

核融合エネルギーと国際熱核融合炉

京都大学大学院エネルギー科学研究科 岸本泰明

(平成 20 年 7 月 13 日発刊「サイエンス・アイ」からの抜粋)

連絡先: kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp

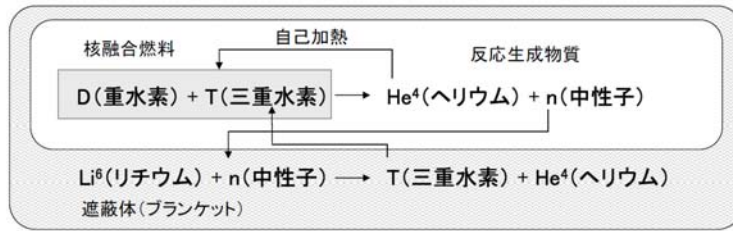
平成 17 年 6 月 28 日、核融合研究をリードしてきた多くの日本の研究者・技術者は、様々な思いを胸に抱きながら、モスクワで開催されていた国際熱核融合炉 (ITER) に関する六極閣僚級会合において、日本、欧州、米国、ロシア、韓国、中国の代表による ITER の建設地についての協議の結果を、固唾を呑んで見守っていました。後述しますが、核融合とは、太陽が輝いているのと同じ反応を地上で実現し、これを次世代のエネルギー源にしようとする壮大なプロジェクトです。このプロジェクトが、目下、上記の六ヶ国の国際協力の下に進められており、その主力実験装置である ITER が、日本 (青森県六ヶ所村) か、フランス (カデラッシュ) のいずれかに決まることになっていました。最終的には、日本が準ホスト国 (準主催国) となり、欧州と並んで ITER 計画に重要な役割を果たすという条件で、建設地をフランスに譲ることになりました。日本は、茨城県那珂市にある日本原子力研究開発機構や岐阜県土岐市にある核融合科学研究所を中心に、核融合研究のレベルは高く、世界のトップランナーとしての役割を果たしてきただけに残念でしたが、基礎研究も国際政治と決して無縁でないことを物語っています。本稿では、前編と後編の二回に分けて、この核融合研究の目指すところや ITER 誘致の論争で垣間見た科学と国際政治の関係に想いをはせながら、科学技術創成国・日本のあり方を考えてみたいと思います。

太陽エネルギーと核融合

核融合とは、ウランウムやプルトニウムといった重たい元素の連鎖的な核分裂反応を利用した現在の原子力発電とは異なり、軽い元素である水素 (H) の同位体の重水素 (D) とトリチウムと呼ばれる三重水素 (T) の原子核が高速で衝突すると融合反応が起こり、ヘリウム (He) と中性子 (n) が生成されますが、その際の質量欠損によって放出される膨大なエネルギーを取り出して次世代のエネルギー源にしようとする試みです。具体的には、融合反応で生成される中性子が大きなエネルギー (およそ 1,400 万電子ボルト) を持って飛び出してくることから、これを遮蔽体によって減速し、熱エネルギーに変換して取り出します。1 グラムの燃料はおよそ石油 8 トンに相当します。重水素は海水中におよそ 0.016% の割合でわずかに含まれますが、海水が無限にあることを考えれば重水素も無限にあります。また、トリチウムは、自然界にはほとんど存在しませんが、遮蔽体にリチウム (Li) を使用することで、生成・増殖することが可能です (図)。

この核融合も中・低レベルの放射性廃棄物は発生しますが、燃料に核分裂性の物質は介在しないため、高レベル廃棄物は発生しません。このため相対的にはクリーンなエネルギー源と言えます。また、リチウムも海水から回収が可能なことから、実用化すれば地域に偏

図 核融合反応持続の仕組み



在しないエネルギー源となり、エネルギーセキュリティーの観点からも有用であると考えられます。

最初に触れましたが、この核融合エネルギーは50億年に渡って輝いている太陽のエネルギー源に等しく、様々なエネルギーの中でも最も人類になじみが深いエネルギーと言えます。エネルギーそのものはそれを取り出す手段に依存しませんが、地球に生命をもたらしたエネルギーが実は“融合”と言う“和”によってもたらされたエネルギーであったことを考えると実に感慨深く、このエネルギーを究極のエネルギー源として人類が目指すのも理解できるように思います。私が核融合研究を選んだ原点もここにありました。しかし、宇宙レベルで創成されるエネルギーだけあって、それを地上で実現するのは容易ではありません。核融合反応を起こすためには、燃料を加熱して正と負の電荷を持ったイオン（原子核）と電子からなる“プラズマ”と呼ばれる状態を作り、さらに、これを1億度に加熱して、この状態を安定に保持する必要があります。この状態が一度実現されると、核融合反応で生成されるもう一方のヘリウムによって燃料が再び加熱され、外部からエネルギーを供給しなくても1億度のプラズマ状態が維持され、連鎖的に反応が持続します（図）。これが“点火”です。このプラズマは、固体、液体、気体に続く第4の物質状態と呼ばれており、地上ではあまり実感できませんが、宇宙の実に99%以上がプラズマ状態にあります。北極や南極に出現するオーロラや、日食のとき美しく輝く太陽コロナもプラズマです。ビッグバンに始まる多彩な宇宙の構造も、このプラズマによって支配されていると言っても過言ではありません。

さて太陽は、地球の30万倍の質力を持つことから、中心での圧力は2,400億気圧に達し、この想像を絶する重力によって高温・高密度のプラズマを安定に閉じ込めて点火を起こし、核融合反応を持続させています。このような状態を地上で実現するために考案された装置の一つが“トカマク”と呼ばれるもので、ITERもトカマク型です。この装置は、超伝導技術を用いてドーナツ状の容器内に50万ガウスもの強い磁場を発生させ、その磁場の圧力によって1億度のプラズマを閉じ込めようとするものです。この核融合は、いわゆる水爆も同じ反応を用いていることから、当初は米ソを中心に秘密裏に研究が進められていましたが、1950年代後半には学術研究として公開されました。この時期、日本でも研究が本格化し、様々な困難な課題を克服しながら40年の歳月を経た今日、ようやく点火を実現して核融合エネルギーを取り出す見通しを立てることができました。これがITERです。それでも実用化にはさらに数十年の歳月が必要であるとされています。

人類を月に送り込んだ米国のアポロ計画がおよそ10年のプロジェクトであったことを考

えれば、核融合開発は非常に長い年月を要しています。しかし、これは、核融合研究が工学的な応用の域を超えて、宇宙を支配するプラズマを理解し、さらにそれを制御するという、物理の根幹に関わる要素を多く内包していたことによると私は考えています。実際、核融合で見られるプラズマ現象は、地球に磁気嵐をもたらす太陽表面の爆発過程（プロミネンス）や宇宙において星や銀河が形成される過程など、宇宙・天体现象と多くの類似点があります。核融合プラズマを用いて宇宙物理を探求する分野融合型の研究もホットな学問領域であることを付記しておきます。

国際熱核融合炉(ITER)計画発足の経緯

1970年代、様々な小型装置で核融合実験が行われ、それらのデータに基づいて1980年代には、日本、米国、欧州、および、ロシア（当時ソビエト連邦）が共に大型の核融合実験装置の建設に着手しました。1970年代のオイルショックも核融合研究を後押しすることになりました。日本でも1985年から日本原子力開発機構のJT60と呼ばれる大型のトカマク装置が本格的に実験をスタートし、核融合実現の鍵となる様々な発見が相次いでなされ、1990年代には科学的にも工学的にもトップランナーとしての地位を築きました。

一方、ITER計画は、当時、SDI（戦略防衛構想）を押し進めていたレーガン米国大統領と、腐敗した政治体制と経済の改革を目指してペレストロイカを提唱していたゴルバチョフソビエト連邦書記長による1985年の米ソ首脳会談での合意に始まりました。1970年の東西冷戦の真っ只中に、アポロ宇宙船がソビエトのソユーズ宇宙船とドッキングして船上で米ソの宇宙飛行士が握手するといったパフォーマンスを演出したことがあります。これと若干類似しています。一方ではSDIで対立構造を作りつつ、他方では軍事技術との関連が比較的薄い分野で協力関係を維持するといった冷戦構造の緩和策ともとれる施策に端を発している点は興味深いところです。

レーザー核融合研究と国家戦略

話は少しそれますが、同じ核融合を実現する手法にレーザー核融合があります。これは、直径が1ミリメートル程度の球形のプラスチック容器に核融合燃料を封入し、これに四方八方から高強度のレーザー光線を瞬時に照射することにより燃料を圧縮し、太陽中心に匹敵する高密度状態（固体密度のおよそ2,000倍）を作り出して核融合反応を実現しようとするものです。日本では大阪大学を中心に研究が進められており世界のトップレベルにありますが、この手法は水爆の原理と同じであるため米国では軍事技術に属し、多くが機密事項として扱われています。水爆は原爆を爆発させて核融合に点火しますが、レーザー核融合では原爆の代わりにレーザーを使います。もちろん、レーザー核融合自身が爆弾としての機能を持つことはありませんが、X線などの輻射を用いた燃料の圧縮技術は水爆の小型化技術と関連があるとされています。そのため米国では、たとえCTBT（包括的核拡散防止条約）によって全面的に地下核実験が禁止されても、レーザー核融合によるデータとスーパーコンピュータによるシミュレーションを併用して実験を予測し、実際の核実験を行うことなく核兵器の開発能力の維持・管理を目指していると言われていています。この戦略はSBSS(科学的

核兵器の維持・管理)と呼ばれ、ASCI (加速された戦略的計算機先導) と呼ばれるスーパーコンピュータの開発戦略とも強くリンクしています。実際、米国ではNIF (国立点火実験施設) 計画が、また、フランスでも ITER とは別予算枠で LMJ (レーザー・メガジュール) 計画が進行中であり、共に巨大なレーザー核融合施設を現在建設しています。これらは軍事研究と強くリンクしていると言われていました。従って、100%エネルギー開発としての日本の立場と米国の立場は大きく異なります。

また、米国はレーザー関連技術を 21 世紀の産業を支える重要な先端技術の一つとして戦略的に研究を進めています。米国は軍事を標榜することによって社会のお墨付きが得られる国であり、未踏の先進技術を軍事研究として国家が率先して開拓し、それを効率的に産業に移転することによって社会の競争力を向上させる戦略です。中国でも近年レーザー核融合研究に力を入れていますが、同様の背景があると考えられます。軍事研究がネガティブな印象を与える日本とは対照的であり、従って、レーザー核融合研究が ITER のような国際協力の土俵に上がることは当分ないでしょう。日本は他の国々と同じ戦略はとる必要はありませんが、核融合エネルギーの実現は、エネルギー輸入国であった日本がエネルギー輸出国になる可能性への挑戦でもあります。わが国においては科学教育のあり方ともリンクして、未踏の分野や技術に積極的に投資し挑戦する気風とシステムを育て、軍事開発に負けない科学技術開発の動機付けを行うことが、科学技術立国・日本の中核をなす重要な課題と思われれます。

米国の脱退

米ソ首脳会談で ITER 計画が発足し、1988 年には日本と欧州が参加を表明しました。以後この四ヶ国が中心となって概念設計を進めましたが、この設計活動で評価された ITER の建設コストは 1 兆円規模になりました。既存の概念でプラズマ性能を十分に確保しようとすると設計が保守的になり、大型化したことも要因に挙げられます。また、国際プロジェクトでは、研究者の考えとは別に各国の政治的な思惑が交錯します。特にエネルギー問題は、その時のエネルギー事情や国家財政にも強く左右されます。100 万キロワット級の原子力発電所のコストが 3,000 億円程度であることや、核融合の実用化にはさらに年月を要することから、計画を立ち上げた当事者である米国 (当時、クリントン政権) は、当時のエネルギー事情は逼迫した問題ではないなどの判断から、1999 年には ITER 計画から脱退することを表明しました。この時期、レーザー核融合予算を大幅に増額し、前述の NIF 計画をスタートさせたことを考えれば、国際協力の枠組みでさえ壊す覚悟で、プロジェクトを取捨選択していることが分かります。ITER より先に NIF で核融合点火を実現できる見通しを得たからだとの説もありました。

このため、ITER 計画は一時は崩壊の危機に瀕しましたが、日本、欧州、ロシアは枠組みを維持するとともに、最新の研究成果を積極的に取り入れるなどの設計の見直しを行い、装置を小型化することでコストを 5,000 億円程度まで削減する提案をしました。この小型化には、JT60 での“内部輸送障壁”と呼ばれる、プラズマ性能を大きく向上させる物理機構の発見などが鍵となり、日本がリードする形で進められました。この新設計に基づいて

2001 年から ITER 誘致に向けての政府間協議が開始されました。

国際協力の光と陰

科学研究を進めるとき、独自開発を選択するか、国際協力を選択するかは重要な岐路となります。日本は国際宇宙ステーション計画にも参加しています。この主目的は、無重力でしか合成できない次世代の新材料の開発などを行うためです。これらは物作り国家・日本の根幹をなすものであり、ロケット技術は米国に頼っても、この分野で一歩たりとも遅れをとることはできないとの判断によるものです。逆に米国は、多額の予算を日本に拠出させて宇宙開発計画を有利に進めようとしているのでしょう。最近、中国が有人宇宙飛行を行い話題になっています。この技術は 40 年前に実現したのですが、有人飛行は生命に関わる技術の信頼性や人類の夢と言った精神的側面も兼ね備えていることから必ずしも侮れません。日本が有人宇宙飛行を目指すかどうかは議論の分かれるところです。

核融合研究も、それが直ちにエネルギー供給に貢献できなくても、国家として基盤技術を保有しているかどうかは重要な問題です。場合によっては、一国のエネルギーを長期に渡って他国に頼らないといけないこととなります。一方、ITER を誘致した国（ホスト国）は大きな財政負担を求められます。他の参加国は、最小の負担で有利な条件を引き出そうとするため、道路や建屋などはホスト国に準備させ、なるべくハイテクの集合体である装置本体の建設に参加して技術力を向上させようとしています。その反面、ホスト国は、複雑なシステム全体を組み上げる総合技術や参加国を取りまとめてプロジェクトを推進する様々なノウハウが蓄積されます。また、原子力に関わる法整備や、多くの外国研究者やその家族を受け入れる社会整備も求められますが、これらは一見負担に見えても物的尺度では測れない有形無形の財産となる可能性があります。このため、ホスト国は全体の 50%、それ以外は 10%を負担することが決められました。10%でも 500 億円に相当し、大きな負担ですが、一度国際協力がスタートすれば、一国でそれに追いつくことは事実上困難になるため、国としての判断を迫られます。

米国の復帰と中国・韓国の参入

米国の脱退で暗雲が立ち込めた ITER 計画ですが、日本とフランスに引き続いて、スペインも誘致に名乗りを挙げました。また、研究経験の少ないカナダも無償で敷地を提供する提案を行うなど、いずれの国も誘致のメリットは大きいと判断し始めました。この背景には装置の低コスト化や、長期的に様々な技術がホスト国に集中するなどの考えが広まったことによります。

このような情勢を受けて、2003 年、米国のブッシュ政権は、誘致は希望しないものの、再び ITER 計画へ復帰することを表明しました。米国の政策変更の速さには驚くばかりです。また、これまで静観していた中国と韓国も突如参加を表明し、カナダは負担金の支払いが困難として途中で断念したことから、六ヶ国となりました。深刻なエネルギー問題を抱える中国は、たとえ核融合が未知数でも、将来、エネルギー技術を他国に頼ることがあってはならないと判断したのでしょう。また韓国では、KSTAR と呼ばれるトカマク装置を建設し

ていますが、これは超伝導技術のノウハウを獲得することが目的であると言われてい
ます。日本の超伝導技術は、世界最速(時速 581km)の超伝導リニアモーターカーに見られるように、
世界のトップクラスですが、参加国の多くが ITER 計画において超伝導技術を担当したいと
考えています。また、同じエネルギー問題を抱えるインドも ITER 計画に関心を示していま
す。このように、参加目的は様々ですが、国情を強く反映していることが分かります。

誘致合戦と立花隆氏の論評

結果として、欧州は候補地をフランスに一本化し、日本とフランスが激しい誘致合戦を繰
り広げることになりました。後から参加した中国・韓国も一票を持つことになり、ロシア
と中国はフランスを支持する一方、米国と韓国は日本を支持し、双方とも譲らない展開と
なりました。表面上は立地条件や便宜性が議論されましたが、国々が置かれている政治情
勢を色濃く反映していることは明らかでした。韓国はフランスの高速鉄道システム (TGV)
を導入するなど、フランスと協力関係を持っていますが、日韓科学技術協力が進んでいる
ことや、前述の KSTAR では米国から多くの協力を得ていたことも日本支持の要因と思われ
ます。中国は、“日本は地震が起きる”と云うのが表面上の理由でした。もちろん日本の耐
震技術は世界の最先端であり、技術的には問題なかったはずですが、政治判断だったので
しょう。

このような情勢の中で、評論家の立花隆氏が文藝春秋 (平成 17 年 3 月号) で「日本の敗
北・核融合と公共事業 一効率無視の巨大計画が日本の科学技術を滅ぼす」と題して、
日本の ITER 誘致を批判する論評を發表しました。この中で立花氏は、高温プラズマ研究は
未解明の部分が多く、今巨額の予算を投入して日本に ITER を誘致する価値はないこと、誘
致は関連科学者や企業活動を維持するための公共事業の色彩が強いこと、また、他の科学
予算を圧迫し、逆に日本の科学技術を滅ぼしかねないことなどの考えを述べています。立
花氏らしく、核融合の物理面にも細かく言及し、前述の米国の ITER 計画撤退の理由やレー
ザー核融合との関係についても触れています。

これがきっかけで、平成 17 年 2 月、立花氏が JT60 施設を訪問することになり、幸い私も
その場に同席し、2 時間に渡って意見を交わす機会を得ました。核融合研究を含め立花氏
の国家プロジェクトに対する理解は一般の知的文化人に比べると格段に高く、総額 10 兆円
に及ぶ米国のアポロ計画については、極限技術を目指す人類の夢やそれがもたらす長期的
な国際競争力への影響などの理由から絶賛しています。議論を通して理解できた立花氏が
言いたかったことは「日本の核融合研究のレベルは高く評価している。ITER が他国にでき
て、それに日本が直接参加するなら、大いにやるべし。しかし、様々な思惑が交錯する国
際協力のもとに巨額を投資して日本に誘致することが本当に唯一の選択であり、国益に適
うのか、より少ない予算で日本の核融合技術を大きく発展させる方法があるのではないか、
国家財政が逼迫する中、もっと戦略を持って考えていただきたい」と云うことのように
でした。日本は、町工場レベルでも世界をリードする様々な最先端技術を持ちながら、国と
してそれらを守ろうとする明確な意思や戦略がないため多くの知的財産が失われていると指
摘されていますが、そのような情勢に対する強い憂いもあったのでしょう。個人的には同

調するところが多くありました。私はプラズマ研究に内在する価値や意義を専門の立場から話しましたが、大変興味を持っていただき、「岸本さん、今日お話しになられた資料は全部送ってください」と言われたのが印象的でした。

ITERのフランス誘致と日本の課題

この間も六カ国次官級会合が繰り返されましたが、合意には至らず、欧州からは、日本を除外してでもフランスで遂行する、と云った情報も流れたほどでした。この強行とも思える姿勢に日本も妥協することなく、ギリギリの交渉を行いました。しかし、誘致のため今以上の財政負担は得策ではないこと、また、これ以上続けると協力の枠組みそのものが崩壊する恐れがあることなどを勘案し、大局的な見地から核融合の早期実現に向けた役割分担を定め、勝者と敗者を作り出さない道筋を敷いた上でフランス（欧州）にサイトを譲る決定をしました。この役割分担とは、JT60を改造・増強してITERではできない先進研究を日本で長期的に行うこと、日本からITERを直接操作できる遠隔実験施設や実験を予測するスーパーコンピュータ施設、核融合材料の開発施設をフランスが資金提供して日本に建設すること、さらに負担額を上回る日本への受注や研究者派遣枠を認めること、また初代の機構長を日本から選出することなど、日本が準ホスト国として欧州と並ぶ国際拠点となることでした。さらに、次世代の核融合炉建設が国際協力で行われる場合、日本が誘地を提案すれば欧州はそれを支持することも含まれていたと聞いています。

結果的には立花氏の主張に近いものとなり、また、かなりの部分で日本の国益を守ることができたと思います。ただ、日本は大型の国際プロジェクトを誘致した経験がないことから、今回は日本が大型の国際プロジェクトをリードする絶好の機会であり、科学分野における日本の精神的な自立の観点からも意義があったと思います。しかし、立花氏が言うように、誘致“する”、“しない”にかかわらず、日本の築いた知的財産をいかに守り、それを国家としていかに育てるか、という強い意思と戦略を持つことが重要なのでしょう。誘致してもそれがなければリーダーシップは取れませんし、その逆も真です。その観点から、様々な譲歩を引き出した今回の結果は我が国の研究レベルの高さに基づく成果とも言え、最後まで学会、政府、産業界、地元住民が一体となって交渉を続けた努力の賜でもありません。また、日本が、国際社会の中で責任を負いつつ、ホスト国として研究を推進する決意であることを堂々と世界に宣言したことは、それだけでも大きな意義があったと思います。すべては今後の産官学を含めた国家戦略と日本の研究者達のがんばりにかかっています。

サイエンス・アイより抜粋

平成20年7月13日発行（理工系医系懇話会）「サイエンス・アイ」からの抜粋