



ITER 建設にむけて

下村 安夫
(ITER 国際チーム)

Toward Construction of ITER

SHIMOMURA Yasuo

ITER International Team, Boltzmannstrasse 2, D-85748 Garching, Germany

(Received 17 January 2005)

The ITER Project has been significantly developed in the past years in preparation for its construction. The ITER Negotiators have developed a draft Joint Implementation Agreement (JIA), ready for completion following the nomination of the Project's Director General (DG). The ITER International Team and Participant Teams have continued technical and organizational preparations. The actual construction will be able to start immediately after the international ITER organization will be established, following signature of the JIA. The Project is now strongly supported by all the participants as well as by the scientific community with the final high-level negotiations, focused on siting and the concluding details of cost sharing, started in December 2003. The EU, with Cadarache, and Japan, with Rokkasho, have both promised large contributions to the project to strongly support their construction site proposals. The extent to which they both wish to host the ITER facility is such that large contributions to a broader collaboration among the Parties are also proposed by them. This covers complementary activities to help accelerate fusion development towards a viable power source, as well as may allow the Participants to reach a conclusion on ITER siting.

Keywords:

ITER, fusion, tokamak, plasma

1. はじめに

ITER (国際核融合実験炉) 計画の目的は核燃焼プラズマの研究を行い、500 MW の核融合出力を長時間持続し、発電炉の鍵となる技術を実証することである。2001年に完了した工学設計活動 (EDA) の成果をさらに発展させ、建設開始に向けた技術的な準備が着実に進められている。これと平行して、EU、日本、ロシア、中国、米国、韓国の政府代表による公式協議が進められてきた。2003年末までに、協定書案、ITER 国際研究機構の構成・運営、物品調達方式・分担、リスク管理、知的所有権などの検討はほぼ完了した。研究機構長が指名されれば、短期間の内にこれらの内容は決定できると予想される。政府高官による建設地および費用分担の交渉が2003年12月より本格的に開始された。建設地に関しては、EUはカダラッシュ(仏)、日本は六ヶ所村(青森)への誘致を強く主張し、お互いに譲らず、こう着状況が続いている。核融合開発を統合的に進めるため、また ITER の建設地の合意を得やすくするために、非誘致極に ITER 遠隔研究実験センターや関連研究施設 (サテライト・トカマクまたは 14 MeV 中性子照射設備) を両極 (EU と日本) の分担で設置するとともに、ITER 建設分担比以上の特典を供与することなどが両極から提案されて

author's e-mail: shimomy@itereu.de

いる。EU または日本が非誘致極になった場合には、分担費用は少なく得る利益は多大である。誘致した場合には、サイト整備費に加え ITER 建設費の 50% 程度を分担し、さらに非誘致極に建設する関連施設の分担も含めると全体の費用は膨大になる。したがって、両極が ITER 建設地の誘致に固執している現状は客観的に見て極めて不可解である。また、両極の研究者の声も聞こえてこないことも不自然に感じられる。いずれにしても建設地と機構長の早急な決定が強く望まれる。それらが決定すれば、直ちに ITER 国際研究機構をスムーズに立ち上げ、製作や建設に長期間を要するコイル、真空容器、建屋などの発注手続きが開始できるように、また建設期のリスク管理が妥当に行えるよう、ITER 国際チームは各極内のチームと協力して準備を進めている [1]。それらについて本論文で述べる。

2. 建設にむけた技術的な準備

政府間協定に基づく ITER 工学設計活動 (ITER-EDA) は 2001年7月に完了した [2, 3]。この活動によって、ITER 建設の鍵となる技術の開発を行い [4]、トカマクを構成する主要部分の製作可能性を示すとともに、トカマク、付属設備、建屋等全体の設計を一通り完了した (Fig. 1 に ITER

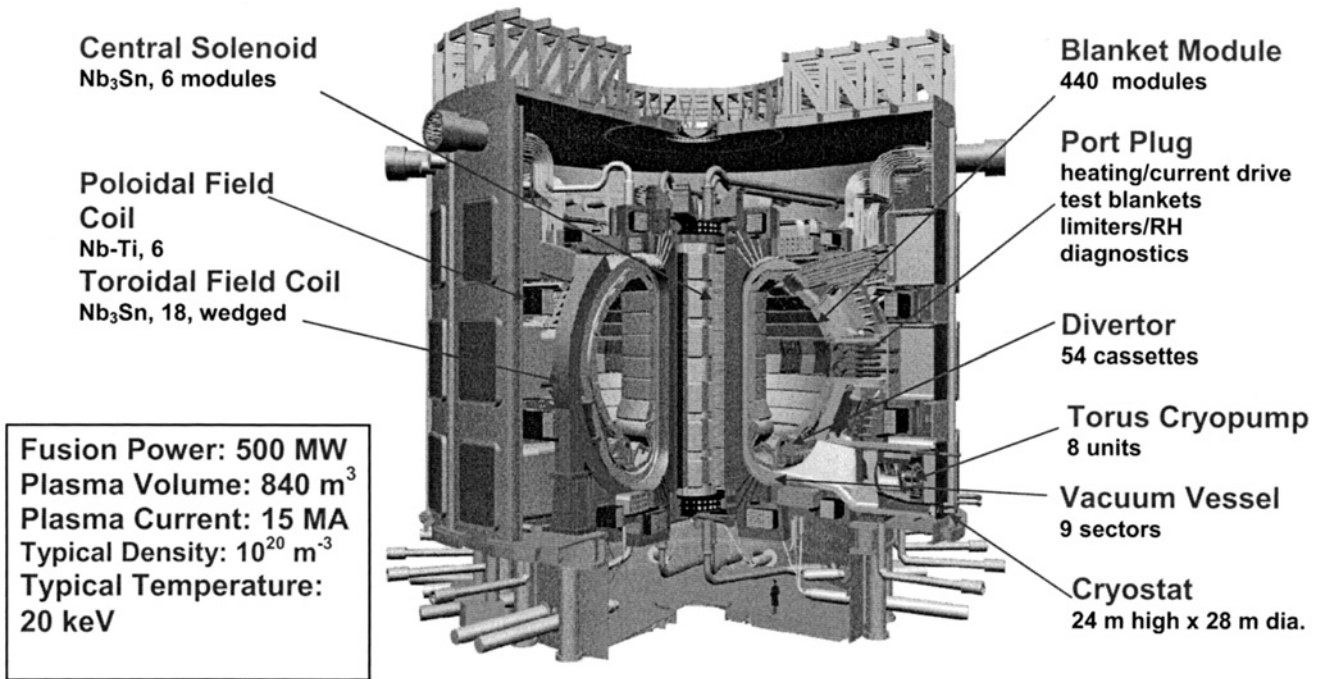


Fig. 1 ITER

の中心部分を示す)。建設活動をスムーズに立ち上げるためには、さらに改良を含めた詳細な設計を進めるとともに、工場製作及び現地工事に必要な主要技術の確認を行い、発注仕様書の準備を進める必要がある。

2.1 設計の主な進展

コイル系

- Nb₃Sn 超伝導素線の臨界電流密度を約600から約 800 A/m²へ増強
 実機大規模コイルの製作・試験の結果、マージンが少ないことが明らかとなった。また、10年前に設定した電流密度より高い密度が得られることが近年実証された。そのため、電流密度を高く設定し、コイルの規模を大きくすることなく、適切なマージンが得られる設計に改良した。

● 構造の詳細決定

オプションの選択、せん断キーの長さの最適化などを行い、コイルの構造詳細設計を進めた。

- 定常運転モード性能向上のための抵抗性壁モード (RWM) 安定化コイルの強化
 トロイダル方向に6組、ポロイダル方向に3組ある補正用磁場コイルの耐電圧値を高め、RWMの安定化の能力を向上した。

真空容器／ブランケット／ダイバータ系

● 真空容器支持の改良

以前の設計では、真空容器はトロイダル・コイルに支持されていた。しかし、免震構造の採用により真空容器とトロイダル・コイルの相対運動が小さくなったため、真空容器の支持をトロイダル・コイルと独立にすることが可能となった。これにより安全隔壁である真空容器と非安全構造体であるトロイダル・コイルを分離することができた。併せて組み立ても簡素化できた。

- 大型下部ポートの18個から9個への削減
 18個の場合に現地接合部分に当たる大型下部ポートを9個に削減し、現地接合部分から除外することによって、組み立ておよび熱遮蔽構造体を簡素化することができた。これは詳細な検討により、9個の大型下部ポートをそれぞれダイバータの冷却小ポート2本と炉内監視装置兼グロー電極挿入用小ポート1本に置き換えられること、および真空容器の支持に対して大型下部ポート9個で充分であることが判明し、その後の設計改良による成果である。
- ブランケット第一壁パネルへの溶接接合の採用 (Fig. 2)
 第一壁が損傷した場合または第一壁材の交換が必要な場合に対応して、ホット・ラボで第一壁パネルをブランケット本体から脱着できる設計とし、廃棄物の量を少な

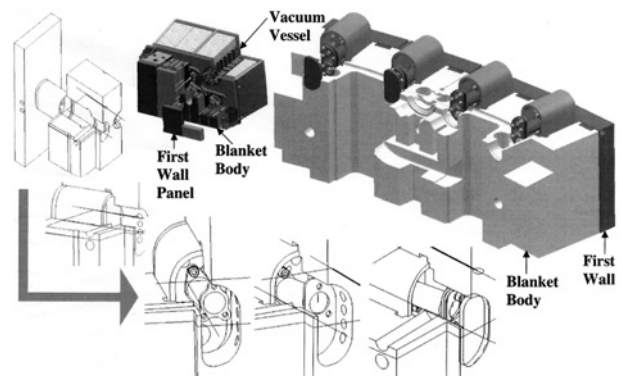


Fig. 2 Removal first wall.
 The first wall panel is supported by the blanket body through the cooling water pipe and can be replaced by cutting and welding the pipe in the hot lab after removing the blanket from the vacuum vessel to the hot lab by using remote maintenance tools.

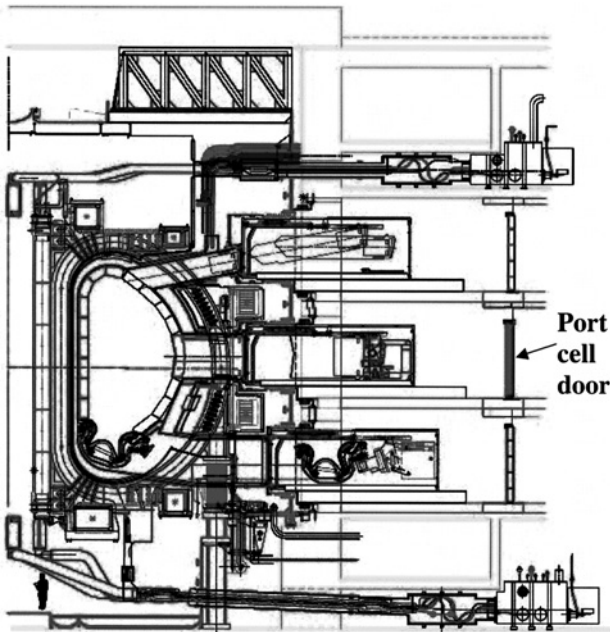


Fig. 3 Second containment barrier.
 In the previous design, the second containment barrier of each port was the second closer at the cryostat wall position. In the present design, the second closer is moved to the port cell door. In above figure, a divertor cassette, an equatorial port plug and an upper port plug are moved into the remote handling casks.

く抑えることとした。そのため、パネルの支持は冷却配管を兼ね、冷却パイプを切断・溶接することによって脱着できる構造とした。

- 中性粒子入射ポート周辺の特殊形状ブランケットの設計
- ダイバータ排気の改良
 ダイバータと主排気を直結することとし、真空容器、計測系等へのトリチウムの吸着を少なくする構造とした。
- 真空容器と超伝導コイルの熱遮蔽構造体の簡素化

建屋系

- トカマク建屋の免震構造化
 カダラッシュ、六ヶ所村の両候補地に対して、免震構造を導入することによって、建屋および機器の支持等を大幅に簡素化した。
- トカマク建屋内の配置の詳細検討
 水、電気、ガス、信号ケーブル、加熱電気駆動系等の配管、配線、配置の詳細な検討を進め、サイト・レイアウトおよび建屋内の設計に反映させた。
- 真空容器ポート・フランジの簡素化
 以前の設計では、第一隔壁となる真空容器ポートを直接閉止するためのフランジと第二隔壁となるクライオ・スタットの位置で閉止する第二のフランジが考えられていた。第二フランジを取り除き、第二隔壁をポート・セルとした。このことによって、ポートに取り付けるブランケット試験体、加熱電流駆動装置、計測機器等の構造を簡素化するとともに、ポート・プラグの入れ換えを簡素化し、管理区域内での作業を大幅に軽減することができる。
- 冷却パイプのガード・パイプの除去による簡素化

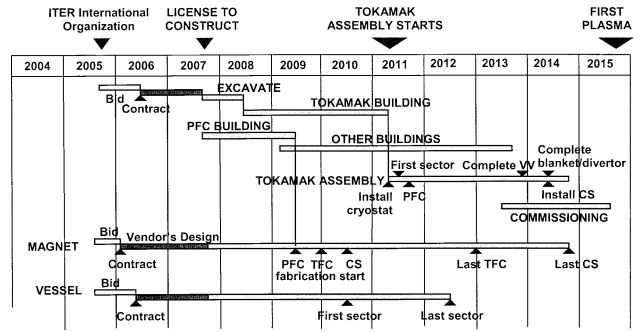


Fig. 4 ITER construction schedule.
 ITER International Organization is assumed to start in late 2005. PFC: poloidal field coil, TFC: toroidal field coil, CS: central solenoid, and VV: vacuum vessel.

ガード・パイプを除去し、もし冷却水の漏洩があった場合には、ポート・セルなどの内側に閉じ込めることとした(Fig.3)。その際、圧力があまり上昇しないようにするため、高温水(240℃)を用いるベーキング運転については、遮蔽弁を有した小口径のバイパスを用いることとした。

2.2 製作技術の開発及び確認

進行中の主な項目

- 真空容器の溶接新検査方法、特に片側溶接部および接近した溶接
- 真空容器の製作方法及び品質保証(QA)計画の詳細検討
- ポロイダル・コイル導体(NbTi)の製作と試験
- トロイダル・コイルのラジアル・プレートおよび外側支持構造物の製作試験
- 第一壁パネルのブランケットへの取り付け、取り外しの試験
- 第一パネルの製作性の実証(6極)
- 新しい仕様のNb₃Sn製作の実証(15の企業)

2.3 発注仕様書の準備

ITER建設のスケジュール上、最もクリティカルになるのは超伝導コイルおよび真空容器の製作、トカマク炉建屋の建設(とそれに引き続く装置の組み立て)である(Fig.4)。したがって、これらの発注仕様書の準備を行っている。作業はITER国際チームと、関係チームのそれぞれの分野の専門家からなるグループが行っている。建屋に関しては、設計のための発注仕様書を準備しているが、建設地が決定していないことから専門家の参加が限られることにより進展が遅れている。超伝導コイルに関しては、特に最初に発注する超伝導線およびコイルの大型構造物の技術仕様書の準備が順調に進んでいる。真空容器に関しては、他の多くの機器との取り合いが複雑であるため、他の機器の詳細設計を進めつつ、仕様を詰めている状況である。

建設決定からITER国際研究機構発足までの間は約一年と考えられているが、この間にこれらの技術仕様書を完成できるだろう。言い換えると、機構発足後直ちに発注作業を開始できるだろう。

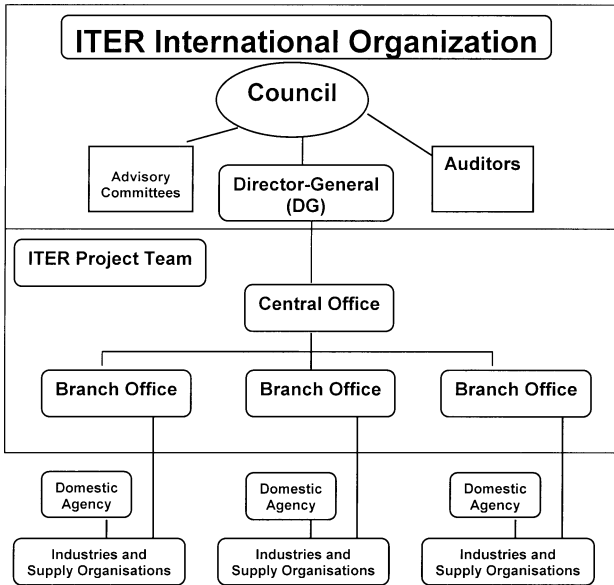


Fig. 5 ITER Organization.

3. 組織に関連した準備

現状の活動 (ITA: ITER 暫定活動) がスムーズに ITER 国際研究機構 (Fig. 5) に引き継がれるための準備, および将来のリスクを低く抑えるための対策および検討を進めている。もちろん ITER 国際研究機構の運営, ITER 建設の責任は機構長にあり, 将来の機構長は ITER 計画を実施するにあたって十分な自由度と力を必要とする。自由度を拘束したり, また力を弱めたりしないよう準備する必要がある。

3.1 リスク管理

大型科学技術プロジェクトの多くは, その装置の複雑さと, 前例のないことから共通したリスクが内在する。ITER プロジェクトでは, さらに複雑な国際組織, 及びその計画が長期間に渡ることによる特有のリスクが考えられる。リスクを注意深く管理することが ITER の成功のため, すなわち, 性能, コスト, スケジュールを守るために不可欠である。

ITER 建設の各極の分担の90%は各極内で調達することが, 政府間協議で合意されている。また, 各極の調達物の分担についてもほぼ合意がなされている。しかし, リスクを最小にするように分担案が合意されたわけではない。実際には, 技術的要求と各極の要求の妥協の産物である。例えば, 真空容器系は A, トロイダル・コイル系は B, ダイバータ系は D などの分担であれば, それぞれの調達のかなりの部分をそれぞれの極に任せることは可能であろう。しかし, 多くの系を複数極で分担する現状の案では, 技術者を ITER 機構と製作メーカーに集中し, ITER 機構が直接管理できる対策が必要であろう。また, 資金による分担は全体の10%であるため, 物品の調達コストにクッションがなく, 柔軟な対応が取りにくい。

これら ITER にとって重要なリスクのいくつかの例について述べる。

超伝導線, 第一壁パネル, ダイバータ・ターゲット・エレ

メント

これらの部材, 部品は大量 (~500トンの素線, 2,000 枚の第一壁パネル, ダイバータ・ターゲット・エレメント, 2,000 枚) かつ高品質のものが予定通り製作される必要がある。この場合の主なリスクは, 品質, 生産スピード, コストにある。これらのリスクを最小に抑えるため発注前に, ①技術開発を行い製作可能性を実証する, ② QA/QC 方法を確立しておく, ③発注前にメーカーの生産能力を確認する, ④メーカーの競争力を確保する, ことが必要である。これらを確保することによって, 初めて妥当なコストで信頼性のあるメーカーとの契約が可能となる。また, この場合には生産量が多いため, 数社~10数社との契約が必要となる。現在は, 一部を除き ③~④の過程にある。例えば, Nb₃Sn 導線の試作は15社で行われている。

生産過程で, もしある社の生産が遅れた場合や不良品の率が高く生産コスト・生産スピードに問題が発生した場合, 早く問題を感知し対策を取れる体制が必要である。対策が直ぐに取れない場合には, この社の残りの生産を他社に振り替えることが必要である。この振り替えは国を渡って行われることも予想される。したがって, このような振り替えが可能なシステムを参加極は準備しておく必要がある。この例の場合, 参加極の覚悟さえ得られれば, ITER の特殊性は有利に働く可能性がある。

トカマクの大型構造物

トカマク本体その周辺の設備は複雑に入り組んでいるため, 各系統間のインターフェースの管理が極めて重要である。また, 設計および製作が最も困難な所であり, 発注後の多少の設計変更の可能性も否定できない。これらのリスクを最小にするためには, まず製作の困難が予想される主要部について, 製作可能性を実規模または実機を予測し得るモデルの開発・製作が必要である。それは EDA の主要なテーマであり, 大規模の R&D を行って製作を実証した。しかし, その後, 設計の変更もあり, 製作技術の確認を現在進めている。

次に, 設計の詳細を詰めておくことである。このことにより, 製作時に発生する変更の可能性を低く抑えることができる。そのためには, 誤りのない詳細な設計を効率よく行える人とシステムを用意しておく必要がある。これらについては後に述べる。

発注に際しては, その単位は大きくし, 多くの小さい発注に分割した時に発生する多企業間, 多極間の複雑なインターフェースの問題を軽減しておく必要がある。また, 製作能力をもった企業は限られているため, いかに適切な競争力を確保しておくかも重大な課題である。幸い, EDA において主要コンポーネントの開発・製作を複数極が行ったこと, 開発成果を相互に公開したことにより, ある程度競争力は確保できていると考えられる。しかし, 国際的な競争入札を多くの参加極は望んでいないため, コスト増が予想される。しかし, これは国際競争力のメリットよりも自極内の調達を選んだ極の責任でもあり, この点に関する覚悟は当然なされているものと期待している。さらに, 重要な要素は一個の系を複数極で分担している点である。例

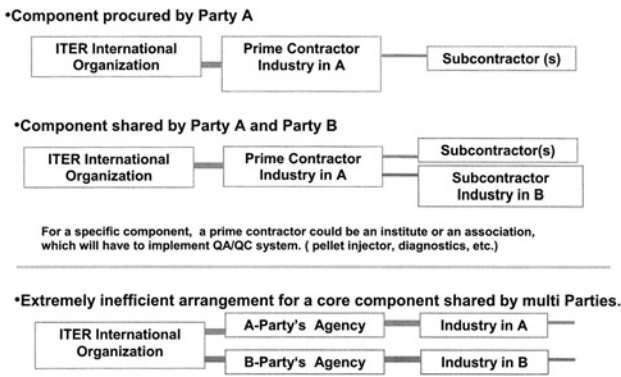


Fig. 6 Examples of relations between the ITER International Organization and suppliers.

例えば、真空容器は三極、トロイダル・コイルの製作は二極などである。この場合、Fig. 6 に示すように、ITER 機構—主契約会社—副契約会社（複数）という通常の形態がとれるシステムを保障しなければ、著しく製作が困難になるだろう。

長期に亘るプロジェクト及び専門家の不足

EDA の協定に基づき、設計および R&D を開始してからすでに12年以上経過した。建設地がすぐに決定されとしても建設完了までにはさらに11年必要である (Fig. 4)。このように長期間に亘るため、多くの経験者が定年を迎え、プロジェクトを去っていく現実を直視しなければならない。早急に若い世代を投入し、技術継承をする必要がある。また、大型核融合装置の建設経験者もどんどん減少している。したがって、専門家の分散は極力避けるべきである。例えば、具体的にはトカマクの本体およびその周辺のシステムの専門家は ITER 国際研究機構に集結する。つまり、ITER 国際研究機構と極内機構 (Domestic Agency) に分散しないことが必要であろう。一方、他の系とのインターフェースが比較的簡単で特殊な技術を必要とする系 (例えば、ペレット入射装置) であり、なおかつその専門家がある研究所または企業に集中している場合はこれを強化し、そこを主契約者として等が考えられる。したがって、専門家は ITER 国際研究機構か主契約者に集中すべきであろう。この観点から、極内機構は補助的な役割に徹すべきであろう。しかし、この考え方は必ずしも全極の支持を得ているわけではない。

ITER 機構長に機構メンバーの選択権、機構運営権を完全に与えるべきである。ポストの割合等に関して各極間の合意を反映するにしても、人選は、機構長に任せることが、ITER 計画の成功の重要な鍵となる。上級役職者に対しても、この原則は適用することが当然と思われるが、この考え方も必ずしも全極の支持を得ているわけではない。

3.2 コンフィギュレーションおよびドキュメント管理

信頼性の高い、誤りの少ない装置を作り、運転するためには、適切なコンフィギュレーション管理及びドキュメント管理が不可欠である。これらを実行するために、以下のシステムを導入し、日常の設計活動において利用している。

- Technical Coordination Meeting (TCM)

国際チームリーダーを議長とする決定機関。

- Design Integration/ Drawing Office (DIDO) Meeting
ガルヒンクおよび那珂でそれぞれ頻繁に開催する。作業の進行状況の把握。
- Design Work Order, Design Change Order 等
- CATIA V5 および Virtual product data management (ENOVIA VPM)
- ITER Document Management (IDM)

4. 政府間協議と核融合開発の協力拡大

政府間協議は2001年に開始され、以下の項目の検討がなされた。最初の3件についてはその内容についてはほぼ合意案が得られた。しかし、その他の2件については、いまだ合意が得られていない。

- 建設・運転・実験・廃炉に関する協定 (ITER 協定)
- 物品調達の手配と調達方法
- プロジェクト運営
- ITER 建設サイト
- ITER 国際研究機構長等の人事

4.1 協定および関連合意事項

協定書案、付帯書、及び関連合意事項 (ITER 国際研究機構の構成・運営・人事規則、物品調達方式、知的所有権等) が詳細に検討され、それぞれの内容はほぼ合意されている。機構長が指名されれば、短期間のうちに、これらの内容の詰めが行なわれ、合意されると考えられる。

4.2 費用分担と調達分担

建設費 (約5千億円) の分担に関しては、中国、韓国、ロシア、米国が10%ずつ、合計40%を分担する。残りは EU と日本で分担することが合意されている。誘致極40~45%、非誘致極20~15%の分担が想定されていた。この場合、建屋など誘致極でしか分担できない部分 (20~25%) を除くと、両極の分担はほぼ20%程度で他の4極に比べてほぼ約2倍の分担と権限を持つことが想定されていた。しかし、ITER 建設サイトを両極は強く希望しているため、自極内に建設サイトが決定した場合に50%まで分担する用意があるとしている。

建設費用分担の約10%は資金として ITER 国際研究機構に納め、90%はそれぞれの極内で調達し、物納するというのが基本的な考え方である。この考えは、自極内の経済活動に分担費の大部分を還元すること、鍵となる技術を各極内の企業に残したいとの強い希望からきている。全体の80%程度の調達については、分担案がほぼ合意されている。分担案ができたことにより、各極内での調達の下準備が進められるようになった。しかし、EU と日本の分担比率が当初の予想と大幅に変わってきている。また、誘致極の分担分の中からある程度の部分を非誘致極で調達することが提案されている。したがって、現状に合った、より合理的な分担を行うために EU と日本の分担比が決定した時点で調整が必要となるだろう。

4.3 ITER 国際研究機構と構成員

ITER 国際研究機構の適正な構成員と運営が ITER 計画の成功に不可欠であるのは言うまでもない。初期の数年間

については、計画に対する不安や、ITER 計画の実態を知らないことなどによって、有能な人材を短期間に集めることは容易ではないだろう。従って、機構長には十分な力と自由度を与えるとともに、各極は質の高い候補者を提供することが重要である。機構の構成員は、機構の直接雇用者と各極からの派遣員からなると考えられるが、いずれの構成員の延長、昇格などの人事権は当然機構長に属さなければならない。物品調達においても同様の権限を機構長が有するべきであることは当然であろう。また物品調達が参加極全体に分散するため、参加極のそれぞれ、ITER 国際研究機構の支部が必要となる。

4.4 核融合計画の協力分野の拡大

核融合開発を統合的に進めるため、また ITER の建設地の合意を得やすくするために、非誘致極に ITER 関連施設や、他の研究施設を建設する案が考えられている。それらの候補は以下の通りである。これらのために、EU 及び、日本は誘致極になった場合、他の極に ITER 建設費の約 8% 程度に相当する額を投資する用意があるとされている。

- ITER 遠隔研究実験センター

ITER の計算機モデルの開発および遠隔実験のためのセンター

- 次世代核融合炉の設計センター
- サテライト・トカマク
- 14MeV 中性子照射設備 (IFMIF)

5. 終わりに

ITER 建設にむけた技術的準備は順調に進んでいるが、ITER の技術者・専門家の不足、高齢化を考慮に入れて、さらに慎重な準備が ITER 計画の成功のため必要である。ITER 建設地の選定をめぐってこう着状態が 2003 年 12 月から続いている。ITER にとどまらず、広い協力が EU と日本の間で具体的に提案されるようになってきた。ITER 候補

地決定と同時に、これらの多くの協力が開始できれば核融合開発にとって極めて望ましい。しかし、EU と日本がそれぞれの ITER 建設地に固執するあまり、決定が遅れ、協力の精神が失われていくとすると、核融合開発にとっては、致命傷となりかねない。EU または日本のいずれかが、ITER 建設地を譲れば、少ない分担で多大の利益を得るのは明らかである。にもかかわらず、いずれも建設地に固執するのは合理的ではない。この点について、両極の研究者が真剣に考え、率直な意見を表明することが望まれる。

6. Acknowledgement

This report was prepared as an account of work undertaken within the frame of ITER Transitional Activities (ITA). These are conducted by the Participants: the European Atomic Energy Community, Japan, the People's Republic of China, the Republic of Korea, the Russian Federation, and the United States of America, under the auspices of the International Atomic Energy Agency. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the Participants to the ITA, the IAEA or any agency thereof. Dissemination of the information in this paper is governed by the applicable terms of the former ITER EDA Agreement.

参考文献

- [1] Y. Shimomura, 20th IAEA Fusion Energy Conference, Vilamoura, 2004, IAEA Vienna, FPM/3 Y.S (2004).
- [2] ITER Technical Basis, ITER EDA Documentation Series No. 24, IAEA Vienna, (2002).
- [3] 特集 ITER 工学設計, プラズマ・核融合学会誌 78, Supplement (2002).
- [4] Y. Shimomura (Editor), "ITER Technology R&D", Fusion Eng. Des. 55, 97 (2001).