2. 国際概念設計活動報告

苫米地 顕

(ITER 運営委員会議長)

(日本原子力研究所那珂研究所)

(1990年11月20日受理)

Report on International Conceptual Design Activities

Ken Tomabechi

(Received November 20, 1990)

Abstract

The ITER Conceptual Design Activities are expected to be completed by the end of 1990. A next-step programme (Engineering Design Activities) is now under discussion. An overview of the Conceptual Design Activities, including design policy, outline of the device and the operational programme, is presented. The next-step programme is also mentioned.

Keywords :

ITER, conceptual design, engineering design, design policy, operational programme,

1. 緒言

国際熱核融合実験炉 (ITER) の概念設計活動は、1988年4月に開始され、1990年の12月にその全作業を予定通り終了しようとしている。この国際協力は1985年に開催された米ソ首脳会談を契機に生れたもので、その経緯、協力活動の枠組、組織、設計指針などの具体的な事については、本誌既報の解説¹⁾に詳しく述べられているが、その目的、活動概要をここに要約すると次のようになる。

ITERの概念設計作業は、EC、日本、ソビエト、アメリカの四者が国際原子力機関 (IAEA) のもとで、対等、平等の原則に基づいて実施されているもので、その目的は核融合の科学的、技術的可能性を実証する実験炉を開発することである。この活動を開始するに当たって四者間で合意された文書には、ITERの目的として、次のことが明記されている。

1. 重水素、三重水素プラズマの制御された自己点火、長時間燃焼 (究極的には定常状態が目標) を実証すること。

Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-01.

2. 核融合炉にとって重要な技術を総合的なシステムにおいて実証すること。
3. 核融合エネルギーを実際に利用するための高熱負荷機器並びに中性子工学関係機器の試験を行うこと。

具体的な設計作業は、毎年約10名の専門家が各参加国からドイツのガルヒンにあるマックスプランク・プラズマ物理研究所に集って、各国の国内チームの支援を受けながら、数ヶ月間共同作業を行うという方式で実施された。また設計作業と平行して、設計の技術的前提や基礎を実証するために、プラズマ物理の分野・工学関係の分野でITERの設計に関連する研究開発を各国の分担で実施した。設計および解析作業の規模は、全体で約400人・年、工学関係の研究開発が総額約120 M\$相当である。プラズマ物理関係の研究開発は自発的貢献の形で実施され、総額は推計されていない。

この概念設計期間中の共同作業スケジュールを図1に示す。

図1. ITER 共同作業スケジュール。

2. 設計の基本的考え方

ITERの設計は、世界のトカマクで行われた実験から導かれる科学的知識に基づき、また、参加国が行って来た広範な工学的研究開発から得られた技術的な知識に基づいて行うこととした。それらの知識から先に述べたITERの目的を達成する装置概念を構築することが可能である。核融合プラズマの知識は近年著しく進歩しており、後述するようにITERのプラズマ性能はこれ迄実証されたプラズマ性能の1桁以内のところにあるものとなっている。この作業の結果得られた概念設計は、次に実施されるであろう工学設計の出発点となり得るものである。

もちろん、設計上不確実な点も残されてはいるが、それらの諸問題の完全な解決は、ITER自身の運転に

俟つべきものであり、それがITERの目的でもあると言い得る。

装置の設計は意欲的であり、同時にまたリスクを軽減するために種々の配慮を行うという考え方で進められた。

ITERについての設計の基本的な考え方を要約すると下記のようなになる。

1. 現代のトカマクで達成されているプラズマの諸性能に基づいて設計すること。
2. 慎重な工学的手法と妥当なコストを両立させつつ、装置のプラズマ物理面の性能に最大限の余裕をもたせること。
3. 装置に対し実現可能な最大限の実験上・運転上の融通性をもたせること。
4. 設計上の仮定・基礎を実証するために、関連するプラズマ物理および工学関係の研究開発を実施すること。

以上述べた条件の範囲内で、できるだけ装置を小型化し建設費を低減する努力が払われた。

3. 装置の概要

上述の考え方に立てば、与えられたITERの目的から技術的に装置概念を導き出すことが可能である。すなわち、長時間燃焼ということから超電導コイル系の使用が必要となる。自己点火条件からは必要なプラズマ電流の大きさが与えられる。中性子壁負荷とフルエンスの条件からは、必要な遮蔽の厚さが決められる。これらのことをプラズマの安定性や灰排気等の諸条件と組合せると、自動的に一つの装置概念が導かれる。

この様にして設計されたITERのトカマク部分の概要は、図2に示す通りであり、その主要目は次の通りである。

プラズマ主半径	6.0 m
プラズマ副半径	2.15 m
楕円度	2.0
軸上磁場	4.85 T
定格プラズマ電流	22 MA
定格出力	1 GW

ITERの主要な目的を達成するための運転は、プラズマの安定性についての知識の範囲内で可能であると考えられる。自己点火燃焼状態を維持するために必要なエネルギー閉じ込め時間は、多くのトカマクで実現されているいわゆるHモードの範囲内にある。また、燃焼の初期状態でのヘリウム濃度が低い場合には、自己点火に必要な閉じ込め時間は、Hモードの値よりもずっと低い値になる。

前述のように、ITERの設計に関連して、プラズマ物理・工学の両分野の研究開発が実施された。プラズマ物理面で設計にとって重要なものとしては、ダイバーター性能およびエネルギー閉じ込め時間についての不確かさを低減すること、プラズマのディスラプションを回避することなどに関するものをあげることができる。工学関係の研究開発は、ブランケット、プラズマ対向機器、超電導磁石、加熱電流駆動系、トリチウ

△燃料系，遠隔操作の6つの分野について行われた。

図 2. The ITER Device.

4. 運転計画

前述の通り ITER には 3 つの主要な目的がある。それらの目的を達成するために、ITER の運転は 2 つの段階に分けて行われるよう計画されている。すなわち、プラズマ物理実験を主として実施する物理段階と、工学的な諸試験を主として実施する技術段階である。物理段階では自己点火長時間燃焼プラズマが実現されて第 1 の目的が達成され、技術段階では種々の工学試験が実施されて第 3 の目的が達成される。しかしながら、これらの 2 つの段階の役割には、当然かなりの重複があるだろう。

ITER の運転の成功そのものが核融合エネルギー開発上重要なステップとなるものと考えられる。何故なら、それは核融合炉に必要な主要な機器が総合された炉システムとして運転されることであり、次の実証炉の開発にとって大きな意味をもつことになるからである。そして、それは第 2 の目的の達成を意味する。

物理段階の実験には、約 6 年間が必要であると考えられている。この間に予定される運転パルス数は約

15, 000, その中性子フルエンスは 0.05 MWa/m^2 と見積られている。この物理段階の主要な目標は、自己点火のための十分なエネルギー閉じ込め、燃焼の進展と灰蓄積の制御、プラズマ対向機器性能の最適化などである。非誘導電流駆動による燃焼時間の延長やディスラプションの頻度を最小にすることもこの段階の主要な研究課題である。

技術段階は ITER を試験施設として活用する段階であり、トリチウム生産のためのブランケットモジュールを装荷した試験、中性子工学のための実験、高熱負荷機器の試験、材料開発のための試験などが行われる。また、将来の動力炉用の高温の熱の取り出し実験も行われる。燃焼パルス長としては、約 2000 秒が見込まれているが、もし定常運転が可能であることが判明すれば長時間の運転が行われるだろう。この技術段階の中性子壁負荷およびフルエンスは、それぞれ 1 MW/m^2 , 1 MWa/m^2 と見積られており、約12年間の実験期間を予定している。

5. 今後の計画

ITER の概念設計活動が所期の成果をあげる見通しがはっきりしたことに伴って、1991 年以降この計画をどのように発展させるべきかについて、関係四者間で既に議論が開始されており、早期に ITER の工学設計を開始するよう話し合いが進められている。そのような工学設計についての技術的見地からする検討結果によれば、工学設計作業とそれに関連して必要となる研究開発の実施のために約 5 年間が必要であると考えられている。この 5 年間は設計作業そのものよりは、むしろ研究開発の実施の面から必要な期間であり、工学設計段階のためのプラズマ物理・工学両分野の研究開発計画が作成されている。

プラズマ物理面の研究開発では、現存する施設を用いた各種の実験により、種々の不確定要素を最小にし、設計上の仮定についての信頼性を高めることが行われなければならない。また、各国によってこれまで実施されて来た工学関係の研究開発に更に追加して、新しい概念の原理実証試験や重要な機器の原型試験などを行うことが必要である。もし、1991 年初頭にこのような ITER の工学設計と関連の研究開発が開始され、組織的に強力に推進されるならば、1995 年の終りには建設段階へと進むための技術的準備が整うものと考えられている。

また、競争入札を前提とした ITER の建設費の見積りによれば、それはトカマク装置 1.7 B \$, トカマク装置補機系 1.4 B \$, 建屋等 0.8 B \$, 予備費 0.7 B \$, 輸送据付費 0.3 B \$, 合計 4.9 B \$ で、建設許可後約 7 年が建設に必要であると考えられている。

6. 結言

ITER の概念設計活動の特徴を列挙すれば、次のようになる。

1. 世界の四大核融合開発計画の参画
2. 約 400 人・年の設計作業

3. 毎年 40 ～ 60 人の専門家による数ヶ月間の共同作業

4. 強力な支援研究開発の分担実施

(世界の主要トカマク実験と総額 120 M \$ 相当の工学的研究開発を含む)

この国際協力により、1つのITERの設計概念がまとめられた²⁾⁻²⁸⁾。このITERは将来の核融合炉に必要なプラズマ物理と大部分の工学技術を実証する重要なステップとなるに違いない。四者間の合意が成立して工学設計が早期に開始されるよう切望するものである。

謝辞

このITERの設計作業、研究開発には、原研をはじめ、大学、産業界の各方面から広範な技術的貢献、支援を戴いた。設計チームを代表して、それらの方々に誌上を借りて謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 苫米地顕: “国際核融合実験炉 (ITER) 協同設計について” 核融合研究 59 (1988) 5.
- 2) K. Tomabechi *et al.*: “ITER: Conceptual Design”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Washington (1990), IAEA-CN-53/F-1-1.
- 3) R. Toschi *et al.*: “ITER: Design Overview”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-1-2.
- 4) D. Post *et al.*: “ITER: Physics Basis”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-1-3.
- 5) E. Salpietro *et al.*: “ITER: Engineering Basis”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-1-4.
- 6) Y. Shimomura *et al.*: “ITER: Operational Scenario”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-2-1.
- 7) C. Baker *et al.*: “ITER: Nuclear Engineering”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-2-2.
- 8) M. Abdou *et al.*: “ITER: Test Programme”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-2-3.
- 9) H. Iida *et al.*: “ITER: Safety Aspects”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-2-4.
- 10) N. A. Uckan *et al.*: “Energy and Particle Confinement in ITER”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-1.
- 11) T. Tsunematsu *et al.*: “Operational Limits and Disruptions in ITER”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-2.
- 12) S. A. Cohen *et al.*: “Power and Particle Control for ITER”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-3.
- 13) W. M. Nevins *et al.*: “ITER Current Drive and Heating Physics”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-4.
- 14) W. Lindquist *et al.*: “ITER Current Drive and Heating Systems”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-5.
- 15) K. Borrass *et al.*: “Plasma Operation Control in ITER”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-6.
- 16) J. R. Miller *et al.*: “ITER Superconducting Magnets Systems”, *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-7.

- 17) F. Casci *et al.* : "The ITER Basic Machine Layout" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-8.
- 18) T. Honda *et al.* : "ITER : Remote Maintenance" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-9.
- 19) L. Bottura *et al.* : "Transient Electromagnetics in ITER" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-10.
- 20) D. Smith *et al.* : "Tritium Breeding Blanket" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-11.
- 21) G. Vieider *et al.* : "Plasma Facing Components in ITER" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-12.
- 22) P.J. Dinner *et al.* : "ITER Fuel Cycle Design" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-13.
- 23) C.A. Flanagan *et al.* : "ITER Plant Systems and Site Requirements" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-14.
- 24) L.J. Perkins *et al.* : "ITER System Studies and Design Space Analysis" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-15.
- 25) J. Wesley *et al.* : "The ITER Poloidal Field System" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-16.
- 26) V. Mukhovatov *et al.* : "ITER Operation and Diagnostics" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-17.
- 27) F. Engelmann *et al.* : "Physics R and D Programme" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-18.
- 28) J.G. Cordey *et al.* : "A Preliminary Analysis of the ITER Energy Confinement H-Mode Data Base" , *Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA-CN-53/F-3-19.