

## 熱核融合：IAEAのもとで進展する国際プロジェクト

核融合エネルギーの技術的成立性を明らかにすべく、国際協力が更に前進

ダヴィッド・バンナー、パウル・ハウベンライッヒ<sup>1)</sup>

エネルギー供給の長期的展望に立ったとき、我々には三つの選択肢しか残されていない。それらは、太陽エネルギー、高速増殖炉、そして核融合である。この簡単明瞭な現実を踏まえて、1989年に西ドイツ（当時）の研究技術大臣であるハインツ・リーゼンフーバー博士は、核融合の研究開発における現在進められている世界規模での協力に対する動機付けを指摘した。

その後1990年には、IAEAの諮問機関であるIFRC（国際核融合研究協議会）によって、核融合開発の現状と将来展望についての見直しがなされている。同協議会の報告書には次のようなことが書かれている。これは「我々を取り巻く最近の情勢に鑑み、長期的なエネルギー資源の開発は、多様化を図ると共に地域の特殊性を配慮した形で進める必要があることが、実際問題として認識されるようになってきた。これらのエネルギー資源は技術的な成立性が有ることは勿論のこと、経済的にも、安全上にも、環境保護の観点からも受け入れられるものでなければならない。この点で、核融合は潜在的に優れたものを持っている」と言う一文と、もう一つは、「核融合のような新エネルギー源の開発を進めることは、極めて高度な科学技術上の困難に立ち向かうことであり、しかも陽の目をみ

るまで数世代の時間が必要となる。それにもかかわらず、実用炉の実現に向けてこれまで積み重ねてきた研究開発の大いなる進展状況を見ると、感動的ですからあり、また明るい未来を予感させる何かがある。核融合炉の主要燃料である重水素／三重水素（ただし三重水素は天然には存在せず、リチウムから作られるが何れにしても）は天然に極めて豊富にあるので、全地球的なエネルギー需要に対しても実際問題として、資源の枯渇の心配は無い」と言う文章である。

核融合エネルギーの平和利用として、現在二通りの異なるアプローチが試みられている。それらは、通常“磁気閉じこめ”と呼ばれるものと“慣性閉じこめ”と呼ばれるものである。（図を参照）

慣性核融合に関する国際的な情報交換の機運が、最近盛り上がってきたが、これまでこの分野の開発はほとんど国のみによって推進されてきた。それとは対照的に、磁気閉じこめによる核融合の方は、多くの国々において、それらを総計すると、年間20億米ドルにもおよぶ予算規模で長期にわたって研究が進められてきた。それら活動の大部分はEC、日本、ソ連および米国におけるそれぞれの計画に沿って進められてきたものであり、他の数か国の寄与も金額的には必ずしも大きくないが、研究上は有意義なものが多々ある。

30年の長きに渡って、“磁気閉じこめ”の方は国際協力で研究を実施するという点に関し

1) バンナー氏はIAEA物理化学部の物理課長。ハウベンライッヒ氏は前ITER評議会議長である。

て、非常に恵まれていた。IAEAはその初期から研究上の情報交換を積極的に支援してきた。とくに1987年以降は、国際熱核融合炉（ITER）計画に、より具体的に、かつ大々的な国際協力体制を敷いて積極的に係わってきた。

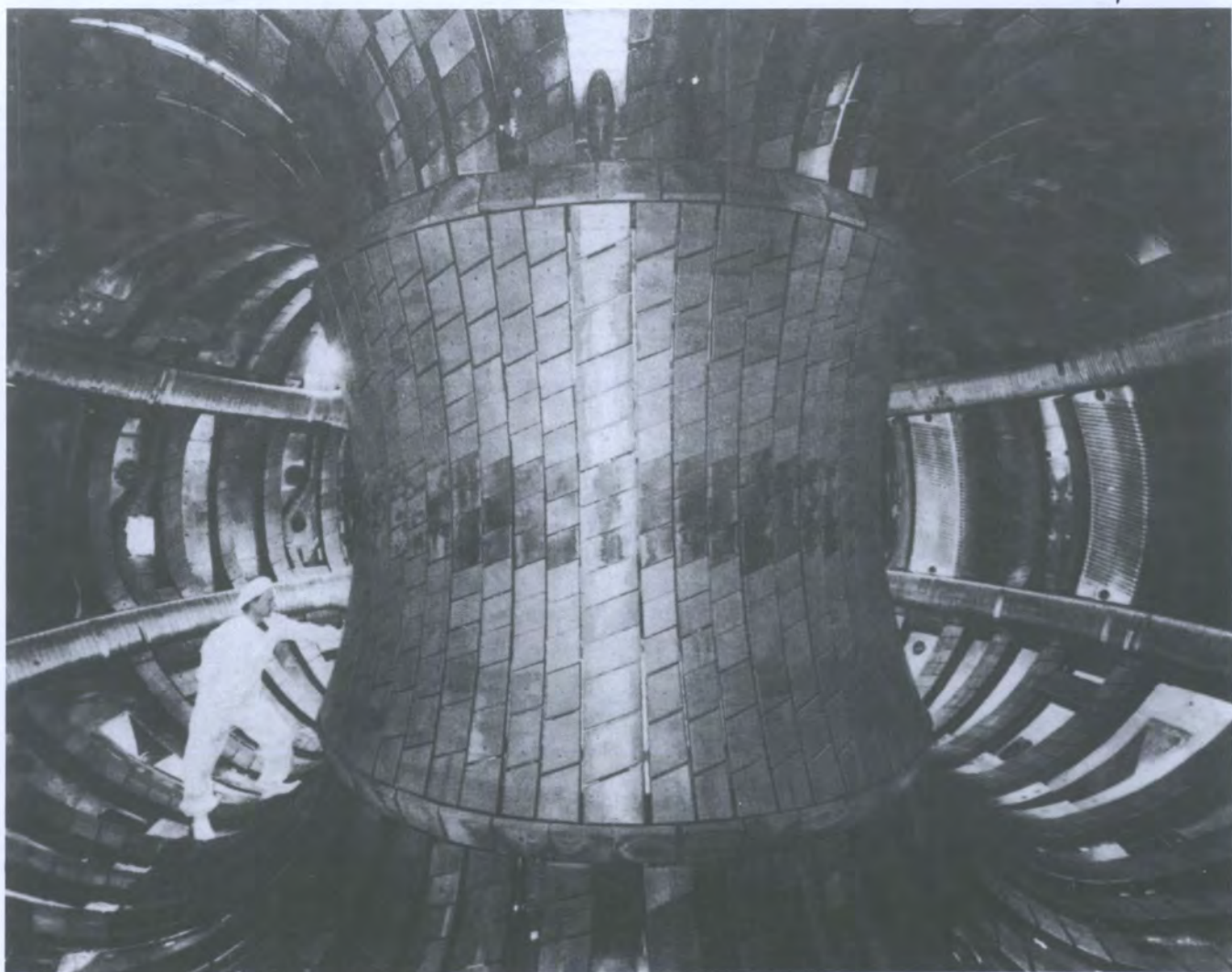
#### ITER 計画とは

先の四大核融合計画のそれぞれにおいて、研究の進展状況は1986年頃までに“しかるべき段階”の一手前まで到達した。その“しかるべき段階”とは、実際の燃料を用いて自己点火条件が達成され、かつ燃焼制御ができるような、いわゆる炉工学技術を統合した装置を建設することである。そのような装置は、必然的に

大型で高出力なものになる。このような装置の建設と運転に、多くの専門家と多額の資金を要することは論を待たない。このことを踏まえ、核融合に携わる、政府の指導的立場にある人々は、現状の協力体制の枠を更に拡大することを呼びかけた。

これらの呼びかけに応じて、IAEAの事務局長は先の四極の代表者をオーストリアのウィーンに招き、1987年を通じて一連の会合を開催した。その会合で、ITER概念設計活動（CDA）と呼ばれる3年間の共同作業の細目が規定された。CDAの目的は、四極のそれぞれの開発計画の要求を満足する装置の建設に向けて、具体的な第一歩を踏み出すことである。全

欧州共同トーラス研究装置（JET）内部の様子。JETは世界最大の強磁場プラズマ閉じ込み装置で、JETの内部で発生した水素プラズマは、磁気により熱核融合に必要な条件まで閉じ込めが行われる。この温度は1億°Cに達する。





会一致で決定したことは、装置概念はトカマク方式とする、と言うことである。最初ソ連で発明されたトカマク方式は、その後、ソ連も含めた多くの国で、装置の大型化および高性能化が進められてきた。IAEA 事務局長は、四極間で合意された付託条件（装置のミッションおよび設計指針に係わる憲法のようなもの）に則って、IAEA の賛助のもとで CDA への参加を改めて呼びかけた。四極はいずれも、1990 年の終わりまでに、概念設計とコスト評価と建設用地に要求される条件の摘出を実施する要請を受諾した。

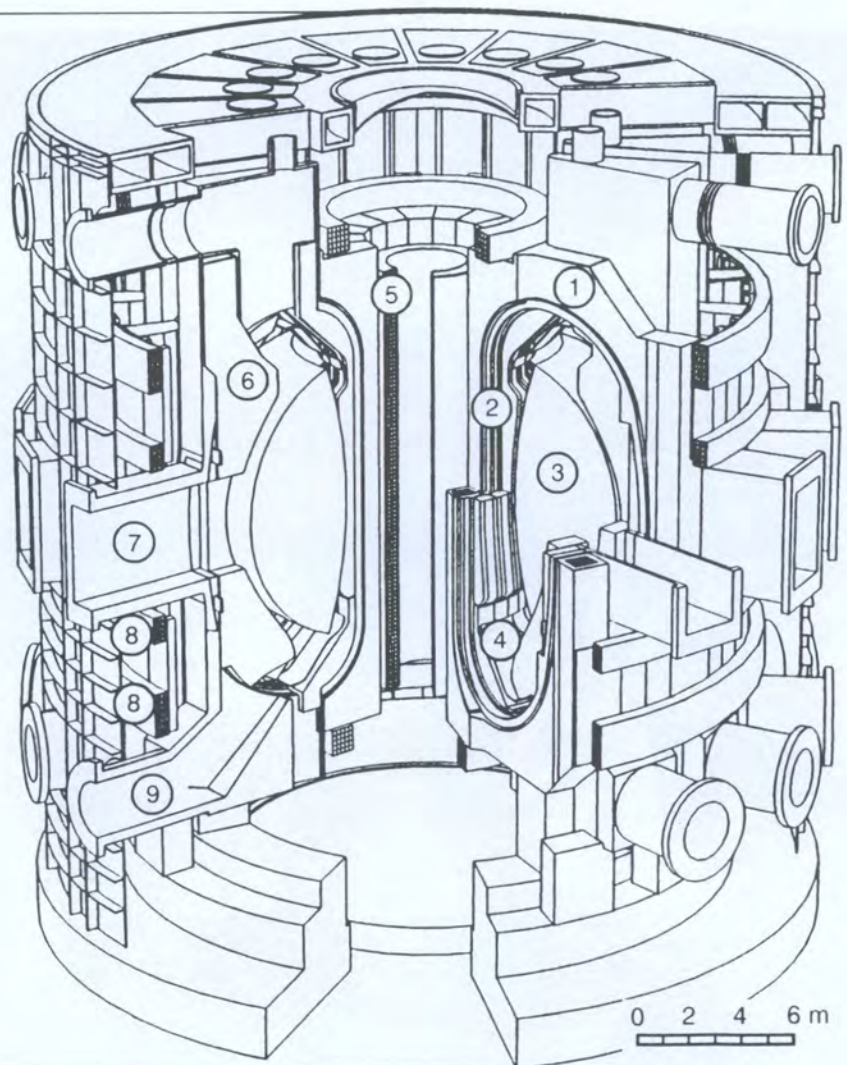
1988 年 4 月に開始された共同設計活動は、成功裡に 1990 年 12 月に完了し、ひとまず幕を

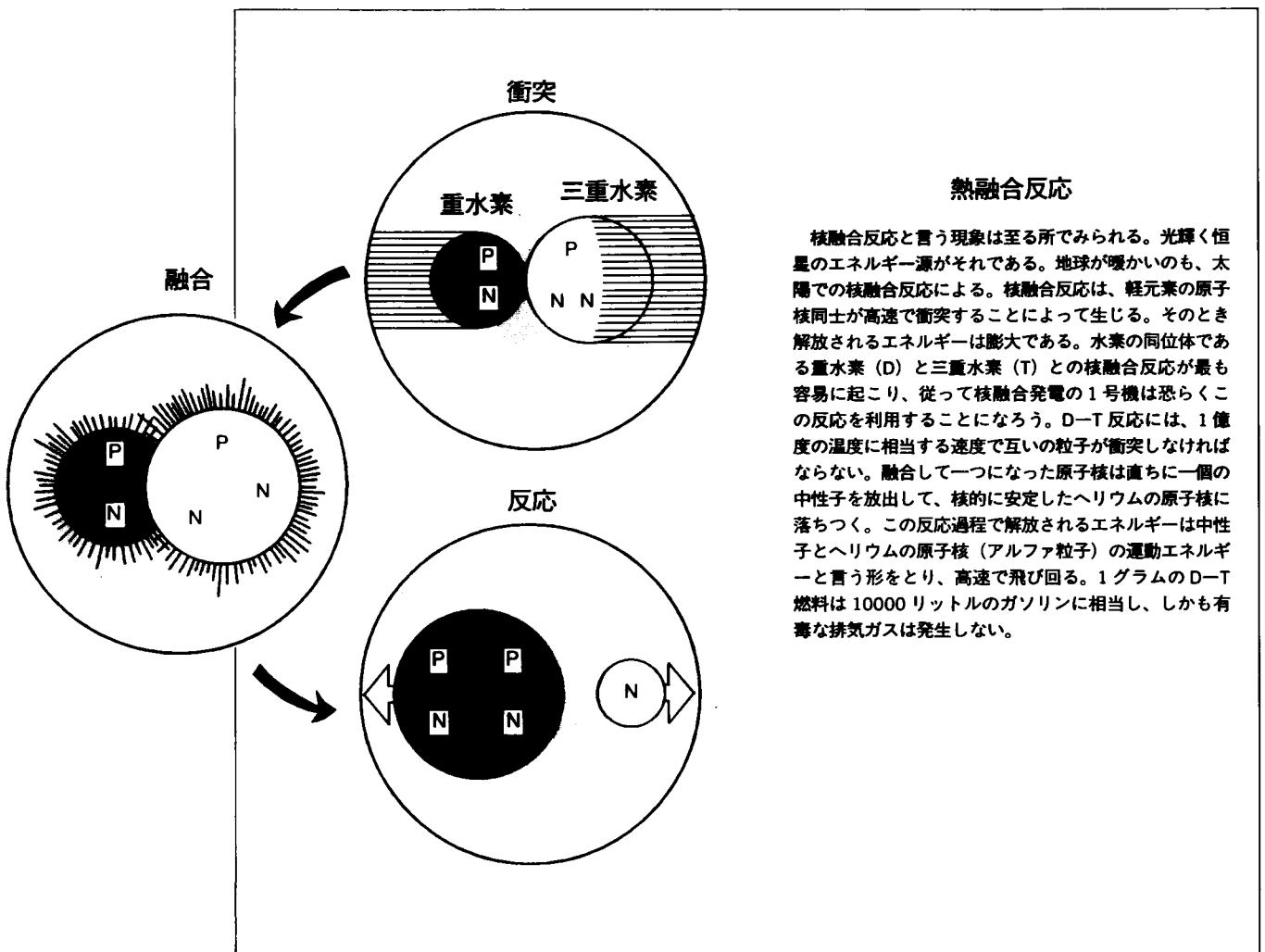
閉じた。設計作業は、それぞれの母国においてなされた部分と、ミュンヘン郊外のガルヒンに EC 提供の敷地内で共同でなされた部分から成る。毎年六か月の共同設計作業の期間を通じて、50 人以上の専門家が同地に在住し、各国においてそれ以上の人数の専門家が精力的に作業を進めていた。共同設計作業のために組織した機構は、四極から派遣された専門家が十分協力しあえるように援助を惜しまなかった。ITER 活動の全体の方向付けは、各極 2 人ずつで構成される ITER 評議会 (IC) によってなされてきた。

四極それぞれの核融合の開発計画は、実験炉に対して似たような目的を掲げており、また

#### ITER 装置の主要機器

- 1) トロイダル磁場コイル
- 2) 真空容器
- 3) プラズマ
- 4) ダイバータ
- 5) 中心ソレノイドコイル
- 6) ブランケットと遮蔽体
- 7) 水平ポート
- 8) ポロイダル磁場コイル
- 9) 排気ダクト





ITER の活動を開始するに当たって、技術的な進め方についても概ね合意に達していたが、四極が独自に進めいた設計概念の間には多少の違いがあった。これらの違いの相互理解と解消が程なく達成されたことは、共同作業における決して小さくない成果であった。1988 年末までには、ITER の各参加国は装置諸元の選択およびコイル磁石、材料、保守方法等についての設計概念に関して合意に達した。

設計を進めるに当たっては、各参加国で実施している広範囲な研究開発 (R&D) の支援を受けた。各参加国は技術開発に年間約 1 千万ドルの資金を投じており、さらに ITER に焦点を当てた課題を研究テーマとした、閉じ込め物理の実験も実施してきた。ITER の成果は、信頼の置ける設計のための土台として評価され、採用された。

1990 年末には、四極の共同作業によって、プラント全体の概念設計が完了し、ITER の組み立て方と運転の仕方についての明確なイメージが描かれた。この共同作業には、建設用地に対する要求事項の洗い出しと建設の事業計画に対する提案も含まれている。同事業計画には、各国の開発計画として振り分けられる物理および工学上の R&D の内容が記載されており、これら R&D は詳細設計の実施に不可欠である。さらに、建設と運転に関する実行可能なスケジュールとコストの概算についても検討がなされた。

CDA を終えるに当たっては、3 年間の成果の徹底的な見直し作業が、共同チーム内では勿論のこと、各国内のしかるべき審査員によってもなされた。見直しを行なった人全員が「ITER 計画における次の段階へ移行するに際し、十分

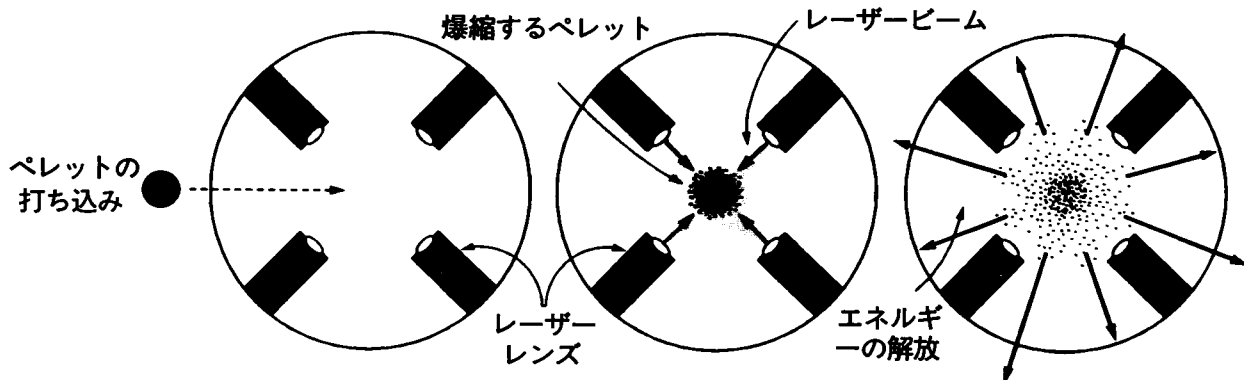
## 核融合における「閉じ込め」

磁気閉じ込め方式では、燃料は最初冷たい希薄ガスの状態であり、それが何らかの方法で加熱されてプラズマ状態になる。この「物質の第4状態」とも言うべきプラズマは原子核と電子に分離して、熱運動で飛び回る。プラズマ中の全粒子は電荷を帯びているので、磁場を横切るとき力を受ける。磁気閉じ込めのしくみは、それら荷電粒子が磁力線に巻き付いて螺旋運動をするので、真空容器の壁に衝突しないようにしてあることである。粒子が熱運動によって核融合反応を生じるまで、加熱し続けなければならない。

実用化のための加熱方法と閉じ込め性能については、十分解明されている。後者（閉じ込め性能）は、プラズマ容器を大きくし、磁場を強くすることによって向上す

る。

慣性核融合の基本原理は、極めて急速に核融合燃料を加熱して、大量のエネルギーを発生させることである。核融合反応は燃料粒子が熱エネルギーで飛散する前に生じる。実用化の検討では、水素の氷の小ペレットを容器内に落下させ、周囲からペレットに焦点を当てて急速にレーザーエネルギーをパルス的に与える（下図参照）。急速な表面加熱によって衝撃波が生じ、ペレット中心の温度と密度が熱核融合条件に達する。ペレットが飛散するまでの極めて短時間に核融合エネルギーが生成される。実用化のためには、このような現象を短い間隔で連続して起こす必要がある。



な技術的根拠が得られた」との結論に達した。

CDAを通じて、ITER共同チームは、ITERの建設に要する期間は7年であり、投入資金は約49億米ドルと試算した。ITERの着工に先だって、工学設計活動(EDA)のために約6年間が必要となる。EDAでの主な活動には、詳細設計、各構成機器の開発および建設用地の評価が含まれる。

将来EDAの当事者となる人達は、各参加国の均等な負担で仕事が進められるような組織のあり方を提示した。彼らは、2億5千万米ドルが設計作業のために、7億5千万米ドルが基礎工学R&Dと大規模工学R&Dのために必要であると試算している。設計作業全体の約半分が、特定の場所に設営されて一年中活動する“中央チーム”によってなされる。“中央チーム”は四極から均等に派遣された計180名の専門家

で構成され、一部地元の支援を受けて運営される。“中央チーム”の指定した特定の設計課題については、各参加国の研究所および産業界において実施される。ITER参加国およびその他の国々による物理研究の成果は、ITERの設計の妥当性を確認するため、およびITERの実験計画を策定するための情報源となる。

ITERのみに焦点を合わせた工学R&Dについては、一つあるいはそれ以上の参加国によってそれぞれの国内で実施されることになる。EDAプロジェクトの管理運営は共通基金によって、一人のディレクターとそのスタッフが行うことになる。四極とも、核融合発電の技術的成立性を実証するだけでなく、安全上および環境保護上の優位性をも実証するものとしてITERを位置付けており、従ってITERの安全性および環境保護における重要性は、工学設計



でも継続して指導原理であり続ける。

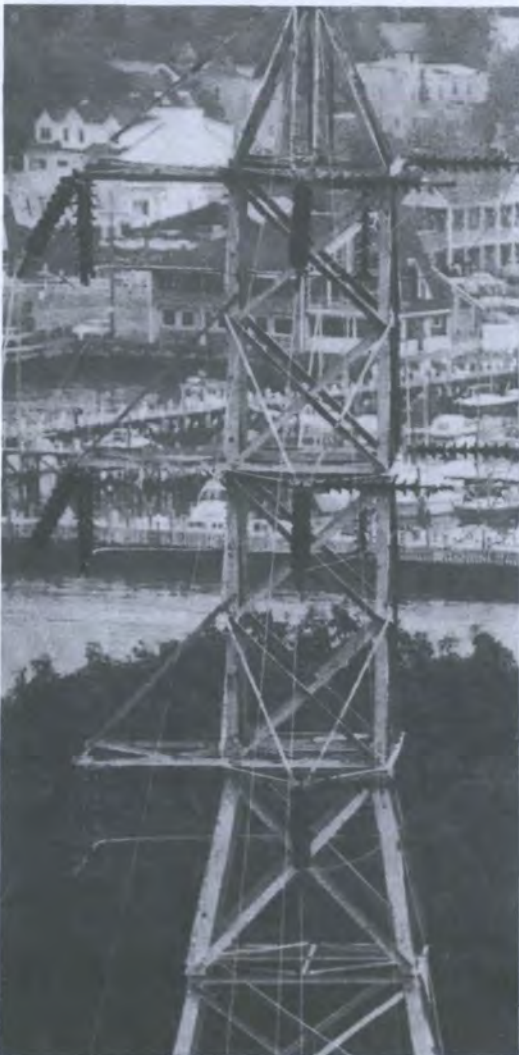
CDAの成果は専門家によって高く評価されただけではなく、各国政府も核融合エネルギーが途方もない可能性を秘めていることを勘案して、今後ともITERの活動を推進することに自信を深めた。国際協力には困難な面もあるが、エネルギー開発と言う優先順位の高い分野で、科学技術上の知見を持ち寄り、費用を分担し合うことはお互いにとってメリットが大きいと各国とも認識している。

ITERの参加国間でなされたEDAにおける協体制のあり方についての予備的な議論を受けて、各参加国の政府は正式な交渉に入ることを認可した。IAEAの事務局長は、一連の交渉をするためにウィーンで同じテーブルに就くよう各参加国に呼びかけ、EDA中央チームの設

立および支援には最大限の努力をすることを保証した。第一回目の交渉会議は1991年2月11,12日の両日にウィーンのIAEA本部で開催された。

各参加国の意見は、ITERのEDAの交渉に関して、米エネルギー省長官が語った次の発言内容に集約されている。すなわち、『国際的な研究協力のパートナーとして、我々が核融合の成立性を実証するための炉を共同で設計することは理に適っている。科学と納税者は、文字通り地球規模でかつ昼夜兼行で進められてきたこの共同研究からすでに恩恵を蒙っている』

四極のうち三極がEDAの主催国として名のりをあげた。ECはCDAと同じ敷地であるドイツのガルヒンを、日本は日本原子力研究所の那珂研究所を、米国はサン・ディエゴにある大



#### 核融合における安全性と環境問題

核融合はガス燃焼のヒータに幾分似ている。即ち、ガスの供給を止めれば炎（核融合反応）はたちどころに消滅する。核融合反応を制御できないことによる破局的連鎖反応や広範囲におよぶ損傷といったものは起こりようがない。

核融合反応による一次発生粒子は放射性のものではないが、発生した中性子が構造材その他の物質に吸収されることにより放射性核種が生じる。しかし、放射性核種は移動性のものではなくまた極端に長寿命でもないため、その格納および廃棄はそれほど困難ではない。運転終了後における崩壊熱の発生も比較的穏やかであり、簡単で信頼性の高い機器・システムを備えて対処することは容易である。

核融合燃料の中にはトリチウムが唯一放射性を示すものであって、機械および施設的设计・運転に当たってはトリチウムの格納に十分注意しなければならない。

トリチウムの格納についてはかなりの検討がなされ、効率的かつ実用的な方策が確立されている。

ITERの概念設計活動において、この核融合炉は既存の安全性と環境に関する全ての基準を満足することが報告されている。

学と核融合センターをそれぞれ提案した。いずれも180人の専門家と20人の支援部隊を収容できる建家の提供と、設計作業に必要な計算機関係の施設の提供を申し出ている。通信システムは中央チームとそれぞれの母国でITERのために働いている人達との間で効率的な共同作業ができるように十分なものでなければならない。

EDAサイトの決定と主要メンバーの選定は交渉によってなされるであろう。順調な交渉経過から見て、各国とも1991年の中ごろまでには妥結に至るであろうと目論んでいる。

#### 核融合エネルギーの潜在的パワー

核融合エネルギーの燃料は地球規模で広く分布しており、しかも量的には事実上無尽蔵である。核融合のエネルギーを充分制御した形で取

り出すための物理的諸条件は、この10年間に世界中の研究所において実施された成果によってかなり明確になった。エネルギー発生過程は太陽や恒星の中で生じている過程と同じである。つまるところ核融合開発の最終目標は地上に“小型の太陽”を創り、その熱エネルギーを電気に換えて利用することである。

さらに、核融合発電における安全性および環境保護上の問題については、多くの利点があり、社会が受け入れる際、障害となるものはない。もし、ITERの当事者達が考えているように、要求を満足する装置が実際に製作できて運転制御もできるものならば、核融合は今世紀後のエネルギー需要に応えるために大きな役割を果たすであろう。

