

SPECIAL REPORT

Fusion dreams delayed

International partners are likely to scale back the first version of the ITER reactor. **Geoff Brumfiel** reports.

ST PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

ITER — a multi-billion-euro international experiment boldly aiming to prove atomic fusion as a power source — will initially be far less ambitious than physicists had hoped, *Nature* has learned.

Faced with ballooning costs and growing delays, ITER's seven partners are likely to build only a skeletal version of the device at first. The project's governing council said last June that the machine should turn on in 2018; the stripped-down version could allow that to happen (see *Nature* 453, 829; 2008). But the first experiments capable of validating fusion for power would not come until the end of 2025, five years later than the date set when the ITER agreement was signed in 2006.

The new scheme, known as 'Scenario 1' to ITER insiders, will be discussed on 17–18 June in Mito, Japan, at a council meeting that will include representatives from all seven members: the European Union (EU), Japan, South Korea, Russia, the United States, China and India. It is expected to be approved at a council meeting in November.

Indeed, the plan is perhaps the only way forward. Construction costs are likely to double from the €5-billion (US\$7-billion) estimate provided by the project in 2006, as a result of rises in the price of raw materials, gaps in the original design, and an unanticipated increase in staffing to manage procurement. The cost of ITER's operations phase, another €5 billion over 20 years, may also rise.

In fact, the ultimate cost of ITER may never be known.

Because 90% of the project will be managed directly by individual member states, the central organization has no way of gauging how much is being spent, says Norbert Holtkamp, ITER's principal deputy director-general. "They won't even tell us," he says. "And that's OK with me."

Holtkamp says that the only way to get ITER built is to do the skeletal version first. Before scaling up to do energy-producing experiments, he says, "you really need to know whether the major components work. It's absolutely clear that this is the right approach." As to why Scenario 1 is being touted only now, Holtkamp says it took him time after joining the project to review the original schedule.

Fusion researchers say that Scenario 1 is

"Building ITER is like building the space station, but having to set up NASA and ESA in the process."

A 180-hectare stretch of land has already been cleared for ITER.

preferable to the alternative: a permanent smaller machine that would never produce significant amounts of power. "You can't build a half ITER because then you'll just go on and on not quite knowing what the answer is," says Steven Cowley, director of the UK Atomic Energy Authority's fusion laboratory at Culham.

The project's rising price and lengthening schedule have angered some of ITER's members, who plan to finalize the schedule and budget by the end of this year. "People are pissed off," says a source close to the negotiations who requested anonymity because of political sensitivity.

ITER is the most ambitious fusion experiment ever proposed. At its heart is a doughnut-shaped device known as a tokamak (see graphic), which uses magnetic fields to squeeze and heat hydrogen isotopes to hundreds of millions of kelvins, until they fuse. The consequent fusion reactions release high-energy neutrons that can, in principle, be harnessed to generate electricity. Normal hydrogen will not generate enough fusion events to produce large amounts of power, but when scientists inject deuterium and radioactive tritium into the machine, it should generate roughly 500 megawatts of thermal power — around 10 times the amount of power needed to run it. Such an achievement would be long-sought proof that fusion

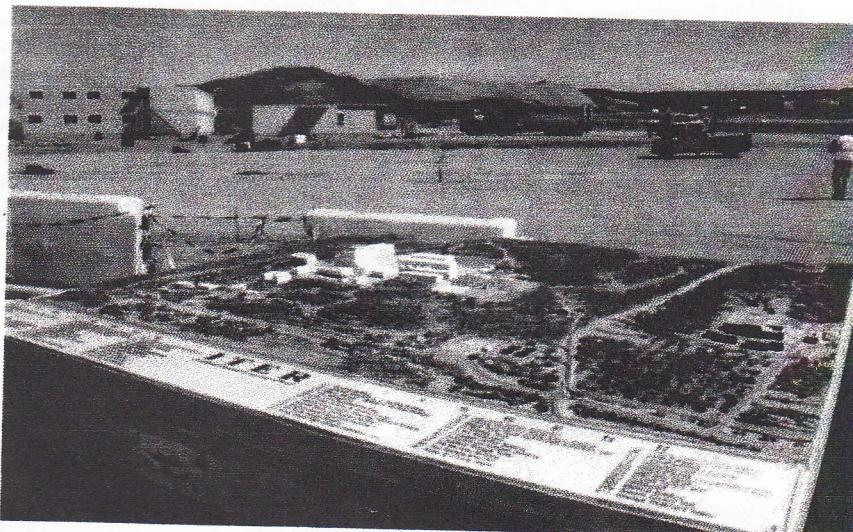
power can work, although a commercial reactor would still be decades away.

The machine's costs have doubled once before. Budgeted at US\$6 billion in 1989, cost climbed to nearly twice that during the decade that followed. Angered, the US Congress withdrew the country from the project in 1999. The remaining partners — Europe, Russia and Japan — pressed ahead to redesign the machine to keep it within \$6 billion.

Design scaled back

The redesign fell to Robert Aymar, a prominent French physicist who had overseen the French tokamak Tore Supra, in Cadarache. Aymar redesigned the entire device in just three years with a staff of 70 — half the size of the original design team. In addition to shrinking ITER to its present-day size, the team made other money-saving assumptions. The new design did not include the cost for auxiliary equipment and some spare parts, and it assumed that some buildings could be reused multiple times. The design was accepted by ITER's partners in 2001 as a way to keep within the \$6-billion price tag, and used as a baseline when the United States rejoined and India, South Korea and China joined the project.

Aymar maintains that his redesign was never meant as a final blueprint for the machine, but to act as a guideline for ITER's members to decide who would contribute which portion. It did not





UNEXPECTED ACTIVITY
Old antibodies may protect elderly from swine flu.
www.nature.com/news

AM/IMAGES

assign costs to the values of various components, but used 'ITER units of account' to allow nations to negotiate which parts they would provide as their share. "What we provided was not a cost," he says. "We provided a value."

Some ITER partners say Aymar's design contained an appropriate level of detail. "It was a conceptual design," says Octavi Quintana Trias, director for energy at the European nuclear research organization Euratom, and an EU representative on the ITER council. "You will not develop and refine the design until you have a real commitment to go ahead."

But some US officials see things differently. "We thought that it was 80% designed and that you only had 20% to fill in, and it turned out to be more like 40%," says Raymond Orbach, former head of science at the US Department of Energy and until this year a US representative on the ITER council.

When the project was approved in 2006, the newly formed ITER organization set to work reviewing and completing Aymar's 2001 design, adding parts that included a set of superconducting magnets to control a type of instability not anticipated in the earlier design. The adjustments have cost time and money.

Agencies in the seven member governments are also struggling to set up the complex network that will eventually supply ITER with

parts. Although the specifications for each piece can be set by the central lab, it is individual governments that will award contracts to industry and oversee production.

Who provides what is detailed through a series of procurement agreements, which have been slow in coming: 26 were originally scheduled to be ready by the end of 2008, but as of late May this year, only 17 had been signed. The delay is in part due to setting up domestic organizations that will award the contracts, says Niek Lopes Cardozo, vice-chairman of Fusion for Energy, the Barcelona-based body overseeing contracts to European industry. "Building ITER is like building the space station, but having to set up NASA and ESA [the European Space Agency] in the process."

During negotiations, each nation bargained for a stake in the most technically sophisticated parts of the machine, and, as a result, single components will be built with parts from several nations. For example, the 150,000 kilometres of superconducting wire for the

magnetic coils will be produced in China, Japan, Russia, Korea, the EU and the United States.

Awarding contracts, setting up production lines and ensuring quality control across the seven partners will also require significantly more manpower than anticipated in 2001,

when there were only three member states. Holtkamp says that the central project office will need up to 750 staff to do the job — a 25% increase over the original plan.

Nations could bring down the cost of the machine by swapping procurement agreements and consolidating production, but that's not politically realistic, says Kaname Ikeda, ITER's director-general. "The first objective is [for members] to get the experience of designing, fabricating and operating this machine," he says. Akeda adds that most seem willing to live with the cost increase, so long as they gain the knowledge needed to build a power-producing fusion reactor.

Member governments are preparing to shoulder the increase. Last year, the United States upped the estimated cost of its contribution to \$2.2 billion — double the preliminary price. The EU, meanwhile, is grappling with increased spending to complete the buildings for the project. We are "trying to get rid of everything that is not indispensable," says Trias. "Each country has its own internal problems," adds Evgeny Velikhov, a Russian representative on the ITER council, although he adds that "Russia does not see any problem in fulfilling its obligation".

Those close to the project now see Scenario 1 as the only practical way forward. Under the plan, the reactor would initially be built without several crucial and expensive components, including an inner shielding wall and test bed for new materials such as lithium blankets that generate tritium for the machine, along with the divertor, a series of tiles at the bottom of the tokamak that shunts heat safely out of the device. Also gone will be expensive accelerators to pump neutral beams of fuel into the machine, and some radio-frequency devices designed to further heat the plasma. Without these components, ITER can handle only plasmas of hydrogen, not deuterium or tritium.

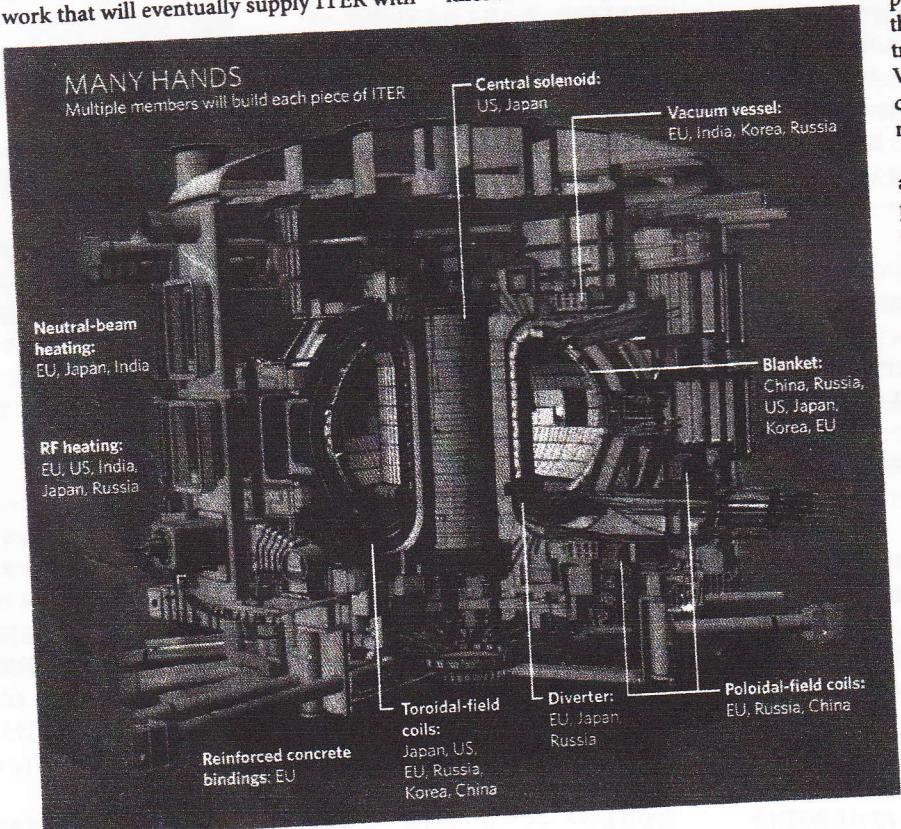
The plan would allow scientists and engineers to ensure that ITER works long before it is injected with tritium — a process that will make large sections of the machine inaccessible. "They want to see success at the end, and the way to success is this road," says Holtkamp. "There really is no other one."

Additional reporting by David Cyranoski

INTERNATIONAL CONTRIBUTOR TO ITER



ITER



遠退く核融合の夢

国際的なパートナーたちは ITER 核融合炉の初期段階での規模を縮小するものと見られている。

ITER-エネルギー源としての核融合を実証することを目的としたを数十億ユーロ規模の国際的実験炉は、初期段階的としては物理学者たちが最初に期待していたよりも遙かに野心的ではないものになることが分かった。

膨れ上がる費用と度重なる遅れに直面しながら、ITER の貢献国である 7 極は、まず最初に装置の骨格から建設し始めたようだ。昨年の 7 月、プロジェクトの理事会は、装置は 2018 年に稼動させるべきであると発表した；必要最小限のものだけを装備した装置であれば、それは可能であると考えられた (Nature 453, 829; 2008 参照)。しかし、エネルギーとしての核融合の実証のための最初の実験は 2025 年の終わりまで実現することはないであろう。これは 2006 年に ITER 協定が締結された際に設定された期日より 5 年も遅れることになる。

ITER 関係者たちの間で「シナリオ 1」として知られている新しい計画が、参加 7 極 (EU、日本、韓国、ロシア、米国、中国およびインド) 全ての代表を交えて、6 月 17-18 日に茨城県水戸市にて開催される協議会で議論される。この計画は、11 月に行われる理事会にて承認されることが期待されている。

実際のところ、そのシナリオは計画を進めるための唯一の方策であろう。建設費用は 2006 年にプロジェクトによって提示された 50 億ユーロ (70 億 US ドル) の二倍に膨れ上がると予想される；これは原料の価格高騰、当初の設計との差異、および調達を管理するための人材の予想外の増員が原因となっている。ITER の運用段階における費用（別途、20 年間で 50 億ユーロ）も上昇する可能性がある。

実際、ITER にかかる最終的な費用は予想がつかない。ITER の首席副機構長であるノルベルト・ホルトカンプ博士は次のように述べた。「プロジェクトの 90% が個々の参加極によって直接管理されており、中央組織にはどのくらいの費用が使われているのかを判断する手段がない。そして、彼らも決して我々に話そうとはしない。しかし、それでも私は構わない。」

「ITER を建設するためには、まず骨格を作らなければならない」と、ホルトカンプ博士は続けた。「エネルギー生産の実験へと展開する前に、主要機器が実際に動くかどうか

かを確認することが必要なのです。これが最も適切な手段であることは明らかです。」なぜ今、シナリオ 1 が推し進められているかということについて、ホルトカンプ博士は「私がプロジェクトに参加してから当初の工程を見直すのに時間がかかったのです」と答えた。

核融合の研究者たちは、相当量のエネルギーを生産することのできない恒久的な小型装置とする代替案よりも、シナリオ 1 の方が望ましいと口にする。「半分のサイズの ITER を建設することはできません。なぜなら、そのまま続ければはっきりとは答えを見つけられないからです」と、イギリス原子力公社のカラム核融合研究所ステイプル・カウリー所長は言った。

プロジェクト費用の高騰と期間の延長は、計画や予算を年末までにまとめようとしている ITER のメンバーたちを苛立たせている。「みんなうんざりしていますよ」と、政治的感覚からあえて匿名を希望した、交渉に近い人物は言った。

ITER はかつて提案された核融合実験の中でも最も野心的なものである。その中心部はトカマク（図参照）として知られるドーナツ型の装置であり、磁場を用いて水素同位体を閉じ込め、核融合するまで何億度という高熱にまで加熱する。その結果生じる核融合反応は、原理上、電力を発生するために利用出来る高エネルギー中性子を放出する。通常の水素では大電力を生成するための十分な核融合反応を引起させることはできないが、重水素と放射性三重水素を装置に注入することにより、熱出力約 500 メガワット—その装置を運転するために必要な電力の約 10 倍—を生成することが出来るとされている。それを達成することは、実用炉の実現は数十年先のことであるとしても、長年の目標である核融合エネルギー実現の証となる。

装置に係わる費用はかつての二倍となっている。1989 年に 60 億ドルで計上された予算は、その後十年間の間で約二倍にまで跳ね上がった。そのことに連邦議会は怒りを表し 1999 年に米国を ITER 計画より離脱させた。その他の参加極—ヨーロッパ、ロシアおよび日本は 60 億ドル内で収まるよう、再設計を推し進めた。

小型化設計

再設計はロバート・エマール博士—フランスのトカマク装置、トール・スープラ（カダラッシュ）を指揮したフランスの著名な物理学者—に託された。エマール博士は、初期の設計チームの半分の人員である 70 人のスタッフと共にわずか 3 年で装置全体を再設計した。ITER を現在の大きさまで小型化

することに加え、費用削減の前提を設定した。新しい設計では、付属機器および予備部品の費用を計算から外し、幾つかの建屋は複数回使用することとした。その設計は、60 億ドル内で収めるための手段として、2001 年に ITER 計画参加極に承認され、米国が再参加を表明し、そしてインド、韓国および中国が計画に加わった際に、ベースラインとして用いられた。

エマール博士は、この再設計されたものは最終的な装置の青写真ではなく、ITER 参加極のどの国が、どの部分に貢献するかを決めるためのガイドラインとしての役割を果たすものであると主張する。これは、様々な機器の価値に費用を割り当てるものではなく、参加極がそれぞれの貢献分として、どの機器を提供するかを交渉するために用いる「ITER 価額」を表している。「私たちが規定したものは費用ではなく、一種の価値です。」と、エマール博士は続けた。

一部の ITER 計画参加極は、エマール博士の設計が適切なレベルで細部にも踏み込んでいると言う。「あれは概念設計です」と、欧洲委員会研究総局エネルギー局長であり、ITER 理事会の欧洲代表であるオクタビ・キンタナ・トリアスは言う。「先に進めてよい」という確約を得るまで、設計を進めたり、改良したりすることはありません。」

しかし米国の一の当局者は異なる見解を示している。“我々は、設計の 80% は既に済んでおり、残りの 20% の設計を行なうだけであると考えたが、それが 40% 以上であるということが判明した。”と米国エネルギー省の前科学課長であり、今年まで ITER 理事会の米国代表を務めるレイモンド・オーバック博士は言った。

2006 年に計画が承認された際に新しく設立された ITER 機構は、2001 年のエマール博士の設計をレビューし完成させるため、初期の設計段階では予想されていなかったある種の不安定性を制御するための超伝導コイルを含むいくつかの部品を取り入れて、本格的に活動を開始した。その調整には時間と費用が必要である。

参加 7 極の政府機関も、ITER に将来機器を提供するための複雑なネットワークを構築するために奮闘している。それぞれの機器の仕様は ITER 機構が決定するが、産業界と契約を結び製造を監督するのは個々の政府機関となる。

どの国が何に貢献するかは一連の調達取決めに詳述されているが、これらは提出が遅れている。本来、2008 年の終わりには 26 件の調達取決めが準備されている予定であったが、2009 年 5 月現在、17 件だけが締結されている。

この遅れは、契約を締結する各極内の組織立ち上げによるところがある、と欧州産業界との契約を監督するバルセロナにある核融合エネルギーの副議長である Niek Lopes Cardozo は言う。“ITER を建設することは宇宙ステーションを建設するようなものであるが、今まさに NASA や ESA (欧州宇宙機関) を立ち上げているようなものだ。”

交渉において、各極は装置に用いられる最も技術的に高度な部品に関する分担の話し合いを行い、その結果、単一の構成機器は複数の極から提供される部品により構成されることになる。その例として、磁場コイルに使われる 150,000 キロメートルの超伝導線は中国、日本、ロシア、韓国、欧州および米国で生産されることになる。

契約の締結、製造ラインの設置、そして 7 極に渡る品質管理を確保するため、3 極のみが参加していた 2001 年に想定されたよりも多くの人的資源が必要となる。ホルトカンプ博士は、ITER 機構がこれらの仕事を行うための人員を 750 人にまで増やす必要があると言う—これは、当初の計画よりも 25% 増となる。

各極は調達取決めの交換や生産統合により費用削減を図ることは出来たはずであるが、それは政治的な観点からすると現実的ではなかったと、ITER 機構長の池田氏は言う。

「各極にとって第一の目的は装置の設計、製作そして運転の経験を得ることにある」と池田氏は言い、「エネルギーを生産する核融合炉建設のために必要な知識を得られるのであれば、ほとんどの極は費用の負担増を進んで受け入れるようだ」と続けた。

各極政府機関は、増大する費用負担の準備を進めている。昨年、米国は自国の貢献にかかる予算を 22 億ドルまで引き上げた—これは当初予定していた金額の二倍にあたる。一方で欧州は、ITER 計画のための建屋の建設に係わる費用増大の問題に取り組んでいる。「私たちは現在必要でないものを排除する努力をしているところです」とトリアス博士は言う。「各極ともそれぞれ、自国の問題を抱えている」と、ITER 理事会のロシア代表であるエフゲニ・ベリホフ氏はそう言いながらも、「しかし、ロシアには自国の責務を果たす上での問題は何もない」と続けた。

ITER 計画に近い立場にいるこれらの人々は、シナリオ 1 が計画を前に進めるための現実的な唯一の手段であると見ている。この計画の下、核融合炉は最初の段階として、幾つかの重要かつ高価な機器を除いたうえで建設されるとみられる。これらの除外される機器には炉内遮蔽壁、トリチウムを発生させるリチウムブランケットのような新し

い材料開発のための試験機器、ダイバータに沿ってトカマクの底に設置される熱を安全に装置外に取り出すためのタイルなどが含まれる。また、燃料を装置に供給する中性粒子ビームのための高価な加速器や、プラズマをさらに加熱するために設計されたいくつかの高周波機器も先送りされると見られている。これらの機器なしには、ITER は軽水素のプラズマしか取扱うことが出来ず、重水素やトリチウムのプラズマを取扱うことは出来ない。

この計画により、ITER にトリチウムを入射する段階—これによって装置が広範囲に渡って立ち入り禁止となる—に至る前に、科学者と技術者たちは、ITER が確実に稼働するということを確認することができる。「皆が成功を願っているのです。そして成功するためにはこの方法しかありません」と、ホルトカンプ博士は言った。「他に道はないのです。」

David Cyranoski による追加の報告 483 ページの論説参照。