

核融合炉とITER(国際熱核融合実験炉)について

大阪大学名誉教授 長谷川 晃

要旨：国際協力のもとにフランスのSaint-Paul-lez-Duranceで建設中のITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) がいよいよ5年後の実験開始を目指して装置の最終組み立てが始まっている。Scientific Americanの2020年12月号にもこのことが取り上げられ核融合装置の実証実験に世界の注目が集まっている。

30年ほど前に米国物理学会のプラズマ部会長を拝命していた頃、筆者は当時の米国政府のエネルギー長官Watkins氏から核融合エネルギーの将来の見通しについて諮問されたことがある。会員3000人のプラズマ部会の代表者としては、本来なら核融合研究の推進を答申すべきところであったが、公正な調査の上、トリチウム(三重水素)を燃料とする現行の核融合装置は多量の高エネルギー中性子を発生すること、燃料のトリチウムは放射性を持ち、自然界に存在しないことなどの理由から、ITERを米国内で建設することは推奨できないとした。そして、米国内では中性子を発生しないヘリウム3と重水素を燃料とするいわゆる進歩的燃料の核融合研究を推進し、トリチウムを燃料とする実験は国際協力としてITERで、しかも、国外で行うべきだと答申した。この答申の効果もあり、ITERは米国外で建設されることとなった。

1. 核融合について

重水素-トリチウム(D-T)の核融合反応は他の核融合に比べ、点火温度が最も低いため、現行の核融合炉はこの燃料を使って推進されている。この中で、ITERの推進者たちは、「太陽を地上に作る」とか「放射線物質を生じない理想的原子炉」だとか、さらには「燃料は海水中に無尽蔵に存在する」とか、事実と反することを主張して多額の研究費の支出を正当化してきた。この点も筆者が大いに危惧するところだ。周知の通り、太陽のエネルギー源は核融合には違いないが、そこで燃えているのはプロトンであり、自然界に存在しないトリチウムではない。また、トリチウムを燃料とする核融合は核反応からは放射性物質を生まないが、核反応で多量に発生する高エネルギー中性子が炉壁はもとより周囲の構造建築物をも放射化し、フル運転をした場合の(炉壁の交換などによる)核廃棄物は核分裂炉が生む核廃棄物の量を超える恐れがあり、さらにその核廃棄物は半減期が長く、核分裂炉よりもっと始末が悪い。こうした理由で、現行の核融合装置は失敗したときはもとより、成功して万々歳した時にも、その瞬間、生み出された多量の核廃棄物を見せられ、世

の中の失望と、研究者に対する非難を生む恐れが極めて高い。さらに、数キログラムは必要とされる燃料のトリチウムは現行では多くの原子炉を使ってしか生成できない放射性物質でもある。もし事故でこれが爆発すると、極めて多量のトリチウム水を発生し、これが地下水に流れ込むと、危険極まりない事態となる。ITERを日本で建設する動きがあった時、こうした心配から、筆者は日本国内でのITERの建設の反対運動を率先してきた。こうした経緯も踏まえ、今回は核融合炉に関する話をしてみることにする。

2. 原子力エネルギー、 $E=mc^2$ はどこからきたか？

政治的な話はこれくらいにして、物理の話をしておこう。私は物理学の基礎原理はラグランジュの最小作用の法則で表すことができると考えている。物理学は物質の運動と、その運動をつかさどる力の場を記述する学問である。この双方を1行で表す原理がラグランジュの最小作用の法則である。これは極めてきれいな数式、つまり、粒子のラグランジュアン L の軌道に沿った時間積分が極値を取る形で表される

$$\delta \int L dt = 0 \quad (1)$$

ここに $L(p, q; t)$ は正準運動量、 p 、と正準座標、 q 、の関数であり、古典的には運動のエネルギーとポテンシャル・エネルギーの差で表される。これをラグランジュの最小作用の法則という。この変分形式を微分方程式で書き表すと、ハミルトン・ラグランジュの運動方程式が簡単に導出される。

しかし、マイケルソンの観測結果から光速が座標によらず一定ということが分かり、結果時間は座標によらず不変と考えられていた古典的考えは成り立たなくなった。つまり、動く系に乗ると時間の進みは遅くなる。この結果ラグランジュの法則を動く座標でも同じ形に書き換える必要が生じた。ラグランジュの法則を座標に依らない形に書き換えるためには時間を含む四次元空間(ミンコフスキー空間)での微小距離(座標変換に対する不変量)、

$$ds = [c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2]^{1/2} = c dt (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (2)$$

の線積分を使って書き換える必要がある。ここに v は粒子の速度を表す。(1)式はエネルギーの時間積分だが、こ

れを距離の線積分に書き換えるには、被積分量は運動量となる。座標に依らない運動量は光速 c と粒子の静止質量 m の積とするのが妥当である。この結果、四次元自由空間（力の場が存在しない空間）中の粒子の運動を表すラグランジュの法則は

$$\delta \int mc ds = 0 \quad (3)$$

で表されることとなる。ここに mc は考えている粒子の座標変換に対して不変な作用（action）を表し、 m はその質量（静止質量）、 c は光速を表す。

もし粒子の速度が光速に比べ十分小さいと上記の積分の第一項は $mc^2 dt$ となり、また第二項は古典的な運動のエネルギー、 $-(mv^2/2) dt$ を与える。このことから、 mc^2 を静止状態のラグランジュアンとすると（1）式と比較して、質量 m の物体の持つポテンシャル・エネルギーとなる。これがアインシュタインの $E=mc^2$ を与える。

この極めて簡単な4次元空間の最小作用の法則に座標変換に対して不変な場の量と4次元座標のスカラー積を加えると、電磁場のマックスウエル方程式が導ける。また、この表現を連続場に拡張すると、シュレディンガー方程式も導くこともできる。

3. 核融合と核分裂のエネルギー

周知の通り、原子核は中性子と陽子からできている。しかし、正の電荷を持つ陽子同士と中性子の塊を原子核として閉じ込めておくためには力（あるいはエネルギー）が必要である。このエネルギーを粒子と想定して生まれたのが有名な湯川の中間子論である。原子量の大きな原子核を2つの原子核に分裂させると、原子核をくっ付けていた中間子が原子核を構成していた粒子の運動のエネルギーとして飛び出す。同時に分裂してできた新しい原子核の総質量は、分裂前の原子核の質量より小さくなる。分裂前の原子核の質量と分裂後の原子核の質量の差 Δm が、アインシュタインのエネルギー Δmc^2 の値を持ち、分裂時の粒子の運動のエネルギーとして取り出される。これが原子炉のエネルギー源となる。一方、原子量の小さい原子核を融合させ、より重い原子核を作ると、作られた原子核の質量は融合させた原子核の質量の総和より小さくなる。この質量差が核融合のエネルギー源となる。

軽い原子核同士をぶっつけてより重い原子核を作る核融合反応を起こすためには原子核を構成する陽子のクーロン力を上回る力で衝突させる必要がある。これには核融合反応を起こさせる原子核を相応のエネルギーまで加速しなければならない。爆発ではなく、制御しながらこれを行う一つの方法はイオン化した燃料となる軽い原子核を磁場で閉じ込めて核融合反応が起こるまで加熱し、また十分な反応が得られるまで閉じ込めておく必要がある。これを起こさせるのが磁場核融合炉である。

軽い原子核同士をぶっつけて核融合反応を起こさせるた

めの運動のエネルギーは反応物質によって異なる。また、体積あたり核融合反応率は核融合反応によって異なる。核融合反応に必要な核反応粒子の運動のエネルギーを等価的な温度（電子ボルト単位、1電子ボルトはほぼ摂氏1万度）で表すと、核融合反応が最も起こしやすいのは重水素 D とトリチウム T の反応で、反応の結果運動のエネルギー $3.5MeV$ （ミリオン電子ボルト）を持つアルファ粒子（ He^4 ）と $14MeV$ のエネルギーを持つ中性子（ n ）が作られる。またこの核融合反応率がピークとなるのは燃料温度が $50\sim 100keV$ （キロ電子ボルト）程度である。この結果、核反応のエネルギー増倍率はほぼ300倍になる。しかし、この反応の問題点は多量の高エネルギーを持つ中性子を発生することである。しかもこの中性子のエネルギーは $14MeV$ と、核分裂炉が生み出す中性子の10倍以上の高エネルギーを持っているため、炉壁はもとより、構造物も放射化し、これがフル稼働状態では莫大な量の核廃棄物を生み出す。この結果 $D-T$ 反応を利用する核融合炉は、核反応そのものからは放射性廃棄物を産まないが、装置や構造物が多量の、しかも、半減期の長い放射性廃棄物を生み出すと言う大きな問題を持つ。

これに対し、ヘリウム3（ He^3 ）と重水素の核融合反応で生まれる物質は $3.6MeV$ のエネルギーを持つアルファ粒子と $14.7MeV$ のエネルギーを持つプロトン（陽子）である。大半のエネルギーはプラスの電荷を持つプロトンが運び出す。プロトンは正の電荷を持つため、磁場で捕獲し、導き出すことができる。しかし、ヘリウム3と重水素の核融合反応がピークを持つのは燃料温度が $200\sim 500keV$ のあたりで、点火温度は約 $60keV$ と $D-T$ 反応の4倍程度高くなる。またエネルギー増倍率はほぼ100倍程度である。トリチウムを燃料とする炉では燃料を人工的に作らねばならないのに比べ、ヘリウム3はわずかではあるが地上に存在する。しかし、本格的に炉として動かすためには燃料のヘリウム3を月面から採取する必要がある。ヘリウム3は太陽内での陽子同士の核融合反応物質として多量に作られ、太陽風に乗って運び出され、月面に長年吸蓄積されている。したがって月面でヘリウム3を採掘し、液化して地上に運べば良いことになる。ヘリウム3は放射性物質ではないので地上で安全に保管できる。残念なことに太陽風によって運ばれてくるヘリウム3は地磁気が邪魔して地上には到達しないし、到達しても大気に混合し拡散してしまう。

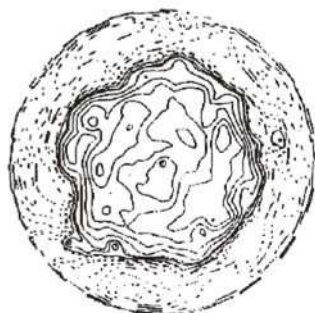
ヘリウム3の核融合反応からは中性子は発生しない。しかし、燃料の中の重水素同士が核融合反応を起こし、中性子を発生する。例えば、温度が $100keV$ では核融合反応の約 $1/4$ は重水素同士の反応となり、この反応の50%は $1MeV$ のヘリウム3と $2.5MeV$ の中性子を発生する。残りの50%は $1MeV$ のトリチウムと $3MeV$ のプロトンとなる。このトリチウムが重水素と反応すると $14MeV$ の中性子を生む。ヘリウム3を燃料とする核融合炉はトリチウムを燃料とする炉に比べ、発生する中性子の量もエネルギーも小さい。しかし全く問題がないわけではない。

中性子を全く放出しない核融合反応にはプロトン p とリチウム6($p-L^6$)、あるいはプロトンとボロン11($p-B^{11}$)などがあり、特に $p-B^{11}$ の核融合炉の研究が進められている。しかしながら、これらの核融合反応は点火温度が $D-T$ に比べ、 $p-L^6$ では66KeV、 $p-B^{11}$ では123KeVと $D-T$ 反応と比較してほぼ一桁高い。さらに高温プラズマからのシンクロトロン放射によるエネルギーロスを抑えるためには、プラズマ密度も一桁高くする必要があり、トカマック型の装置は不向きと考えられる。このため双極子磁場による閉じ込めや、あるいは閉じ込めをしない電力増幅型の装置とか、レーザー核融合装置が必要とされる。

4. プラズマ乱流の自己組織化と核融合炉

建設中のITERで期待されている面白い現象にプラズマ乱流の自己組織化がある。乱流の自己組織化により、円周方向に帯状流を発生し、これがプラズマの半径方向の拡散を阻止し、結果としてプラズマの閉じ込めが良くなるというものである。

プラズマ乱流が自己組織化し、帯状流を生み出し、これがプラズマのエネルギー閉じ込めに効くと言う理論は筆者が故若谷誠宏京大教授とともに、プラズマ断面の振る舞いのモデル方程式を導き、この方程式を使って乱流のシミュレーションをすることにより初めて発見したものである。Hasegawa, Akira; Wakatani, Masahiro (1987). "Self-organization of electrostatic turbulence in a cylindrical plasma". *Physical Review Letters*. **59** (14): 1581-1584. 下図はシミュレーションの結果を表す。プラズマ乱流はプラズマの温度勾配とプラズマを閉じ込めている磁力線の曲がりによって発生する。発生した乱流の振る舞いは乱流の流線、すなわち、等電圧面の持つ等高線の時間変化で追跡できる。この図で太く表されている線はプラズマ断面での乱流ポテンシャルが0の等高線を表し、またこの等高線の内側の実線群は正の電位の等高線、外側の破線は負の等高線を表す。図は乱流が自己組織化し、プラズマの外側を負、内側を正の電荷を持つ等電位面を産み出し、この結果、プラズマはこの等高線に沿ってほぼ円周方向に流を持つことを示している。こうしたプラズマの振る舞いは後に実験的に実証され、トカマックのHモードと呼ばれている。この理論とHモードの発生は核融合



プラズマ乱流の自己組織化によってつくられる流線

炉の成功に重要な役割を果たす。

プラズマ乱流の発生源はプラズマが半径方向に持つ圧力勾配である。従来、こうした乱流が発生すると、プラズマは異常拡散を起こし、プラズマの閉じ込めに支障をきたすと考えられていた。この異常拡散は、これを予言した人の名前を取り、ボーム拡散と呼ばれている。しかし筆者の提唱する乱流の自己組織化による拡散の阻止、または、低減はボーム拡散とは逆に乱流がプラズマの閉じ込めに役立つと言う話であるため、乱流の効果に上下、大きな違いを生む。

制御核融合反応を成功させるためには、プラズマの温度を点火温度($D-T$ 反応の場合は14KeV)まで上昇させ、これを反応持続のため十分長い時間とじ込めておく必要がある。つまり温度と閉じ込め時間の積が重要になる。一方閉じ込め時間はプラズマの拡散速度と逆比例するため、もしプラズマ温度を上げることで乱流が発生してこれがボーム拡散を誘発すると閉じ込め時間とプラズマ温度には逆相関関係が生じ、核融合反応の点火は困難となる。逆に、筆者が提唱するように、プラズマ乱流が自己組織化し、円周方向に帯状流が発生し、これが熱拡散を阻止するならば、プラズマ温度の上昇で発生する乱流が生じて、プラズマの閉じ込めが逆に良くなり、結果、プラズマ温度を上昇させることで核融合反応が非線形的に起こりやすくなることになる。別の言い方をすれば、ボーム拡散が発生すると閉じ込め時間は温度に比例して悪くなるのに対し、筆者の提唱する乱流が閉じ込めをよくすれば、閉じ込め時間は温度に比例して良くなるので全く逆の現象を引き起こし、核融合炉の成功が楽観的になるわけだ。プラズマ乱流の発生はプラズマ中に温度勾配がある限り、避けられない。したがって、ITERの成功はプラズマ温度を上げたときにボーム拡散を引き起こすか、逆に筆者の提唱する帯状流が発生するかにかかっていると言うことになる。この理由でITERの実験は、筆者として楽しみこの上ない。

まとめ

いろいろ雑多な話を書いたが、筆者に取りプラズマ物理学は学位論文以来の専門分野である。5年後に運転開始予定の国際熱核融合実験炉での核融合点火実験は世界で1万人ほどの核融合研究者集団にとり半世紀以上待ちに待った一大イベントである。読者とともにこのイベントに注目したいと思っている。他方、この実験が成功した時には多量の高エネルギー中性子が発生し、これが装置や、周辺建造物を放射化し、多量の放射性廃棄物を生み出すことになるだろう。この時に備え、核融合研究者たちは非中性子発生核融合装置(Aneutronic fusion)の研究などの論理的武装をしておく必要があるだろう。

(通信 昭和32年卒 34年修士)