

平成10年より、世界最大の超伝導コイルを有し、日本独自のヘリオトロン方式である大型ヘリカル装置実験が開始され、これにより、イオン温度4100万度、電子温度5000万度、エネルギー閉じ込め時間0.3秒を達成している。閉じ込め性能はトカマクにおける閉じ込め改善(H)モードと同等であることが示された。核融合プラズマの総合性能を示す核融合積は現在2.3億度・秒・兆個/cm³であるが、これらの性能が1分を超える長時間保持においても劣化せず、定常運転への容易な伸張を展望できることを示している。加熱パワー及びダイバータ排気の整備を進めており、まもなく大型トカマクと比肩できる領域に手が届くようになっている。なお、ドイツにおいてもLHDとほぼ同規模かつ超伝導コイルを備えたW7-Xが建設中である。

また、中規模のヘリカル装置として京都大学にヘリオトロンJが建設され、新しいヘリカル軸配位の実験が始まっている。

(3)逆磁場ピンチ方式

逆磁場ピンチ方式は、トカマク方式同様にプラズマ電流を発生して閉じ込める方式で、プラズマ電流の立ち上げ時に、トロイダル磁場の向きを反転させることによって、プラズマの中心部と周辺で磁場の向きを反転させ、プラズマ自身に安定な閉じ込め配位を自立的に形成させるところが異なる。

この方式では、強力なトロイダル磁場を必要としないため、装置の構造を単純化でき、原理的にプラズマ電流を大きくすることが可能であり、その結果として閉じ込め性能の向上、外部からの追加熱装置が不要になるなどの可能性も有する。現在、プラズマの閉じ込めを維持するための技術開発等が課題となっている。

我が国においては、電子技術総合研究所（4月1日からは産業技術総合研究所）を中心として研究が行われており、これまでに、イオン温度800万度の達成、電子温度1000万度の達成、改良閉じ込めモードの確認、プラズマ-容器壁相互作用を制御するダイバータ配位の最適化などの成果をあげている。しかしながら、現状の逆磁場ピンチ装置は、トカマク装置と比べて規模も小さく、トカマク方式の成果と大きな隔たりがある。なお、臨界プラズマ領域と小型装置の実験領域との中間的なパラメータの実現を目指した次段階高性能装置TPERXが1998年末完成している。

(4)ミラー方式

ミラー方式は、他の方式と異なり直線系で、プラズマ閉じ込め領域の両端部の磁場を強くすることにより、端部からのプラズマ粒子の漏れを軽減する方式であり、装置構造が単純、取扱が容易という特徴を有する。

しかしながら、端からの粒子の漏れが大きく、エネルギー回収効率が極めて悪いため、1970年代末に、ミラー磁場の両端部にコイルを追加して正負の電位を作り、両端において粒子を電氣的に跳ね返して閉じ込めるタンデムミラー(複合ミラー)方式が提案されている。

この方式は、磁力線に垂直な方向の閉じ込めには磁場を用い、磁力線に沿った方向の閉じ込めは電場の効果で行うという、磁場と電場の双方を用いた閉じ込め方式である。

最近の研究は、タンデムミラー方式が主体で、筑波大学が中心になって行われており、筑波大学のGAMMA10装置は、世界最大のタンデムミラーで、ミラー端部に千ボルトを越える電位を形成し、1億度以上のイオン温度を達成して熱核融合中性子を観測している。また、ほぼ一様な閉じ込め領域の磁場や装置への良好なアクセス性を活かして高温プラズマの物理の解明や計測技術の開発にも貢献している。さらに高い閉じ込め電位の形成とそれによる高密度プラズマの達成及び電子に関するエネルギー閉じ込め性能の改善等が今後の課題となっている。

(5) その他（球状トラス方式等）

近年トカマクのアスペクト比を小さくした球状トラス方式の研究が進展しており、コンパクトな高温プラズマの閉じ込めが期待できることから、基礎的な研究や装置の大型化が進められている。

2. 慣性核融合研究の状況

(1) レーザー核融合

レーザー核融合は、強力なレーザー光を球殻状の燃料ペレット表面に照射し、表面で発生するプラズマの圧力で固体密度の千倍程度にこれを爆縮して、瞬時に核融合反応を起こさせる方式である。

このレーザー核融合ではプラズマ閉じ込め用の磁場が不要で、また不純物の問題もないので超高真空技術が不要となるため、この観点からは炉を作りやすいといえる。しかし、レーザー効率が炉としての効率に大きく影響するため、レーザー効率の向上を図ること、1秒間に数回の割合で燃料ペレットを炉に供給し、これに高出力レーザーを照射する技術等が技術的開発課題である。

我が国においては、大阪大学を中心として研究が進められており、激光XⅡ号による炉心プラズマ発生研究では、1億度以上の高温発生と固体密度の600倍以上の超高密度圧縮が実証され、現在自己点火への実証に向けて点火等価プラズマの発生のための研究が行われるとともに、新しい点火方式として、最近新しく開発された超高強度レーザーで強制的に爆縮プラズマに点火する「高速点火」の研究が進められており、これにより、より小規模の核融合炉が実現されるものと期待され、注目を集めている。また最近、実用炉に必要なレーザー効率を持つ半導体レーザー励起の固体レーザーが発明され、産業応用との連携で研究開発が進められている。

なお、米国においては、大型の点火施設（National Ignition Facility：N I F）が建設中であり、2010年頃までにレーザー核融合の点火・燃焼を実証する計画となっている。また、ロチェスター大学では出力30kJの紫外レーザーで投入レーザーエネルギーの2%の核融合出力が得られている。さらにフランスでも米国の点火・燃焼実験計画と同様の計画（Laser Mega-Jule：LMJ）が進められている。

(2) 重イオン核融合

レーザーの代わりにビスマス等の重イオンビームを利用して燃料ペレットを爆縮する方式も考えられており、米国等ではそのための重イオンビーム発生装置の開発研究等も進められている。我が国では理化学研究所等の加速器を用いた基礎研究が開始されている。

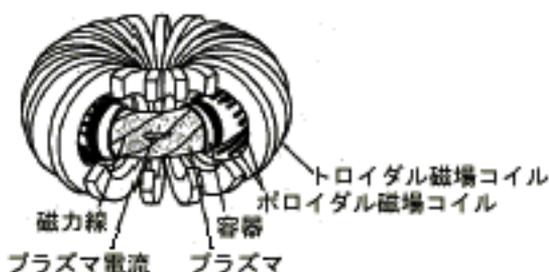
※1) 臨界プラズマ条件：核融合反応を起こすために外部から入れたパワーと重水素・三重水素燃料を用いた場合に核融合反応により発生するパワーとが等しくなるプラズマ

条件

- ※2) 自己点火条件：外部からのパワーの注入よりも重水素と三重水素とが核融合反応して発生するパワーが十分に大きくなる条件
- ※3) 単位面積当たりのプラズマに面する壁に 100 万ワットの負荷 (中性子壁負荷) が 1 年間入射し続けた時に相当する中性子の照射量 ($\text{MW a} / \text{m}^2$)

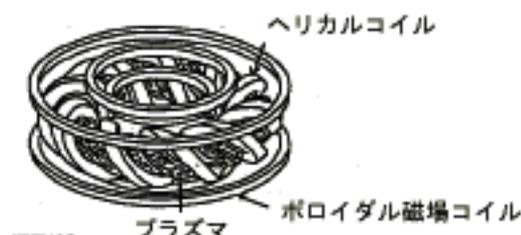
核融合研究における各種閉じ込め方式の分類

トカマク型 ———— 代表的国内装置：JT-60 (日本原子力研究所)



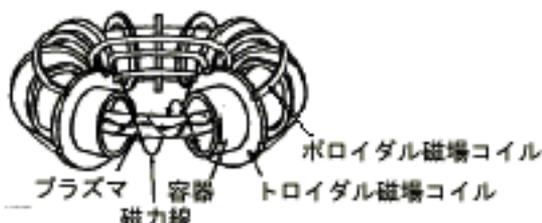
原理：
プラズマ中に流す電流（プラズマ電流）が作る磁場とトロイダル磁場コイルが作る磁場とが合成してできる軸対称のらせん状磁力線によってドーナツ状容器内にプラズマを閉じ込める方式で、最も高いプラズマ性能を実現しており、世界で最も研究が進んでいる

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

主な核融合装置の方式

慣性閉じ込め方式

各種閉じ込め方式による成果比較

方式 項目	磁場閉じ込め				慣性閉じ込め
	トーラス			開放端	
	トカマク	ヘリカル	逆磁場ピンチ	ミラー	
閉じ込め時間	1.2秒 (JET) 1.08秒 (JT-60)	0.3秒 (LHD)	0.009秒 (MST)	0.6秒 (GAMMA 10)	20ピコ秒 (激光X11号) [注：反応時間]
電子密度	2000兆個/cm ³ (Alcator C) 270兆個/cm ³ (JT-60)	250兆個/cm ³ (W VII-AS) 150兆個/cm ³ (LHD)	200兆個/cm ³ (OHTE)	11兆個/cm ³ (GAMMA 10)	50兆・兆個/cm ³ (激光X11号) [注：質量密度]
イオン密度	約2000兆個/cm ³ (Alcator C) 220兆個/cm ³ (JT-60)	公開データなし	公開データなし	11兆個/cm ³ (GAMMA 10)	50兆・兆個/cm ³ (激光X11号) [注：質量密度]
電子温度	1.7億度 (JT-60)	5000万度 (LHD)	1000万度 (TPE-RX)	350万度(中心セル) (GAMMA 10)	4600万度 (オメガ)
イオン温度	5.2億度 (JT-60)	4100万度 (LHD)	800万度 (REPUTE, TPE-1RM)	1.2億度 (GAMMA 10)	1億8000万度 (オメガ)
核融合積	177億度・秒・兆個/cm ³ (JT-60)	2.3億度・秒・兆個/cm ³ (LHD)	公開データなし	0.5億度・秒・兆個/cm ³ (GAMMA 10)	35億度・秒・兆個/cm ³ (激光X11号)
等価エネルギー増倍率	1.25 (JT-60)	公開データなし	公開データなし	公開データなし	0.01 (オメガ)
放電継続時間	2時間 (TRIAM-1M)	127秒 (LHD)	0.14秒 (RFX)	0.15秒 (GAMMA 10)	1ナノ秒 (激光X11号) [注：レーザー出力時間]

核融合エネルギーの位置付け

○未来のエネルギー選択肢の幅を広げ、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。

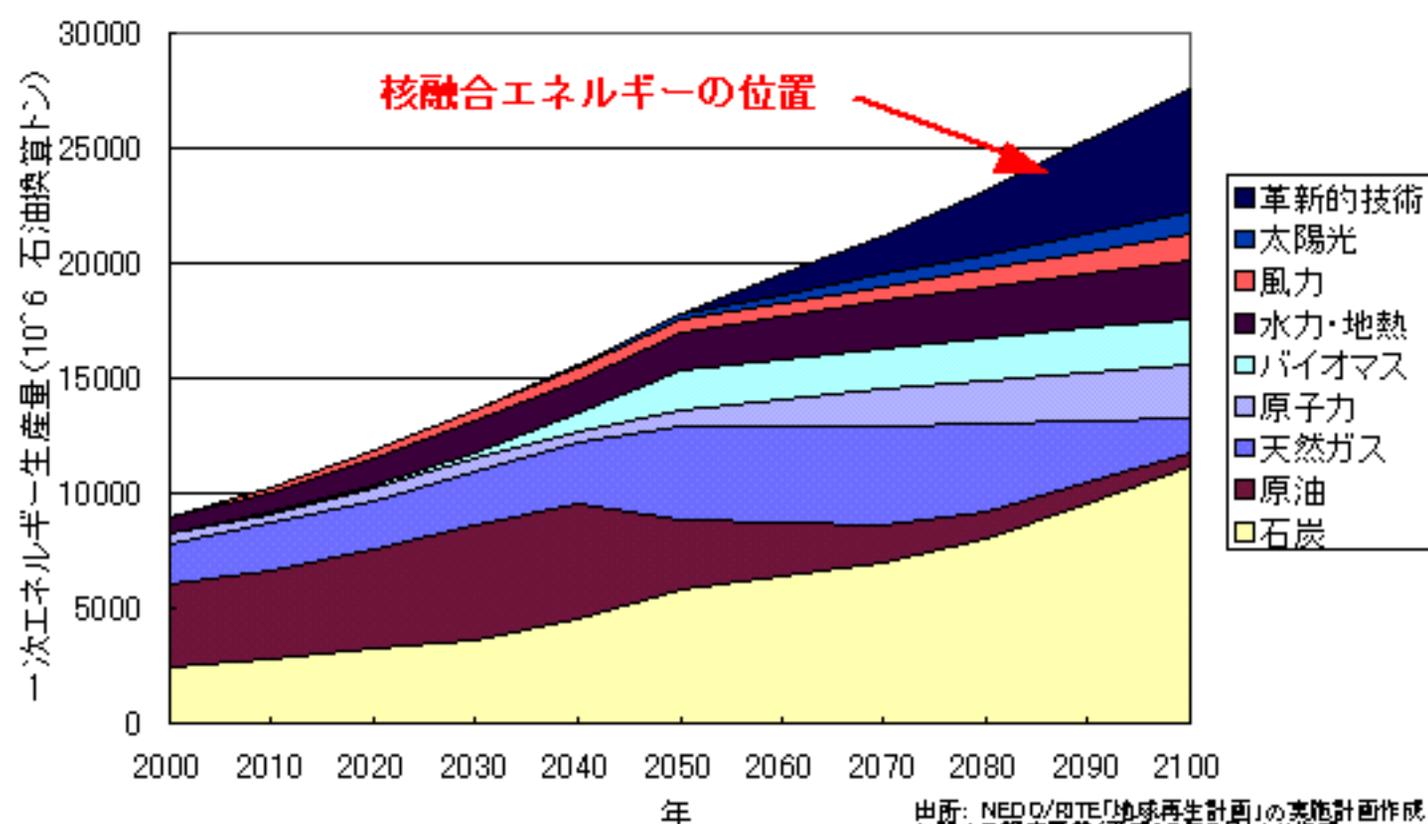
（「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（平成 12 年 11 月）」より抜粋）

○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（下図）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）

550ppm 安定化ケース(CO₂ 処分有、革新技術有)

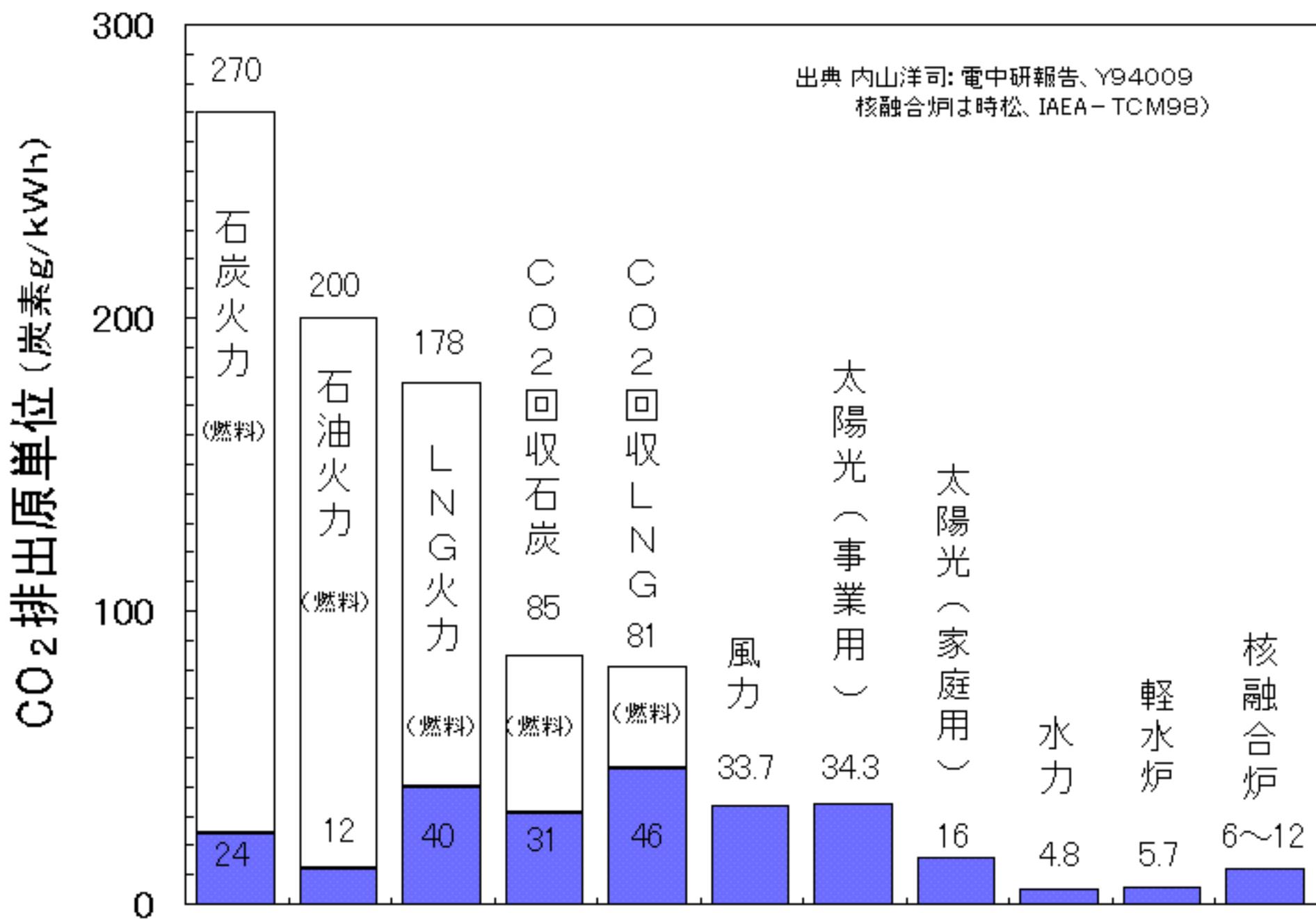


環境制約(二酸化炭素濃度規制)を行った場合の将来のエネルギー予測

○核融合は、様々な産業・学問への波及効果を伴う、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、計画の拡がりと裾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）



各種電源別の二酸化炭素排出量

出典:「核融合エネルギーの技術的実現性、計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」
(平成12年5月17日)

核融合エネルギーの資源量

核融合エネルギーの資源制約は事実上無い

		資源	注記（製造等）
燃料	重水素	ほぼ無尽蔵 (海水中に~140ppm)	カナダの重水製造設備で 800トンD ₂ /年 (核融合炉11000基分に相当)
	リチウム (トリチウム原料)	ほぼ無尽蔵 (海水中に~170ppb; 1500万年分)	海水からの回収法 予想コスト:市販価格の2倍弱 (四国工業技術研)
特殊材料	ニオブ (超伝導材)	7万年 (総鉱物資源量)	線材によってはNbは不要 資源制約にならない
	ベリリウム (中性子増倍材)	7万年 (総鉱物資源量)	方式によってはBeは不要 資源制約にならない

世界の総発電量(12.5兆kWh)を核融合炉約1500基で賄うと仮定した評価

総鉱物資源量：地球化学的手法で、地殻中の存在度から現在の資源技術で獲得できると考えられる鉱石量

出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会
「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」
(平成12年5月17日)

核融合の安全性の特徴

「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。
 一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

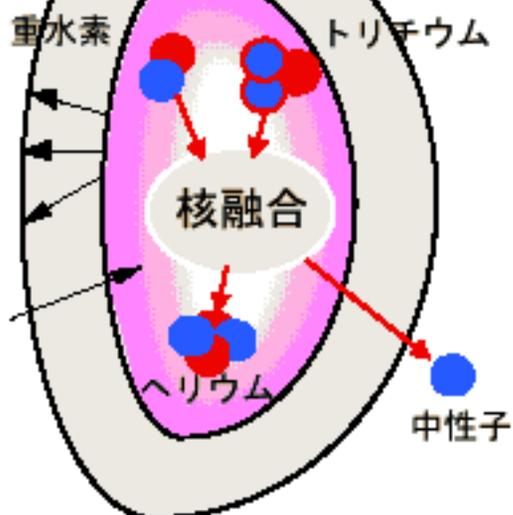
核融合燃料

・重水素
 ・トリチウム

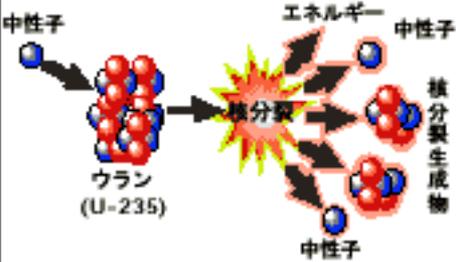
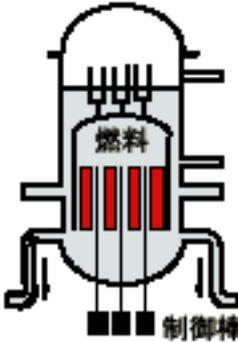
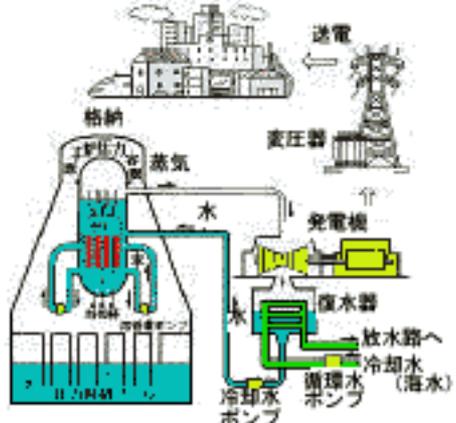
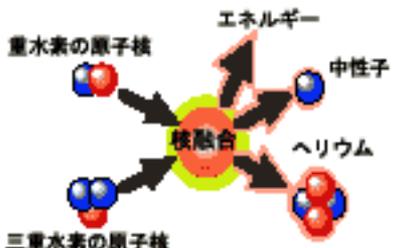
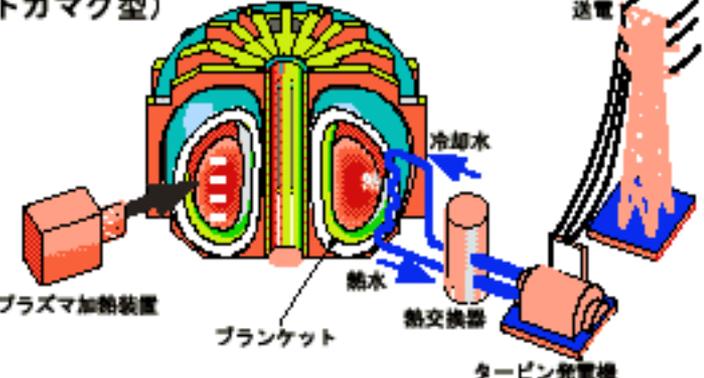
放射性物質であるトリチウムが
 分散して広範囲に存在

「閉じ込め」が重要

核融合反応



核分裂と核融合

	原理	制御	エネルギーの取り出し
核分裂	 <p>中性子が当たるとウランは割れて中性子と核分裂生成物となるが、この時大きなエネルギーが放出される。ウラン燃料1gは石油1.8トン分のエネルギーに相当。</p>	<p>制御棒で制御する</p>  <p>核分裂によって発生する中性子を水などを使って遅い中性子にすると共に、制御棒を使って核分裂反応の量を調整する。</p>	<p>(沸騰水型)</p>  <p>中性子のエネルギーにより冷却材（水など）を加熱して、その蒸気を発生させ、タービンを回し発電する。</p>
核融合	 <p>重水素の原子核と三重水素の原子核が衝突して融合し、ヘリウムと中性子になる。この時莫大なエネルギーが放出される。核融合燃料1gは石油8トン分のエネルギーに相当。</p>	<p>燃料供給と外部入力の増減で制御する</p>  <p>燃料（重水素と三重水素）の供給量と外部入力の増減で、プラズマの密度と温度を制御して核融合出力を調整する。</p>	<p>(トカマク型)</p>  <p>中性子のエネルギーはブランケットで受けとめ、ブランケット内を通る冷却材（水など）を加熱し、その熱で蒸気を発生させタービンを回し発電する。</p>

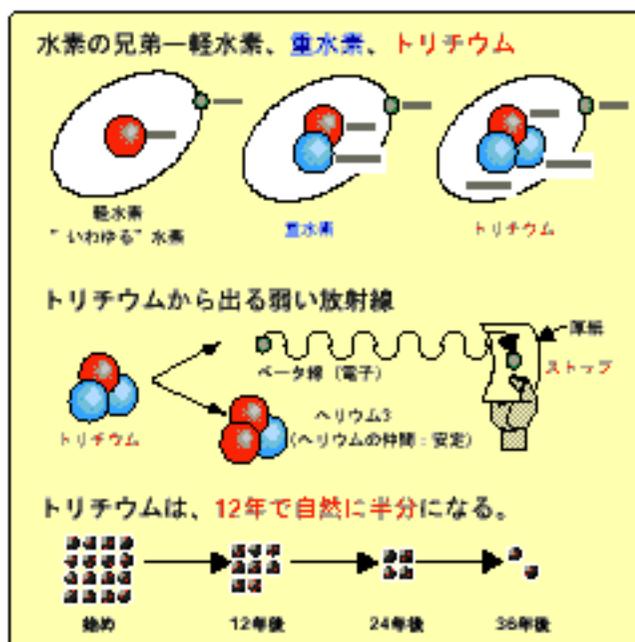
トリチウムとは？

トリチウムは水素の仲間である水素とほぼ同じ性質を持ち、水素のあるところには必ず存在する。トリチウムは放射能を持ち、半減期は12.3年で、弱いβ線を放出してヘリウムに変わる。このβ線は、空気中で5mm、水中では0.006mm透過する。

宇宙線と大気との反応で年間200g程度のトリチウムが天然に作られている。

トリチウムは体内に入った場合、普通の水素と同様に体内の水分代謝とともに、汗や尿として排出される。半分の排出されるまでの時間は約10日。

上述のようにトリチウムのβ線は最大でも18keVと弱く、厚紙一枚でとまるので、外部被曝よりはむしろ内部被曝が検討される。



ITERでのトリチウム安全取り扱い

ITERでは、燃料として放射性物質であるトリチウムを取り扱う。施設内のトリチウム保有量は約3kg（約 10^{18} ベクレル）と評価されており、そのうち、最大約1.2kgが真空容器内に、また残りは燃料処理貯蔵施設に分散して存在する。このことから、ITER施設では、「公衆及び放射線作業従事者にこれらによる放射線障害を及ぼす恐れが無いように措置を講ずる」ことを安全確保の目標としている。

その目標を達成するため、平常時にあつては合理的に達成可能な限り低く保つよう放射線障害の防止に努め、事故発生を防止する措置を講じる。具体的には、公衆の実効線量当量が国の法的限度を十分に下回るように維持するための措置を講じる。

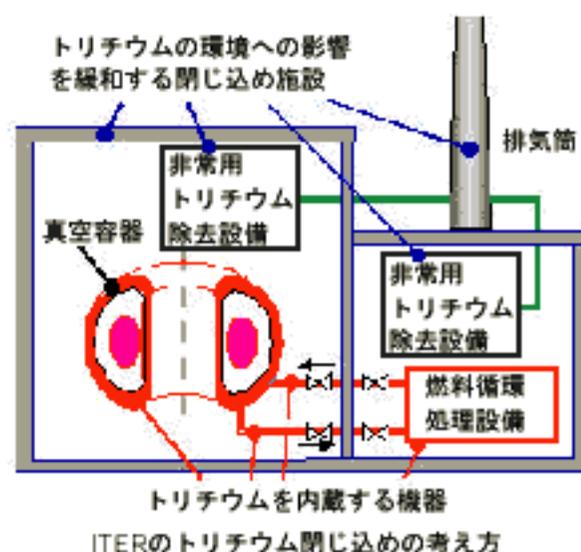
事故発生を防止するために、トリチウムを内蔵する機器の気密、十分な構造強度を確保・維持し、及び必要に応じて圧力逃がし機構を設置する。また、万一に備え、放出放射性物質をできる限り除去・低減するコンファインメント施設（閉じ込め施設）を設け、トリチウムの環境への異常な放出を防止する。

設計上想定する事故事象

上述のように、十分に事故発生防止に努めるが、ITERの安全設計の解析評価のために、以下の7つの事故事象が想定されている。

1) トリチウム燃料系に係る事象、2) 真空容器システムの閉じ込め障壁の破損、3) 真空容器外冷却水系に係る事象、4) 真空容器内機器に係る事象、5) プラズマに係る事象、6) 超伝導コイルに係る事象、7) 商用電源喪失。

この内、最初の3事象では、トリチウムを内蔵する機器からトリチウムのトカマク区画（建家内）への放出が想定されている。予備的な評価では、「ITER施設の安全確保の考え方（科学技術庁H12.7）」に基づき、非常用トリチウム除去設備を設置し（上図参照）トリチウムを除去するので、環境に放出されるトリチウムはごく僅かと評価されている。また、残る4つの事象は、固有の安全性、受動的安全性、及び設備設計によって、放射性物質の建家への放出なく事象は終息すると評価されている。



ITERの廃棄物

ITERは20年間の運転の結果、トリチウムが機器に付着すること、真空容器内部の機器等が中性子の照射により放射化することにより、廃炉・解体時に放射性廃棄物が発生する。

放射性廃棄物に含まれる代表的な放射性核種は、C-14、Co-60、Ni-63、Nb-94である。

ITERで発生する放射性廃棄物は、すべて低レベル放射性廃棄物と呼ばれるものであり、その量は運転停止直後の量では約3万9千トンと見積もられている。原子力発電所（電気出力100万kW）の廃炉・解体時の放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物が約200 m³、低レベル放射性廃棄物が約8000～10000トンであり、ITERの低レベル放射性廃棄物は、原子力発電所の4-5倍となる。

ITERで発生する放射性廃棄物の性質は、 α 核種（ウラン、プルトニウム等、 α 線を放出する放射性元素）がない。 β γ 核種（C-14、Co-60等電子及び電磁波を放出する放射性元素）の濃度は、原子力発電所の低レベル放射性廃棄物の200分の1（高レベル放射性廃棄物と比較すると約1万分の1）と、はるかに小さい。

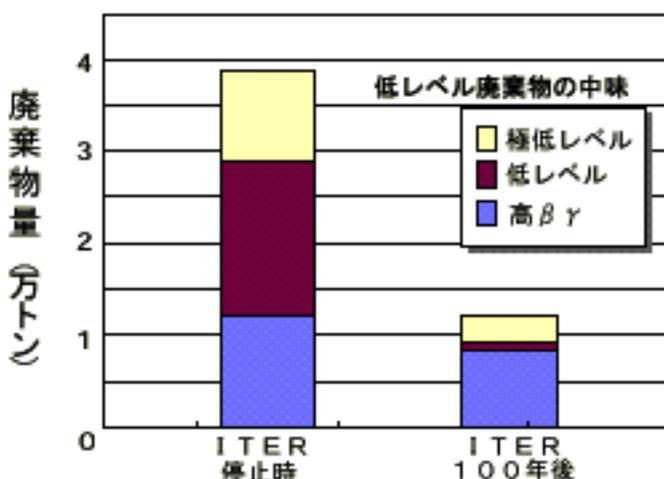
放射性廃棄物の分類とその処理

●以下の廃棄物については、処分の考え方*が既に示されている。

- (1)高 β γ 濃度区分低レベル放射性廃棄物：「地下利用に十分余裕を持った深度に処分」（例えば地表から50-100 m程度の深度）
- (2)低濃度区分低レベル放射性廃棄物：浅地中の「コンクリートピット処分」
- (3)極低濃度区分低レベル放射性廃棄物：「素掘り処分」

*「RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方について」
原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（平成10年5月）

● ITER廃棄物量の経時変化



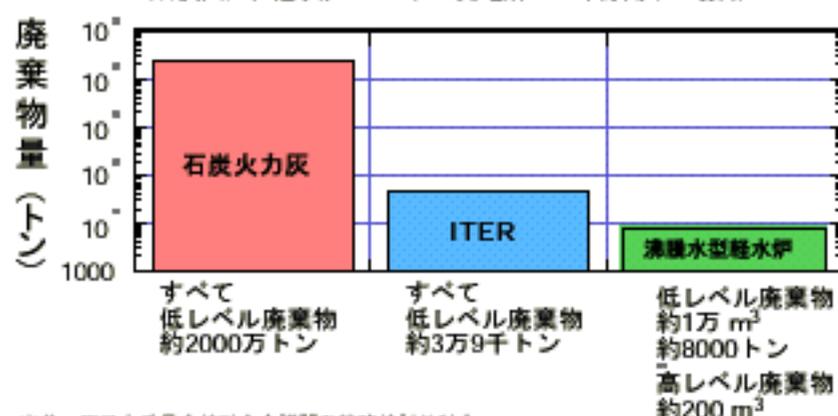
ITERの廃炉時に低レベル廃棄物であったものは、ある程度の管理期間を過ぎた後、放射性物質濃度がクリアランスレベル**以下となり、放射性廃棄物としての扱いが不要となる。

ITERの廃炉時の廃棄物量は約3万9千トンと見積もられているが、100年後には、そのうち約3/4がクリアランスレベル*以下の一般廃棄物となる。

**「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」
原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会
（平成11年3月）

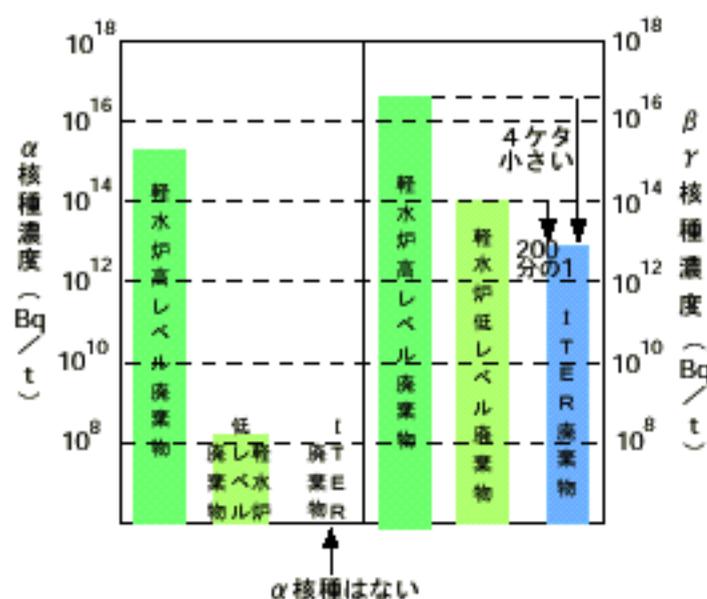
● 廃炉時の石炭火力、ITER及び核分裂炉の廃棄物量比較

（石炭火力、軽水炉：100万kW発電所が30年稼働した場合）

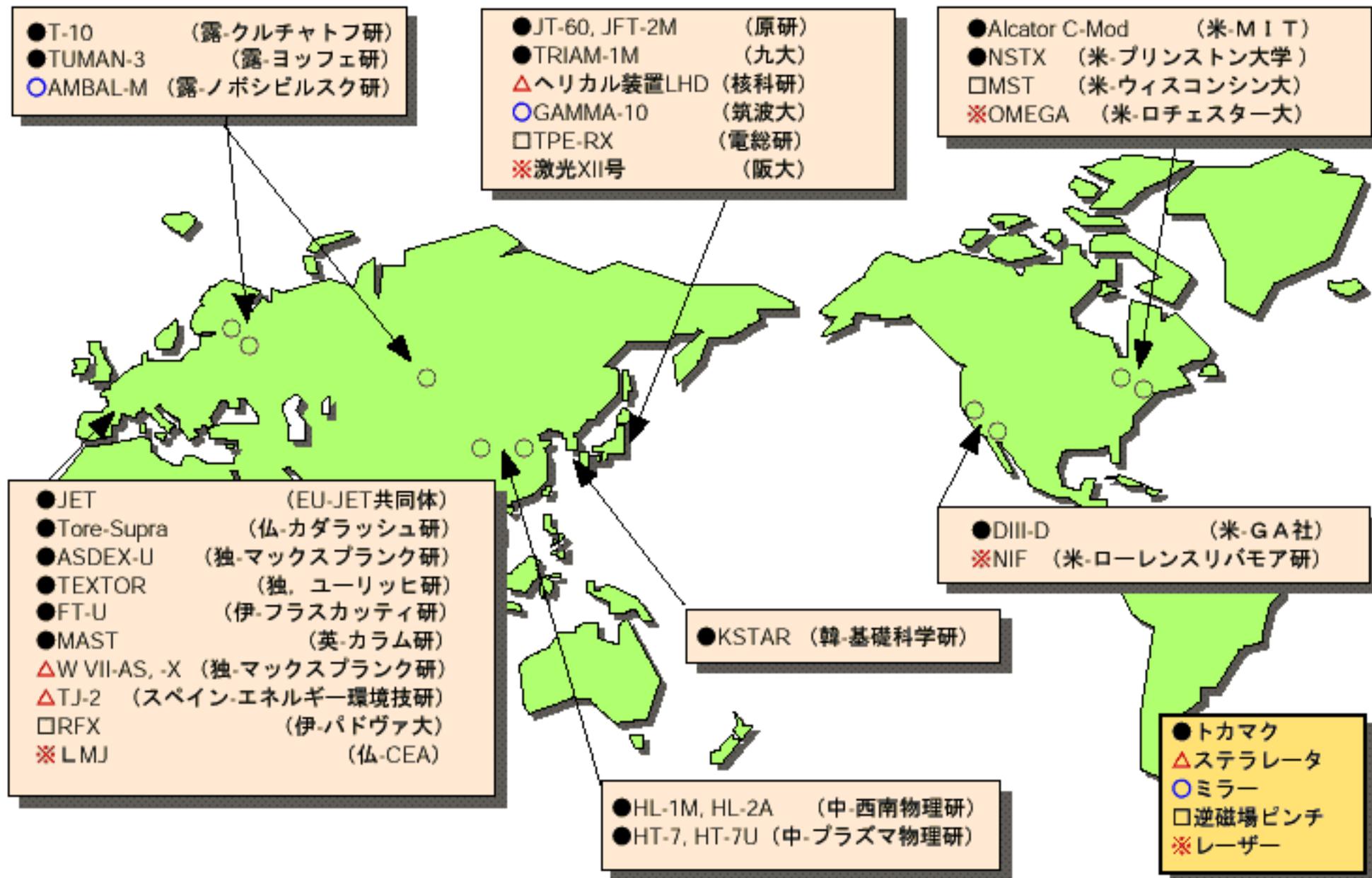


出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会
「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の広がりと視野としての基礎研究に関する報告書」
（平成12年5月17日）

● 廃棄物中の放射性物質の濃度比較



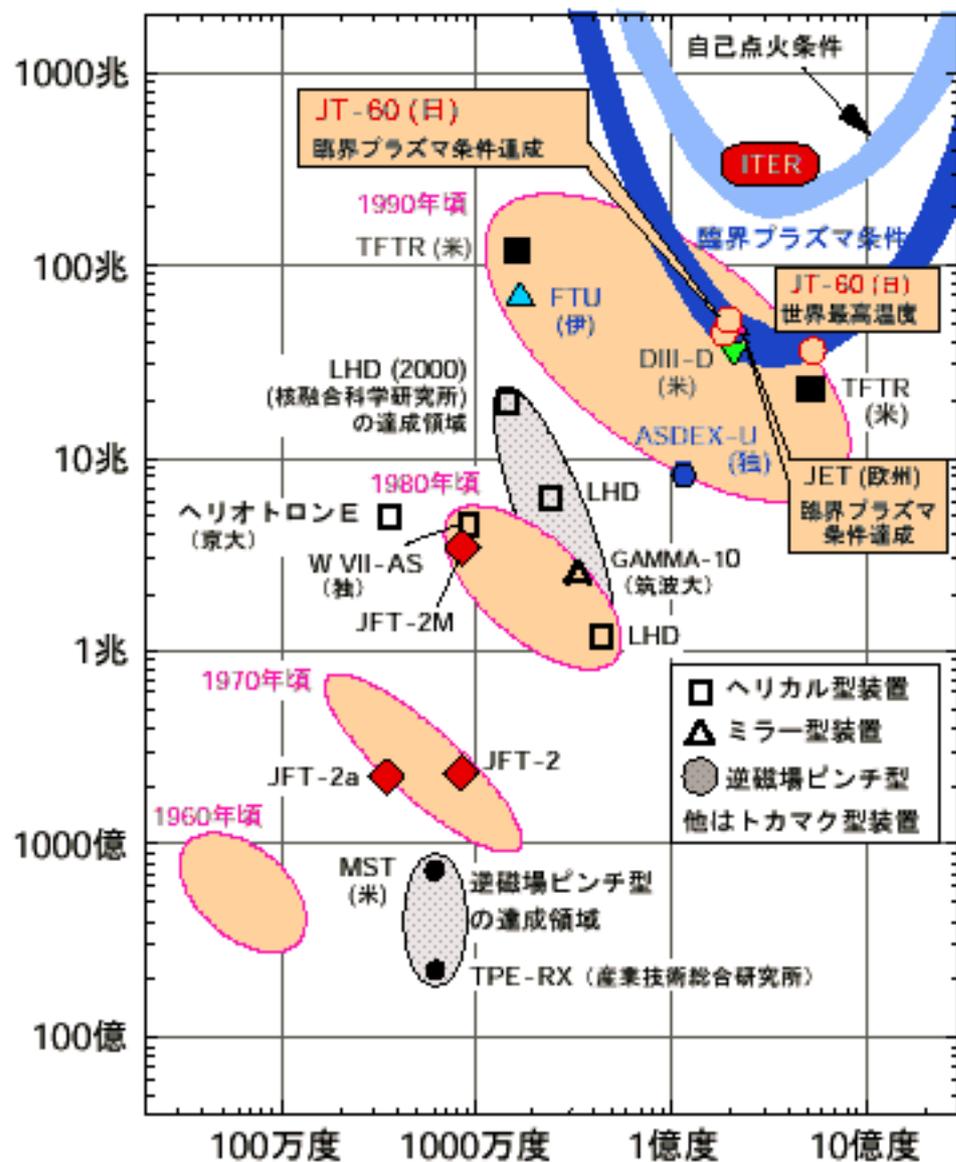
世界における代表的核融合装置



核融合開発のこれまでの展開とこれからの見通し（磁場閉じ込め方式）

プラズマ中心密度×閉じ込め時間（個/cm³・秒）

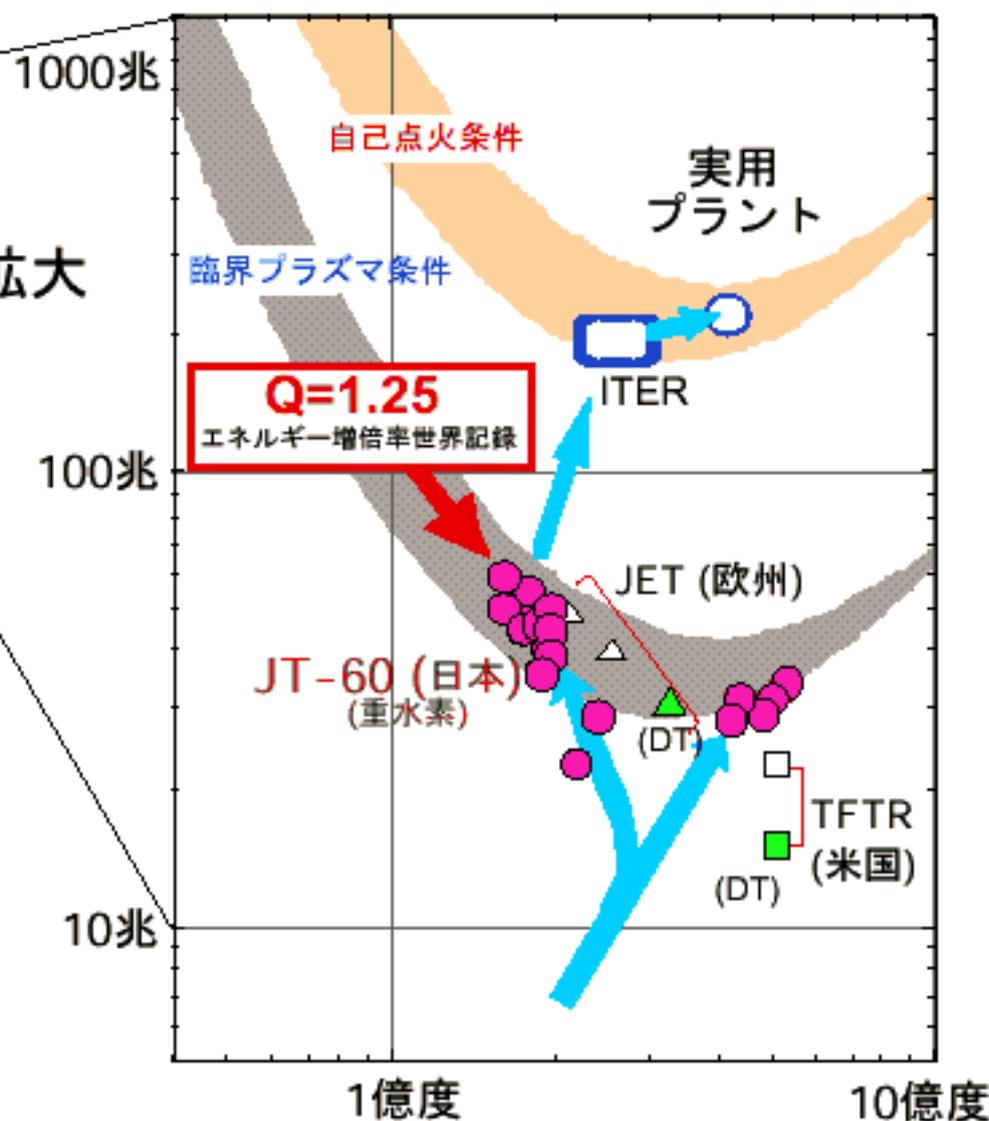
参-24



中心温度

(エネルギー増倍率: $Q = \text{核融合出力} / \text{加熱入力}$)

拡大



中心イオン温度

[文部科学省研究開発局核融合開発室]

参-資料11

国際熱核融合実験炉（ITER）計画の概要

平和的目的のための核融合エネルギーの科学的及び技術的実現可能性の実証を目標とした国際共同プロジェクト

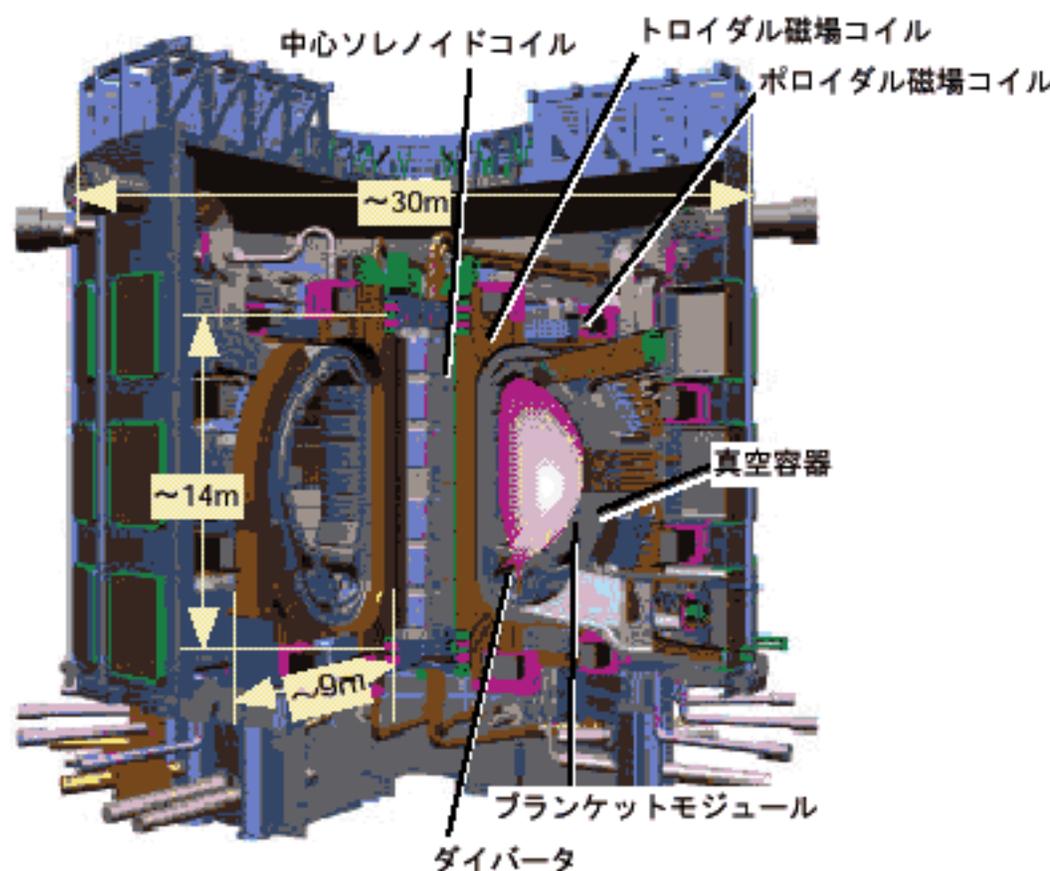
● 経緯

- 1985年11月の米ソ首脳会談が発端
- 1988年～1990年 概念設計活動（CDA）
- 1992年7月～1998年7月 工学設計活動（EDA）
日本、米国、EU、ロシアの4極で実施
- 1998年7月～2001年7月 工学設計活動（EDA）延長
本体建設費を従来に比べ半減化する設計活動を実施
(1999年7月の米国撤退後は、日本、EU、ロシアの3極で継続)
- 2000年4月 非公式政府間協議を開始（同年12月に終了）
- 2001年2月 ITER理事会（最終設計報告書の報告）
- 2001年前半 公式政府間協議開始（予定）
- 2001年中頃 各極が誘致（1極1サイト）の是非を表明（予定）

● 我が国の取り組み

- 原子力委員会ITER計画懇談会：
我が国への誘致の是非について審議
- 国に誘致要望を表明している自治体：
北海道（苫小牧市）、青森県（六ヶ所村）、茨城県（那珂町）
- 本体建設費の見積り：約4500億円
(最終設計報告書（案）に基づく共同中央チームの試算)
(この他に、付帯的経費、立地地点固有の経費等が必要)
- ITER事業体：
国際機関（もしくはホスト国の国内機関）として設立

ITER本体概要図



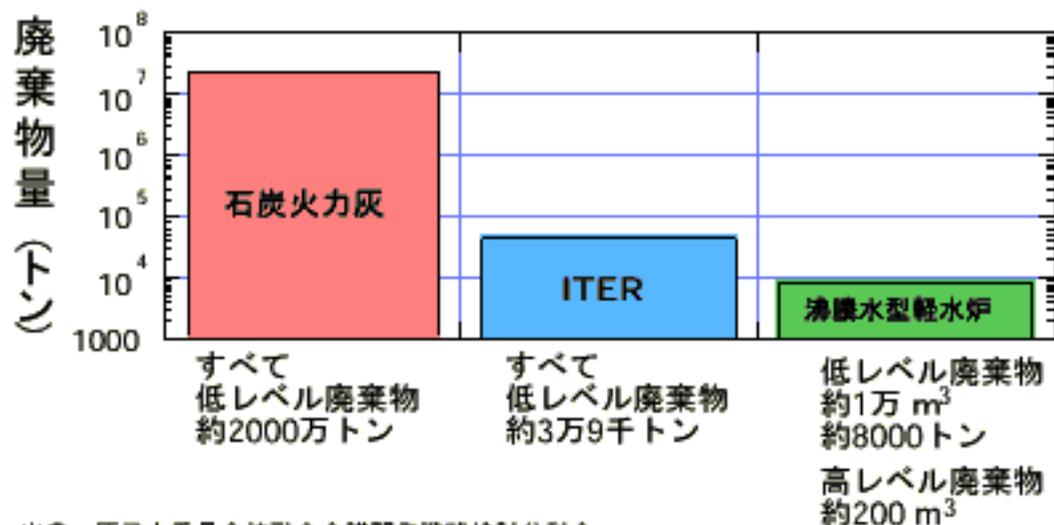
主要諸元

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

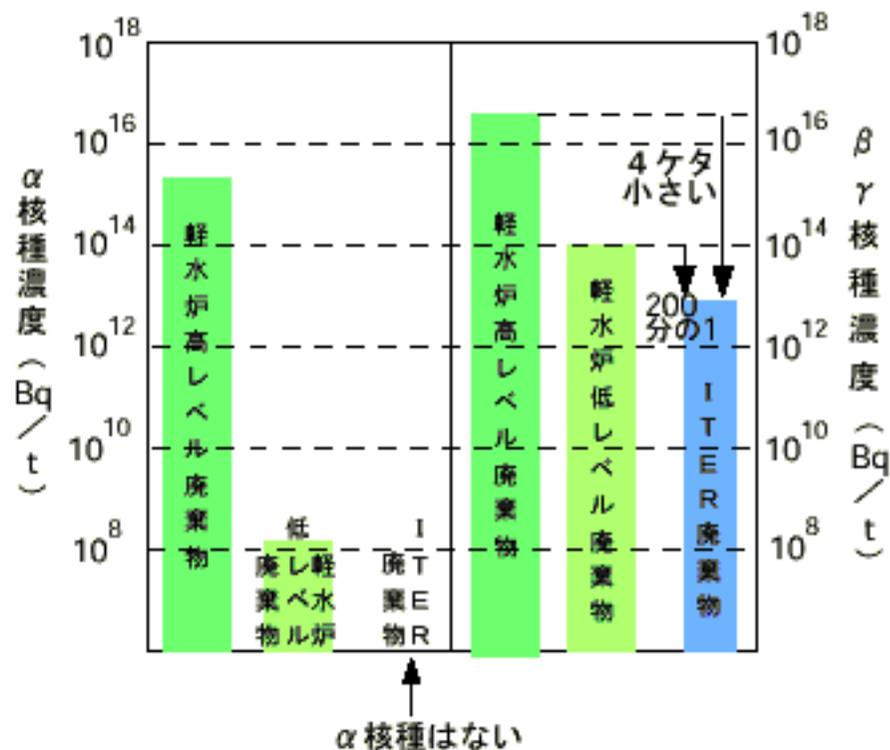
※1：70万kwまで運転可能 ※2：1700万Aまで運転可能

ITERの廃棄物の特徴

● 廃炉時の石炭火力、ITER及び核分裂炉の廃棄物量比較 (石炭火力、軽水炉：100万kW発電所が30年稼働した場合)

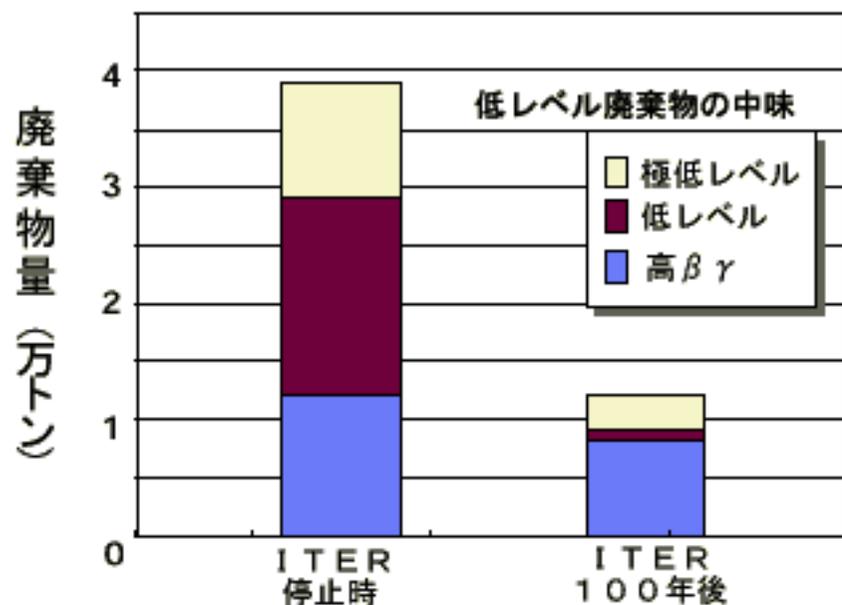


● 廃棄物中の放射性物質の濃度比較



出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会
「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」
(平成12年5月17日)

● ITER廃棄物量の経時変化



α核種：ヘリウムを放出する放射性元素（ウラン、プルトニウム等）
βγ核種：電子及び電磁波を放出する放射性元素
(コバルト60、炭素14、トリチウム等)

● 廃棄物の主な内訳

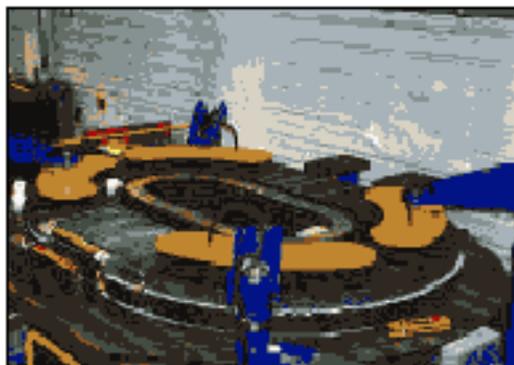
- 核融合炉：放射化物（コバルト、ニオブ等）
トリチウム汚染物
- 軽水炉：核分裂生成物等
- 石炭火力：燃焼灰中のトリウム、ウラン

ITER工学R&D

中心ソレノイドモデルコイル試験



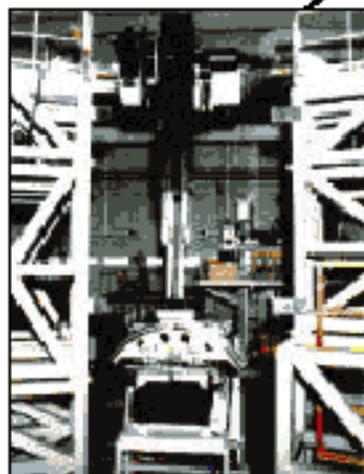
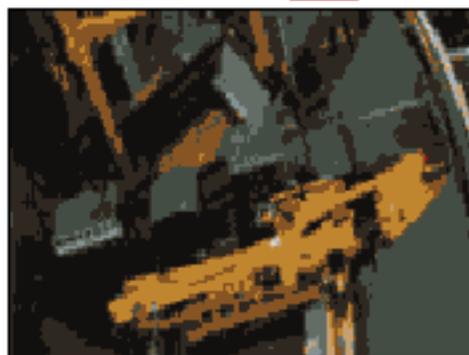
トロイダルモデルコイル試験



真空容器実規模 1/20 セクタモデル試作開発



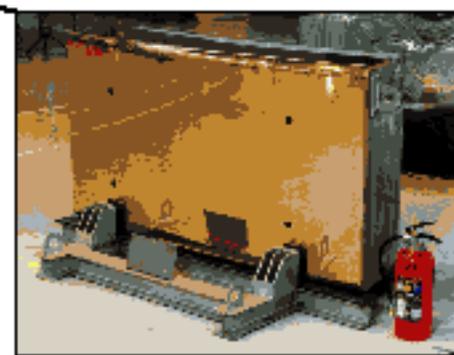
ダイバータカセット遠隔保守技術開発



ブランケットモジュール遠隔保守技術開発



ダイバータカセット組み合わせ試験



遮蔽ブランケット実規模モックアップ試験

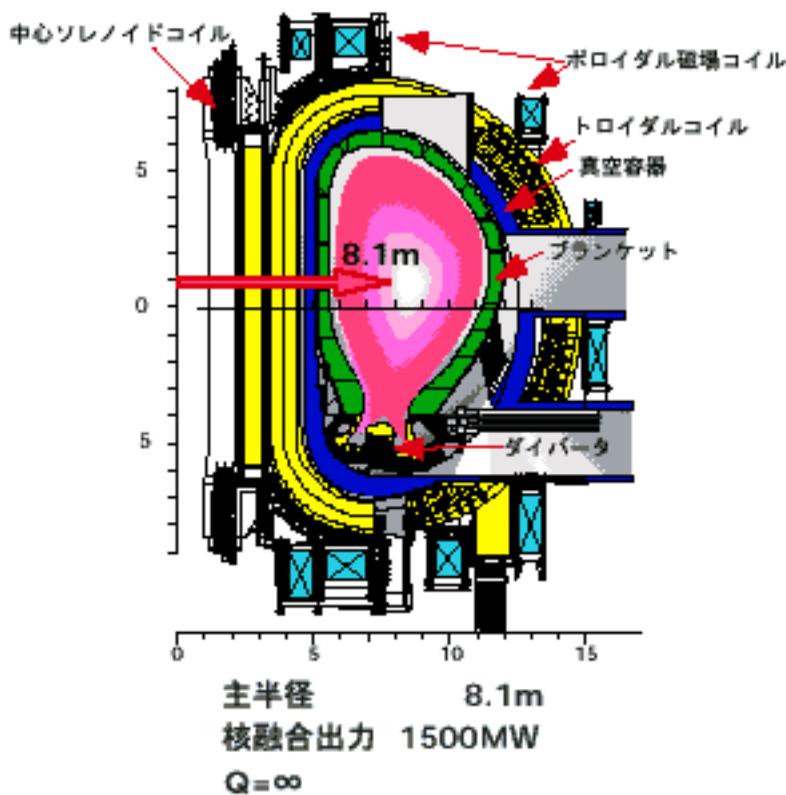


工学 R & D の分担

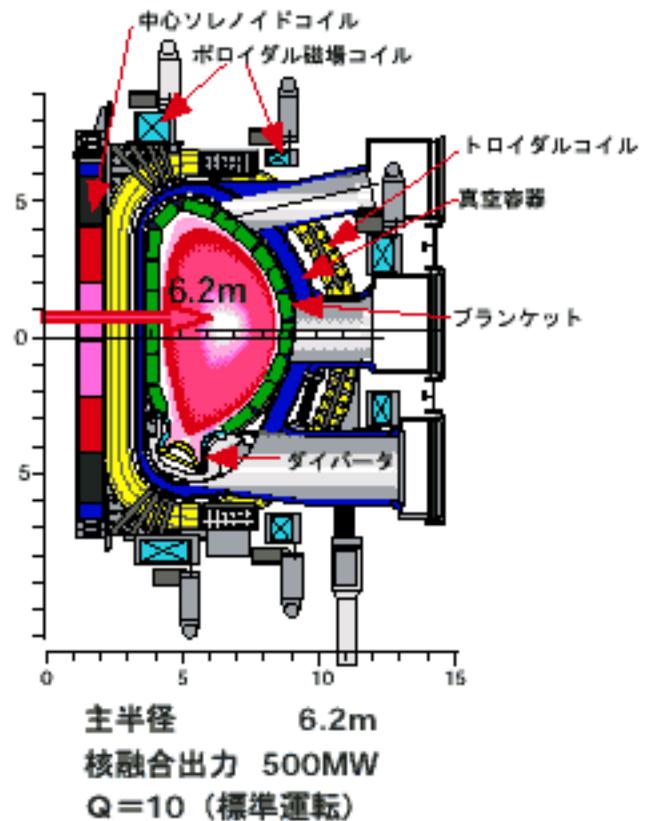
	課 題	幹事極	開発参加極	実証試験実施場所
1	中心ソレノイド モデルコイル試験	日本 米国	日本・米国・ EU・ロシア	日本／原研
2	トロイダル モデルコイル試験	EU ロシア	EU・ロシア 日本・米国	EU／ カールスルーエ研究所
3	真空容器実規模 1/20 セクタモデル試作開発	日本	日本・米国・ EU・ロシア	日本／原研
4	遮蔽ブランケット 実規模モックアップ試験	EU	EU・日本 米国・ロシア	EU／NETチーム (独仏伊の各研究所)
5	ダイバータカセット 組み合わせ試験	米国	米国・日本 EU・ロシア	米国／サンディア 国立研究所
6	ブランケットモジュール 遠隔保守技術開発	日本	日本・米国・ EU	日本／原研
7	ダイバータカセット 遠隔保守技術開発	EU	EU・日本 米国	EU／ENEA (イタリア)

新旧ITERの比較

当初のITER

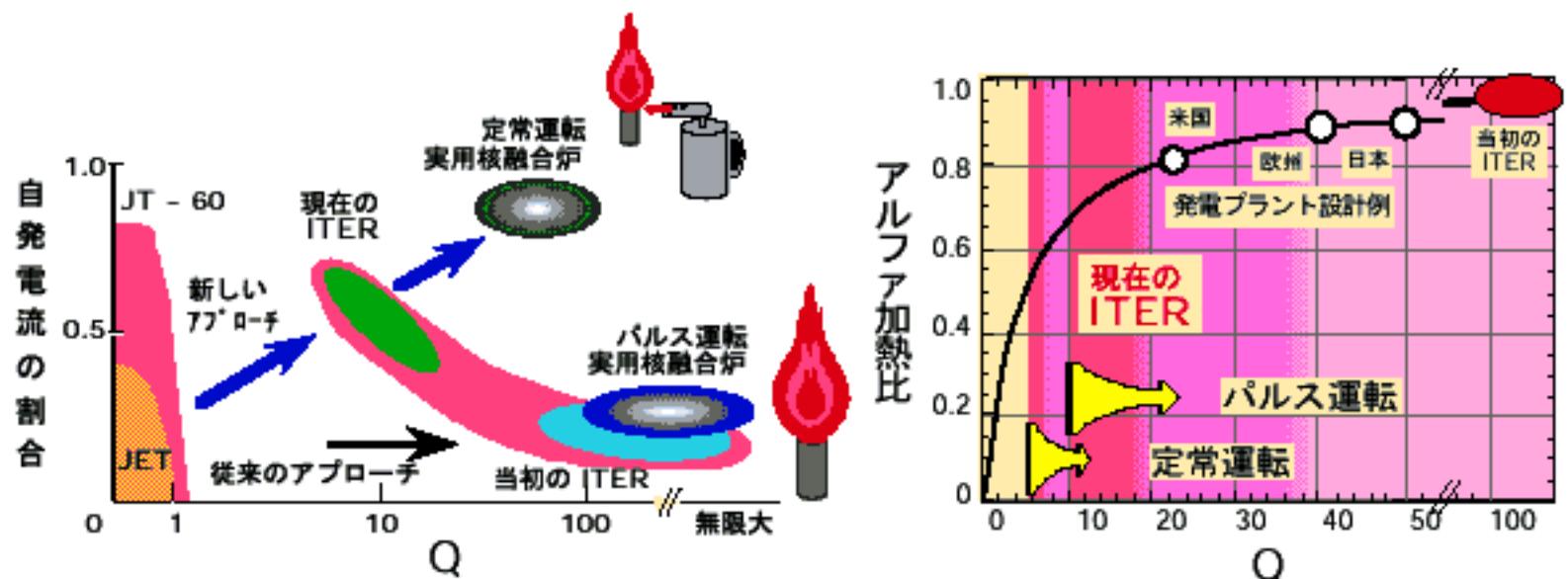


現在のITER



- エネルギー増倍率 $Q \geq 10$ では、アルファ加熱による自己加熱が主である。自己加熱領域のプラズマ理解が、核融合実用化に不可欠である。
- トカマク型定常運転実用核融合炉のQ値では、20~50 程度である。

出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会
「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」



$$\text{エネルギー増倍率 (Q)} = \frac{\text{核融合出力}}{\text{外部加熱入力}}$$

$$\text{アルファ加熱比} = \frac{\alpha \text{ 粒子による加熱パワー}}{\text{プラズマ加熱パワー}}$$

ITER建設のための国際協定に関する非公式政府間協議

ITER建設の共同実施協定に盛り込まれ得る事項について、参加極間で基本的な考え方を
得るため「非公式政府間協議」を平成12年4月に開始し、同年12月に終了

◀ 非公式政府間協議における各国の議論の方向 ▶

1. 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：
超伝導コイル等主要機器 → 可能な限り均等負担
建屋・機器組立等 → ホスト国負担
- 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）：
本体建設費の分担と同様に締約国で負担
- 廃止措置段階：
ITER事業体が除染までは実施。除染以降はホスト国の責任。
但し、廃止措置費用は各極の積み立て基金で賄う。

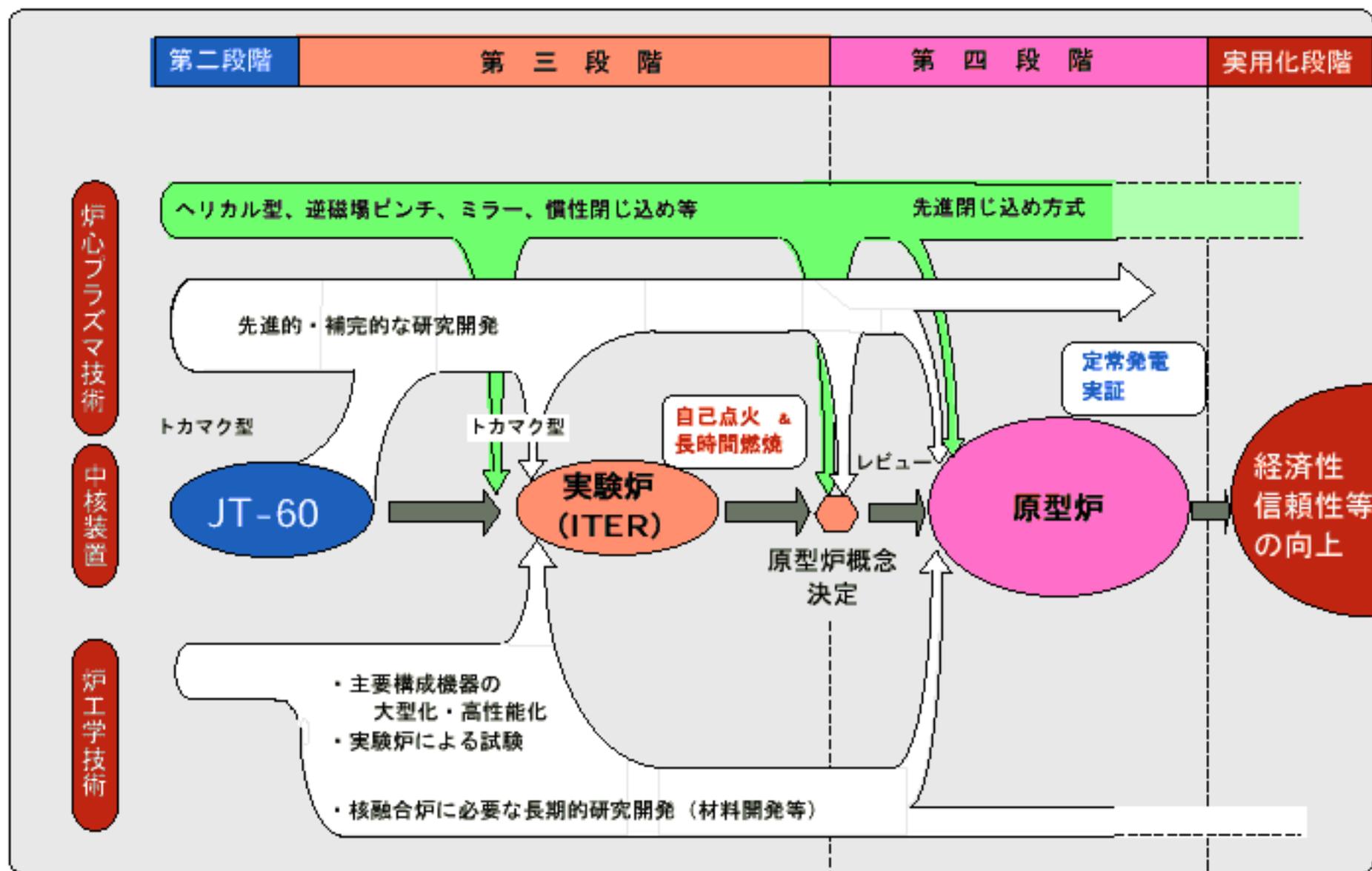
2. ITER事業体 (ITER LEGAL ENTITY: ILE) の設置

- ITER事業を責任をもって実施できる国際機関（またはホスト国の国内機関）として設置
(理事会 [メンバー: 締約国の代表] は最高意思決定機関。所長は執行責任者として強い権限、
安全性等に関してはホスト国の法令遵守。)

3. 研究環境

- 資材、機器、通貨の国際的移動を容易にするための最善の努力
- 外国人研究者の長期滞在を可能にするための魅力ある生活環境の整備（子弟の教育施設等）

核融合エネルギー研究開発と実用化への道



出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会

「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」

(平成12年5月17日)

核融合材料技術

低放射化フェライト鋼等の有力な候補材料が存在する中、中性子照射損傷研究を着実に進め、核融合炉に必要な数10～200dpa程度の中性子照射に耐え得る材料の開発を目指す

- 構造材料としては、低放射化フェライト鋼等の有力な候補材料が存在する。中性子照射損傷に対する材料組成の最適化研究を着実に進めることにより数10～200dpa程度の中性子照射に耐え得る材料が実現できると判断する。
- ブランケットは、今後の開発とITERにおけるモジュール機能試験を経て原型炉の使用条件に耐えるものにする事が可能と判断する。

候補材料

(1) 低放射化フェライト鋼

(原型炉候補材料)

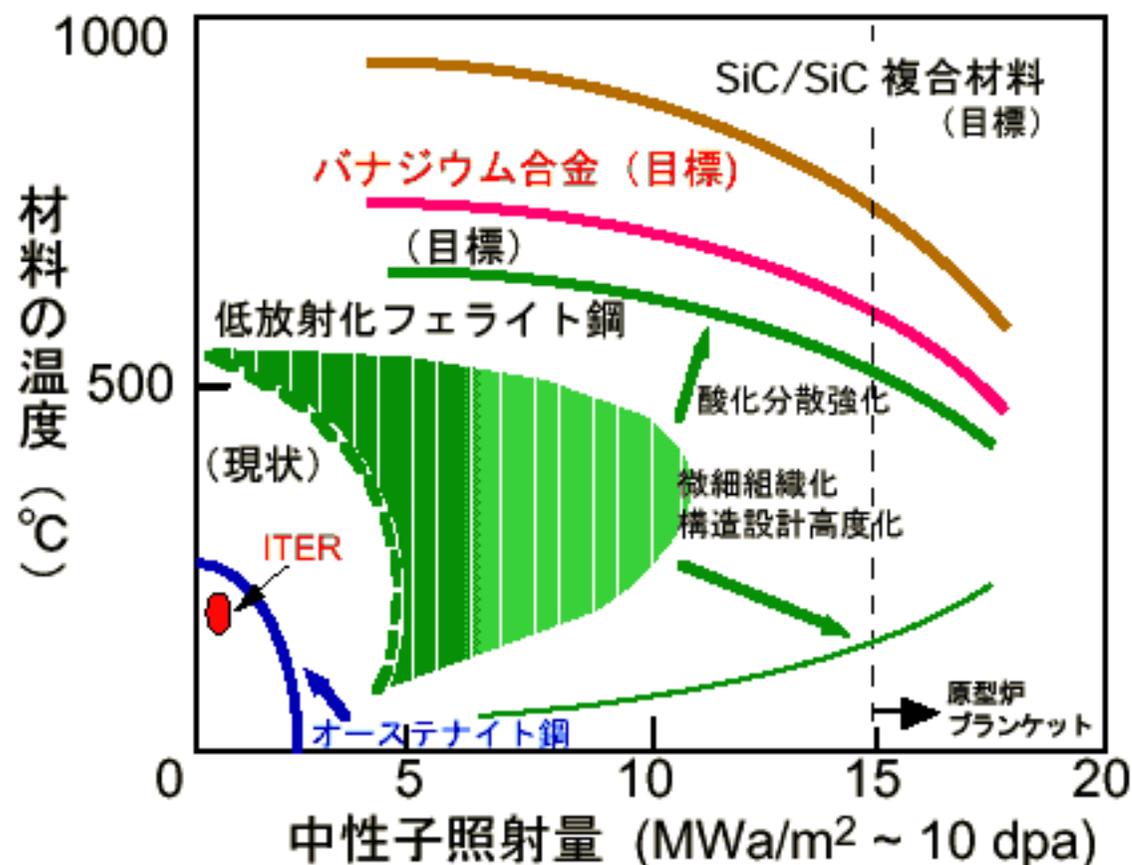
- ・ ~500℃使用可能
- ・ 素材開発をほぼ終了
- ・ 重照射試験、総合性能試験

(2) パナジウム合金 (先進材料)

- ・ ~700℃使用可能
- ・ 基礎研究段階
- ・ 液体金属冷却に適する

(2) SiC/SiC複合材等 (先進材料)

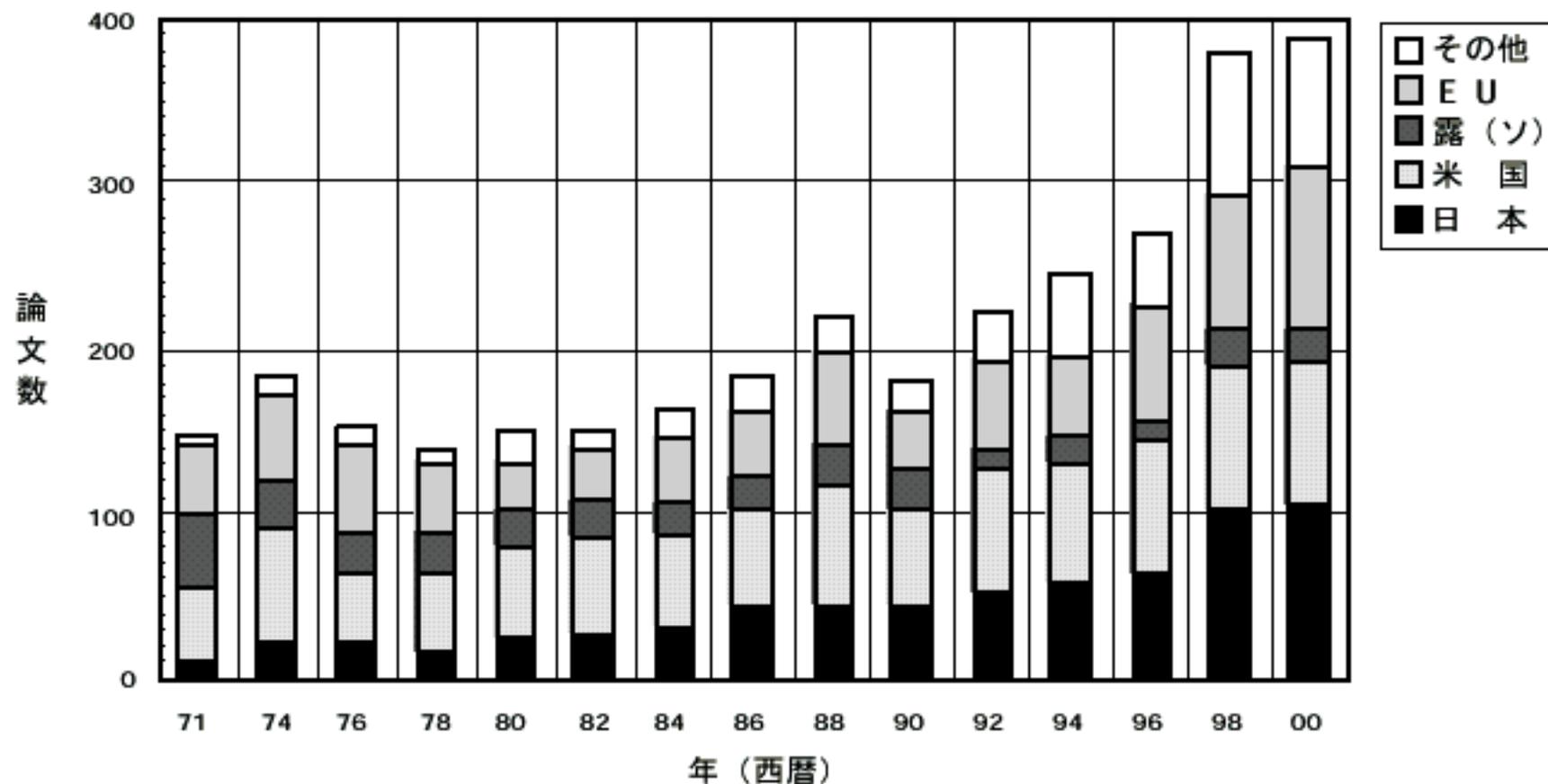
- ・ ~1000℃の先進材料
- ・ 極めて低放射化



出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会

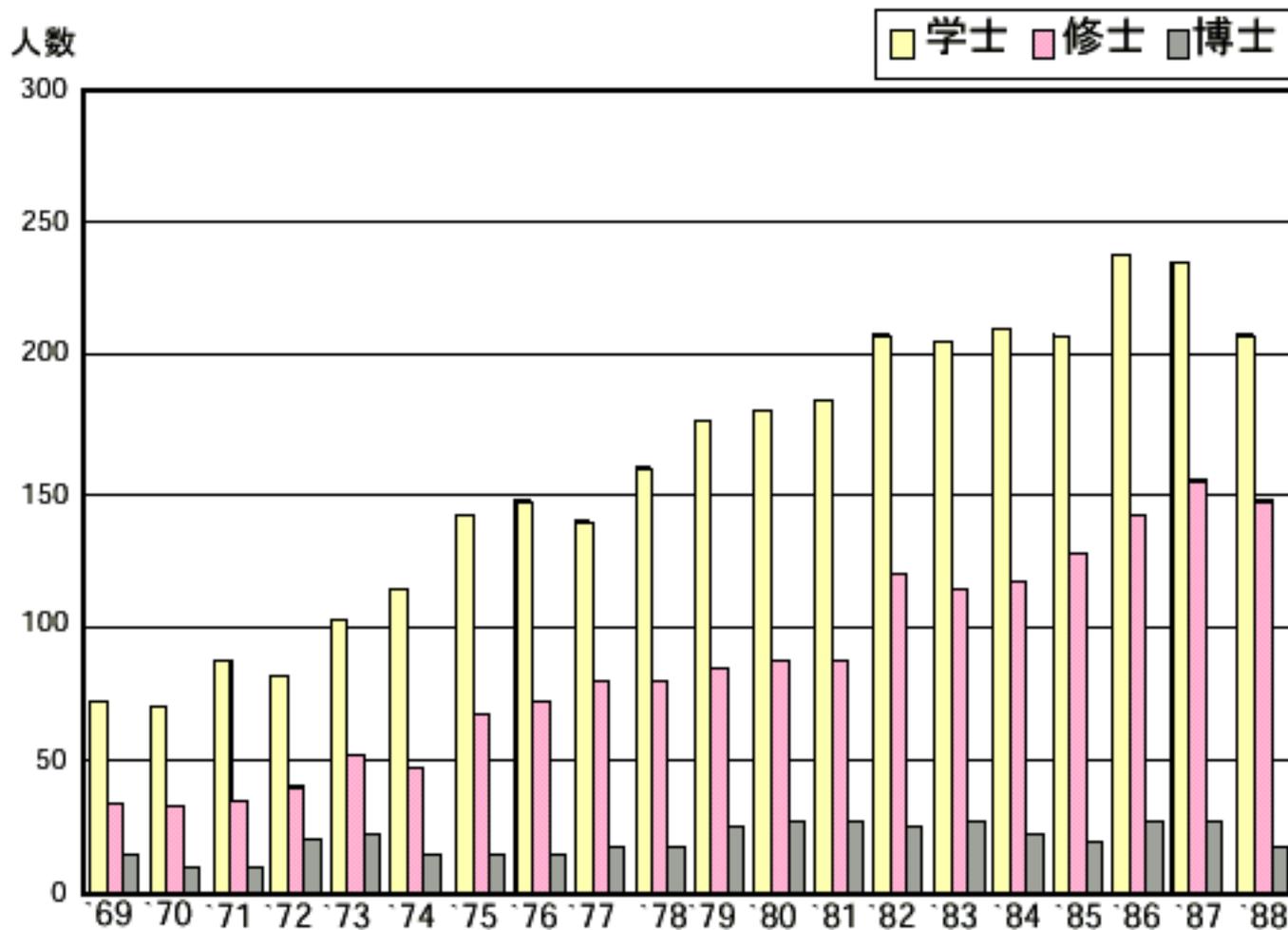
「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」(平成12年5月17日)

IAEA 核融合エネルギー会議における各国の論文数



[文部科学省研究開発局核融合開発室]

核融合研究者の構成と推移

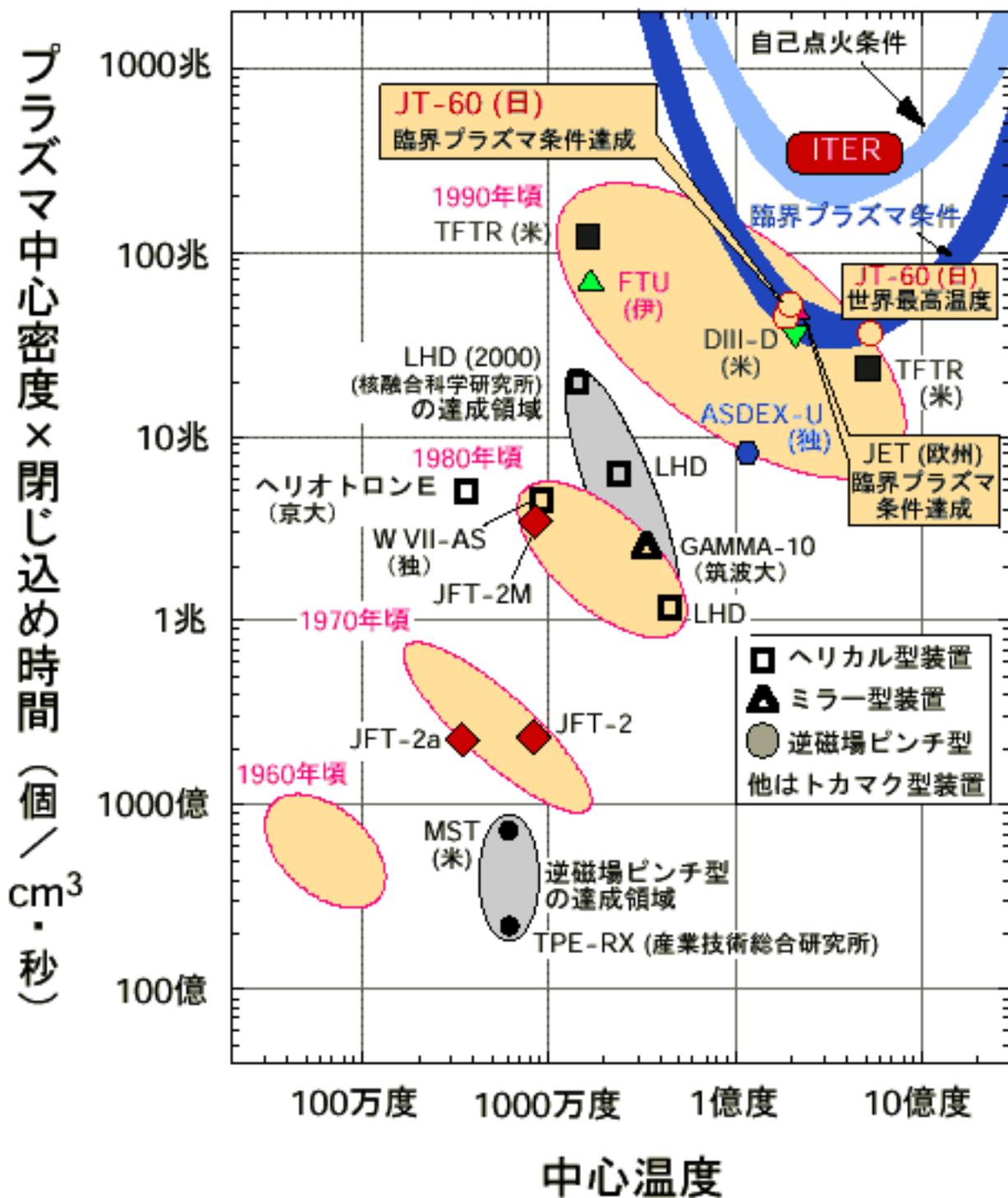


プラズマ・核融合関連分野の学生数の推移

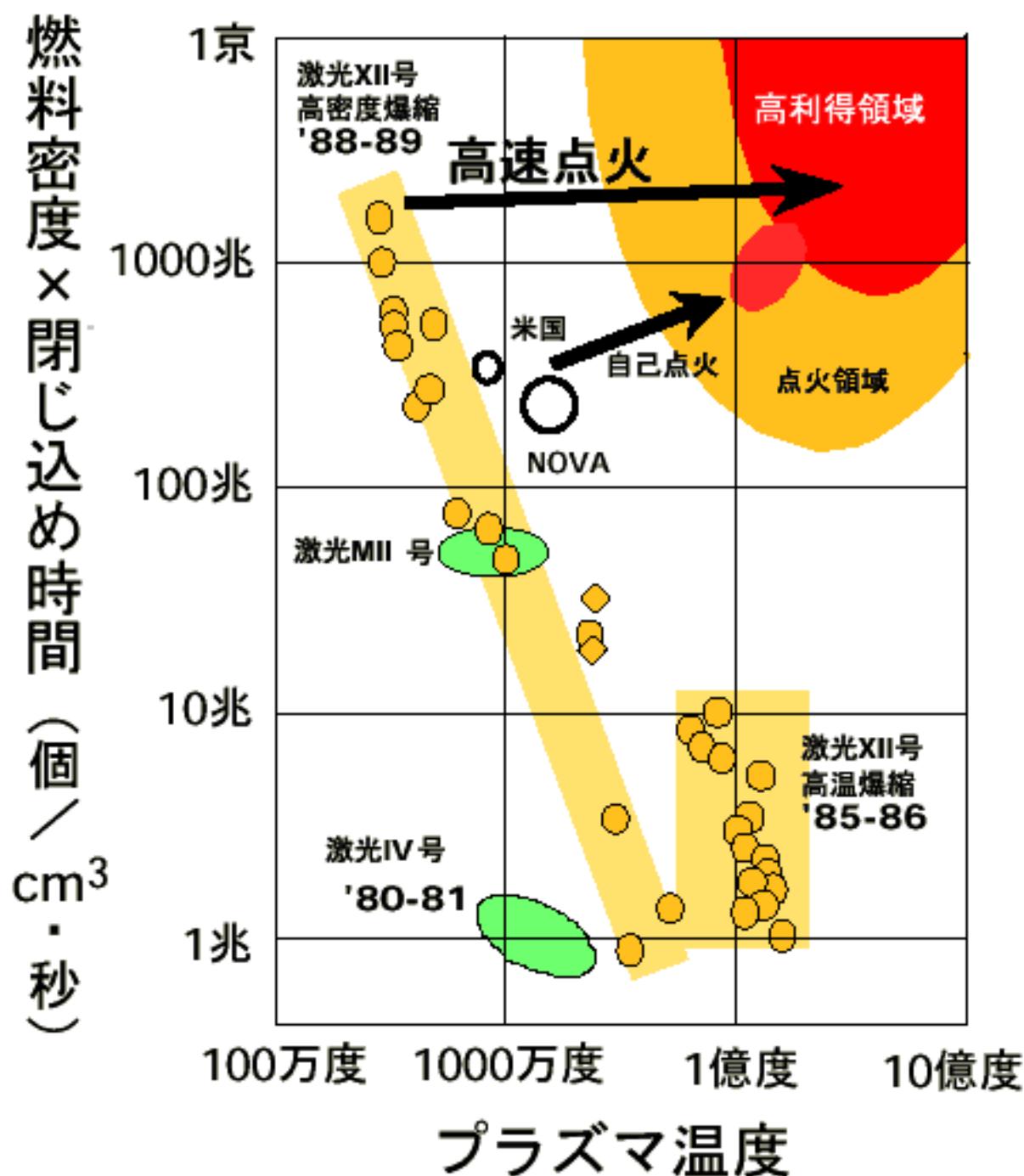
出典：原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会
「核融合エネルギーの技術的実現性」計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書
(平成12年5月17日)

核融合研究開発の進展

(磁場閉じ込め方式)



(慣性閉じ込め方式)

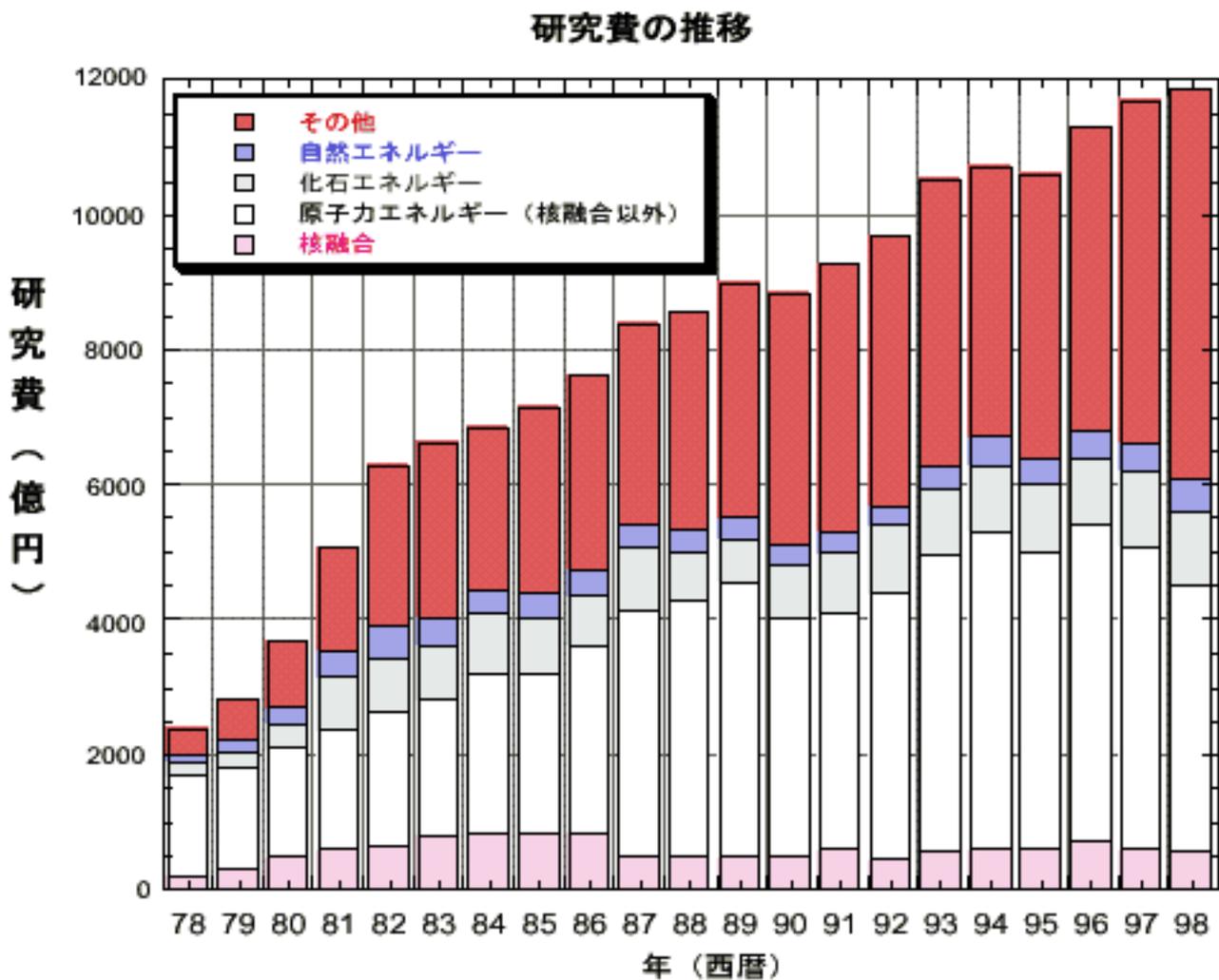
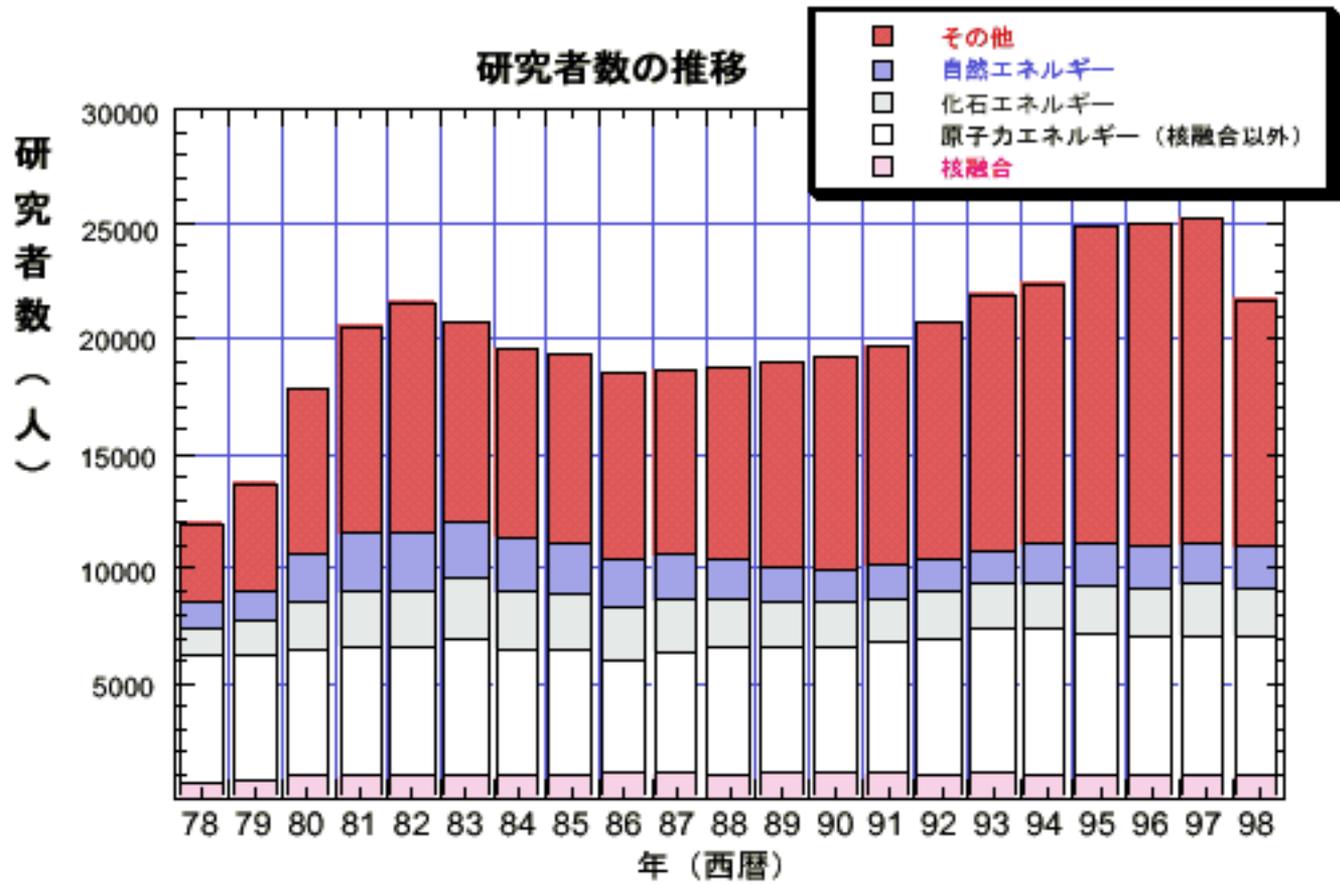


- 点火領域：爆縮コアからの熱損失より核融合反応による α 加熱量が勝ってコア温度が上昇し続ける条件を満たす領域
(磁気閉じ込め方式での臨界プラズマ条件に相当する条件を満たす領域)
- 高利得領域：核融合反応による発生エネルギーと照射エネルギーの比が100以上となる条件を満たす領域
(磁気閉じ込め方式での自己点火条件に相当する条件を満たす領域)

出典：原子力委員会核融合会議計画推進小委員会

「レーザー核融合の現状と展望について」(平成12年8月21日)

我が国のエネルギー研究に占める核融合研究開発の推移

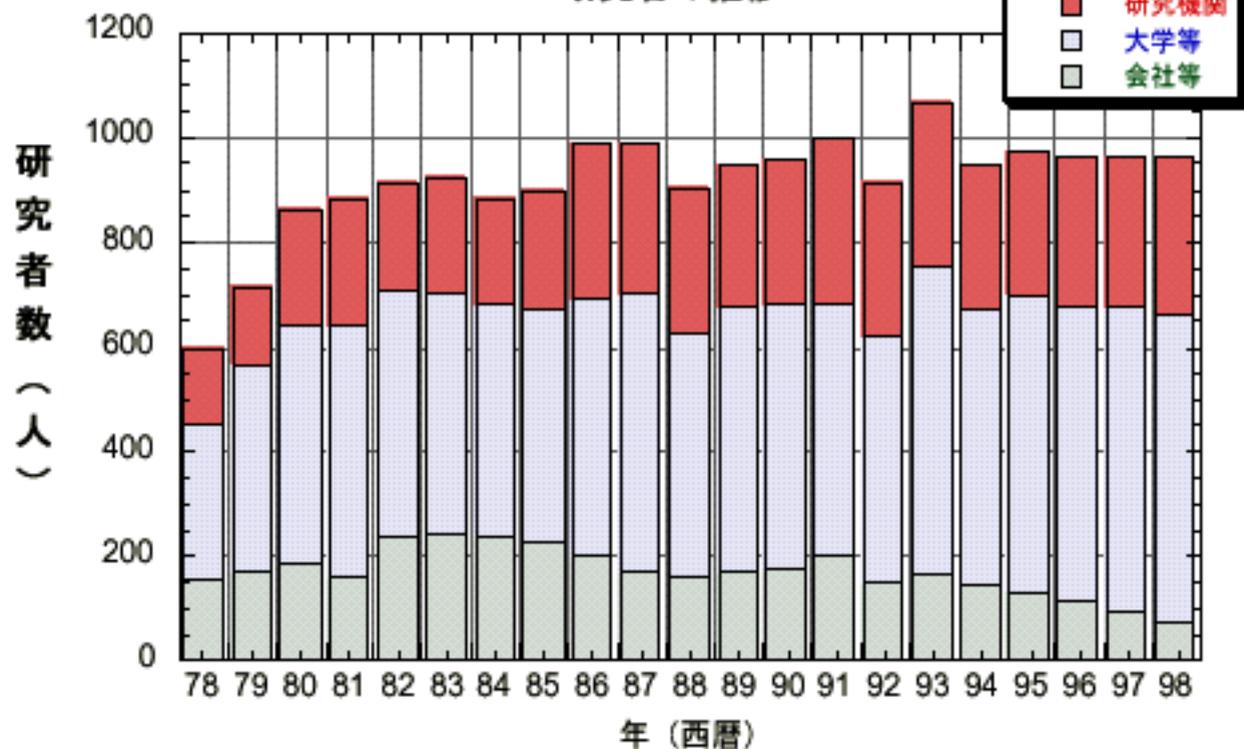


注) 研究費、分類は総務庁の統計法による。

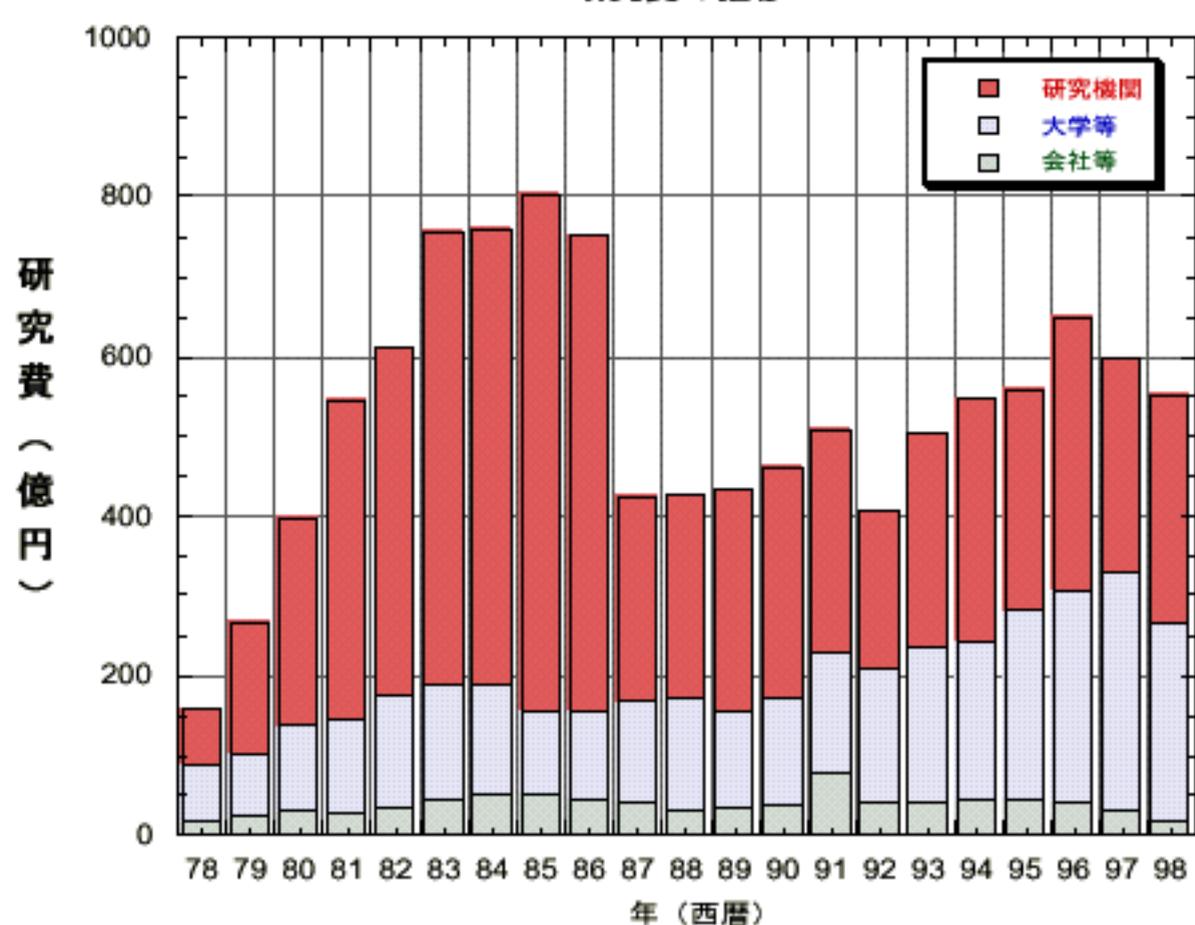
出典: 科学技術統計調査に付帯するエネルギー研究調査報告書 (総務庁統計局)

我が国の核融合研究開発実施体制の推移

研究者の推移



研究費の推移



注) 研究費、分類は総務庁の統計法による。
 出典：科学技術統計調査に付帯するエネルギー研究調査報告書（総務庁統計局）

日本が参加している主な多国間国際共同研究プロジェクト

名 称	プロジェクト概要	タイプ	主導国・機関	参加国	実施期間	規模	日本の負担	備考
国際ヒトゲノム計画	ヒトゲノムの全 30億塩基の配列を決定し、そこに書き込まれた遺伝情報を読み取ることが目的。	タスク分 担	米国	日、米、英、 独、仏、中国	1989年 ～	ヒトの全塩基 配列の解読	全解読量の約 1割(7%)	平成12年6 月にヒトゲノ ムの概要解 読を終了。
ヒューマン・フロンテ ィア・サイエンス・プ ログラム	生体の持つ優れた機能の解明を中心とする基礎研究を国際・学際・若手重視の理念の下に推進しようとするプロジェクト。研究グラント事業、フェローシップ事業、ワークショップ事業が実施されている。	共同基金	日本	日、米、英、 独、仏、加、 伊、EU、スイ ス	1989年 ～	目標値600 0万米ドル (/年)	3700万米ド ル(/年)	
国際宇宙ステーショ ン計画	将来人類が宇宙で活動していくための基盤を形成し、また微小重力等の宇宙環境を利用した新しい科学技術の創造に寄与するための国際協力プロジェクト。	大規模施 設	米国	15ヶ国(日、 米、欧、加、 露)	1987年 ～	開発費総額 約4兆円(ロ シア分を除 く。)	約3100億円	
大型陽子・陽子衝突 型加速器計画	周長約27kmlにわたる超電導磁石を配置する円形加速器を使用し、世界最高のエネルギーレベル(14兆電子ボルト)で未知の粒子を発見し、物質の究極の内部構造を探索する計画。	大規模施 設	CERN(欧州 原子核研究機 関)	日、欧、米、 加、露等	1993年 ～	総事業費 3900億円	50億円(H7) 38.5億円(H8) 50億円(H10)	
国際深海掘削計画	掘削研究船を運航し、海底の研究を行う国際共同研究計画。約2ヶ月毎に世界各地の海域を移動し、海底を掘削して直接資料を採取・分析すること等が目的。	タスク分 担	米国	21ヶ国(日、 米、英、独、 豪、加、仏、 中国等)	1985年 ～	(2000年に おける予算) 4610万米 ドル	(2000年に おける負担) 295万米ドル	
ITER計画	人類の恒久的なエネルギー源の一つとして期待される核融合エネルギーの科学的、技術的な実現可能性を実証することを目的として、4極(のちに米国が抜けて3極)で進めている国際共同プロジェクト。現在は、工学設計活動を実施。	大規模施 設		日、EU、露	1985年 ～	本体建設費 の見積り 約5000億 円	今後の政府間 協議による	

核融合技術の波及効果

精密計測

超高真空



高分解能質量分析計

(四重極質量分析計、
特許第2873239)

日本真空技術(株)提供

核融合 技術

材 料

耐熱負荷



耐熱材料

(ロケットノズルに使用)



電動機類のブラシ

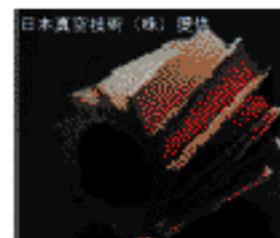
プラズマ対向部材及びその製造法
(特許平成8年出願)

粒子ビーム



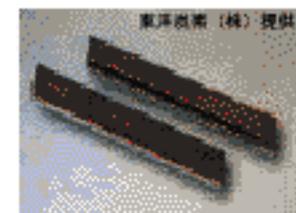
表面改質

半導体製造
イオン源アーク電源保護回路
(特許第2865329、他)



表面改質

炭化チタン皮膜製造法
(特許1760116平成5年出願)



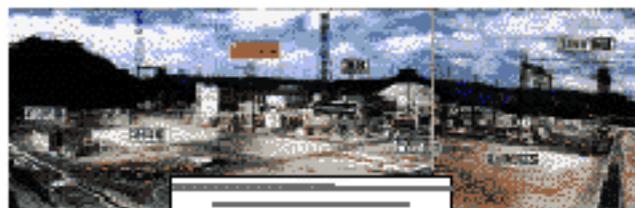
新幹線等のパンタグラフ
核融合装置第一壁部材の製造法、
(特許第1653797、他)

大電力

大電力利用



沖縄電力のフライホイール付き発電機、
(電力システムの安定化に寄与)



超伝導コイル



エネルギー貯蔵

I T E R施設の安全確保の 基本的な考え方について

平成12年7月

1. はじめに

科学技術庁では、国際熱核融合実験炉（ITER）の安全規制に関して、ITERの基本的特性を踏まえた安全確保の考え方及び当面設計に反映すべき事項の策定を目的として原子炉安全技術顧問の会合を開催した。

同顧問の会合では、ITERの概要設計報告書に基づいて、ITER施設に特有な安全上の特徴、安全上の要件、事故の評価等について検討し、ITER施設の安全を確保する上での基本的な考え方について議論され、本報告書はその結果について取りまとめたものである。

本報告書では、検討の対象としたITER施設の概要及び安全確保の目標、安全確保の原則、安全設計の基本的な方針、免震構造により耐震安全性の確保を図る考え方を示した。これらは、いずれもITER施設に特有な放射線安全に関する検討に基づくものであり、労働安全衛生法、消防法等の放射線安全以外の事項については、別途既存の法令、基準等で対応を図ることとする。

また、ITER施設は、プラズマを閉じ込めるため強力な磁場を発生することから、磁場の影響についても、電磁場の安全性に係る国際的な勧告等を踏まえ、適切に対応することとする。

なお、本顧問会で議論がなされたもののうち今後の対応が必要とされた項目を「今後の課題」として整理し、報告書中に取りまとめた。

2. ITER施設の概要

2.1 ITER施設の目的と主たる構成機器

ITER施設は、平和利用を目的とした核融合エネルギーの科学的・技術的実現性を実証する試験装置であり、重水素とトリチウムのプラズマによる高出力長時間燃焼（最終的には定常運転）の実現を目指すとともに、ブランケット及びダイバータ等の炉工学試験を実施することとしている。

このため、約500MWの核融合出力を約400秒間持続する運転を標準（運転モードを参考として別図－1に示す）として、種々の性能試験を計画している。

炉工学試験では、最初にしゃへい用のブランケットを装着し、その後トリチウムの増殖を行うブランケットに変更する段階的な試験を計画している。

上記の目的及びトリチウム等の放射性物質に対する安全性を考慮したITER施設は、トカマク施設、トカマク付帯施設、燃料処理貯蔵施設、放射性気体、固体及び液体の廃棄物処理施設、冷却系統施設、計測制御系統施設、放射線管理施設、電気系統施設、建物・構築物等で構成する。これらのうち、安全確保の考え方を検討する上で主要な施設は、以下の通りである。

(1) トカマク施設（プラズマの形成・維持）

- ①真空容器：トーラス形状の容器で、プラズマの形成・維持のため高真空の維持等を行い、内部にトリチウム及び放射化生成物等を内蔵する。

- ②ブランケット及びダイバータ：真空容器の内部に配置されるモジュール式の機器であり、しゃへい及び不純物の制御等の機能を有する試験機器として交換を計画している。
 - ③超伝導コイル：真空容器の周囲に配置され、プラズマの閉じ込め磁場を形成するトロイダル磁場（TF）コイル、プラズマ電流の立ち上げ・維持を行う中心ソレノイド（CS）コイル、及びプラズマの位置・形状を制御するポロイダル磁場（PF）コイルがある。
 - ④トーラス真空排気系：真空容器のポートに取り付けられる真空排気ポンプで、不純物ガス及び未燃焼の燃料ガス（重水素、トリチウム）を排気し、プラズマの純度を維持する。
 - ⑤燃料注入設備：真空容器のポートを介してプラズマに燃料ガスを供給する。
 - ⑥追加熱設備：真空容器のポートを介してプラズマの加熱及びプラズマ電流の駆動を行う。
- (2) 燃料処理貯蔵施設（水素同位体の精製・回収、分離・貯蔵及び分配）
- ①精製回収系：トーラス真空排気系の排気ガスから水素同位体ガスを精製・回収する。
 - ②水素同位体分離系：精製・回収した水素同位体ガスから燃料ガスを濃縮・分離する。
 - ③燃料貯蔵分配系：燃料ガスを貯蔵し、燃料注入設備に分配する。
- (3) 放射性気体廃棄物処理施設（建家内の雰囲気中の放射性物質の除去・低減）
- ①通常換気系：平常時の建家内雰囲気温度の調整及び給排気による空気流を調整することで清浄区域への汚染の拡がりを防止する。
 - ②通常雰囲気浄化系：主に保守時にグローブボックス等の内部の漏洩トリチウム等を循環運転により除去・低減する。処理した雰囲気の一部を排出ガス処理系に送ることによりグローブボックス内を負圧に維持し、グローブボックス外側の部屋等への汚染の拡がりを防止する。
 - ③非常用雰囲気浄化系：事故時に区画等に放出される放射性物質を循環運転により除去・低減する。処理した雰囲気の一部を排出ガス処理系に送ることにより区画内を負圧に維持する。
 - ④排出ガス処理系：平常時においては通常雰囲気浄化系からの排出ガスを受け入れ、また、事故時においては非常用雰囲気浄化系からの排出ガスを受け入れ、これらの排出ガス中の放射性物質を除去・低減し、区画等の負圧を維持する。
- (4) 建物・構築物
- ①トカマク建家：トカマク施設、燃料処理貯蔵施設等を収納する建家で、事故時に放出される放射性物質を隔離するトカマクピット区画、トリチウム区画等を備える。

②排気筒：区画等の内部の雰囲気を排出する。

2.2 安全上の特徴

(1) 内蔵する放射性物質とその影響

通常運転時の ITER 施設における可動性放射性物質としては、トリチウム及び放射化ダストが主たるものである。ITER 概要設計報告書によれば、施設内のトリチウム保有量は約 2.8 kg (約 1018Bq) と評価され、そのうち、約 1.2 kg が真空容器内 (主に、ブランケット、ダイバータ等の機器に吸着) に、また残りは燃料処理貯蔵施設の各機器に分散して存在する (施設内のトリチウム保有量を参考として別図-2 に示すが、これらの値は、今後の設計の進捗により増減されることが想定される)。

また、放射化ダストについては、プラズマに対向する壁面での浸食作用により生成するが、これまでの実験結果等を踏まえ、管理上、タングステンダストが 100 kg、ベリリウムダストが 100 kg、炭素繊維複合材のダストが 200 kg を上限として存在するとしている。これらのうち、タングステンダストは、体外被ばくのソースタームとして、約 1016MeV・Bq (タングステンダスト 100 kg 中の核種の実効エネルギーと放射能の積の合計) と評価される。

100m 高さの排気筒からの全量放出を仮定して、これらの可動性放射性物質がもたらす内部及び外部被ばくによる実効線量当量を評価すると、内部被ばく主体のトリチウム 1.2kg (4x1017Bq) は数十 mSv に、被ばく形態が内部及び外部被ばくとなるタングステンダスト 100kg は例えば事故後 1 週間までのグランドシャインによる線量当量も考慮した場合にトリチウムと同レベルの線量となる (これ以外のダストの影響は、タングステンダストに比べて十分に小さい)。

これより、ITER 施設は、放射性物質を内蔵する機器等から放射性物質が異常に放出される事故時の公衆の放射線被ばくを十分に低く抑えるために、放出放射性物質を除去・低減する施設 (影響緩和施設) を備える必要がある。

(2) 影響緩和施設 (コンファインメント施設)

コンファインメント施設は、以下の機能を有する非常用雰囲気浄化系、コンファインメント区画、排出ガス処理系、排気筒等で構成され、想定する事故時に公衆の放射線被ばくを十分低く抑え、事故の影響緩和を図るものとしている。

- ①非常用雰囲気浄化系：放射性物質を内蔵する機器等からコンファインメント区画内に放出された放射性物質を除去・低減する。
- ②コンファインメント区画：放出放射性物質による汚染を限定された領域内に留めるために、建家内に設定する区画である。
- ③排出ガス処理系：コンファインメント区画内に放出された放射性物質を除去・低減するとともに、通常の建家の漏洩率を考慮し、コンファインメント区画の内部雰囲気を負圧に維持し、放射性物質の放出経路を排気筒に限定する。
- ④排気筒：コンファインメント区画内の雰囲気を排出する。

(3) 放射性物質を内蔵する機器等に作用するエネルギーと考慮すべき荷重

ITER 施設において、放射性物質を内蔵する機器等のうち、真空容器、燃料処理貯蔵施設、並びにブランケット及びダイバーター一次冷却系には、核融合反応等に伴う熱及び磁気エネルギー、並びに冷却水及び液体水素同位体の内部エネルギー等が作用する。これらの機器に作用するエネルギー及び考慮すべき荷重は、表 1 のように整理される。

表 1 放射性物質を内蔵する機器に作用するエネルギーと考慮すべき荷重

放射性物質を内蔵する 主要な機器等	作用するエネルギー	考慮すべき荷重
真空容器	核融合出力 (約 500MW) プラズマが保有する熱エネルギー (約 400MJ) プラズマに入射するエネルギー (約 50MW)	核融合出力の増大 (熱源異常) による熱負荷 通常熱除去機能の喪失による熱負荷及び電磁力
	放射化に伴う崩壊熱 (最大 0.5MW/m ³)	通常熱除去機能の喪失による崩壊熱による熱負荷
	冷却水の内部エネルギー	真空容器内での試験機器損傷に伴う冷却水放出等による過圧
	プラズマの保有する磁気エネルギー (約 300MJ)	ディスラプションによる熱負荷及び電磁力
	超伝導コイル系中の磁気エネルギー (約 50GJ)	超伝導コイルの短絡等による超伝導コイルの変形
	燃料処理貯蔵施設	液体水素同位体の内部エネルギー
ブランケット及びダイバーター一次冷却系	冷却水の内部エネルギー	冷却系の圧力制御の故障等による過圧

(4) ITER 施設の安全上の特徴

ITER 施設の安全上の特徴は、表 2 に要約される。これらの特徴を踏まえれば、放射性物質を内蔵する機器等の健全性を確保するために、表 1 に示した考慮すべき荷重のうち過圧荷重による機器破損の発生を防止する対策を講じることが必要となる (別図-3 に、圧力逃がし機構を備えた場合の代表的な事象のシーケンスを示す)。

表2 ITER 施設の安全上の特徴

核融合反応に備わる固有の特徴	核的暴走がない プラズマの圧力限界、密度限界による反応終息性 不純物等の混入に対する反応終息性
ITER 装置条件下で固有の特徴	崩壊熱密度が小さい
ITER の本来機能確保により得られる特徴	真空容器等の気密性が高い 電磁力に対する真空容器の構造強度の確保 電磁力に対する超伝導コイルの構造強度の確保
安全機能を確保するために設計対応を要する特徴	放射性物質を内蔵する特定の機器が過圧される可能性がある

3. 安全確保の基本的な考え方

第2章の ITER 施設の概要に基づき、安全確保のための基本的な考え方を以下に定める。

なお、今回検討対象とした範囲が ITER 概要設計報告書であること、また、ITER 施設が核融合の研究・開発のための試験装置であることに鑑み、今後、研究開発の進捗及び技術的な改良により設計が本報告書の内容と合致しなくなっても、この考え方により本報告書の内容と同等又は同等以上の安全性が確保されると判断される場合には、この考え方を適用してさしつかえない。

3.1 安全確保の目標

ITER 施設は、トリチウム等の放射性物質を取り扱うことから、「公衆及び放射線業務従事者（以下、従事者）にこれらによる放射線障害を及ぼすおそれがないように措置を講ずる（施設を設計、製作し、維持）」ことを安全確保の目標とする。

3.2 安全確保の原則

安全確保の目標を満足するよう、平常時にあっては ALARA の精神に則り放射線障害の防止に努めること。また、事故の発生を防止する措置を講じるとともに、深層防護の原則に従い事故の発生を仮定し、その影響を緩和できる措置を講じること。

この措置を講じるにあたっては、固有の反応終息性やハザードポテンシャル等の ITER 施設の安全上の特徴を考慮し、以下の考え方によること。

- ①平常時において、環境中への放出放射性物質及び施設から直接放出される放射線による公衆の実効線量当量が、国の定める法的限度を超えないように施策することはもとより、ALARA の精神に従い、これらに起因する公衆の実効線量当量を合理的に達成できる限り低減すること。

また、従事者の実効線量当量については、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告に従い、年間 20mSv を超えないよう施策すること。

- ②事故の発生を防止するため、放射性物質を内蔵する機器等については、十分な構造強度を確保、維持するとともに、必要に応じて圧力逃がし機構を設けること。

また、放射性物質の異常な放出を伴うような事故時においても、公衆に過度の放射線被ばくを及ぼすおそれがないよう、コンファインメント施設を設けて放出放射性物質の環境への異常な放出を防止すること。

3.3 安全設計の基本的な方針

安全確保の原則に従い、以下を安全設計の基本的な方針とする。

(1) 平常時における放射線防護

平常時における公衆及び従事者に対する放射線防護のため、施設には放射線しゃへい、換気、並びに適切な浄化・希釈性能を有する排気設備及び排水設備を備えるとともに、トリチウム等の放射性物質を内蔵する機器等の使用・環境上の条件を考慮して、それらからの漏洩を制限する。

また、放射線管理及び防護活動のための適切な施設並びに器材を備えること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

- ①施設で発生する放射線に対して、適切な放射線しゃへいを備え、作業区域及び敷地周辺での放射線量率を適切に低減する設計であること。
- ②放射性物質を内蔵する機器等からの放射性物質の漏洩防止、放射性物質による汚染の拡大の防止、作業雰囲気中の放射性物質濃度、周辺環境への放射性物質の放出量及び周辺環境での放射性物質濃度の低減を図る設計であること。
- ③従事者に対して適切な放射線管理を実施するため、被ばく線量、汚染状況等の監視、除染等のための放射線管理施設を備えること。これらは、必要に応じ遠隔での操作が可能な設計であること。なお、トリチウムに対する放射線管理は、トリチウムプロセス研究棟等の既存の施設における実績を参考にすること。

ITER 施設で講じた施策により、公衆に放射線障害を及ぼすおそれがないことを確認するために、以下の評価を行うこと。

公衆への放射線被ばくを合理的に達成できる限り低く維持する設備の性能の妥当性を確認するため、排気・排水に伴う放射性物質の放出に起因する年間実効線量当量及び施設から放出される放射線（直接放射線及びスカイシャイン放射線）による年間の線量が A L A R A の精神に基づき設定した目標（年 100 μ Sv）を満たすことを評価すること。

なお、排気・排水に伴う放射性物質の放出に起因する年間実効線量当量の評価に際しては、通常運転時及び保守・補修に伴い放出する全ての放射性核種及び放出経路を考慮すること。

(2) 事故の発生防止

放射性物質を内蔵する機器等にあつては、2.2 節に示したエネルギー、使用・環境上の条

件及び真空容器内の試験機器の試験条件を考慮して、その構造的健全性を確保するとともに、内蔵される放射性物質が機器等の外部に異常に放出することを防止すること。

また、ディスラプションによる荷重は、その発生頻度に応じ設計条件として考慮すること。

なお、放射性物質を内蔵する機器等の設計、製作及び検査については、それらの構造強度を確保する上で適切と認められる規格・基準等によること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

①放射性物質を内蔵する機器等の材料の選定、設計、製作及び検査は、適切と認められる規格・基準等に従い行うこと。

②放射性物質を内蔵する機器等は、適切な耐震性を確保するとともに、試験機器の使用条件等を考慮し、想定される荷重に対してもその構造健全性を維持できる設計であること。

なお、構造健全性を維持するために、必要に応じて圧力逃がし機構を設けること。圧力逃がし機構は、放射性物質を内蔵する機器等の過圧時に確実に動作し、異常な過圧を適切に防止できること。このため、動的機器については多重性を有する設計であること。

③プラズマに面する壁（対向壁）の温度上昇に伴う放射性物質の放出を低減する観点から、必要に応じて対向壁の温度を制限できる設計とすること。

④放射性物質を内蔵する機器等を構成する機器の構造健全性維持を確認できるよう、試験・検査が可能な設計であること。

(3) 事故の影響の緩和（コンファインメント施設）

放射性物質の異常な放出を伴うような事故を仮定しても、放出放射性物質の環境への異常な放出を防止できるよう、コンファインメント施設を設けること。コンファインメント施設は、放射性物質を内蔵する機器等の破損等により放射性物質が機器等の外部に放出した場合に、当該機器を取り囲む区画（コンファインメント区画）を周囲から適切に隔離し、この区画内を負圧に維持するとともに、区画内の雰囲気浄化し、環境への放出経路を排気筒に限定することにより、公衆に過度な放射線被ばくをもたらずおそれを十分小さくできる設計であること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

①コンファインメント施設は、放射性物質の放出に伴い流出する流体等の条件を考慮し、必要な放射性物質の除去機能を確保できる設計であること。

②コンファインメント施設は、事故時において、商用電源の利用を期待しえない場合においても、その機能及び性能が損なわれないよう、非常用電源設備からの給電が可能な設計であること。

③コンファインメント施設は、事故時において、コンファインメント区画内の負圧を可能な限り確保し、放射性物質の放出経路を制限できる設計であること。

④コンファインメント施設は、想定すべき地震力と事故の組み合わせに対しても放

放射性物質の除去機能が損なわれないよう、十分な耐震性を確保した設計であること。

- ⑤コンファインメント施設は、動的機器の多重化を図り、起動失敗等の故障を仮定しても、放射性物質の除去機能が損なわれない設計であること。
- ⑥コンファインメント施設は、事故の状況を把握するために必要な情報を監視できる事故時監視計装設備を有する設計であること。

ITER 施設で講じた施策の妥当性を確認するために、以下の評価を行うこと。

技術的見地からみて放射性物質の放出が最大となる事故を放出経路毎に想定し、深層防護の観点から事故時の影響緩和機能を担うコンファインメント施設の性能の妥当性を確認すること。判断基準としては、公衆の実効線量当量として 5 mSv (ICRP の補助的線量限度に準拠) を用いること。

事故の代表的な事象については、内蔵する放射性物質の量及びその放出の駆動力を考慮して選定すること。

影響評価に当たっては、試験機器の使用条件、化学反応、放出放射性物質の形態・性状、放出経路・移行率、除去系の性能、拡散条件等を十分に検討し、妥当な保守性を加味した解析条件とするとともに、動的機器の故障の仮定、商用電源が利用できない場合等も考慮すること。

また、漏洩トリチウム等による火災・爆発の可能性についても併せて評価すること。

なお、公衆の放射線被ばくの評価にあたっては、必要に応じ直接放射線及びスカイシャイン放射線による線量を加算すること。

想定する事故及びその影響評価にあたっては、以下に留意すること。

- ①ブランケット及びダイバータ等のプラズマに対向する機器では、温度上昇に伴う水蒸気等との化学反応或いは放射化した対向材料の昇華等の影響について、局所的な温度上昇に伴う影響も含めて十分に考慮すること。
- ②影響評価に用いるトリチウム、放射化ダスト等の放射性物質の量は、試験装置としての運転上の柔軟性を確保するため保守的な値とすること。
- ③影響評価にあたっては、ITER 施設の安全上の特徴を踏まえ、安全確保を目的に設置する施設以外の施設であっても、その施設の信頼性等を考慮した上で、安全機能として取り扱うことも妥当とする。

(4) 立地に対する考慮

ITER 施設の予備的評価によると、技術的見地から想定し得る放射性物質の放出が最大となる事故(設計基準事故)が発生しても、公衆の実効線量当量の最大値は 5 mSv を超えないという結果が得られている。

一方、ITER 施設は、本格的な長時間 DT 燃焼を行う初めての試験装置であること、及び内蔵する放射性物質の全量が地上放出すると周辺公衆に過度の放射線被ばくをもたらす得ることに鑑み、設計基準事故を超える放射性物質の放出を工学的観点から仮想し、規制上の

観点から、ITER 施設と周辺公衆との間の離隔の適否、並びに、敷地外における緊急時計画（防災対策）の必要性の有無を評価することとする。

今後の課題

設計基準事故を超える事故の想定及びそれに対する公衆の安全確保に係る評価の基準に関しては、以下を参考に、ITER 施設の目的、安全上の特徴等を考慮して検討する必要がある。

- ①設計基準事故を超える事故の想定にあたっては、設計基準事故（技術的見地から放射性物質の放出量が最大となる事故）を対象とし、工学的観点からこの事故を上回る放射性物質の放出を仮想すること。
- ②ITER 施設と周辺公衆との離隔の適否の評価にあたっては、「原子炉立地審査指針」及び「原子炉立地審査指針を適用する際に必要な暫定的な判断のめやす」の考え方を参考とすること。
- ③敷地外における緊急時計画の要否の評価にあたっては、「原子力施設の防災対策について（昭和 55 年 6 月原子力安全委員会決定、平成 12 年 5 月 29 日一部改正）」の附属資料 3「EPZ についての技術的側面からの検討」の考え方を参考とすること。

(5) 火災に対する考慮

ITER 施設は、火災発生の防止を設計の基本とするが、万一に備え、火災検知及び消火、並びに火災による影響の軽減の方策を適切に組み合わせて、火災によっても ITER 施設の安全性が確保できるよう設計すること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

- ①火災により放射性物質を内蔵する機器等の健全性が損なわれない設計であること。特に、トリチウムを保管・貯蔵する容器等の耐火性及び当該容器等を収納する部屋等の耐火性・不燃性が確保できる設計であること。
- ②万一の事故発生に備え、放射性物質を内蔵する機器等は、隔離弁等により、トリチウム放出（或いは空気の流入）を制限し、かつ、機器等の周囲は必要に応じ不活性化や真空化を図る設計であること。
- ③事故時において、放出するトリチウムを含む水素同位体による火災が万一発生した場合でも、コンファインメント施設の放射性物質の除去機能が損なわれない設計であること。

今後の課題

真空容器及び燃料処理貯蔵施設等は、万一の事故の場合でも隔離弁あるいは周囲雰囲気の不活性化等により、水素火災を防止することとしているが、局所的な燃焼については、現在十分な情報が得られていないことから、今後、局所的な燃焼に対する考慮を検討する必要がある。

(6) 品質保証に対する考慮

放射性物質を内蔵する機器等及びコンファインメント施設の所要の信頼性を確保すること。このため、国際協力を進める設計、製作、据え付け等の各段階において、所要の性能を有していることを適切に確認できるよう考慮するとともに、ISO 規格等を参考に適切な品質保証活動を実施すること。

なお、動的機器を海外調達する場合には、我が国特有の条件である耐震性の要求を適切に反映させる必要がある。

今後の課題

品質保証については、一義的には事業主体の問題であるが、その内容は、国が行う性能確認の内容によっても変わってくる。特に、施設検査で確認できない安全性能がある場合や、工事認可を課す場合には品質保証計画の是認が必要となる。この場合、品質保証活動自体は事業主体の範囲であるが、その活動が適正に行われる組織であることを行政が確認する方向で検討することになる。

3.4 免震構造により耐震安全性の確保を図る考え方

ITER 施設は、トリチウム等の放射性物質を内蔵するため、地震時に公衆の放射線障害を防止する必要がある。特に、トカマク施設では、動作温度の異なる複数の機器が柔軟な支持構造で支持されるため、放射性物質を内蔵する機器等の耐震性確保の観点から、免震技術を採用し機器相互間の干渉の防止と付加する加速度の軽減を図ることとしている。なお、ITER 施設では、一般建家・建築物で実績が多い積層ゴムによる水平免震を適用することとしている。

免震技術の適用にあたっては、地震時における放射線障害の防止を図るため、以下の基本方針に基づくことが求められる。

放射性物質を内蔵する機器等は、地震により閉じ込め障壁が破損し内蔵する放射性物質の放出を防止するため、十分な耐震性を有すること。さらに、万一の事故時に稼働するコンファインメント施設については、本施設の機能が必要な期間中に発生が想定される地震に対しても十分な耐震性を確保すること。

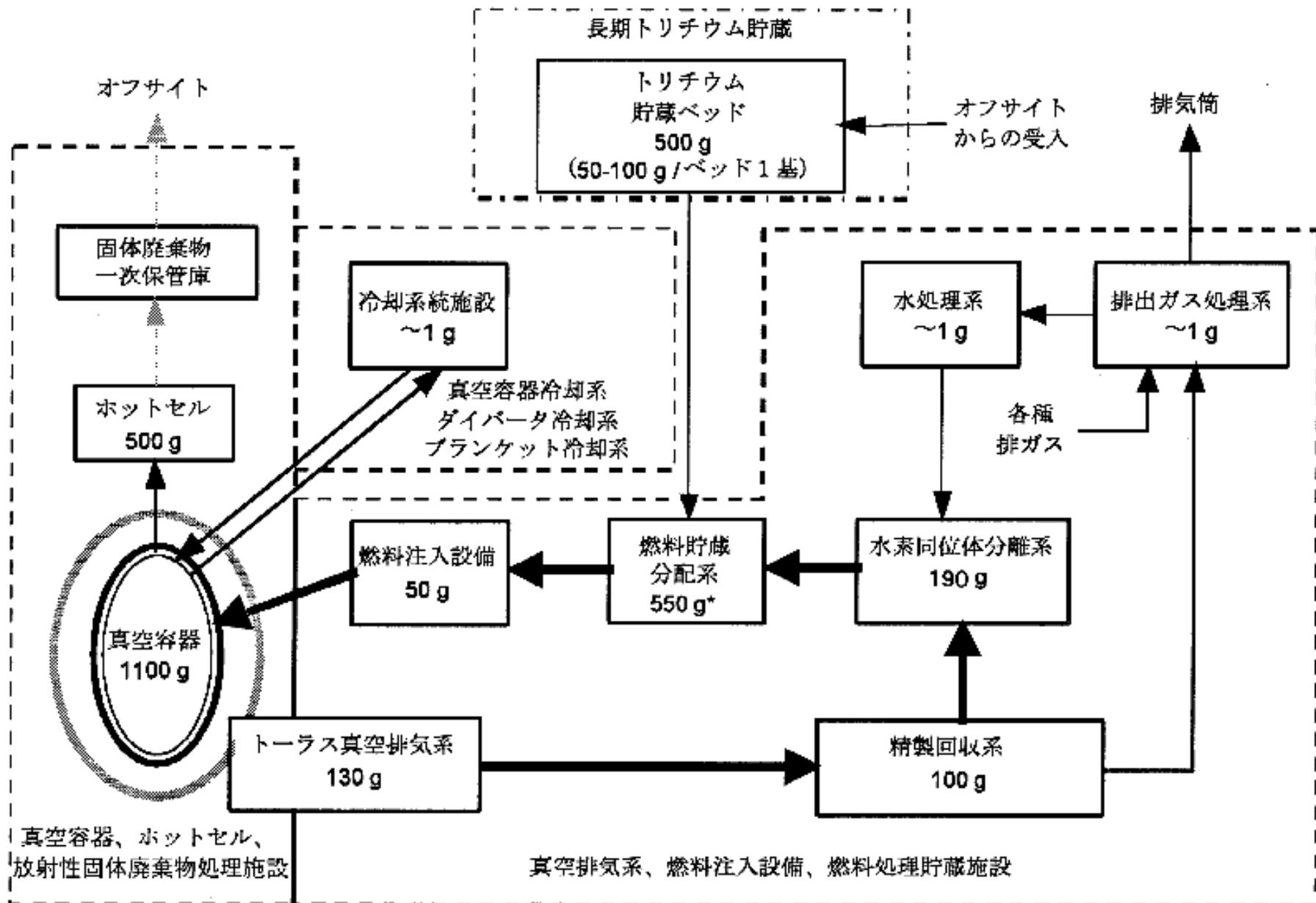
この基本方針に基づけば、耐震（免震）設計においては以下を考慮することが必要である。

- ①放射性物質を内蔵する機器等やコンファインメント施設等の重要な安全機能を有する施設は、安定な地盤に支持すること。
- ②重要な安全機能を有する施設については、ITER 施設における放射線による環境への影響を考慮し、適切な地震力を定めること。
- ③免震設計を行う施設にあつては、免震装置に支持される上部構造は免震機能が発揮されるよう十分な強度・剛性及び耐力を有する構造とすること。この際、免震装置の特性を考慮して、やや長周期領域における地震力の影響を適切に考慮すること。

また、免震装置は、間接支持構造物とし、上部構造に要求される耐震性に応じ、その健全性を確保できるように設計すること。

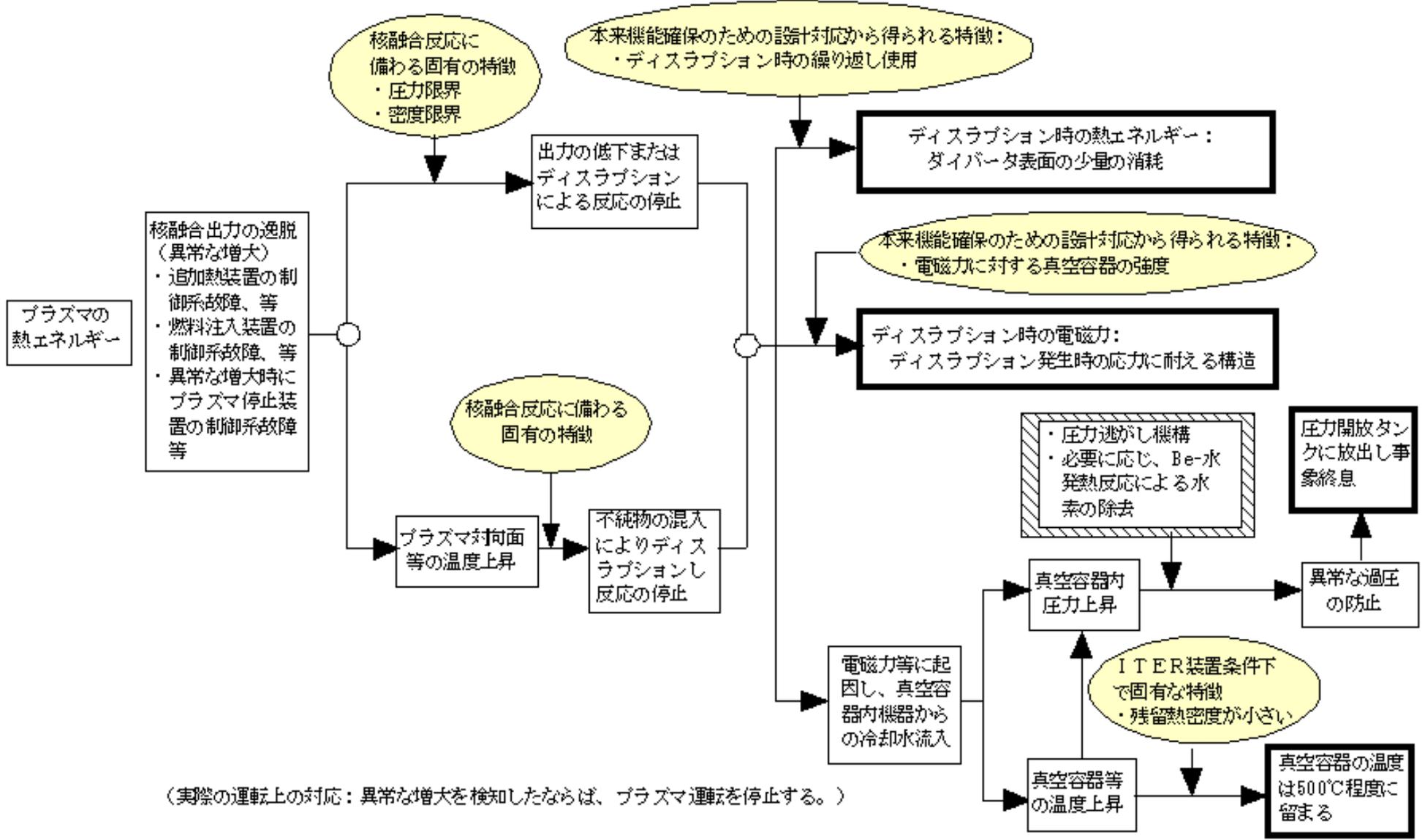
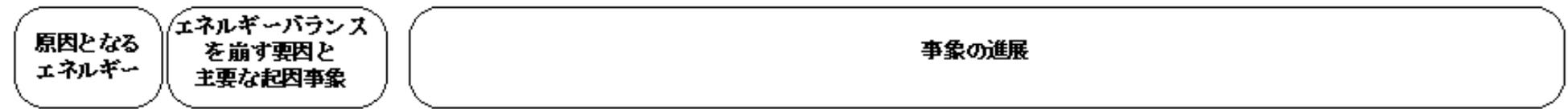
今後の課題

- ①コンファインメント施設の機器については、特に、地震時に要求される動的機器の機能の実証に関して、振動試験等の実績を含め、今後検討が必要である。
- ②ITER 施設は、安定な地盤に支持することとしているが、安定な地盤に要求される要件については、特に ITER 施設の立地地点における地盤と免震構造の相互作用と裕度等を適切に考慮し、検討する必要がある。



ITER 施設内保有量

*: 回収のための最大容量、貯蔵ベッド
1基当たりの貯蔵容量は100g



(実際の運転上の対応: 異常な増大を検知したならば、プラズマ運転を停止する。)

検討経過

本報告書は、日本、欧州及び露国の3極協力で進めている国際熱核融合実験炉（ITER）の工学設計活動を通して取り纏められた概要設計報告書を踏まえ、日本原子力研究所那珂研究所が作成した「ITER 施設の安全設計について」（平成12年5月）に基づき、ITERの安全規制に係る技術的事項の基礎となる安全確保の考え方について検討した結果を取り纏めたものである。

検討の経過において、平成11年10月から科学技術庁原子炉安全技術顧問の会合を計4回開催し、下記に示す当該技術顧問の専門的意見を求めた。

記

岡 芳明 東京大学大学院工学系研究科教授

香山 晃 京都大学エネルギー理工学研究所教授

小佐古敏荘 東京大学原子力研究総合センター助教授

○ 近藤 駿介 東京大学大学院工学系研究科教授

齊藤 正樹 東京工業大学原子炉工学研究所助教授

早田 邦久 日本原子力研究所東海研究所副所長

西 好一 財団法人電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部長

濱田 泰司 核融合科学研究所教授

藤田 隆史 東京大学生産技術研究所教授

本間 俊充 日本原子力研究所東海研究所副主任研究員

宮本 霧子 放射線医学総合研究所第4研究グループ主任研究官

山本 一良 名古屋大学大学院工学研究科教授

○ 主査

核融合エネルギーの実現に向けた総合的な開発戦略について

平成12年5月17日

核融合会議

核融合は、太陽をはじめとする宇宙の恒星のエネルギー源である。これが実用化された場合には、人類にとって究極的なエネルギー源となり、世界のエネルギー問題の解決に大きく貢献するものと期待されている。この核融合の実用化に向けて、我が国をはじめ世界各国において多くの研究開発が進められてきた。その結果、今後取り組むべき重要課題は、核融合反応により燃焼するプラズマを制御する技術を確立することであると認識に至っている。この課題の解決を目的として、国際協力の下で「国際熱核融合実験炉 (ITER)」の建設が計画されている。

原子力委員会 ITER 計画懇談会は、平成10年3月に取りまとめた「懇談会の論点の整理と今後の課題」において、「我が国が ITER 計画における実験炉の設置国になることの意義が非常に大きいことを理解した。」としている。同時に、「我が国が、ITER 計画における実験炉の建設への移行も含め、設置国に名乗りを挙げるか挙げないかを決断するために明らかにしなければならない課題が示された。」とも述べている。

本会議は、核融合エネルギーの実現に向けての総合的な開発戦略を検討することを目的として「開発戦略検討分科会」を設置し、ITER 計画懇談会により指摘されている課題について検討を行うとともに、同分科会より提出された報告書を踏まえてさらに検討を行った。この結果、同懇談会において、明らかにしなければならない課題として示された「核融合エネルギーの技術的実現性」及び「計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究」に関し、以下のような結論を得た。

1. 核融合エネルギーの技術的実現性

核融合エネルギーの技術的実現性を検討するに当たって、その実現される将来像とそれに至る道筋を明らかにし、技術的実現性を検証する。

(1)核融合エネルギーの将来像

現在想定されている核融合炉は、重水素とトリチウムの核融合反応で発生する中性子及びアルファ粒子の運動エネルギーをブランケット及びダイバータと呼ばれる機器を通して熱に変換し、この熱を冷却材を媒体にして外部に取り出して利用しようとするものである。

今後のエネルギー供給源に要求される重要な要件は、①資源が豊富で広く存在すること、②環境に対して出来る限りクリーンであること、③コストが合理的な範囲内にあること、④基幹システムとして十分なエネルギーを安定して供給できること、⑤安全性が高いこと、であろう。核融合システムは、以下に述べるように、資源量、地球温暖化防止

への効果、安定供給性、優れた安全性等の特長が認められるので、これらの特長を生かしつつ、技術的成立性と合理的なコストを達成し得る場合には、他のエネルギー供給技術と競合できる有力なエネルギー源として実用化されるものと考えられる。

分科会では、現在最も研究開発が進んでいるトカマク方式の核融合炉概念に関して、定量的な評価を行い以下の結論を得ている。

①資源量については、燃料となる重水素及びトリチウムの原料であるリチウム、並びに核融合炉に用いられる特殊材料は十分であると見込まれる。②環境影響については、核融合反応によって二酸化炭素を発生させることはなく、プラント製造過程を含めた排出原単位で比較しても化石燃料エネルギー源の数十分の1に止まり、脱炭素化・地球温暖化防止効果が期待される。放射性廃棄物については、高レベル放射性廃棄物の発生がなく、放射線被ばくに関する長期リスクや、処分費用の観点で優位性がある。一方、低レベル放射性廃棄物は、核融合発電炉の廃止措置に伴って現行の軽水炉より多く発生することが予想され、低放射化材料の開発などにより低減化することが望まれる。③コストについては、核融合の実用化時期は経済の時間軸で言えばかなり未来であることからその予測には大きな不確定性があるものの、将来のエネルギー源として競争力を持ちうる範囲内にある。④安定供給性については、設備利用率、出力安定性等のプラント特性から現行の軽水炉に匹敵することが目標となる。⑤安全性については、核融合反応の暴走はなく、放射性物質である燃料のトリチウムをプラント内で数 kg 保有することが予想されるものの、存在する放射性物質の潜在的放射線リスクは核分裂炉の約 1/1000 以下である等の特長を有している。

(2) 実現に至る道筋

我が国では、核融合の研究開発を段階的に推進している。これは、設定する目標の妥当性や目標達成に必要な科学技術的見通しを十分に評価してから次の段階に進もうとする方策であり、これにより、長期にわたる大規模システムの開発を、リスクを最小化しつつ着実にすすめることが可能となる。

これまでは第二段階として、核融合出力が外部からの加熱入力に等しい、いわゆる臨界プラズマ条件領域でのプラズマの発生及び閉じ込め技術の確立を目標として研究開発が行われ、日本原子力研究所のトカマク型装置 JT-60 によりこの目標を達成している。

現在は第三段階として、自己点火条件の達成、長時間燃焼の実現、炉工学技術の基礎形成を目標としており、国際協力のもとに実験炉である ITER の建設が計画されている。この計画が成功すれば、核融合炉実現への見通しは大きく開ける。

しかしながら、第三段階では核融合エネルギーの利用技術が確立したとは言えない。本格的な核融合発電は、次の段階である核融合発電の実証を目標とする原型炉段階ではじめて実現する。ITER による研究開発とその後の原型炉の建設が順調に進展した場合、数十万～百万 kW の発電能力をもつ核融合原型炉による核融合発電の実証が技術的には 2040 年頃に可能になると推定される。

これ以降の実用化段階においては、実用化に向けての経済性向上、信頼性向上等を通

じて市場参入が図られることにより、核融合発電がエネルギー供給技術として社会にその地位を築くことが期待される。

(3)技術的実現性

現在の核融合研究開発は、実験炉の建設を行おうとする段階にある。これまで行われてきた研究開発により、ITER の建設及び運転を通じて核融合炉実現に不可欠な燃焼するプラズマの制御技術が十分に実証されると確信している。例えば、ITER の設計においては、これまでに得られているプラズマに関するデータベースをもとに外挿して設計値を設定しているが、この外挿は流体力学などにおける次元解析と同様の手法によっても裏付けられており、ITER の技術目標を十分な確度をもって達成することが可能であると判断される。また、ITER においては、強い磁場を定常的に発生するための大型超伝導コイル、大規模なプラズマを1億度まで熱する加熱装置等これまでになかった技術や設備が必要になるが、これらに関する試作開発が着実に進められ、所要の性能が確認されている。

ITER は、原型炉の技術的見通しをより確実なものとするために必要な研究開発を行う役割をも担っている。このため、現在の ITER の設計においては、プラズマのパラメータを様々にかえた運転が可能となるよう柔軟性を持たせてある。また、ITER の建設及び運転を通じてシステム統合化の経験が得られる。このため、ITER を利用した研究開発を行うことによって、原型炉に要求されるプラズマ特性の確認や工学知見の獲得が可能であり、得られた成果は原型炉の設計、建設に利用されることとなる。また、原型炉以降の段階においては、経済的で実用に供しうる核融合発電を目指すことが必要である。このため、ITER を用いて研究を進めていくとともに核融合炉の高度化、高性能化を図る研究を進めていくことが重要である。さらに、放射線の遮蔽、トリチウムの増殖及びエネルギーの熱変換という三つの機能を果たす発電用ブランケットの技術開発を行い、ITER において試験を行うことが必要である。一方、材料については、有力な候補材が既にあるものの、現状では特性に関する知見は十分ではないことから、ITER を利用して材料に関する試験を行うとともに、ITER のみでは原型炉に必要な中性子量が得られないことを踏まえ、材料に関する適切な研究開発計画を進めることが必要である。

実用化される核融合発電炉の概念においては、現在では達成されていない条件が目標として数多く設定されているが、ITER においては、実用化される核融合発電炉の概念を構成する科学的知見や技術の大部分が発電炉に近い規模で実現されることから、大きなステップを超えることとなる。

従って、核融合の実現性は、ITER の目標が達成され、さらに原型炉の設計に必要とされる研究開発を、ITER 計画や他の適切な研究開発を通じて着実に実施することにより、十分見通すことができることとなる。

2. 計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究

(1)核融合開発の基礎研究としての側面

プラズマは原子を構成する原子核と電子がばらばらになった状態であり、固体、液体、気体に次ぐ第四の状態である。身近な炎、蛍光灯をはじめとして、オーロラ、恒星など宇宙自然の大半は、広範な密度、温度のプラズマ状態である。特に核融合に必要とされるプラズマは完全電離した1億度を超える高温である。

このようなプラズマに関する研究は宇宙物理学や電子工学における研究対象として始められ、力学、電磁気学、流体力学、統計力学、熱力学、相対論等を基盤として研究が進展し、プラズマ物理学として体系化されてきている。

プラズマは、複雑、多様、かつ非線形的に振る舞う活性な媒質である。特に核融合研究においては、プラズマ中で起こる波の伝播、乱流やカオスの発生、自己組織化などの非線形現象や非平衡輸送現象は重要な現象であり、これらは同時に現代物理学の最先端課題である。また、核融合プラズマの研究は宇宙や自然界に生起されている現象の理解にも重要な学術基盤を与えるものである。

種々のプラズマ閉じ込め方式の研究はそれ自身、それぞれ核融合概念開発を目的として研究を進めているが、一方でそれぞれのプラズマの持つ特性から抽出される現象の理解はこの複雑な高温プラズマの総合的な理解に大きな寄与をなしている。

さらに、1億度といった高温のプラズマを制御するための炉工学は、超高温、極低温、超高真空、大電力等といった極限技術を必要とし、また、常に新しい工学領域を開拓してきた。その結果がもたらす波及効果は、半導体産業、電力技術、大型・精密機械加工などの基盤となる一般民生用技術に活用することができ、かつ、加速器技術、超伝導技術、計測診断技術、計算機シミュレーション技術など、他の先端技術開発や基礎科学研究の発展に大いに貢献し得るものである。

なお、核融合に関しては、ITERのようなトカマク方式以外にヘリカル方式や慣性閉じ込め方式等の研究開発が進められている。ITER計画で行われる研究開発によって得られる成果、即ち燃焼プラズマに関する知見や超伝導技術、ブランケット技術などは、トカマク方式以外の核融合研究にとっても必要とされるものである。

このように、ITERを中核とする核融合研究開発は広範な学問や技術に支えられており、調和のとれた進展が重要である。

(2)核融合開発の研究者、技術者育成における側面

我が国では、核融合研究開発に携わる研究者は、全国の大学、核融合科学研究所、日本原子力研究所、電子技術総合研究所や金属材料技術研究所などの国立試験研究機関、企業の研究所等に広く所属し、基礎研究から工学研究、技術開発に至る極めて幅広い研究開発を協力して進めてきた。研究者は、個々がそれぞれの組織に属しており、基本的には組織毎に役割を分担するものの、共同研究や兼職などの枠組みを活用して密接な協力のもとに国際的にも高いレベルの研究を発展させてきた。これらの研究者は、プラズマ・核融合学会、日本原子力学会、日本物理学会、電気学会、機械学会、日本金属学会、レーザー学会、放射線影響学会等において活動している。その数は数千人にのぼり、年齢構成も広い。

プラズマ・核融合関連の大学院生の人数は、これまで着実に増加してきている。その一方で、核融合界全体の研究者の伸びは、ここ数年僅かであり、鈍化傾向にある。これは、大学や企業における核融合研究者が核融合以外の分野に新たに研究を転換・発展させていることに起因していると思われる。

プラズマや核融合に関連する多くの学会において講演数が増加している最近の傾向や、核融合プラズマ研究で培われた経験があらたな産業分野を切り拓いている事例は、今後も顕著に現れてくるものと考えられる。核融合界への定着率が伸びていないものの、プラズマ・核融合の潜在的研究者の維持・確保は現時点においてはなされていると考えてよいであろう。また、今後も関連学術分野との人事交流や学術交流・学術発信を盛んに進めることは望まれることであり、核融合界への理解と支援を得ていく上からも重要である。

しかしながら、ITER 計画は、建設に 10 年、研究開発に 20 年を要することから、長期にわたって優秀な人材を結集、育成することが必要である。プラズマ研究に必要な人材としては、プラズマについて一定レベルの理解と実験の企画立案能力、または解析能力を有する人材が必要である。また、炉工学分野の人材としては、核融合装置を熟知した高い研究開発能力を持つ人材を、大学や研究機関に確保するのみならず、産業界に多く存在している機械、電気、情報、建築、土木等それぞれの専門的経験を有する人材が必要である。

我が国は、日本原子力研究所の JT-60 や核融合科学研究所の LHD など、世界でも有数の大型核融合研究装置を建設した経験があり、また、ITER 建設に向けての工学設計活動を着実に実施するなど、世界的に見てもポテンシャルが高い。ITER の建設開始に必要な人材は確保されているものの、ITER が運転を開始するのは 10 年以上後と見込まれており、その時に核融合研究に携わる人材をいかに育成していくかが重要である。今後も JT-60 や LHD などの大型装置や大学等における中小規模の装置により先進的な研究を精力的に推進し、またブランケット試験を中心とした炉工学研究を推進することによって、各研究拠点からの新しい人材の流れが確保出来ると期待され、ITER 完成後の研究にも主導的に貢献することができる。

我が国が ITER 計画に取り組むためには、日本全体において引き続き研究活動のさらなる発展と活性化を図ることによって人材の確保に務めることが重要である。また、かねてより、大学、研究機関、産業界の連携協力の重要性が指摘されており、これに積極的に対応する動きが見られる。今後ともこのような活動を着実なものとすることによって人材の育成を図ることが必要である。