

連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

第12回 核融合炉実現に向けて

核融合研究開発の将来像

電力中央研究所 岡野 邦彦，

日本原子力研究開発機構 栗原 研一，飛田 健次



・核融合炉の燃料って本当に無尽蔵なの？

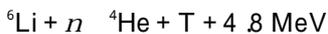
1. はじめに

12回にわたって連載してきた本講座も今回が最終回です。本章では、核融合炉が実現したら本当にたくさんのエネルギーを供給できるのか、実現するためにどのような計画があるのか、などをご紹介しますことにしましょう。まずは資源量の確認からです。

太陽の内部で起こっている水素(H)の核融合反応は発生率(反応の断面積)が小さいために核融合炉に使うことは困難です。そこで、第一世代の核融合炉を地上で実現するには一番反応率が高く、低温で(といっても1億度)で反応が起こるDT反応を用いることは第 1 章(2004年12月号)で説明しました。もう一度、その反応式を書いておくと、



ここで、Dは重水素、Tは三重水素、nは中性子です。そして実はTは地上にはほとんど存在しないので、上記の反応で発生する中性子をリチウム(Li)に吸収させることにより、核融合炉のブランケット内で自己増殖することになります。その反応式は以下のようになります。



結局、DT燃料を用いた核融合炉の真の燃料資源は、DとLiということになります。まず、それらが地上でどれくらい手に入るかとその製造方法を考

えましょう。

2. 重水素はどうやってつくるのですか

DT燃料を使った電気出力100万kW級の核融合炉では、発電の熱効率を1/3として、1日で約200gのDが必要になります。水は水素(H)と酸素(O)からできているわけですが、地球上の水(主に海水)のなかにある水素同位体の約150ppmがDです。地球の海全体では約48兆トンにもなります。Dは事実上、海水の中に無尽蔵といってい良いでしょう。

D資源についてよく誤解があるのは、その製造方法のほうかもしれません。とくによくある誤解は、「水を電気分解してからHとDを同位体分離するので、Dの製造には電解で大量のエネルギーが必要である」というものです。これを「核融合が正味のエネルギーを生み出せない致命的理由」としてあげている例は、インターネットを検索するといまでも出てきますが、これはまったくの誤解です。

Dをたったの150ppmしか含まれない水を全部電気分解などしていたら、エネルギー技術として非効率で成立しないのは当然です。Dを大量生産する場合の製造プロセスでは、そんなことはしないのです。HとDは2倍も重さや大きさが異なるために、それらを含む水分子は、含まれるのが普通のHかDかで、化学的性質がわずかですが異なります。その違い(同位体効果)を利用した化学交換反応で、Hでできた普通の水(軽水)とDでできた重水を分離します。この化学交換法は、2つの化合物の間での水素同位体の分配が異なることを利用するもので、反応によっては分離係数はとても大きく、しかも平衡反応であるためエネルギー消費が非常に少なく済みます。世界にはすでに数多くの重水製造プラントがありますが、中でも重水冷却の核分裂炉CANDUを有するカナダが圧倒的に生産量が多

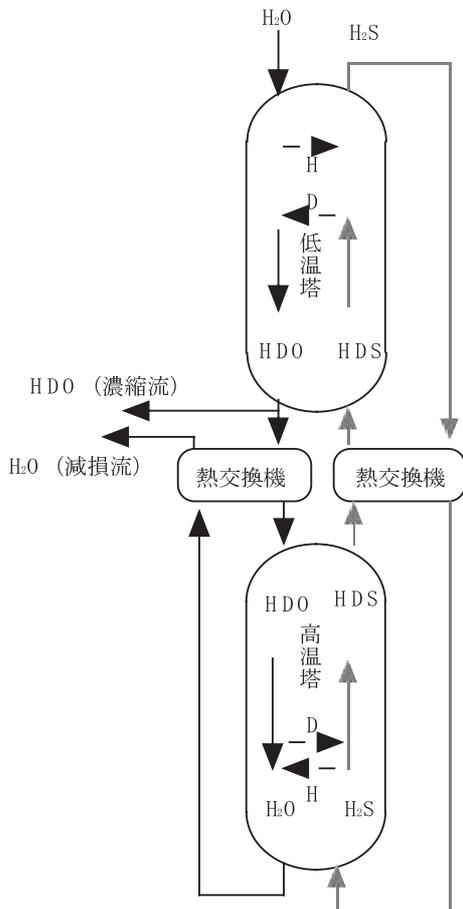
Intelligible Seminar on Fusion Reactors (12) Next Step toward the Realization of Fusion Reactors Future Vision of Fusion Energy Research and Development: Kunihiko OKANO, Kenichi KURIHARA, Kenji TOBITA.

(2005年12月27日 受理)

く、製造法として化学交換法の一つであるGS法(水-硫化水素二重温度交換法)が用いられています。その生産力は、現在のカナダの製造能力のみで100万kW級核融合炉約1万基分のD製造が可能です。すなわち、核融合燃料用Dの製造は、現在すでに工業化されている技術です。

第1図にGS法の原理を示します¹⁾。水-硫化水素(H₂S)の同位体交換反応、H₂O(液体)+HDS(ガス)=HDO(液体)+H₂(ガス)の平衡定数は30で約22,140で約1.7です。硫化水素は高温塔で水(Dを含む)からDを得ます。一方、低温塔上部より水を供給し、下部より高温塔からの硫化水素ガスを流通して向流接触することで、水は硫化水素(Dを含む)からDを得て濃縮流として取り出され、一部は高温塔へ供給されます。重水はこの循環で濃縮されていくわけです。実際にはこのプロセスで数段のカスケードを組んで重水を濃縮し、さらに水蒸留により99.8%重水を得ることができます。

濃縮された重水からDを得るには電気分解をしますが、この場合は軽水素までまとめて無駄に電気



第1図 GS法(水-硫化水素二重温度交換法)による重水生産の原理¹⁾

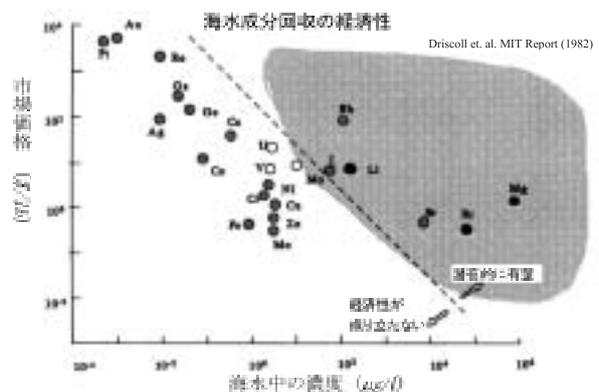
分解するわけではないので、その化学エネルギーはDから生み出される核融合エネルギーとは比較にならないほど小さなものなのはいまでもありません。

3. Liの資源は十分ですか

Li電池など、現在も身近で利用されているLiですが、そのほとんどすべてはLi鉱山から得られたものです。すでに知られている埋蔵量は940万トン、そのうち経済的な産出が可能な範囲での埋蔵量は370万トンと考えられています。100万kWの核融合炉で年間に使用するLiの量は約10トン程度です²⁾。利用可能な資源が上記の370万トンとするなら、1,000基の核融合炉370年分となり、Dのように「実質的に無尽蔵」には思えません。しかし、実はこのLiも海水中にたくさんあり、かつ経済的な回収が可能とされる資源なのです。

海水中には様々な元素が溶け込んでいて、とくにLiは170ppbと比較的濃度が高く、海水中のLi総資源量は2,330億トンです。海水中濃度と市場価格を比較して、海水からの回収が経済的に有望な鉱物であるかどうかの検討がマサチューセッツ大学のドリスコル(Driscoll)によってなされています。その結果を図示すると第2図のようになります²⁾。各種海水成分のうち、図中の点線より右にある物質、ルビジウム(Rb)、ヨード(I)、Li、ストロンチウム(Sr)、ブロム(Br)、マグネシウム(Mg)などが海水から回収しても経済性が成り立つ可能性がある物質で、Liは現状の市場価格と比較してもその利用が有望な海水中資源のひとつといえます。

Li回収技術については、四国工業技術院における結果³⁾では、Liだけを選択的に吸着する結晶を利用したイオンふるい結晶法によって10⁵cm³/gの高



第2図 海水から回収した場合の経済性の検討結果²⁾

い濃縮係数が実現されています(濃縮係数 = 吸着量/海水中の濃度)。これから予想される採取コストは、現在のLiの市場価格(400円/kg-Li₂O₃)の2倍弱にあたります。最近ではLiイオン電池などでLiの需要が大きく伸びていることから、海水Li回収の工業化もすでに議論されはじめています。また、Liを海水から回収するために海水を汲みあげるプラントを別途作るようなことをしなくても、たとえば、核融合発電所の温排水からLiを回収することを考えると、1基の100万kWプラントの温排水だけでも年間約230トンのLiが回収できると試算されています。この量は核融合炉1基の年間Li消費量の20倍以上になります。

このようにLiについても海水中の資源量を利用すると考えれば、DT核融合炉のLi資源量は、1,000基核融合炉を2,300万年運用もできる量になります。ちなみに、現在の世界の電力需要のすべてをまかなうのに必要な電源は、1基が100万kWとして約1,500基です。つまり、Dと同様にLi資源の観点でも、核融合炉の燃料資源量は実質的に無尽蔵といえるのです。

・燃料以外の資源で足りなくなるものはないのですか

核融合炉の燃料資源が無尽蔵ならば、核融合炉を現実に建設するのに必要な燃料以外の特殊材料が制約にならないかが気になってしまいます。その点についても現在の解析結果を紹介しておきましょう。

最新の調査^{2,4)}によれば、核融合炉の材料のうちで資源量が問題と予想されている主たる材料は、ニオブ(Nb, 超電導コイル用)、ベリリウム(Be, トリチウムの増殖率をあげるための中性子増倍材用)、バナジウム(V, 低放射化の構造材料)が挙げられます。その現在知られている資源の量を、先ほどと同様に、100万kWの核融合炉1,000基を運用するとして考えると、Nbが約600年分、Beで約650年分、Vで340年分という数字になります。これはかなり少ないと思えます。ただし、これらの資源は、いずれも現在はあまりニーズのない資源であるために、既知の埋蔵量だけで将来を予想するのは非常に過小評価になります。つまり、まだ探鉱が十分に行われていないからです。

将来、利用できるはずの資源量まで予測するには、資源論的な検討が必要です。様々な物質の地殻

存在度は知られており、それと利用可能なるはずの資源量の上限というのは関連があることが知られています。それによれば、核融合で不足する可能性が指摘されている物質は、いずれも探鉱が進んでいない物質で、今後、大量に発見できることが示されています。発見可能と思われる上限で考えると、先ほどと同じ基準で書くと、Nbは7万年、Beも7万年、Vは4.5万年分となります。もちろん、これは発見可能と予測される量の上限ですが、核融合炉に必要な資源は、今後の探鉱によって少なくとも数千年にわたって確保することが可能と考えてもよいと思われ²⁾。

さらに今後の技術開発を考えますと、高温超伝導線であればNbは不要になります。中性子増倍材も、Beより資源が豊富な鉛という別の選択もあります。低放射化構造材候補のVも、将来にわたっていつまでも核融合炉の構造材として必須のではなく、別の材料、たとえば炭化シリコン系の複合材料(SiC-SiCコンポジット材)などが考えられています。すなわち、Nb、Be、Vのいずれも、核融合炉の死命を制する必須材料とはいえません。

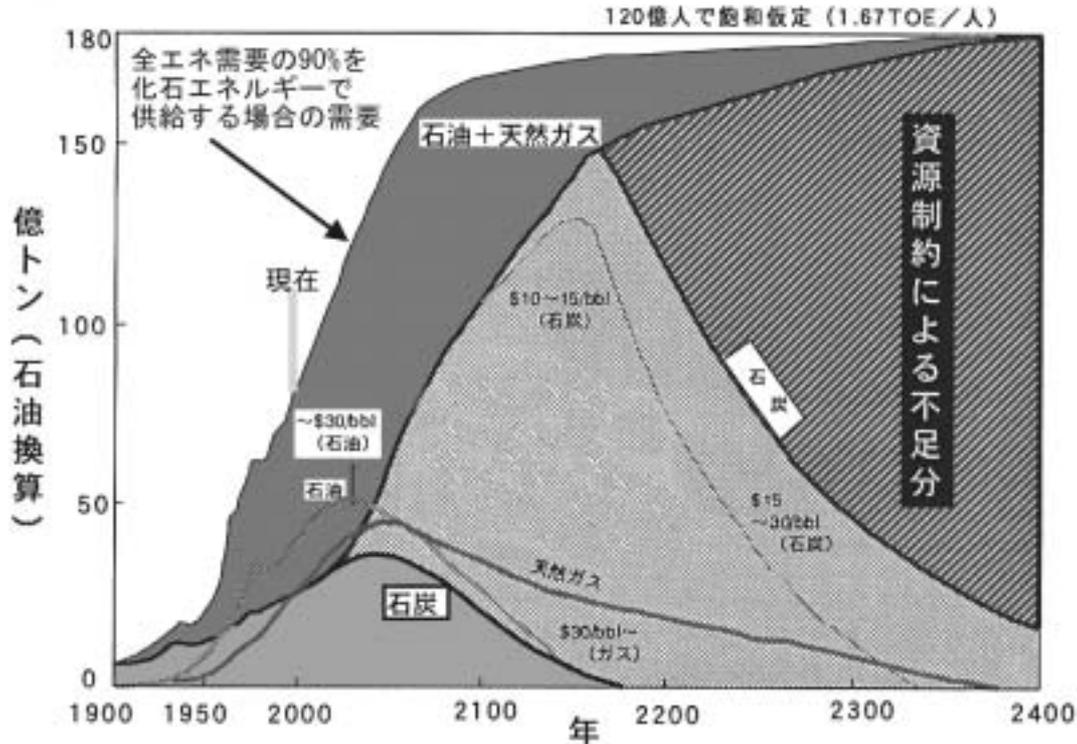
以上のようなことから、核融合炉は、技術的に実現さえできれば、そのエネルギー供給量に関しては実質的に無限と見ていいほどの量であるといっても科学的に間違っていないのです。

・核融合炉実現はどのような意味を持つのですか？

1. エネルギー・環境問題とは

核融合をはじめとするような新しいエネルギー源とその実用化のための新技術が、なぜ求められるのかから考えてみましょう。

新エネルギー源が求められるのは、現在のエネルギー資源が遠くないうちに枯渇するからである、という理解は正確ではありません。第3図は、人類が使用する全エネルギーの将来予測と、仮にそのエネルギーの90%を石油、天然ガス、石炭の化石燃料で賄うとした場合、どの程度の期間にわたりエネルギーを供給可能かを示した図です。石炭は膨大な埋蔵量があり、このような極端な仮定をしても、現行の10ドル/bbl以下の価格が15~30ドル/bblまで上昇することを許せば、実に22世紀後半まで不足しないということになってしまいます(注: bbl = バレル。本来は石油量の単位だが、ここでは石炭の石油

第3図 化石燃料のエネルギー供給可能量³⁾

TOEは石油換算トンといい、エネルギーを石油で生成した場合に必要な石油重量を表す。

換算量を表す)。それでも数百年という時間で考えれば、化石エネルギーは枯渇するとはいえましよう。しかし、それだけをもって、巨大な投資が必要な核融合エネルギーなどの開発を今の時点で急ぐ理由にするのは無理があるといえます。新エネルギー技術に求められる役割は、エネルギー枯渇への対応だけではありません。このまま化石エネルギーを使い続ければ、その枯渇よりずっと早い時期に地球環境問題で破綻が訪れると考えられているのです。

具体的に心配されているのは、CO₂の温暖化効果による気温上昇です。1995年のIPCC(気候変動に関する政府間パネル)は、様々な計算結果に基づいて、このままのペースでCO₂放出を続ければ、今後100年間の気温上昇は過去の1世紀を大きく超え、1.0~3.5程度に達すると予想しました。さらに2000年には1.4~5.8に達すると修正されています。このような気温上昇がもたらす影響はいろいろ考察されているのですが、もっとも定量化しやすいものとしてよく指摘されるのが海水面の上昇です。2.5の上昇で50~100cmの水位上昇が予測され、例えば、日本国内では砂浜の90%が消失、中国では35,000km²に影響が及ぶ、などといわれています。

しかし、このような水位変化は、ある朝起きてみ

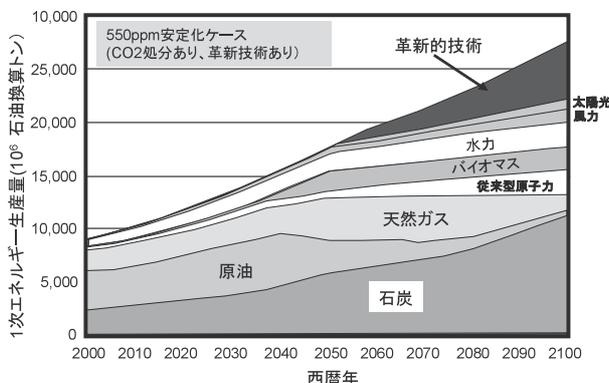
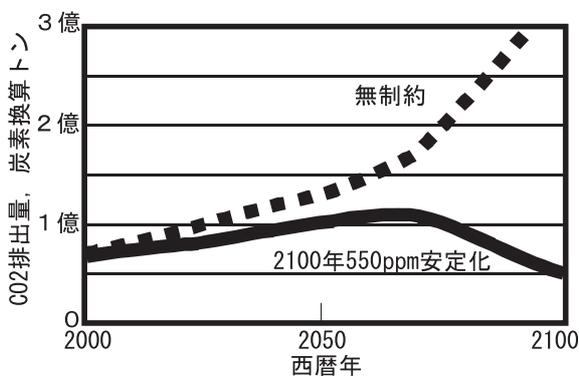
たら突然世界が水没しているわけではなく、100年かけてゆっくり起こるものです。本当に心配すべきは、現在の知見では予想しきれないカタストロフィックな気候の変化などではないでしょうか。わずかな気温の変化が大きな気候変化をもたらし、人類や生物の活動に大きな影響を及ぼす可能性があります。現時点では、気候に関連する災害の発生頻度が増加しているといった説の多くは統計的根拠が希薄なようですが⁶⁾、生物が数十億年かけて固定したCO₂を、人類はわずか数百年で大気に放出しようとしているのであり、これで地球環境に今後もなんの変化も起こらないと主張するのはむしろ不自然ではないでしょうか。

2. 新エネルギー技術になにが期待されるのでしょうか

上記のような問題意識のもと、「2100年においてのCO₂濃度が産業革命前の約2倍の550ppmとする」というのが、IPCCが1995年に示した実現可能なひとつの目標例でした。現実には人類は化石燃料に大きく依存しており、それを急に置換できる技術も未開発です。今後、少なくとも50年程度にわたり、CO₂排出は増大するのは恐らく避けられない。その

ような認識の上で実現ができそうなぎりぎりの選択をしたのが上記の目標なのです。ここでは当面、これを目標として受け入れるとして考えみましょう。

第4図は、NEDO/RITE(NEDO：新エネルギー・産業技術総合開発機構，RITE：地球環境産業技術研究機構)による地球再生計画において示されたCO₂排出削減シナリオの1例です。CO₂削減のための努力を特にししないケース(BAU: Business as usual)では、今後100年はコストで有利な石炭が圧倒的に増大し、2100年のCO₂排出量は2000年時点の6倍にも達してしまうかもしれません。これでは到底550 ppmの達成などできるはずはありません。図には「2100年に550 ppmにする」という規制をかけて展開したシナリオの例も示しました。このシナリオ例の概要は以下のようにいえます。まず、21世紀中頃まではどうしてもCO₂排出は増大します。しかし、2050年以後、石炭の急増を抑え、それらを再生可能エネルギーや「革新的技術」が置換することが期待されています。それによって、CO₂排出は2070年以後漸減し、2100年には2000年をやや下回る排出量にいたることで、550 ppmがやっと達成されます。



第4図 CO₂排出量と供給源内訳予測の例⁷⁾

上図の破線は成行き任せ(BAU)ケース，実線は2100年でCO₂濃度550 ppm安定化をめざす例。

下図は、550 ppm 制約をかけたシナリオの供給内訳例。

3. 核融合炉開発の意義とは

このようなシナリオが可能となるには、2050年頃までに投入が可能な革新的エネルギー技術の開発が望まれることになります。この革新的技術として寄与できないような新エネルギー技術は、現時点で大きな予算を使って開発することを正当化できるとは思えません。第4図の下図のとおり、新技術が導入されても、その瞬間から大量のエネルギーを供給できるわけではないことも忘れてはいけません。

したがって、核融合技術の開発の目標も、この2050年実用化というポイントに置かれていなければならないのです。もちろん、核融合は数百年後に化石燃料が枯渇するなら役に立つエネルギーとなるのですから、その意味での大きな価値は常にあります。しかし、それだけでは、現時点で大規模に開発を進める理由にはできないように思います。21世紀中のCO₂削減に寄与できる革新的エネルギー技術として開発されてこそ、現時点での開発が意義を持つことになるのです。少なくとも、核融合炉開発研究に携わる方々は、そのような意思と責任感をもって研究をしているはずで

・実験炉 ITER では、どこまで研究が進むのでしょうか？

この半世紀間にわたる核融合研究の成果により、トカマク型核融合炉がエネルギー発生装置の実現に最短距離にあるとの共通認識が形成され、いよいよITERにおいて本格的な核燃焼実験を行う段階を迎えています。ITERの使命は、炉心プラズマの構成粒子(D, トリチウム(T))が高温高密度条件下で活発に核融合反応を起し、反応生成物である α 粒子による加熱がそのプラズマの熱バランスを支える「自律的な状態」を長時間維持することです。具体的には、エネルギー増倍率が5以上となるプラズマの状態を1,000 s以上持続します。ITERの基本的設計パラメータは、世界の主要なトカマクの実験データに基づいて構築された比例則と呼ばれる経験則を基盤にして決定されており、その目標の実現可能性はほぼ100%に近いと考えられています⁸⁾。この使命を達成した後は、原型炉につながる先進的なプラズマ運転手法を開拓し、エネルギー増倍率の向上を図ることになります。このような先進プラズマ運転のための制御技術は既存のトカマク装置で盛んに研究されており、今から約10年後のITERの完成時期ま

ではある程度見通しが立ち、ITER での先進運転にヒントを与えることでしょう。

ITER のもう一つの重要な使命は炉工学技術の統合であり、比類のない磁気エネルギー(41GJ)を持つ超伝導コイルの安定な動作、核融合反応で生ずる高エネルギー粒子や熱の処理、テストブランケットでの T 増殖技術の試験、プラント内での大量 T の安全な循環など、原型炉につながる基盤技術を開発・実証します。高放射線量下におかれる炉内機器については、ロボットを利用して遠隔で交換・保守します。ITER の運転を通じて、このような炉工学技術のシステム統合と併せて、核融合燃焼を行う装置としての安全性実証が計画されています。

ところで、巨大なプラントである ITER での研究開発は、重要なミッション達成を優先目標に据えるだけでなく、参加極(=日本、EU、米国、ロシア、中国、韓国、インド)の合意の下で計画を練らざるを得ないため研究の機動性に欠けるというところに問題があります。そこで、ITER を補完しつつ機動的なプラズマ実験を可能にするトカマク装置の存在が研究戦略上重要になることは我が国の第3段階核融合研究開発基本計画に記載されているとおりです。この先進補完を目的とする研究装置は何かという問いに、最近ようやく一つの答えが示せるようになりました。ITER 建設サイトがEUの南フランスにあるカダラッシュ研究所に決定されたことを受けて、日本とEUとの間で「より幅広いアプローチ(Broader Approach)」と呼ばれる協力の約束がかわされ、この合意により日本にサテライトトカマクを設置することが盛り込まれました。このトカマクは、JT-60の既存インフラや本体部(コイル、真空容器等)以外の加熱装置、電源、計測制御装置等を活用し、磁場コイルを超伝導化し定常高ベータ放電を目指すトカマクです⁹⁾。超伝導トカマク装置については、後発の韓国、中国、インドにおいて、この数年の間にそれぞれ超伝導中型トカマクが完成し実験を開始するという活発な状況でしたが、このサテライトトカマク計画によって日欧が引き続きイニシアティブを発揮できるだけでなく、先進プラズマ技術の開拓によって原型炉概念の改良に貢献できると期待されます。

このような ITER とサテライトトカマクを利用した炉心プラズマの研究開発の一方で、材料開発などを含む工学機器開発を同時進行させ、物理的にも工

学的にも発電への見通しが得られたところで、第3段階核融合研究開発基本計画の完遂となります。この次のステップは原型炉です。我が国の定めた核融合研究開発計画の詳細は、以下の URL にアクセスすれば閲覧できます。

- ・「第三段階核融合研究開発基本計画(原子力委員会決定(平成4年6月9日)): <http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kettei/kettei920609.htm>
- ・「第三段階核融合研究開発基本計画における今後の核融合研究開発の推進方策について(原子力委員会決定(平成17年11月1日)): <http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2005/kettei/kettei051101.pdf>
- ・「今後の核融合研究開発の推進方策について」(原子力委員会核融合専門部会(平成17年10月26日)): <http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kettei/houkoku051026/index.htm>

・原型炉のイメージは固まっているのですか？

ワンステップで実用炉に移行可能な発電炉を核融合の原型炉と考えており、100万kW程度を系統に送電する構想を持っています。原型炉では、運転中に T を消費しながら一方で自給する、いわば自転車操業の燃料サイクルを構成します。このような燃料サイクルはプラント内を循環する T を少量にできるという意味で、安全上都合がよいのです。燃料を外部から調達する ITER と比べると、このような燃料サイクルには大きな技術的飛躍があるように見えますが、小規模な燃料サイクルは ITER で実証される予定ですので、その延長技術で対応可能でしょう。プラントとしては、安全性、高稼働率、メンテナンス、廃棄物処理など、発電所としての性能、プラント特性の検証の可能な炉であることが求められます。

さて、具体的な原型炉のイメージですが、旧原研が1990年に提案した SSTR(Steady State Tokamak Reactor)¹⁰⁾がその基本になります。SSTR は現在の核融合動力炉の原点ともいえる炉概念であり、この概念の登場は、他のエネルギーと競合しうる核融合炉が実現可能であるという確信を研究者に与えました。第5図に ITER と SSTR の比較を示します。

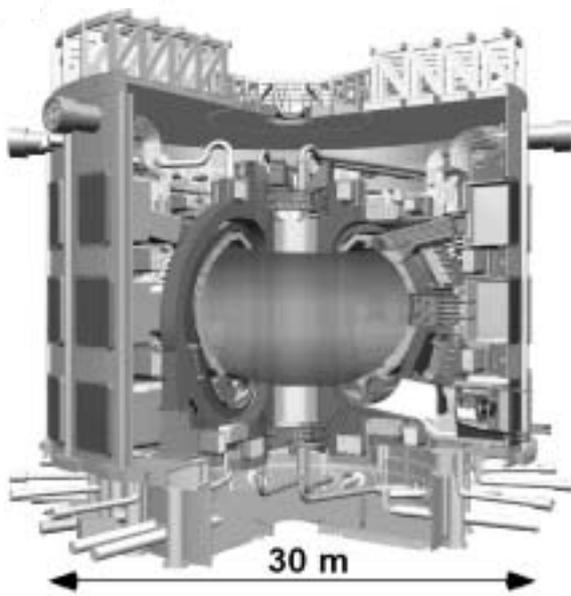
SSTR は寸法では ITER とさほど違いがありませんが、要求する炉心プラズマや機器の性能に関しては ITER からの技術的飛躍を必要とします。しかし、今後見込まれる技術進展を考慮すると、SSTR は ITER の延長技術で十分構想可能であり、原型炉として技術的に妥当と考えられています²⁾。しかしながら、原型炉のイメージが SSTR に固定されている訳ではないことに注意してください。核融合炉の経済性を改善するため、SSTR 提案以降も革新的なアイデアや先進的な炉工学技術を導入した炉概念が次々に提案されています。基本的炉概念に関連するアイデアの一例は、炉を低アスペクト比(すなわち、

ズングリ型ドーナツ形状)にすることによって炉全体をコンパクトにするものであり、前節に述べた計画中のサテライトトカマクはこのような新しい炉概念の有効性を試験するためのフレキシビリティを確保しています。原型炉の構造材は低放射化フェライト鋼が最有力であり、これと固体増殖材および水冷却を組み合わせた実現可能性の高いブランケットからのスタートになるでしょうが、ある段階では、第2期炉心として、超臨界水冷却(またはHe冷却)、液体増殖材、SiC/SiCのような先進材料など新技術への転換も想定すべきでしょう¹⁾。炉心プラズマと炉内機器が完全に分離されていることが核融合の強みであり、これにより、炉心の性能とは独立に、炉内機器を交換しながら高効率・安全性向上を目指した開発試験を原型炉の寿命がくるまで行うことが可能になるのです。

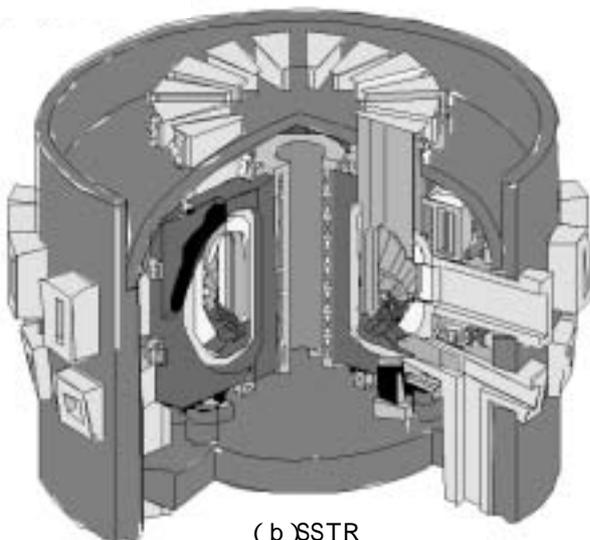
ITER の建設が決定したことで、このところ原型炉概念の具体的検討へ向けた機運が高まってきています。これまでの核融合炉設計研究は、研究機関や大学がそれぞれ独立に行ってきましたが、これからはオールジャパン体制で実施する必要があります。炉工学技術の開発は当面、ITER の建設に照準を当てていますので、原型炉に利用可能な技術がそろってくるのは ITER 完成以降となります。また、原型炉にふさわしい炉心プラズマの運転条件を見通すためには ITER での核融合燃焼プラズマの理解が不可欠ですので、今の段階で原型炉の方向を絞り込むのは時期尚早といえます。今後10年間の原型炉概念検討は、エネルギー情勢や技術進展を注視しながら、原型炉のマスタープランといくつかのバックアッププランの策定に努めることであり、適切な時期に最も妥当な原型炉計画を提示できるよう様々な要素技術の検討評価に努める必要があると考えます。

・その先の市場参入後の展開のために、
どのようなことを考えていますか？

核融合開発はグローバル化が急速に進んでいます。ITER 計画への中国、韓国の加入に続いて、2005年12月にはインドの加入が承認され、これによって、ITER 参加極の総人口は世界の過半数を占めることになりました。ITER 参加極はこの計画への参加を通して ITER に関わる技術を十分習得することになり、核融合技術自体がグローバル化することに



(a) ITER



(b) SSTR

第5図 ITER と SSTR 概念図の比較

なります。将来のエネルギー 2 大消費国が核融合開発に本腰を入れたことは吉報ですが、このような状況になると、日本は ITER の延長上にない技術(例えば、プラントの小型化、水素製造を視野に入れた先進的ブランケット技術、免震技術など)での国際競争力確保に戦略的に取り組む必要が出てきましたので、われわれ研究者にとってはある意味で試練ともいえます。

社会受容性という視点¹²⁾では、低レベル放射性廃棄物の低減と円滑な許認可の方法論確立が重要です。核融合プラントでは数千トンの低レベル放射性廃棄物の発生が予想されます。これらを容易に処分するため、浅地埋設処分できるよう適切な低放射化材料の選択や不純物濃度管理を含めた材料組成の調整に留意したいと考えています。他方、廃棄物の減容のためにはクリアランスまたは放射性廃棄物としてのリサイクルが可能になるよう、同一材料ごとに分別できるようバックエンドを考慮した機器開発が望まれます。安全審査や許認可は導入国ごとに異なるでしょうが、そのプロセスを円滑に進めるため、国際的に認知された技術基準、品質管理システムが必要になります。

核融合の難点は小規模なプラントを作りにくいというところにあり、既存の炉概念に基づく数10万 kW のプラントではコスト的に競争力が低下します。現在、火力発電所が担っている役割を代替するためには中小型プラントの需要に応える必要があります。核融合炉の小型化の努力が必要です。一方、今後の新規導入先となるであろう途上国では、人口の大部分は都市に集中しており、そこには大規模集中電源、ベースロードの需要があると考えられます。このような大都市へは再生可能エネルギーよりも核融合に導入のチャンスがあるはず¹³⁾。また、前述のように、核融合では炉心と炉内受熱機器が独立しているので、先進材料とブランケットの利用による高温発生能力が元来備わっており、SiC/SiC 構造材 He ガス冷却のプラントの設計例¹⁴⁾では水蒸気電解や化学的水素生成に必要な800 以上の高温発生が示されています。このような特長を生かした高効率水素製造プロセスの開発は、核融合の市場導入可能性を高めることになるでしょう。

参 考 文 献

- 1) エネルギー便覧 資源編, 日本エネルギー学会編, コロナ社, p. 259(2004).
- 2) 核融合エネルギーの技術的実現性・計画の拡がり
と裾野としての基礎研究に関する報告書, 原子力
委員会核融合会議 開発戦略検討分科会報告書, 科
学技術庁, (2000).
- 3) 大井健太, 海水リチウム資源の回収技術, 日本海
水学会誌, 51(5), 285(1997).
- 4) 核融合炉実用化技術に関する調査(電力中央研究所
委託研究) 報告書, プラズマ核融合学会 (1998).
- 5) 人類の危機トリレンマ(エネルギー濫費時代を超え
て), 電力中央研究所, 電力新報社 (1998).
- 6) B. ロンボルグ, 環境危機をおおってはいけない,
文芸春秋 (2003).
- 7) NEDO/RITE「地球再生計画」の実施計画作成に関
する調査事業(平成10年 3 月)による .
- 8) 関 昌弘編, 核融合炉工学概論 未来エネルギーへ
の挑戦, 日刊工業新聞社 (2001).
- 9) H. Tamai, *et al.*, “ Design study of national
centralized tokamak facility for the demonstration
of steady state high beta plasma operation ”, *20 th
IAEA Fusion Energy Conf.*, IAEA-CN-116/FT/P
7-8, Vilamoura (2004).
- 10) M. Kikuchi, “ Steady state tokamak reactor based
on the bootstrap current ”, *Nucl. Fusion*, 30, 265-
276(1990).
- 11) 岡野邦彦, 菊池 満, 飛田健次, 日渡良爾, 核融合
プラント実現への道, プラズマ・核融合学会誌, 81,
839-848(2005).
- 12) 飛田健次, 小西哲之, 時松宏治, 西尾 敏, 日渡良
爾, 魅力ある実用化を目指した先進的技術課題,
プラズマ・核融合学会誌, 81, 875-891(2005).
- 13) 小西哲之(京都大学エネルギー理工学研究所), 私
信 .
- 14) S. Nishio, K. Tobita, K. Ushigusa, S. Konishi, *et al.*,
“ Conceptual design of tokamak high power reactor
(A-SSTR 2) ”, *J. Plasma Fusion Res.*, 78, 1218-
1230(2002).

著者紹介

岡野邦彦(おかの・くにひこ)



電力中央研究所上席研究員。専門分野：
核融合を含めた革新的エネルギー技術。

著者紹介

飛田健次(とびた・けんじ)



日本原子力研究開発機構 核融合炉システム研究グループリーダー。専門分野：
プラズマ物理，核融合炉システム。

栗原研一(くりはら・けんいち)



日本原子力研究開発機構 トカマク放電システム開発グループリーダー。専門分野：
トカマクプラズマの美しい電磁場構造と時折見せる多様性複雑性の制御実験研究。

連載講座「よくわかる核融合炉のしくみ」の完結にあたって

今回が連載講座の最終回となります。お読み下さいました学会員の皆様，1年以上の長期間のお付き合い有難うございました。このような長期の連載は学会誌としても異例とのことでしたが，広範囲にわたる技術分野からなる核融合の特徴ということで編集委員会のご理解を頂きました。核融合研究開発の進展はこの20年でその速度が速まり，実験炉 ITER の建設開始を間近に控えた時期でもあるとの認識から，核融合炉工学の現状をそれぞれの分野の専門家に，専門用語を避け平易な言葉で説明して頂こうという意図で企画されました。連載真ただ中の2005年6月には，ITER 建設サイトがフランスに決まるという核融合研究開発史上最大級ともいえるニュースが飛び込み，講座の内容が一気に現実味を帯びて受けとめられるようになったという偶然の出来事もありました。

今後の実験炉開発の進展により一層魅力ある発電炉に向け核融合炉技術はどんどん進化していくことが期待されます。

なお，核融合開発の全体像を学会員の皆様にご紹介する貴重な機会となりました本連載に当たっては，編集委員会，核融合工学部会を始め多くの学会員や学会事務局のご助力を頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。核エネルギーの平和利用という共通の関心や目的を持つ学会員皆様の，継続的なご支援やご協力を最後にお願ひして，連載講座「よくわかる核融合炉のしくみ」の結言とさせていただきます。どうも有難うございました。

編集幹事：上田良夫(阪大)，井上多加志(原子力機構)，安東俊郎(原子力機構)，飯尾俊二(東工大)，栗原研一(原子力機構)