

懇談会における論点の整理と今後の課題について

(座長試案)

平成10年 月 日

(目 次)

はじめに

1. エネルギー問題の位置づけ

2. エネルギー政策の背景

- (1) 化石燃料
- (2) 軽水炉
- (3) 再生可能エネルギー

3. 核融合エネルギーの位置づけ

- (1) 核融合エネルギーの特徴
- (2) I T E Rの技術と状況、今後の計画
- (3) 今後必要となる投入努力・予算と技術

4. 日本への誘致

- (1) 国際貢献
- (2) 科学技術的潜在力
- (3) 日本社会の倫理性からの評価
- (4) 投資の必然性

5. 成功と失敗

6. 結言と提言

- (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ィージビリティースタディ
- (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

付録Ⅰ エネルギー源の将来見通

付録Ⅱ 核融合エネルギーの研究状況

付録Ⅲ 我が国の核融合エネルギー研究開発の基盤

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。そして、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月に調査審議を開始した。

当懇談会では、ITERというものが所与のものであるという立場ではなく、社会・経済的視点をも含めた幅広い観点からのエネルギーとしての核融合の位置づけをはじめ、核融合研究開発のあり方まで、ITER計画の基盤をなす基本要件をも視野に入れた検討が必要であるとの認識の下で、これまでエネルギーの将来的な見通し、我が国の核融合研究開発の現状など、ITER計画を取り巻く状況等を含めて議論を進めてきたところである。しかしながら、最近になって、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められていること、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てきている。

こうした状況を考慮すると、当懇談会の目的である、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、延長される予定の工学設計活動の進捗、財政構造改革等との関係をも勘案して、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。

しかしながら、本年7月に現行の工学設計活動がひとつの節目を迎えることを踏まえ、現時点において、当懇談会として、これまでに議論してきた事項について論点の整理を行い、それを踏まえ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筋道とを示し、今後議論すべき課題の明確化等を行うこととした。

1. エネルギー問題の位置付け

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、生活習慣を譲りながら、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広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来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うべきであろう。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ものであって、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。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決定的な不可逆性から言って、その努力の開始は早ければ早い程よいと言うべきである。

2. エネルギー政策の背景

核融合エネルギーは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。しかしエネルギー問題が、世界的に理解を共有するべき取扱いを受けていない以上、共有化の努力についての展望を画きつつ、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。

第一に必要なのは、各種エネルギー源の将来に亘る見通しについて、出来る限り科学的に推定し、世界的な理解を得ておくことである。それらについての詳細は付録 I にゆずることとし、以下にその概略を記す。なお、以下のデータは、当懇談会で委員から説明のあった資料に基づくものであり、エネルギー量の単位として用いているゼータ・ジュールとは 10^{21} ジュールのことであって、1990 年の世界のエネルギー消費量は約 0.4 ゼータ・ジュールとされている。

(1) 化石燃料

化石燃料には、固体燃料（石炭等）、石油、天然ガス、頁岩油等が含まれる。

石炭を含む固体燃料については、中国、米国、ロシア等のごく限られた国（地域）に偏在

する資源である。確認埋蔵量は、全世界で約1兆トンであるが、究極埋蔵量としては、約12.1兆トンと推定されており、エネルギー換算で約355ゼータ・ジュールである。

石油については、確認埋蔵量は約0.14兆トンと推定されているが、埋蔵量の6割以上が中東地域に集中している偏在資源である。究極埋蔵量としては、約0.27兆トンと推定されており、エネルギー換算で約11ゼータ・ジュールである。

天然ガスについては、ロシアとイランに圧倒的に多い量が存在しており、全世界の確認埋蔵量約150兆立方メートルの約半数を占めている。究極埋蔵量としては、約400兆立方メートルと推定されており、エネルギー換算で約14ゼータ・ジュールである。

頁岩油等については、頁岩油の約4分の1がオーストラリアに、タール・サンドの約8割がナイジェリアに存在している。これら全体としての総埋蔵量としては、約0.39兆トンと推定されており、エネルギー換算で約16.5ゼータジュールである。

(2) 軽水炉

軽水炉に代表される核分裂炉の燃料となるウラン資源については、東側諸国の状況がきちんと把握されていないため不確かさが残っているが、その確認埋蔵量は478万トンと推定され、これにその他の資源量を加えた総埋蔵量は約1500万トンと推定されている。総埋蔵量をエネルギー換算すれば、約8ゼータ・ジュールとなる。

なお、ウラン総埋蔵量の約6割を増殖炉でリサイクルできるとすれば、そのエネルギーは約722ゼータ・ジュールとなる。さらに、海水中には約47億トンというウラン資源量が見込まれ、このウランを増殖炉で利用すれば、約23万ゼータ・ジュールという膨大なエネルギーが得られることになる。

(3) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーとしては、太陽光、風力、地熱、水力、潮汐力及び波力、バイオマスなどがその代表的なものである。

太陽光については、地球に降り注ぐ太陽光のエネルギーの年間総量は、4030ゼータ・ジュールと膨大なものであるが、エネルギー密度が希薄であることから、発電用途の場合、膨大な面積の敷地と巨大な蓄電池が必要となる。このため、仮に我が国の全ての戸建てに導入したとしても高々我が国の年間総発電量の約8.4%相当にしかないとの試算がなされている。

風力については、地球全体の風のエネルギーとしては膨大な値になると推定されており、その約3割が陸上で吹いているとすれば、この風力エネルギーは、年間約0.7ゼータ・ジュールと推定される。しかしながら、風力エネルギーは地域に依存することもあり、発電用途としてはほとんど利用されていないのが現状である。

地熱については、地球表面全体で年間約1ゼータ・ジュールのエネルギーが宇宙に放出されているとの推定がある。地殻の熱エネルギーとしては、地殻中の温水を利用する方法が既に実用化されているが、利用地域が限られることから、発電用途としてはほとんど利用されていないのが現状である。なお、現在地殻の高温岩石の熱を利用する技術開発が行われている。

水力については、技術的に開発可能な水力発電の最大エネルギーは、年間約0.05ゼータ・ジュールと推定されている。現在、世界で利用されている水力発電によるエネルギーは、年間約0.0082ゼータ・ジュール程度であり、開発可能エネルギーの約16%相当が開発、利用されている状況である。なお、我が国をはじめとして欧州や米国などにおいては、開発可能量の半数以上を既に開発、利用済みであり、今後、水力発電エネルギーが大幅に伸びる可能性はほとんどないとみられる。

潮汐力については、全世界の総量として約0.079ゼータ・ジュールになると推定されている。そのうち、約1%が経済的に利用可能であるとされており、そのエネルギーの総量は、年間約0.00074ゼータ・ジュールと推定されている。

また、波力については、全世界の波のエネルギー量は、約0.085ゼータ・ジュールと推定されているが、そのうち約0.1%が利用できるとすれば、年間約0.000085ゼータ・ジュールとなる。

バイオマスについては、薪炭、家畜の乾燥糞、植物性の廃棄物などを含む、植物に起因するエネルギー資源を指す。これらによる全エネルギー量は、約0.051ゼータ・ジュールと推計されているが、将来利用可能なバイオマスエネルギーの最大値については、陸上の有機物の純生産量の10分の1程度とした場合、年間約0.2ゼータ・ジュールとなる。

3. 核融合エネルギーの位置付け

前節に述べたように、現在の主要エネルギー源としての化石燃料および軽水炉は、多くの不確定性を持ちはあるが、永久に依拠し得るエネルギー源でないことは確実である。したがって、その他の代替エネルギーを探る道へ進むことが不可欠である。しかし、これも前節に

述べたように、現在想定し得るエネルギー源のあるものは技術的実現可能性が確実であっても潜在供給量が不足と推定され、また潜在量が大きいとされるものについては技術的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、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。

この状況から言えば核融合エネルギーは、一つの選択肢（オプション）であって、核融合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。しかし選択肢としての重要性を十分検討して置くことが、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。核融合エネルギーの研究状況については付録Ⅱに詳述するが、以下にその中で最も研究実績のあるものについて、その研究の歴史と、実現可能性、国際協調の代表例ともいえる I T E R の状況について以下に略記する。

(1) 核融合エネルギーの特徴

核融合エネルギーに関しては、その燃料となる重水素が、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といえる。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と考えられる。

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。

しかしながら、一方で、最も技術的に実現しやすいとされている核融合反応では、放射性物質であるトリチウム（三重水素）を利用すること、その核融合反応からは高いエネルギーの中性子が発生することにより、炉の内壁の金属を放射化させるため、施設解体時等には比較的多量の放射化金属が発生することなど、安全確保の面で慎重な対応が必要な点があることにも十分な考慮を払うことが必要である。

(2) I T E R 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、欧州の J E T（Joint European Torus）と日本原子力研究所の臨界プラズマ試験装置（J T - 6 0）が、ともに入力と同規模の出力を得る臨界プラズマ条件を達成するまでに至っている。この結果、核融合炉を実現させるための最も重要な要件である自己点火条件の達成が十分に見通せる状況となってきている。

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の製作で培われた技術的知見を基盤として、核融合炉の製作に必要となる超伝導コイル技術、真空容器・ダイバータ関連技術、加熱・電流駆動技術、トリチウム取扱技術等の炉工学技術開発が行われている状況である。なお、将来の原型炉以降の炉壁材料に用いるような材料の開発についても鋭意研究が進められている。

I T E Rの技術目標は、こうした研究開発の進展を踏まえて設定されており、現在、我が国、米国、欧州連合（E U）及びロシアの四極の国際協力により、1992 年から工学設計活動が実施されている。工学設計活動は、均等貢献の原則に基づいて、我が国、米国及びE U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いるところである。

なお、はじめに述べたとおり、現状では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、現行の工学設計活動の期間を3年間延長し、建設段階への円滑な移行を目的として、仮想的なサイトを想定したサイト対応設計等を行う方向で国際的な協議が進められているが、我が国の厳しい財政状況という国内事情をも踏まえると、このような対応は適切なものと言えよう。なお、延長される期間における工学設計活動が着実に推進されるよう、工学設計活動の基本原則に基づいて、各極がそれぞれの役割を着実に果たしていくことが必要である。

また、延長される工学設計活動の期間に実施される予定のサイト対応設計活動においては、建設段階移行に向けての設計の具体化に資するとともに、将来における我が国への立地の是非を判断する際の重要かつ貴重な判断材料を与えることになるため、我が国としても工学設計活動への参画の中で、必要な情報を積極的に提供する等の対応をとることが必要である。

さらに、今後ともI T E R計画が国際協力によって進められていくことが重要であり、我が国として主体的に参画していくことを期待するが、そのためには、他のアジア諸国への国際協力の枠組みの拡大などを含め、今後の国際協議において、我が国としての基本的条件を明確に示せるよう必要な準備を進めておくことが必要である。

(3) 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。しかしながら、これらの課題の解決を一度に行おうとすることは、技術的に

も極めて大きなリスクがあり、従来から、段階的な開発ステップを設けて、目標の達成を目指すという開発手法がとられてきている。

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。このような観点から、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及び実用炉として市場競争力を有するものとするための経済実証を目的とする実証炉の開発を行う必要があるとされている。

核融合炉の場合、その物理的特性から実験炉である I T E Rが既に実用炉規模のプラントとなっていることから、発電システムの違いを除き炉として的大幅な変更はないと考えられる。このため、I T E R以降の原型炉等の開発段階においては、プラズマに直接面し、高いエネルギーの中性子の照射や高い熱入力に耐え、その部分の交換の頻度を少なくしてコストの低減につながるような新材料の開発や、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してそのためのコストの低減がはかれるような低放射化材料の開発が重要である。また、低温の維持がより容易で建設費の低減につながるような、新しい超伝導材料の開発も重要である。さらに、プラズマの制御の技術についても、より経済性改善が望めるような制御方法の開発の他、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が今後の技術課題である。

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、従来の科学技術分野、特に原子力関連分野の開発期間に鑑みれば、今後、長中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。

4. 日本への誘致

上述のように、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ことにより、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。しかしながら、既に述べたようにそれは他の不確実なものも含め、複数の可能な選択肢の中の一つなのであって、人類の将来が核融合エネルギーに全面的に依拠するしかないことを決定的に示すものではないことを忘れてはならない。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を考えると、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ることが示された、というのが現在の結論である。

とすれば、この結論だけをもって、我が国が核融合エネルギー研究を重点課題とすること、ましてITERの設置国として名乗りを挙げることに十分な根拠があると言うことはできないであろう。この結論から言えることは、核融合エネルギー開発が人類にとってほぼ確実に必要であるということに止まる。

したがって、このことを前提としつつ、日本が設置国として名乗りを挙げるためには、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) 国際貢献

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、理念的検討が不十分なまま、貢献の枠組みや方向性については明確さを欠き、その結果貢献の実績は醸金などの経済的なものに止まっている。

国際貢献ということが何故言われたか、そしてある意味ではそれが我々日本人の耳に心持よかったことには明解な理由がある。それは、経済的な成功を通じて豊かさを獲得したから貢献しようというような単純なものではない。日本の経済的成長は、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。その中で収めた成功は、保護政策をとったこと、またそれを国際経済が受け入れたこと、そして更に、より本質的なこととして、自由市場という、いわば大きなコストを払って欧米が建設してきた競争の枠組みに、建設のコストを払わずに参加して大勝を収めたことなどについての、複雑な思いなしには語る事のできない成功なのである。

この思いに立てば、経済一流国と言っても後から既成の枠組みに、参加費を払わずに参加したメンバーに過ぎず、したがって、その参加費をこれから支払うことによって、本当の一流国になるのだというシナリオは魅力的である。と言うよりも、参加費を支払わずに徒らに時が経過すれば、我々の持つ倫理観と日本の経済的成功という事実是不整合を起こし、日本社会が腐敗するという恐怖感すらあったと言うべきであろう。その恐怖感は、醸金を中心とする経済的貢献として国民的合意を成立させる根拠であった。しかし恐怖感による受動的貢献から脱却し、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貢献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。

この観点が、最近の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。そして、核融合エネルギー研究開発をこの観点から見ると、日本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、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。

この検討の詳細は付録Ⅲで述べるが、その結論は、我が国は核融合エネルギー研究開発において、国際的に十分高い条件を備えているということである。すなわち、プラズマ物理学、機械工学、システム工学、品質工学などの研究水準は高く、またそれに応じた教育も行われている。核融合研究そのものについては付録Ⅱで述べたように高い水準にある。

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貢献ができるとすれば、そのこと自体が第二の意義となる。それは参加費なしで向上した競争力について、後払いとは言え参加費をその競争力の根拠としての技術で支払うことは、もっとも相応しいことだからである。

(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、ある国になるためには、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して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。

したがってそこには、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ぬのは当然である。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未払いの参加費を払う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して、人々が公共的意識を発現する可能性のある場を国家が提供する有効な一つの例に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、国際的に独特の信頼感を得ていることを誇ってよいであろう。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、原子力（核分裂）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) 投資の必然性 我が国にとって前述のように、国際貢献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、ITERの設置国になるためには、現在のITER工学設計活動の中間報告（1995年12月）において1兆円近くと推計されている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1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。というのは、核融合エネルギーの実験炉の建設の費用、さらにそれに続く原型炉、実証炉、実用炉の建設の費用などの定量的推定にあたっては多くの必要な開発技術が含まれることからいって、そのような推定を正確に行うことが困難であるとともに、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は全く推定不可能である。もしそれらが低価格であれば、核融合によって得られる電力に競争力はなく、利益は得られない。しかし他のエネルギーが高コストになっているとすれば競争力を持つことになる。

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無意味と言うことである。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す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に投入すべきものに他ならず、直近の時期に期待される技術なのである。

また仮に、化石燃料が尽き、原子力が使用できなくなったときに唯一使えるものであったとすれば、それはコストに関わらず使わざるを得ないことになるであろう。このように現時点で経済効果を論じることは無意味であり、しかもいつかは起きるであろう現行のエネルギー源の枯渇時に使われる可能性があるとするれば、今、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保険料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 I T E R の建設費と推計されている 1 兆円ということである。

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。もし人類が生活様式に関わる大発明をして、自然エネルギー以外の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は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無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。

このように未来への保険という意味での研究開発投資は、地球環境時代に特徴的なものであり、過去の民生技術にはなかったものである。この意味での投資の重要性は、今後ますます大きくなると考えられ、その重要性を広く認識するとともに、その方法、意義、定量的最適化等について、これから検討し深化すべきであるが、残念ながら現在のところ何も得られていない。

したがって、例えば I T E R 計画の建設費が 1 兆円であるとして、それが適当であるかどうかを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、それが一つの社会基盤であるとするなら、土木工事の費用に比べて、決して大きい投資額ではないことを、懇談会としては結論するものである。

5. 成功と失敗

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 I T E R 計画の実現可能性などの技術的側面と、日本の国際貢献、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 I T E R 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、保険としての投資が必要となる地球環境時代においては、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ような条件を極力設定しておくことが必要である。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るだろう。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。

このように、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が、しかし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必要なのであり、それを可能にするものとして計画が設計されていることが、決断のための重要な要件なのである。

6. 結言と提言

懇談会は、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。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、現在生きている人類はこれから生まれてくる人類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て、我が国が設置国になることの意義の大きいことを結論したのである。

しかし、エネルギー問題の持つ本質的不確実性により、現時点では設置国になることを決断することができないのも避けられぬ現実である。しかし問題の検討を通じて、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課題が示された。以下にそのような課題の項目を示すが、これらについては調査、研究によって明確にされる必要がある。

(1) エネルギーの長期に亘る需給調査 特定産業分野や特定の価値観に基づく生活様式などに偏ることなく、可能な状況をできるだけ広く設定し、それぞれについて需要を調査し、一方でそれぞれについて供給の可能性を提示する。

(2) 代替エネルギーのフィージビリティスタディ 代替エネルギーについての見通しを一步深め、研究投資、産業振興など可能な政策を想定して、単なる予想でない政策オプションを提示する。

(3) 核融合エネルギーの技術的実現性

安全で確実な供給源としての核融合エネルギーの実現可能性を、我が国が持つ潜在技術力、経営能力、産業構造の特性等から整理する。これを産業界の主体的参画を得て行なう。

(4) 計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究

仮に I T E R の設置国に我が国がなったとき、I T E R 計画を長期間に亘って支える基礎研究や、教育、人材養成についての、大学や産業界の役割、これらとの連携体制がどのようなことが求められるかの設計図を作成する。

特に、以下の課題については I T E R 計画のための検討に限られるものではないが、一般的な科学技術分野における大型の研究プロジェクトへの公的資金の配分に関する政策的な基本的考え方や理念が求められていること、さらに大型プロジェクトの国際協力が増大しているなかで資金面も含めた各国の責任分担の基本的な考え方の明確化を図ることが求められていることに基づくものである。

(5) 研究の資源配分

基礎研究において公共的費用を必要とする分野は極めて多い。これに対し最終的配分を決定するのは政策決定に他ならないが、その配分の原則についての理念を構築する。とくに、前線拡大型研究と、人類存続型研究とのトレードオフが重要である。それらは決して背反ではないが、両者の基本的関係を明らかにしつつ、後者の重要性が増す現代に適応する配分理念を創出する。

(6) 国際関係

国際協力の責任分担に関しては、そのプロジェクトの態様により、様々な選択肢がありうるが、それを実際のプロジェクトにおいて、どのように責任分担し、研究の負担をするかについての基本的な指針の確立を目指す。これについては、O E C D ・ C S T P（経済協力開発機構・科学技術政策委員会）のメガサイエンスフォーラムにおける議論も参考になるであ

ろう。

以上の他にも明確にすべき項目が我が国の決断に必要な課題として有り得るが、それは今後の検討で順次設定していくのが良い。しかし、示された項目はできるだけ速やかに解明することが望ましい。これらの調査にあたっては、既に実施されている、あるいはされつつある検討の結果を適宜活用するとともに、必要な場合には十分な費用をかけ、関係する研究者等の意見を幅広く結集して実施することが重要である。当懇談会では、このような検討の進捗を踏まえて、改めて I T E R 計画に対する我が国の対応を決定するための審議を行うこととする。

エネルギー源の将来見通し

将来のエネルギー需給見通しに関しては、2010年頃程度までの短中期的な見通しについては、これまでの統計データに基づき、比較的詳細な見通しがなされていると言えるが、核融合がエネルギー源として需要に供することになるであろう頃までの中長期的な見通しについては、不確定性を多分に含むことなどから、ほとんど見通しの的なものが出されていないというのが現状である。この点を踏まえた上で、ここでは、当懇談会において説明がなされた資料を前提とした見通しを紹介する。

エネルギーの需要は、今後の人口の増加に影響するところが大きい。ある統計によれば、世界人口が約53億人であった1990年度の一次エネルギー消費量は、世界全体で約0.4ゼータ・ジュール(エネルギー量の単位で、10の21乗ジュールを意味する。)であった。仮に、将来、現在の発展途上国の人々が現在の先進国の一人当たりのエネルギー消費量と同じ量のエネルギーを消費し、また将来の世界人口が現在の2倍程度の100億人になると仮定すれば、将来において世界全体で必要とされるエネルギー量は、1.0～2.0ゼータ・ジュール程度になると推定される。以降は、これを前提とした見通しとする。

以降のデータについては、懇談会で委員から説明があった資料に基づくものである。なお、確認埋蔵量とは、実際に資源が存在することが確認されており、技術的・経済的に地表に掘り出すことが出来る量であり、究極埋蔵量とは、未調査・未確認地域を含めて全世界に存在し、かつ採取可能であると考えられる資源量の総量のことである。また、総埋蔵量とは、確認埋蔵量に追加可能埋蔵量(経済性を無視すれば採取可能であると考えられる資源量)を加えた量のことである。

1. 化石燃料

(1) 総論

石油を始めとした化石燃料は、エネルギー革命以来、基幹エネルギー源として人類に対して非常に大きな恩恵をもたらしてきたものの、燃焼過程において生成する炭酸ガスによる温暖化等の地球環境への影響が最も大きいと懸念されている。

(2) 固体燃料(石炭等)

固体燃料は、中国、米国、ロシアといったごく限られた地域に偏在する資源であるが、確認埋蔵量は非常に多く、約1.03兆トン(エネルギー換算で約25.7ゼータ・ジュール)となる。また、究極埋蔵量は、約12.1兆トン(エネルギー換算で約355ゼータ・ジュール)と推定されており、埋蔵量の観点からいえば、化石燃料の中では優位であるが、環境負荷が大きいという点が指摘されている。

(3) 石油

石油は、これまで基幹エネルギー源として重要な役割を果たしてきた。確認埋蔵量は0.14兆トン（エネルギー換算で約5.9ゼータ・ジュール）、究極埋蔵量は0.27兆トン（エネルギー換算で約11.3ゼータ・ジュール）と推定されている。また、化石燃料の中では環境負荷が大きく、中東地域に偏在しているといった地域偏在性があげられているが、エネルギー源としての方法以外の付加価値の大きい利用法があるといった特徴を有する。

(4) 天然ガス

天然ガスは、化石燃料の中では最も環境負荷が小さく、他の化石燃料に比べて発電効率を高く設定できるという優れた特徴を有している。確認埋蔵量は約150兆立方メートル（エネルギー換算で約5.07ゼータ・ジュール）、究極埋蔵量は約400兆立方メートル（エネルギー換算で約14.4ゼータ・ジュール）と推定されている。なお、イランとロシアに圧倒的に多い量が存在しているといった地域偏在性があること、ガス田が氷海、深海等の厳しい自然条件に存在すること等の特徴を有する。また、欧米諸国のインフラの整備状況は、アジア太平洋地域等と比較して非常に進んでいるという状況がある。

(5) 頁岩油等

頁岩油は、油母頁岩を乾留して精製した油であり、石油に近い性質を持っている。埋蔵地域としては、オーストラリアに頁岩油の約4分の1が、ナイジェリアにタール・サンドの油の約8割が存在しており、確認埋蔵量は約178億トン（エネルギー換算で0.75ゼータ・ジュール）、推定される総埋蔵量は約0.393トン（エネルギー換算で16.5ゼータ・ジュール）である。

2. 原子力

軽水炉は、供給安定性に優れていること、発電の過程で二酸化炭素の発生がないことから環境負荷が小さいことといった優位性を持っている反面、放射性物質を扱うことから、核不拡散や放射性廃棄物（特に、高レベル放射性廃棄物）の処分も含め安全の確保対策が必要となるといった特徴を有する。

資源量に関しては、核分裂炉の燃料となるウラン資源については、東側諸国の状況がきちんと把握されていないため不確実さが残るものの、その確認埋蔵量は約478万トン（エネルギー換算で約2.6ゼータ・ジュール）と推定され、これにその他の資源量を加えた総埋蔵量は約1500万トン（エネルギー換算で約8.2ゼータ・ジュール）と推定されている。

また、天然ウランを増殖炉でリサイクルすることにより、もしその6割が有効に活用できるとすれば、現在の軽水炉に比べて確認埋蔵量ベースで約100倍にあたる約233ゼー

タ・ジュールのエネルギーを確保することができ（総埋蔵量ベースで考えると、約722ゼータ・ジュール）、また、海水中のウランを増殖炉でリサイクルすることが可能となれば、約40,000倍にあたる約23万ゼータ・ジュールという膨大なエネルギーが得られることになる。

3. 再生可能エネルギー

(1) 総論

再生可能エネルギーは、基本的には燃料を必要としない、環境負荷がかなり小さいといった優位性を持っている反面、地域偏在性が大きく供給が不安定であるフロー型のエネルギーであるため基幹エネルギーとなりにくく、他のエネルギーに比べるとエネルギーの生産規模が小さい。現時点では、まだ設備費が比較的高いなどの点があるが、再生可能エネルギーは、環境負荷の観点で非常に優れており、着実な研究開発とエネルギー効率の向上を目指した取り組みが行われている。

(2) 太陽光

太陽光は、地球に降り注ぐ非常に膨大な太陽光エネルギーを利用するには、大量のエネルギーを集中的に採取する際に膨大な敷地と巨大な蓄電池が必要となるなどの点も指摘されているが、光－電気変換効率の向上等の研究開発が進められており、一般家庭への太陽光発電設備の導入促進が図られている。

資源量の観点からは、地球に降り注ぐ太陽光のエネルギーの総量は、年間で4030ゼータ・ジュールであり、そのうち約3割の1180ゼータ・ジュールが陸地に注がれていることになる。しかしながら、我が国の戸建て総数2330万戸に対して、1戸平均15m²、総合効率20%の高性能太陽電池を南向きに設置し（国土の総面積の0.09%を占める）、稼働率を年間平均12%と仮定すると、年間発電量は約730億kWhとなり、1995年の我が国の総発電量の約8.4%に相当する値に過ぎない。また、仮に、陸地に降り注ぐ太陽エネルギーの0.1%を利用できたとすれば、年間約1.0ゼータ・ジュールのエネルギー量に相当することになる。

(3) 風力

風力は、地球全体のエネルギー総量としては膨大な量（約0.3ゼータ・ワット）であり、その3割程度が陸上で吹いていると考えられる。このうち、利用可能最大量をすべてエネルギー変換することが出来れば、年間のエネルギー総量は、約0.72ゼータ・ジュールとなる。しかしながら、地域偏在性が非常に強いといった特徴をもつ。

(4) 地熱

地熱は、地球内部の室温以上のエネルギー総量約4.0ギガ・ジュール（ギガは10

の9乗ジュールを意味する。)のうち、地球全表面から年間に約1ゼータ・ジュール程度放出されていると推定される。地核の熱エネルギーとしては、地核中の温水を利用する方法が既に実用化されており、地核の高温岩石の熱を利用する技術開発も行われている。しかし、風力と同様に地域偏在性が非常に強いといった特徴をもつ。

(5) 水力

水力は、技術的に開発可能な水力発電の最大エネルギーが、年間約0.05ゼータ・ジュールと推定されており、実際に利用されているエネルギーは、年間約0.00823ゼータ・ジュール程度と約16%が開発されている。しかしながら、先進国においては、開発可能量のうち既に半数以上の開発が終了しており、今後の大きなエネルギー源としての期待はほとんどないとみられる。

(6) 潮汐力

全世界の潮汐力によるエネルギー総量は年間約0.079ゼータ・ジュールであり、そのうち経済的に利用可能であると見積もられているのが約1%であるため、エネルギーとしては約0.00074ゼータ・ジュールとなる。現在、実際に稼働している発電所もあるが、風力と同様に地域偏在性が非常に強いといった特徴をもつ。

(7) 波力

全世界の波力によるエネルギー総量は年間約0.085ゼータ・ジュールであり、そのうち経済的に利用可能であると見積もられているのが約0.1%であるため、エネルギーとしては約0.000085ゼータ・ジュールとなる。
しかしながら、風力と同様に地域偏在性が非常に強いといった特徴をもつ。

(8) バイオマス

バイオマスとは、植物に起因するエネルギー源を指すが、薪炭、家畜の乾燥糞、植物性の廃棄物といった農工業残さを利用するものと、土地を利用して生産から手がけるプランテーションタイプのものがある。現在、これらによる世界の全エネルギー量は、約0.051ゼータ・ジュールと推計されているが、将来利用可能なエネルギー量の最大値は、陸上の有機物の順生産量の10分の1程度とした場合、年間約0.2ゼータ・ジュールとなる。

各種のエネルギー資源

第4回ITER計画懇談会
苫米地委員発表資料抜粋

	究極埋蔵量		確認埋蔵量		現在の使用量
	(兆トン)	(ZJ)	(兆トン)	(ZJ)	(ZJ/年)
固体燃料(石炭)	12.	360.	1.0	26.	0.118
石油	0.27	11.	0.14	5.9	0.134
天然ガス*	0.34	14.	0.12	5.1	0.089
頁岩油等	0.39**	17.	0.018	0.75	0.

	推定最大値 (ZJ/年)	現在の利用量 (ZJ/年)
太陽光	1.	0.
水力*	0.049	0.0082
潮汐*	0.0008	0.0000022
風力*	0.7	0.000023
海洋温度差*	0.1	0.
バイオマス	0.2	0.051

	推定最大値 (ZJ)	現在の使用量 (ZJ/年)
地熱(温水)	0.4	0.00059
地熱(高温岩石)	310.	0.

	総埋蔵量		確認埋蔵量		現在の使用量
	(百万トン)	(ZJ)	(百万トン)	(ZJ)	(ZJ/年)
ウラン	14.8	722. (8.2)	4.8	239. (2.6)	0.023
トリウム	2.4	120.	1.4	70.	0.
リチウム	?	?	8.3	180.	0.

注：*印は電気及び動力エネルギー

**印はエネルギー的に等価な石油量

***印は確認埋蔵量と追加可能埋蔵量の合計値

括弧内の数字は軽水炉での場合

リチウム資源は西側諸国のもののみ

核融合エネルギーの研究状況

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）のもつ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、人工太陽を地上に作ろうという核融合反応についての研究が米国、旧ソ連、英国で開始され、その後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、大きく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、強力なレーザーを照射して、球状容器内部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、逆磁場ピンチ方式に分類される。

(1) トカマク方式

トカマクは、1950年代に旧ソ連で考案された方式であり、トーラスに垂直なトロイダル磁場コイルが作る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成果をあげたことを契機として世界的に注目され、米国、欧州などでも研究されることとなった。

我が国においても、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、トカマク型を中心とした研究開発が行われることとなり、世界中でトカマク型装置による臨界プラズマ条件の達成を競い合う時代に突入することとなった。

特に、三大トカマク装置と呼ばれる我が国のJT-60（1985年）、EUのJET（1

983年)、米国のTFTR(1982年)が建設され、実験が進められることによって、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。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、改善閉じ込めの発見、高周波による駆動電流360万アンペア、高周波による2時間の電流駆動、ダイバータによる熱・粒子制御の実証などがある。この結果、核融合炉の運転に必要なプラズマの制御方法が確立されるとともに、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^{*1)}をJT-60とJETで達成した。また、TFTRやJET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もとなった(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、大型装置の製造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^{*2)}の達成が見通せる段階にまで至った。

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、自己点火達成、長時間燃焼などを目標に、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、ロシアの国際協力の下に、核融合エネルギーの科学的・工学的な実現可能性を実証するために国際熱核融合実験炉(ITER)の開発が進められることとなった。

ITER計画は、①実際の核融合燃料を用いた制御された自己点火と、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目的としている。概念設計活動(CDA)に引き続いて、1992年からは機器の詳細な設計や機器製造に係る研究開発を行い、建設に必要な全ての技術情報を整えることを目的とした工学設計活動(EDA)を実施している。なお、ITER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原型炉を建設し、プラント規模での発電を実証する段階となる。

なお、ITERに関しては、比較的中性子の発生量が少ないため、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以降の核融合原型炉等では、さらに中性子の発生量が多くなることから、1000-1500万ワット・アニュアル/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、トーラスに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ヘリオトロン研究がはじめられ、現在核融合科学研究所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などから、原理的に定常運転の可能性を有していることが特長である。

研究の現状としては、温度1900万度、閉じ込め時間0.05秒を達成するとともに、閉じ込め性能がトカマクと類似の比例則に従っていることやトカマク装置で見いだされた改善閉じ込めモードがヘリカル装置でも存在すること等が明らかにされ、更に、ダイバータに関する研究もなされつつある。現在、核融合科学研究所にイオン温度1億度、閉じ込め時間0.2～0.3秒及び定常プラズマ実証を目標にした超電導コイルを用いた世界最大の大型ヘリカル装置（LHD）を建設中である。なお、ドイツにおいてもLHDとほぼ同規模のW7-X装置が建設中である。

(3)逆磁場ピンチ方式

逆磁場ピンチ方式は、トカマク方式と似ているが、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、プラズマ自身に安定な閉じ込め配位を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る、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、外部からの加熱装置が不要になるなどの可能性も有する。しかし、閉じ込め性能の大幅な改善、プラズマの安定性の向上、逆磁場ピンチ配位を定常的に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、工業技術院電子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、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TPE-RXが昨年末完成している。

(3)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が今後の課題となっている。

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一様に照射し、核融合反応を起こさせるものである。

レーザー核融合の方式では閉じ込め用の磁場が不要であり、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、ドライバ効率や炉としての総合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が必要であるとともに、ターゲットを連続的に炉の中心に供給し、高繰り返しで高パワーのレーザーを運転することなどが今後の開発課題となっている。

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による爆縮物理の研究では、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、自己点火の実証へ向けて点火等価プラズマ発生のための研究が行われるとともに、流体力学的不安定性を含む爆縮ダイナミクスの研究が行われている。

なお、米国において、大型の点火施設(NIF)が建設中であり、レーザー核融合の点火・燃焼の実証を目指している。

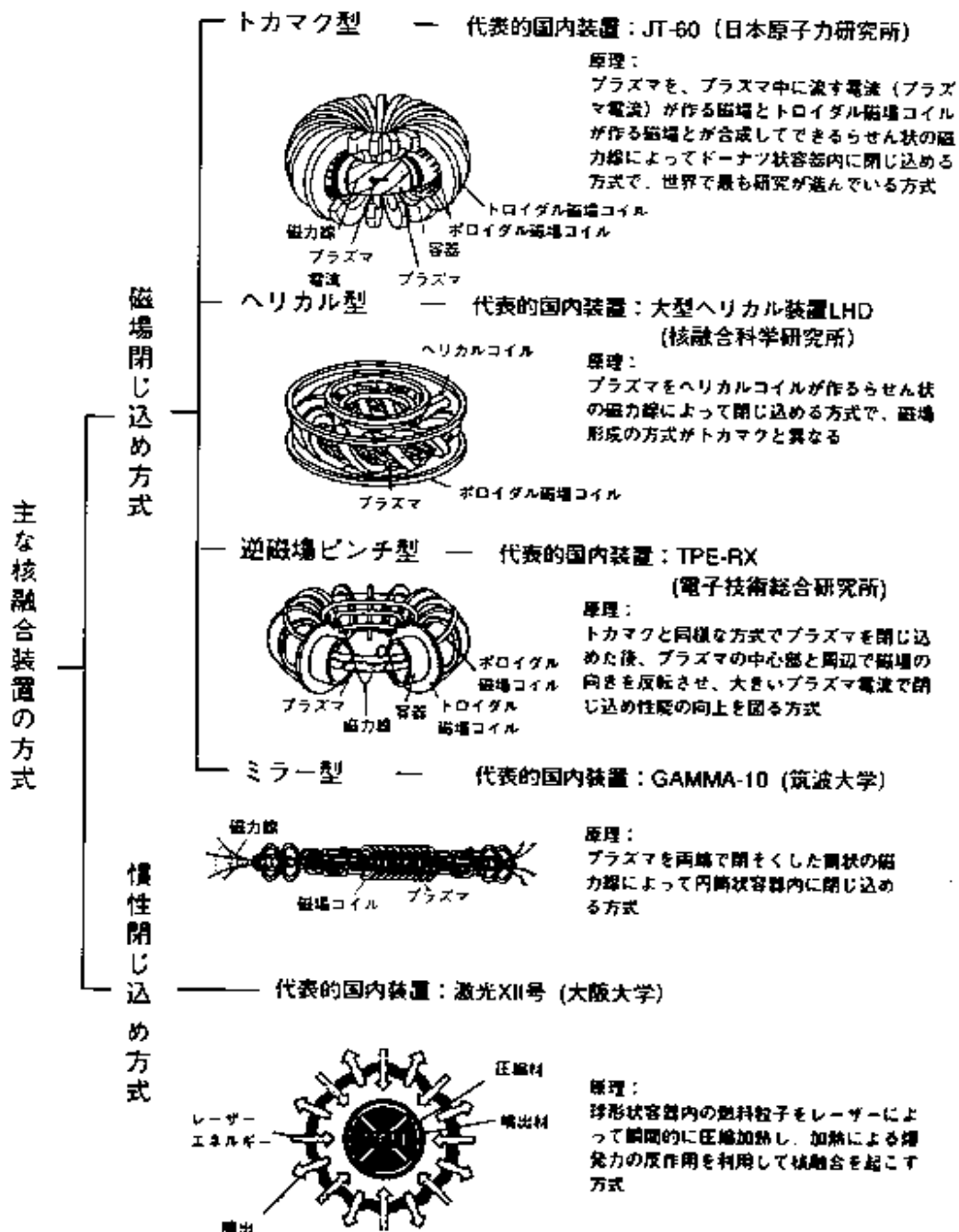
※1) 臨界プラズマ：核融合反応を起こすために外部から入れたパワーと核融合反応により発生したパワーとが等しくなること

※2) 自己点火：外部からのパワーを入れなくても重水素と三重水素とが核融合反応し、発電に必要なパワーを発生すること

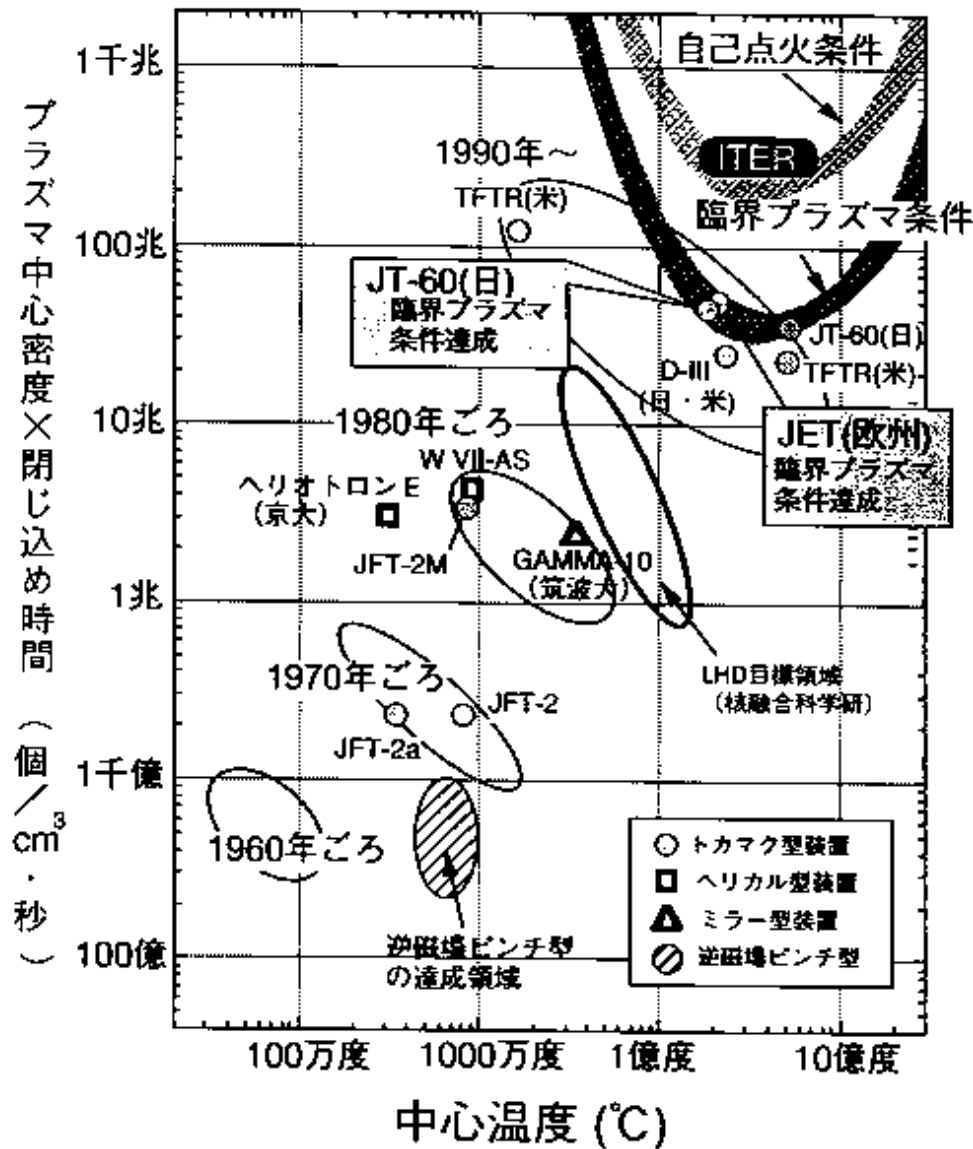
※3) 単位面積当たりのプラズマに面する壁に100万ワットの負荷(中性子壁負荷)が1年間入射し続けた時に相当する中性子の照射量(MW a/m^2)

別紙1

核融合研究における各種閉じ込め方式の分類図

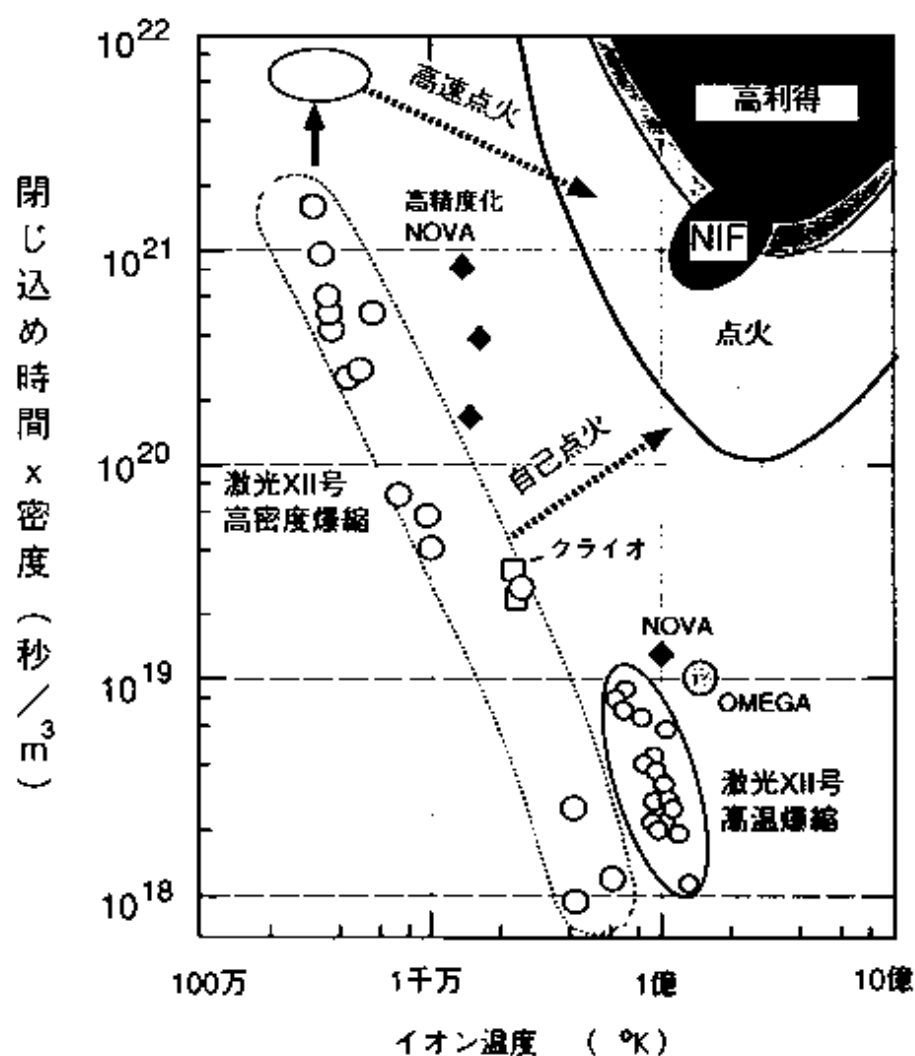


核融合研究開発の進展 (磁場核融合)



* JT-60とJETは臨界プラズマ条件を達成

(慣性核融合)



点 火：プラズマのエネルギー損失と、核融合反応で発生した α 粒子加熱とがパワー
バランスする条件
高利得：核融合反応による発生エネルギーと放射エネルギーの比が100以上となる条件

各種閉じ込め方式による成果比較

方 式	磁場核融合					慣性核融合
	開放型	トラス			トカマク	
項 目	ミラー	逆磁場ピンチ	ヘリカル			
閉じ込め時間	0.6秒 (Gamma 10)	0.005秒 (MST)	0.055秒 (WVII-AS)		1.2秒 (JET)	20ピコ秒 (激光XII)
					1.08秒 (JT-60U)	
電子密度	11兆個/cm ³ (Gamma 10)	200兆個/cm ³ (OHTE)	250兆個/cm ³ (WVII-AS)		800兆個/cm ³ (Alcator-C)	50兆・兆個/cm ³ (激光XII)
					143兆個/cm ³ (JT-60)	
イオン密度	11兆個/cm ³ (Gamma 10)	公開データなし	公開データなし		世界最大値はAlcator-Cで達成したが公開データなし	50兆・兆個/cm ³ (激光XII)
					55兆個/cm ³ (JT-60U)	
イオン温度	1.2億度 (Gamma 10)	800万度 (TPE-1RM)	2000万度 (Heliotron E)		5.2億度 (JT-60U)	1億800万度 (オメガ)
	1.5億度・秒・兆個/cm ³ (Gamma 10)	相当なデータなし	4億度・秒・兆個/cm ³ (WVII-AS)		177億度・秒・兆個/cm ³ (JT-60U)	35億度・秒・兆個/cm ³ (激光XII)
エネルギー増倍率	公開データなし	公開データなし	公開データなし		1.14 (JET)	0.01 (対入射レーザー)
					1.05 (JT-60U)	0.2 (対核融合エネルギー) (オメガ)
電子温度	350万度(中心セル) (Gamma 10)	930万度 (TPE-1RM20)	4600万度 (WVII-AS)		1.5億度 (JT-60U)	4600万度 (オメガ)

我が国の核融合エネルギー研究開発の基盤

核融合エネルギーを形成するプラズマ核融合技術は、プラズマ物理学、原子核物理学、機械工学、原子核工学、電気・電子工学、システム工学、品質工学などの幅広い分野にわたる技術の総体として成立するものである（別紙1 参照）。したがって、プラズマ核融合技術の水準の高さは、各種分野における研究が高い水準を有していることを反映しているといえよう。

実際、世界的にみても、核融合研究開発の先端を行く国や地域は、高い科学技術水準を有している。

我が国における核融合エネルギー研究開発は、付録Ⅱで述べたように、国際的競争の中で進展してきた。このような競争の中で、我が国が世界に先駆けて提唱、実証を行ってきた概念、技術が現在の最先端の核融合研究開発の基盤となっているものも少なくない。

例えば、物理面では、

- プラズマを囲む磁力線の形状を工夫することで、プラズマから発生する熱と粒子を制御し、プラズマの純度を高く保つようにしたダイバータ機能の有効性を実験的に実証した。この技術は、ITERをはじめ、世界の多くの装置に採用されている構造となっている。
- トカマク型装置において、長時間プラズマ電流を維持するため、トランスの原理によらず高周波（低域混成波）でプラズマ電流を駆動する（非誘導電流駆動）方式を実証し、ITERの定常運転シナリオの基礎となっている。

また、工学の面では、

- プラズマを加熱するために、電氣的に中性な粒子ビームを入射する装置を使用するが、その粒子ビームとして、従来の正イオンではなく負イオンを用いることにより、ビームの加速電圧をITERで要求される領域まで向上することに成功した。
- 日本独自の方式（ヘリオトロン方式と呼ぶ）を提唱し、付録Ⅱで紹介した成果をあげている。

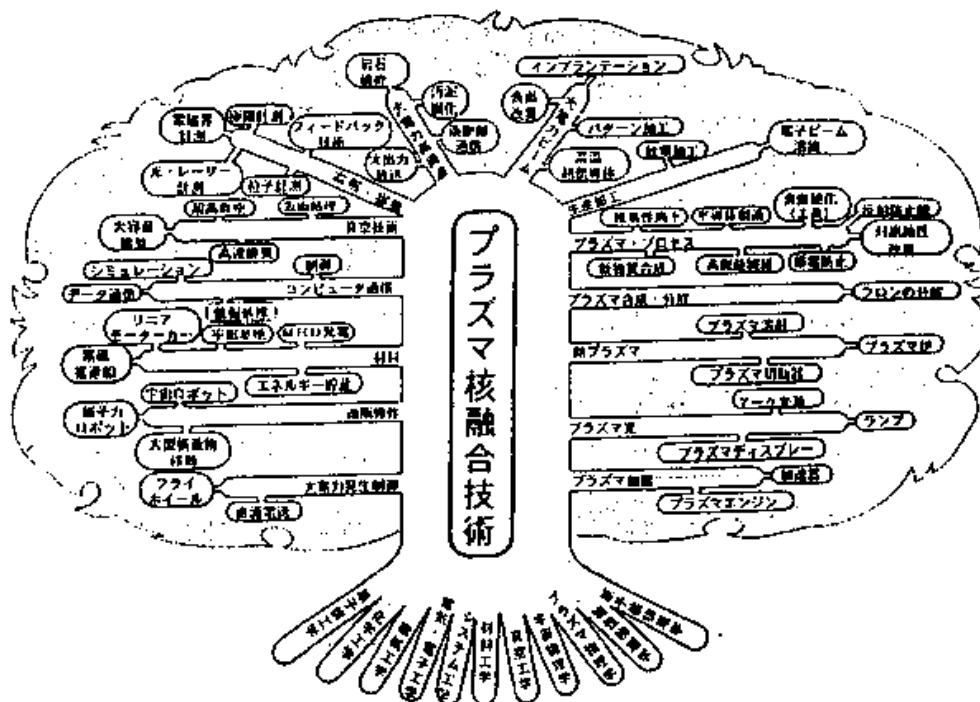
こうした世界に誇る技術への我が国の寄与は、例えば、国際原子力機関（IAEA）が主催して開催する核融合エネルギー会議における我が国の発表論文数にも表れている（別紙2 参照）。

これら技術の成果の背景には、研究開発機関や大学等の研究成果に加え、それを現実のものとする最新の製造技術を有する産業界の高い技術水準の裏付けあることを忘れることはできない。

また、研究機関、大学、産業界における過去からの絶え間なく核融合研究開発に従事する研究者と研究費が確保されてきたことが大きい要因ともいえる。実際、これまでの我が国で行われているエネルギー関連研究開発における核融合エネルギー研究開発の割合を研究者数と研究費で比較しても、核融合エネルギー研究開発の研究者と研究費は、時代の影響を大きく受けることなく、ある一定の割合を確保してきている（別紙3及び別紙4参照）。

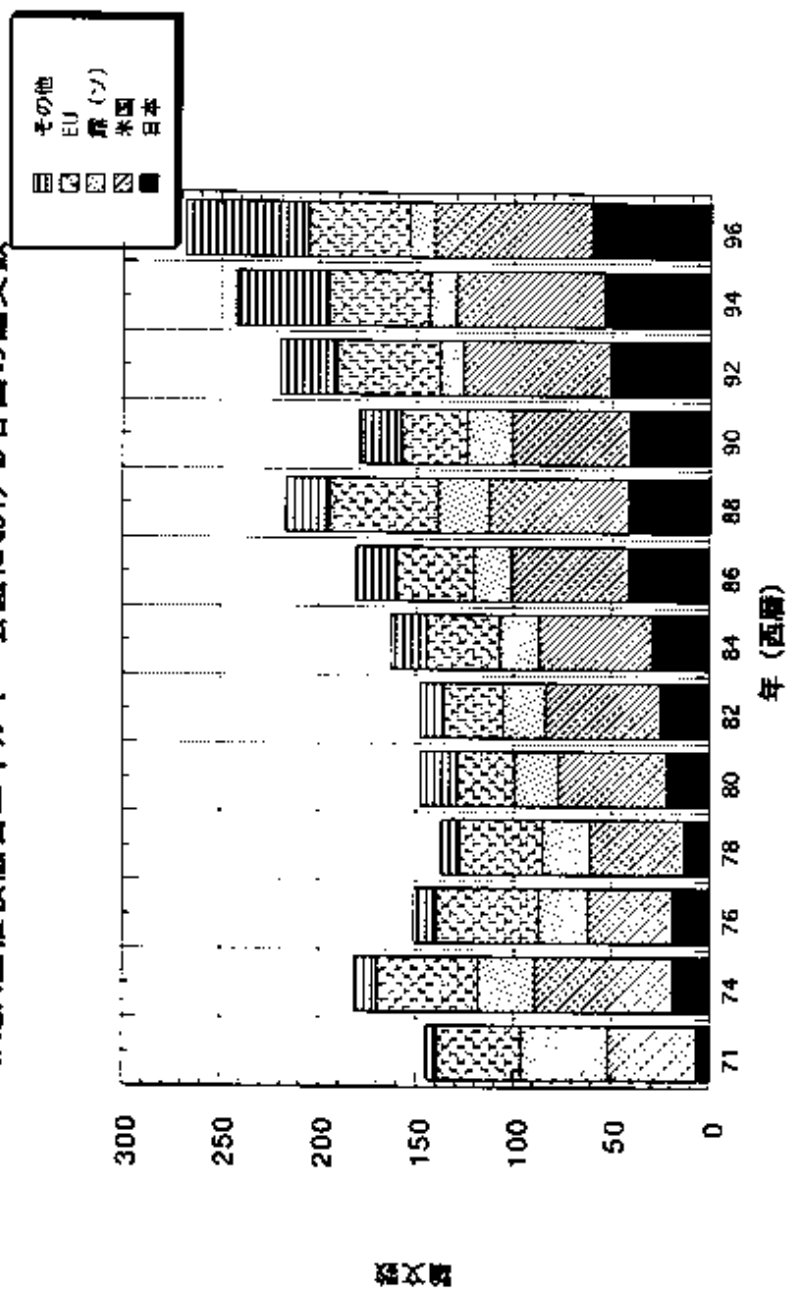
核融合エネルギー研究開発において、我が国が国際的にも十分通用する高い知見と技術を備えるに至った土壌は、各種科学技術分野の順調な進展と、安定した研究資金に支えられた研究者の努力によって形成されてきている。

プラズマ核融合技術の広がり

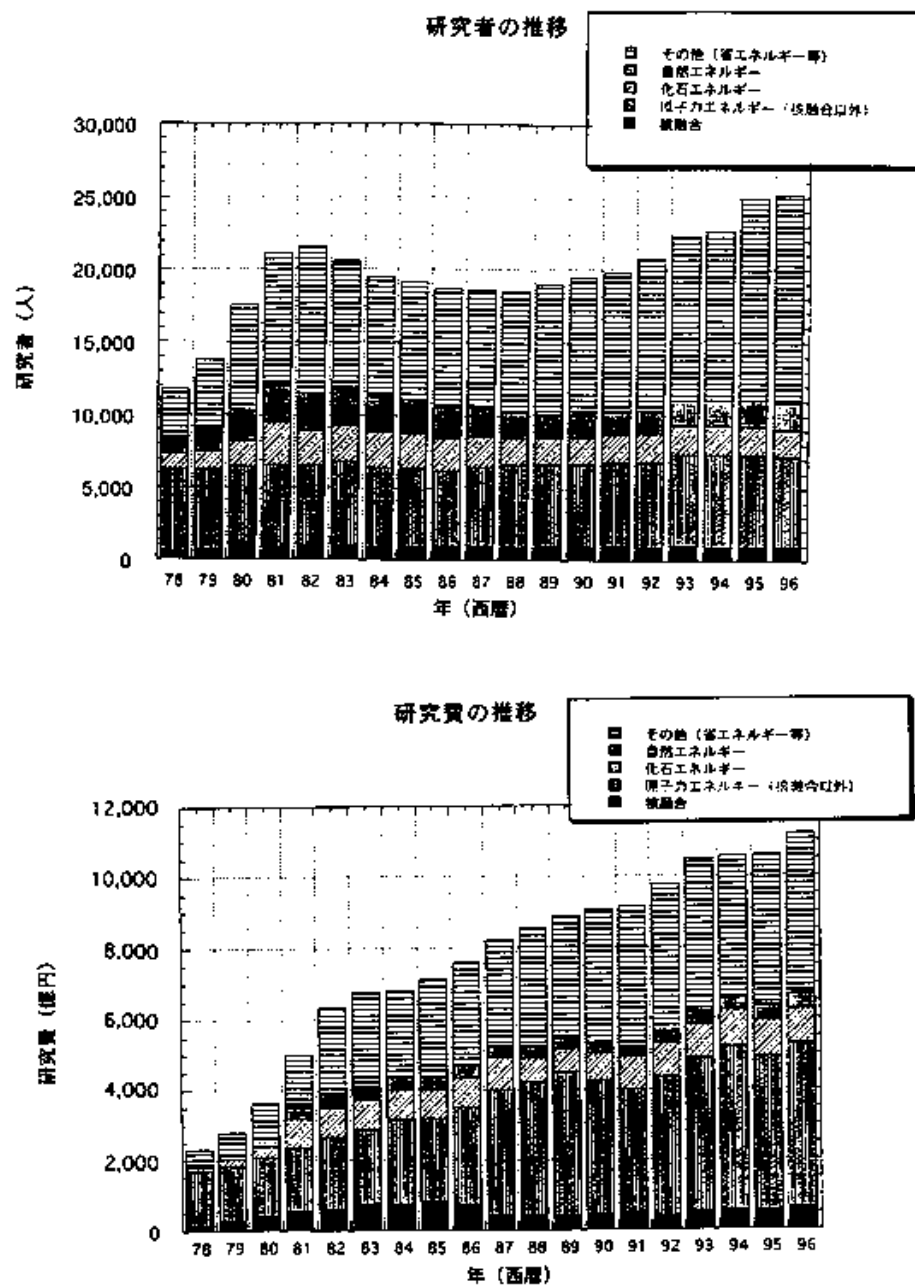


出典：小沼通二著
「現代物理学」
放送大学教育振興会

IAEA主催核融合エネルギー会議における各国の論文数



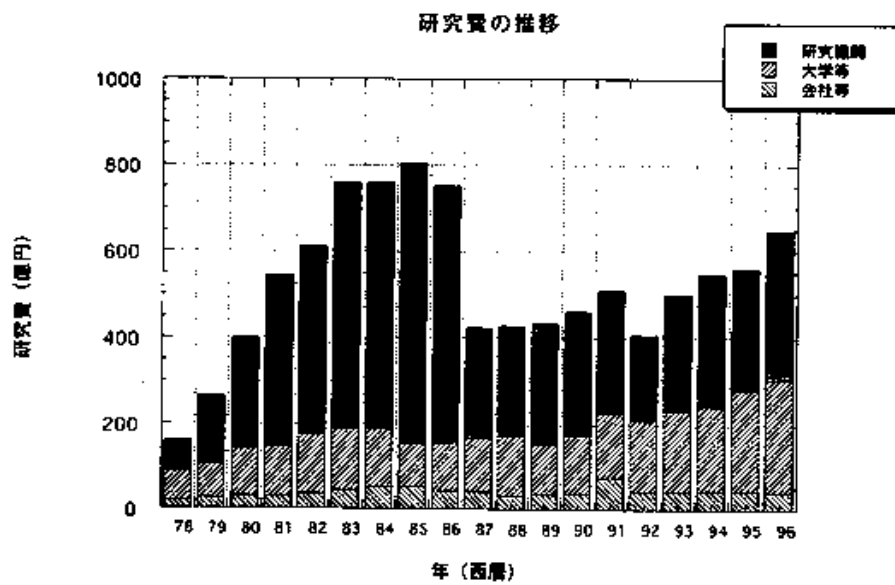
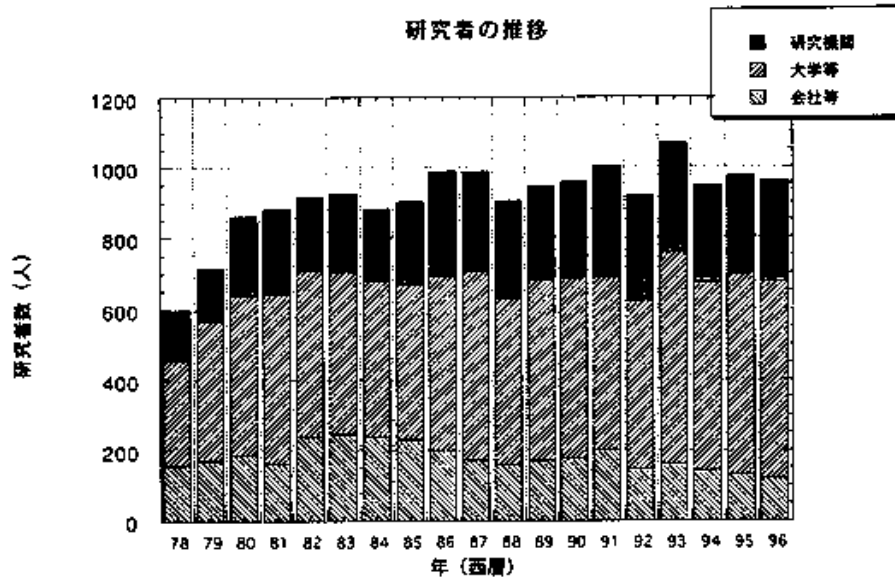
我が国のエネルギー研究開発に占める核融合研究開発の推移



(注) 研究費、分類は総務庁の統計法による。

出典：科学技術研究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



(注) 研究費、分類は総務庁の統計法による。

出典：科学技術研究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）