

## 地上に太陽を— 核融合エネルギー

岡本 祥一  
予科5-7  
航空16-4  
(川口市)



### I まえがき

福島原子力発電所の重大事故で原子力発電の安全性が大きく損なわれ、代替エネルギー源の確保が世界的課題として取り上げられている。現時点では太陽光や風力による発電など、自然エネルギーの開発に衆目が集まっているようである。当然の成り行きとも考えられようが、具体的に原子力発電を自然エネルギーで補完するには長期にわたる年月と莫大な人材、資材の投入が必要でありコストの増大も認識すべきではないだろうか。

自然エネルギーの他に将来のエネルギー源として核融合エネルギーの開発が進められている。現状について概要を報告する。

### II 原子エネルギーの源泉

原子爆弾、原子力発電等に利用される原子力あるいは原子エネルギーの源泉は、核反応に伴う質量欠損である。核反応により原子核の質量の一部が失われ、失われた質量がエネルギーに変換される。

質量が失われることによりエネルギーが放出される核反応は2種類ある。一つは、 $^{235}\text{U}$ のような重原子の核分裂反応によるものであり、他の一つは、水素等の軽い原子核を原料とする核

融合反応である。前者の核分裂反応は周知のように原子爆弾、原子力発電等に利用されている。後者の核融合では水素爆弾として軍事的に利用されているが、平和利用は開発段階にある。1905年、アインシュタイン(ユダヤ系ドイツ人、米国に亡命。1879-1956)は特殊相対性理論の帰結として、物質とエネルギーは等価であるとの概念を提出した。質量 $m$ の物質に内在するエネルギーは光速 $c$ を含む次式でしめされる。

$$E = mc^2$$

例えば、太陽の中心では水素原子核( $p$ : proton)4個が2個の電子( $e^-$ )を取り込み1個のヘリウム核( $^4\text{He}^{2+}$ )を生じる核融合反応が起きており、その過程で一部の質量が失われ、その分がエネルギーとして放出されている。反応式は次式で示される。



この反応により $4.7 \times 10^{-29}\text{Kg}$ の質量が失われ、アインシュタインの式に従い等価の26.72MeVがエネルギーとして放出される。このうちニュートリノが持ち去る0.26MeVを除くと、水素原子核1個当たり6.55MeVのエネルギーが放出される。

太陽の中心では1,500万度、 $10^{12}$ 気圧と推定される超高温、超高压下で上式の反応により毎秒6.2億トンの水素が燃えて440万トンの質量がエネルギーに変換されている。太陽は誕生以来45億年の間に6%の質量を失ったと推定されている。宇宙全ての恒星でも太陽と同じく星の質量の一部がアインシュタインの式によりエネルギーに変換され放出されている。

### III 研究開発の経緯

太陽の核反応は超高压、超高温の条件が必要であり、地上での再現は無理である。地上で実現可能な核融合反応を見出す必要がある。

1942年、米国で原子爆弾開発(マンハッタン

ン計画)に従事していたフェルミーは共同研究者のテラーに、地上でも重水素の核融合によりエネルギーを得る可能性があることを指摘した。テラーは計算の結果D-T反応が実現可能であろうと考えた。

D-T反応に着目したテラーのグループは、原子爆弾により発生する超高温、超高压を利用して水素爆弾を開発、1952年、エニウェトク環礁で爆発に成功、軍事利用への道を開いた。

ソ連では1950年前後、D-T反応の平和利用に着目し、トカマクと呼ばれる核融合炉装置の設計が検討されていたようである。この頃は各国で秘密裏に開発研究が行なわれていた。

現在の核融合炉はトカマク型が主力となっており、イータープロジェクトを初め現在開発中の核融合炉に多く採用されている。

#### IV D-T核反応

重水素 ( $H^+ + n$ ) (デウテリウム、D) と三重水素 ( $H^+ + 2n$ ) (トリチウム、T) との核反応をD-T反応と通称している。ここでnは中性子である。



(D+T)混合ガス1grの核融合反応により  $34 \times 10^{10}$  Jのエネルギーが得られる計算になる。石油1kgの発熱量は  $4.4 \times 10^7$  J程度であるから、約8トンの石油に相当するエネルギーが得られることになる。

D-T核反応を起こすためには、D及びTの2つの原子核同士を毎秒1,000キロメートル以上のスピードで衝突させねばならない。この状態を生み出すため、加熱装置を用いて1億度以上の高温プラズマ(注)を作り、さらに核融合反応の結果出てくるエネルギーがプラズマ自身を加熱し、1億度以上に保ち続ける必要がある。そのためには、D、Tの原子核を高い密度で、長時間、一定の空間に閉じ込めておかねばならない。閉じ込め方式としては、強力な磁場を発生させて閉じ込めるトカマク型とヘリカル型、さらに磁場を必要としないレーザー方

式がある。

#### V.イータープロジェクト

1955年8月、第1回原子力平和利用国際会議がアイゼンハウアー米国大統領の提唱でジュネーブにおいて開催され、更に1958年9月に第2回の同国際会議が開催された。この過程で核融合研究が公開されるようになり、日本からも論文が提出されている。

冷戦末期の1985、旧ソビエト連邦のゴルバチョフ大統領と米国レーガン大統領は核融合実験炉計画を国際プロジェクトとして推進することに合意した。この合意により世界のプロジェクトとしてのイータープロジェクトが発足した。当時、核融合研究は大型化する装置、予算規模の増大、本格的な核融合反応の必要性という背景から国際的な共同プロジェクトとして開発すべきとの声が大きくなっていった。

イータープロジェクトではこれまで概念設計、工学設計などが行われ、参加国の合意を得て2007年10月より協定の発効により、建設が開始された。現在の参加国は、EU、日本、ロシア、中国、韓国、インドであり、米国が抜けている。

#### VI 日本の核融合研究

日本では1956年に原子力の研究、開発、利用について審議し決定するため原子力委員会が設置され、その下に核融合専門部会(湯川秀樹会長)が設置された。また同年、日本原子力研究所(現在日本原子力研究開発機構)も設置されている。

積年の努力により、我が国は現在世界のトップレベルの研究、開発実績を有している。

我が国の核融合炉研究、開発はイーターへの国際貢献と国内機関による独自の研究、開発とに大別される。

##### 1. イーターへの国際協力

###### a) イーター事業の経緯と概要

イーターはフランス・カラダッシュに建設さ

れている国際熱核融合実験炉（International Thermo nuclear Experimental Reactor — ITER）であり、熱核融合の実現を目指して、実証炉を建設運用する国際共同プロジェクトの名称である。核融合熱出力は50万kw。ただし、発電の実証までは計画されていない。特に我が国は核融合研究開発の先進国として積極的な協力を行っている。初代イーター機構長に池田要氏が就任した。

全体計画としては、建設に10年、運転に20年、解体処分に5年を予定している。全体で35年期限の条約である。2011年4月現在、池田機構長によれば、2018年まで装置の完成、2019年にはプラズマを発生、2026年頃には核反応実現に向けて試運転を始めるとのことである。

イーターでは、強力な磁場で燃料を閉じ込め加熱するトカマク型と呼ばれている、最も有望でしかも研究開発が進んでいる方式を採用している。

総経費は1兆7千億円（2006年10月時点での換算—文部科学省）、日本の費用分担は建設期：9.1%、運転期：13%となっている。

イーター担当機関は文部科学大臣により独立行政法人日本原子力研究開発機構が指定されている。現在池田機構長の他27～28名の職員がフランスに派遣されている。

#### b) イーター計画への支援

##### — 幅広いアプローチ —

イーター計画だけでは実施できないプラズマ<sup>1)</sup> 研究等計画の補完・支援する先進的核融合研究開発を「幅広いアプローチ」として、イーター計画と並行して我が国が行うこととなっている。欧州も参加している。

幅広いアプローチは以下の3事業より構成されている。

#### ① 国際核融合エネルギー研究センター

（青森県六ヶ所村）事業長：荒木政則氏

##### イ. 原型炉設計・研究開発センター

原型炉の共通概念を日欧間で確立する。

#### ロ. イーター遠隔実験研究センター

イーター本体との間を高速ネットワークで結び、データ解析などを行う。

#### ハ. 核融合計算機シミュレーションセンター

核融合燃焼挙動、先進材料開発などに関するシミュレーションを行う。

#### ② 国際核融合材料照射施設の工学実証・設計活動

（青森県六ヶ所村）事業長P・ギャラン氏  
強力な高速中性子線の劣化作用に耐える炉壁材料の研究開発

#### ③ サテライト・トカマク計画

（茨城県那珂市）日本原子力研究開発機構、那珂核融合研究所

日本原子力開発機構が独自に開発したJT-60（イーターと同じトカマク方式核融合炉）による実証研究を推進することによりイーター計画を支援する。現在磁場強度を増す為に超電導コイルに改造中である。

## VII あとがき

連続核融合実現のため世界的規模で現在研究開発が進められている。数十年後の成果が待ちどおしい。

その成果に基づき、更に発電装置の開発プロジェクトが発足する。核融合発電が実現し得るのは半世紀以上先の話となる。我々としては草葉の陰から見守るしかすべは無いのである。しかし将来の人類の滅亡を救う重要手段としてその実現が強く求められていることは言うまでも無い。

核融合の利点として挙げられている項目を列挙する。

1. 豊富な資源：燃料となる重水素は海水中に豊富に存在しまた三重水素を得るためのリチウムも入手容易である。
2. 固有の安全性

核融合反応は暴走しない。核分裂反応と比べて安全対策が比較的容易である。

### 3. 環境保全

発電の過程で二酸化炭素を発生しない。  
高レベルの放射性廃棄物が発生しない。

1) プラズマ：超高温では全ての原子から電子が放出され正イオンと電子に分かれ（電離）、夫々がバラバラに動き回っている。ただ、全体としては中性である。オーロラは高層の気体がプラズマ状態となり発光する現象である。蛍光灯やネオンは封入気体が電圧印加により電離されプラズマ状態での発光を利用している。

#### 参考：核融合装置

高温プラズマは、そのままでは拡散し容器壁などに触れてエネルギーを失なう。そこでプラズマを高温・高

密度の状態で閉じ込めるために、磁場を用いる方法と強力なレーザーを利用する方法が提案されている。磁場閉じ込め方式は、電気を帯びたプラズマ粒子が磁力線に巻き付いて運動するという性質を利用したもので、磁力線で編んだ籠状の磁気容器内にプラズマを閉じ込める方法である。この方式にも磁場の形状によりトカマク型、ヘリカル型がある。レーザー光を利用する方法は、磁場は利用せず、慣性閉じ込め方式と呼ばれ、強力なレーザーを重水素と三重水素の塊(ペレット)に照射して瞬間的に核融合反応を起こそうというものである。

我が国ではヘリカル型核融合装置が核融合科学研究所（岐阜県土岐市）に、またレーザー核融合装置は大阪大学に夫々設置され、研究開発が進められている。トカマク型、ヘリカル型、及びレーザー型の装置の概念図を下図に示す。（文部省ホームページより）

