

# 核融合の開発

## Development of Fusion Energy

中 井 貞 雄\*

Sadao Nakai

### 1. まえがき

石油需給状況がゆるんで、エネルギー問題に関する真剣な対応が忘れられている感のある昨今である。10年前のオイルショック及びそのあとの右往左住ぶりを思い起こしていただきたい。人類の未来が閉ざされたような閉そく感といらだちの日々であった。目を長期的視点に移せば、状況は今も何ら変わっていないのである。

20世紀もあと10数年となってきた。世紀末はともすれば人の心の荒ぶものである。これを超え、平和な、人が幸せに生きる21世紀に向かってゆくには、人類生存の基盤であるエネルギー問題に関する見通しが確立していなければならない。21世紀を見通したエネルギー問題への取り組みの基本は次の2点であろう。

- ・エネルギーの有効利用
- ・核融合エネルギー開発

エネルギー戦略の短中期的な対応としては、技術の現状、我が国の特殊事情、経済性等を考慮して、もっと多様な方策があり、きめ細かく対処すべきであろう。太陽エネルギー、風力、潮力、地熱、原子力、バイオマス、ソフトバス等々、人のロマンをかり立てる技術はそれぞれの局面に応じて重視すべきである。

省エネルギーをも含めて、エネルギーに対する慎重な態度、有効利用技術の開発は、新エネルギーの開発と対をなす重要でかつ有効な方策である。

これらの前提のもとに、21世紀に文明を維持して人類が生存するには核融合エネルギーの開発、利用が必須の要件である。本稿では、このような核融合研究について、以下のような素朴な疑問について述べてみたい。すなわち、

- ・21世紀に核融合は必要か
- ・核融合研究を実現するにはどのような方法があるか

るか

- ・核融合エネルギーの実用化は可能か
- ・いつごろ実用化しうるか

なお、核融合研究の全般的な現状、すなわち核融合研究の行方、到達点と展望、技術的課題、我が国及び世界の研究体制等については、岩波書店「科学」が「核融合研究の到達点」として特集<sup>1)</sup>を組んでいるので参照していただきたい。

### 2. 21世紀に核融合は必要か

エネルギー源として社会に受容される要件は、①資源量、②環境保全性、③安全性、である。このどの一つを欠いても人が生きてゆく社会には適合しない。そのうえで、④経済性、⑤エネルギーペイバック等が重要な要件として検討されねばならない。

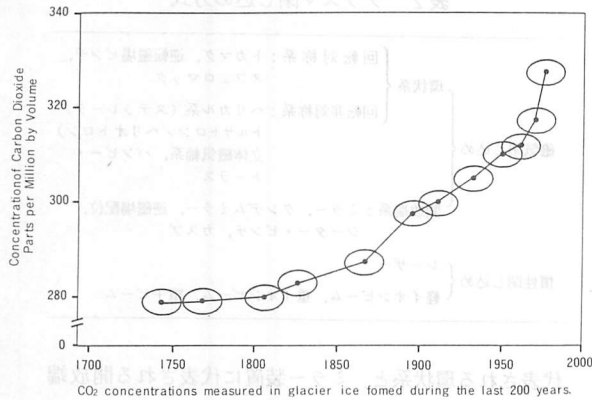
このような観点から核融合エネルギーをみる。まず資源量について、いろんなエネルギー源についての推定資源量を表1に示す<sup>2)</sup>。西暦2,000年までの推定エネルギー消費量11Q、西暦2,050年までの推定値61Qと比較すれば、21世紀の、それもなるべく早い時期に核融合エネルギーに依存しなければならないことは明らかである。D-T反応核融合ではリチウムからトリチウムを生産するから燃料資源量としてはLiの可採量できまる。D-D反応核融合では、海水中の水素の0.03%が重水素であり、 $8 \times 10^8$  Qとなり、どちらにしても燃料としてはほぼ無尽蔵である。

表1 エネルギー資源

世界のエネルギー資源 Resources on the earth	エネルギー(Q) Energy (Q)
石 炭 coal	20 ~ 40
石 油 petroleum	3 ~ 7
天然ガス natural gas	2 ~ 6
235U uranium 235	~ 3
増 殖 炉 breeder reactor	~ 200

Q =  $1.05 \times 10^{21}$  ジュール

\* 大阪大学レーザー核融合研究センター所長・教授  
〒565 吹田市山田丘2-6



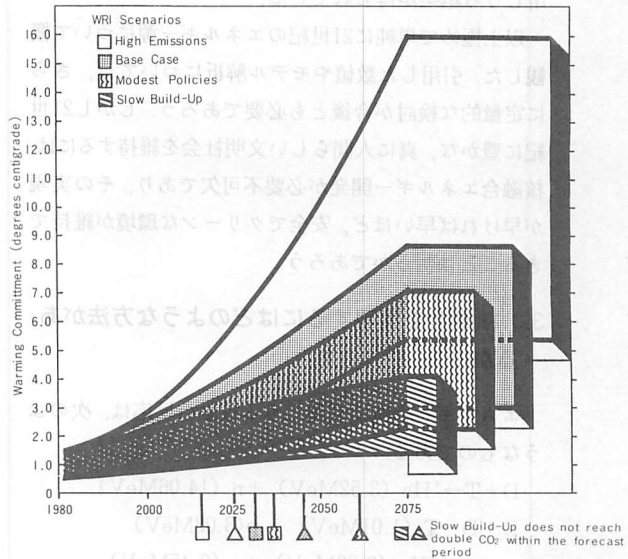
Source: Neftel, et al., "Evidence from Polar Ice Cores for the Increase in Atmospheric CO<sub>2</sub> in the Last Two Centuries," Nature, volume 315, May 2, 1985.

図-1 Estimated Atmospheric Concentration of CO<sub>2</sub>, (Parts per Million by Volume)

資源量について議論する場合、燃料以外に炉を建設するのに必要とする各種炉材料も考慮しなければならない。概念設計の段階ではあるが、各種炉形式について検討されている。長寿命炉を設計すれば、炉材料についての資源的制約はそれだけゆるくなる。しかし研究の進展に伴い、より現実的な炉設計に基づいた検討は必要である。

環境保全性について考えるとき、化石燃料の大量消費をこれ以上持続することはもはや許されない。硫黄及び窒素酸化物による酸性雨の問題は国境を越えた広がりをもつ極めて深刻な問題である。これはしかし技術で解決しうる問題でもある。大量炭酸ガス発生による地球温室効果は、化石燃料の大量消費に伴う本質的な問題である。その影響はまだ明白ではないが、一旦地球の温度上昇として発現したとなると、すぐには抑制できないため、細心で慎重な対策を必要とする。

図-1に産業革命以降の大気中炭酸ガスの増加を示す。<sup>3)</sup> エネルギー消費の増大につれ、すさまじい勢いで増大している。大気中炭酸ガスの温室効果というのは、太陽からの輻射は波長が短く、大気中を透過して地表に達するのに対し、地球からの輻射は赤外線であり、大気中の炭酸ガスにより吸収され、地球大気のを温度を上昇させるというものである。大気モデルと、炭酸ガス放出量の増大から推定した地球温度上昇の予測結果を図-2に示す。大気中炭酸ガスの地球気象への影響、温室効果の解明は、産業先進国の責務であるとともに、一刻も早く化石燃料の大量消費にもとづくエネルギー



- Approximate year of commitment to warming equal to 1.5 to 4.5 degrees centigrade above preindustrial temperature.
- ▲ Approximate year of commitment to warming equal to 1.5 to 4.5 degrees centigrade above 1980 temperature.

図-2 Commitment to Future Warming in the WRI Scenarios

システムの検討を開始すべきである。

核分裂の原子力エネルギーの環境保全性については半減期の永い高濃度燃料廃棄物、いわゆるダウンストリームの解決方法の開発が、永続的なエネルギー源として社会に受け入れられるための要件であろう。

核融合炉の環境保全性についての最大のものは、燃料としてのトリチウムである。半減期は12.3年で、かつβ崩壊により放出する電子のエネルギーは、18.6 keVと低く、放射性同位元素としては極めておだやかなものである。ただし、水素同位体であるため、その生物影響については充分検討する必要がある。中性子による炉の放射化は、廃炉処理問題として検討する必要がある。

安全性に関しては、臨界量の核燃料を集積するということのない核融合炉では、連鎖的に増大するような事故はなく、想定されるのは、一般的な事故、火災のたぐいである。

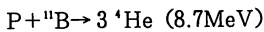
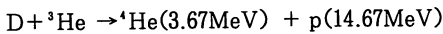
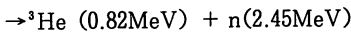
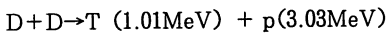
経済性、エネルギーペイバックに関しては、核融合発電所が現実のものとなったとき、さらに詳細な検討を必要とするが、現在想定されている概念設計では、エネルギー資源がひっばくしてくる21世紀には充分実

用しうる結果が得られている。<sup>4)</sup>

以上極めて単純に21世紀のエネルギー源について概観した。引用した数値やモデル解析については、さらに定量的な検討が今後とも必要であろう。しかし21世紀に豊かな、真に人間らしい文明社会を維持するには、核融合エネルギー開発が必要不可欠であり、その実現が早ければ早いほど、安全でクリーンな環境が維持できることは明らかであろう。

### 3. 核融合を実現するにはどのような方法があるか

エネルギー生産に利用しうる核融合反応は、次のようなものである。



(p: プロトン, n: 中性子, カッコ内の数字はそれぞれの粒子が得るエネルギー) トリチウムTは自然界にないから

${}^6\text{Li}+n \rightarrow {}^4\text{He} (2.1\text{MeV}) + T (2.7\text{MeV})$ の反応によりリチウムから生産する。したがってD-T反応を利用する場合はLiが燃料資源となる。重水素Dは海水中の水素の0.03%あり、1ℓの海水中の重水素はD-D反応によりガソリン300ℓに相当するエネルギーを生成する。D- ${}^3\text{He}$ , p-B反応は中性子を発生しないため、炉工学的に極めて有利ではある。まず最も容易なD-T反応で核融合エネルギーを実用化し、技術の向上をはかり、D-D反応の利用技術を開発すれば、ほぼ無尽蔵のエネルギー源を手に入れることができる。

話を当面の目標であるD-T核融合に限っても、反応を起こすためには、D-T燃料を1億度の高温に加熱し、このような高温のプラズマを、密度nと閉じ込め時間 $\tau$ の積 $n\tau$ 値が $10^{14} \sim 10^{15} \text{sec/cm}^3$ となるように安定に真空中に保持しなければならない。

高温プラズマの閉じ込め方式を分類すると表2のようになる。<sup>5)</sup> 原理的に全く異なる磁場閉じ込めと慣性閉じ込めに大別される。前者は荷電粒子が磁力線にまきついて旋回しながら磁力線に沿って運動する性質を利用したものである。密度 $10^{14} \text{cm}^{-3}$ 程度のプラズマを1~10秒間安定に閉じ込めようとするものである。この方式をさらに分類するとトカマク、ヘリオトロンに

表2 プラズマ閉じ込め方式

磁気閉じ込め	環状系	回転対称系: トカマク, 逆転磁場ピンチ, スフェロマック
		回転非対称系: ヘリカル系 (ステラレータ/トルサトロン/ヘリオトロン) 立体磁気軸系, バンビー・トラス
	開放端系: ミラー, タンデムミラー, 逆磁場配位, シーター・ピンチ, カサブ	
慣性閉じ込め	レーザー	軽イオンビーム, 重イオンビーム, 電子ビーム

代表される環状系と、ミラー装置に代表される開放端系となる。

慣性閉じ込め方式は微量燃料ペレットを強力なレーザー光で照射し、ペレット表面から球対称的にプラズマを噴出させる。その反作用でペレット内部の燃料を圧縮加熱し、高温高密度を達成し、核融合反応を起こすものである。これを爆縮という。爆縮により高密度にすると、核融合反応時間は密度の2乗に反比例して短くなるため、慣性による有限の膨張時間より反応時間を短くすることができる。このゆえに慣性閉じ込め核融合といわれる。密度を固体密度 $n_s = 4.5 \times 10^{23}$ の千倍に圧縮すると閉じ込め時間は $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 秒でよいことになる。

上記磁場閉じ込めと慣性閉じ込めとは、高温プラズマの発生、閉じ込めの物理が全く異なり、基盤とする技術も全く異なることは極めて重要な意味をもつことに注目する必要がある。

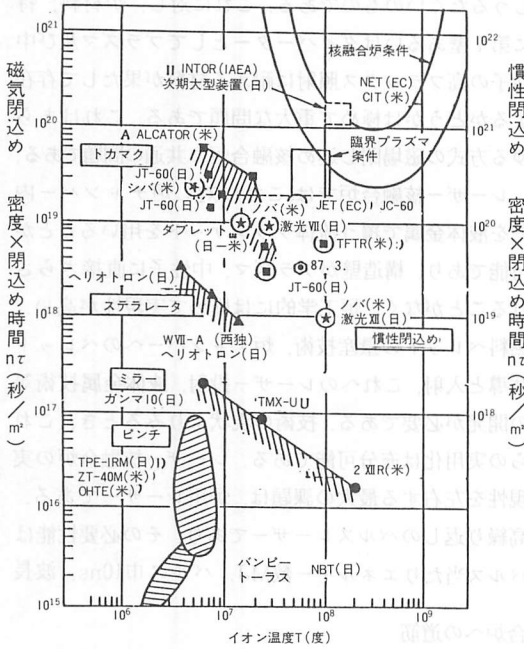
### 4. 核融合エネルギーの実用化は可能か

核融合の実現性を考える場合には、次の2点をそれぞれ独自に検討する必要がある。すなわち、

① 十分なエネルギーを発生することのできる炉心プラズマの生成が可能か—科学実証

② そのような炉心プラズマが出来たとして、エネルギーを長期間、安定に生産することのできる炉の設計・建設が技術的、工学的に可能か—工学実証

上記科学実証と工学実証とは本来別の目標である。未踏の技術開発を行うとき、いたずらに二つを混同して話を複雑にするべきではない。しかし科学実証、工学実証を経て実用エネルギー生産炉となることも事実である。したがって炉心プラズマの特性が向上するにつれ、炉技術的な可能性の検討がより厳しくなされ、それがまた炉心プラズマへの新しい要求仕様を与えることにもなる。



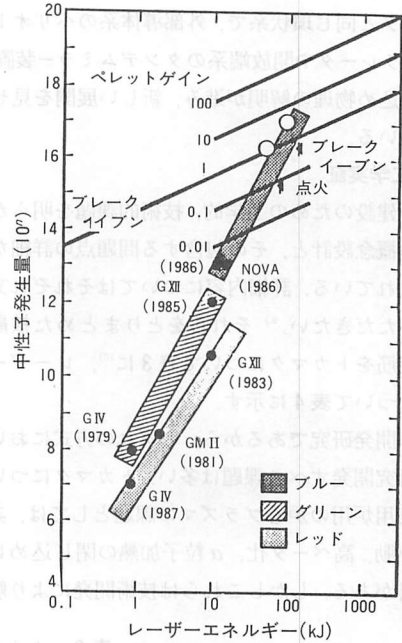
- 1) トカマク (■印) では、平均温度あるいは中心 (最高) 温度の  $\frac{1}{2}$  を示した。他の方式では最高温度を示した。
- 2) 核融合炉条件とは磁気閉込めでは自己点火条件、慣性閉込めではペレット利得100を仮定した。

図-3 核融合研究開発の現状

4.1 科学実証

最近の炉心プラズマ生成技術の進歩を図-3に示す。<sup>6)</sup> 当面の目標は、臨界条件の達成である。これは磁場閉じ込め方式では、高温プラズマを維持するのに必要な入力と、核融合による発生エネルギーが等しくなる条件である。慣性閉じ込め方式では、燃料ペレットに投射したドライバーエネルギーと、爆縮コアからの核融合エネルギーとがバランスする条件である。核融合炉条件とは磁場閉じ込めでは自己点火、すなわちD-T反応によって発生する荷電粒子である $\alpha$ 粒子がプラズマを加熱し、それによってプラズマのエネルギー損失を補い高温プラズマを維持できる条件である。慣性閉じ込めではペレット利得100、すなわち投射したドライバーエネルギーの100倍の核融合エネルギーを発生する条件とした。

図で明らかのように、トカマクが炉心プラズマ発生では最も進んでおり、間もなく臨界プラズマ条件を達成するであろうことは、広く信じられている。閉じ込め特性の良いHモードの出現など、物理的にもまだ完全に解明されない点もあるが、経験的に定式化されたスケール則により臨界条件達成が予測されている。



黒丸は実験データ、白丸はシミュレーション。色分けは基本波  $1 \mu\text{m}$  を赤で、2倍高調波  $0.53 \mu\text{m}$  をグリーン、3倍高調波  $0.35 \mu\text{m}$  をブルーで示す。ブルー光100kJにより核融合点火およびブレイクイーブンが達成できることを示している。

図-4 レーザー核融合の進展とブレイクイーブンのスケールリング

慣性閉じ込め方式では、我が国の激光X II号、米国のノバレーザーの完成、稼働により爆縮物理の解明が進むとともに、目標値に向かってトカマクと比肩するレベルに達していることがわかる。次の課題はレーザーの増力による臨界プラズマ条件—ブレイクイーブンの達成である。これまでに得られた実験結果に基づいた物理モデル、それを組み込んだシミュレーションによって臨界達成に必要な条件が詳細に検討された。図-4に、これまでの実験で達成された点と、ブレイクイーブンへのスケールリングを示す。<sup>7)</sup> ブルー光100kJによって核融合点火が達成されると予測されている。<sup>8)</sup>

核融合の方式として原理的に全く異なるトカマクとレーザー核融合が、臨界条件および炉条件達成へ向けてほぼ等しい距離にあることは、核融合エネルギー開発にとり極めて有利な状況である。基礎とする物理プロセス、基盤とする技術が異なるため、一方のクリティカルパスが他方では問題とならない。このように真に相補的といえる二つの方式の存在は、内燃機関と蒸気タービンの例を挙げるまでもなく、炉の工学的な可能性の検討が近づいてくるにつれ有意義になってきている。

トカマクと同じ環状系で、外部導体系のヘリオトロン、ステラレータや開放端系のタンデムミラー装置も、近年閉じ込め物理の解明が進み、新しい展開を見せようとしている。

4.2 工学実証

実用炉建設のための工学的、技術的課題を明らかにするため概念設計と、その包含する問題点の詳細な検討がなされている。詳細内容についてはそれぞれ文献を参照いただきたい。<sup>9)</sup> それらを取りまとめた核融合炉への道筋をトカマクについて表3に<sup>10)</sup>、レーザー核融合炉について表4に示す。

未踏の開発研究であるから、いずれの方式においても今後研究開発すべき課題は多い。トカマクについてみれば実用炉用の炉心プラズマの課題としては、非誘導電流駆動、高ベータ化、 $\alpha$ 粒子加熱の閉じ込めに与える影響がある。しかしこれらは技術開発により解決

しうるたぐいのものである。これに対し、炉材料、特に第1壁あるいはダイバーターとしてプラズマ及び中性子の高フラックス照射に耐える材料が果たして存在するかどうかは極めて重大な問題である。これはあらゆる方式の磁場閉じ込め核融合炉に共通の問題である。

レーザー核融合炉では、これに対し炉チャンパー内壁を液体金属で覆う流体ブランケットを用いることが可能であり、構造壁がプラズマ、中性子に直接さらされることがなく、炉工学的には極めて実現性が高い。燃料ペレットの量産技術、炉チャンパーへのペレット誘導と入射、これへのレーザー投射、液体金属技術等の開発が必要である。技術の現状よりみると、これらの実用化は充分可能である。レーザー核融合炉の実現性を左右する最大の課題は、炉用レーザーである。高繰り返しのパルスレーザーであり、その必要性能はパルス当たりエネルギー数MJ、パルス巾10ns、波長

表3 トカマク形核融合炉への道筋

装置	臨界プラズマ試験装置 (JT-60などの大形装置)	実験炉 (FER, NETなど)	DEMO炉	実証炉→実用炉
年代	1983 (TFTR / JET稼動)	~2000* (自己点火/長時間燃焼達成)	~2010** (着工)	~2030 - 2050***
主要研究開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界プラズマ条件の達成</li> <li>トカマク炉心の高性能化</li> <li>基本的炉工学技術の研究開発</li> <li>超電導コイル</li> <li>トリチウム取扱い</li> <li>ブランケット</li> <li>材料</li> <li>核融合炉設計研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自己点火、長時間燃焼制御の実証</li> <li>基本的炉工学技術の総合実証</li> <li>超電導コイル技術</li> <li>トリチウム燃料サイクル</li> <li>ブランケット・テスト・モジュール試験</li> <li>中性子工学</li> <li>遠隔操作技術</li> <li>材料照射試験</li> <li>工学的安全性の確認</li> <li>核融合炉設計研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>定常または準定常運転</li> <li>発電技術の実証</li> <li>トリチウム増殖の実証 (増殖比&gt;1)</li> <li>大形システム総合化の実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>信頼性の実証</li> <li>環境安全性の実証</li> <li>経済性の実証</li> </ul>
	(科学的実証)	(技術的実証)	(経済的実証)	

\*原子力開発利用長期計画 (昭和62年6月)  
 \*\*核融合会議核融合炉工学技術検討分科会報告書 (昭和61年10月)  
 \*\*\*核融合炉の経済的フィジビリティに関する調査報告書 (昭和60年4月, 61年1月)

表4 レーザー核融合炉への道筋

装置	激光XII号増力装置 100kJレーザー	金剛, Athena MJレーザー	高平均出力ドライバー MWレーザー	実証炉→実験炉
年代	1990	2000	2010	2020 ~ 2030
主要研究開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界プラズマ条件の達成</li> <li>ペレット製造技術</li> <li>核融合炉設計研究</li> <li>高出力ドライバー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高利得爆縮 Q ≈ 100</li> <li>ペレット製造及び誘導技術</li> <li>液体金属ブランケットの技術開発</li> <li>高効率ドライバー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>連続ペレット照射</li> <li>ペレット量産技術</li> <li>ペレット誘導照射技術</li> <li>液体金属ブランケット炉チャンパー</li> <li>高出力、高効率、高繰り返しドライバー</li> <li>MJ/10nsec・1Hz</li> <li>効率5~10%・波長0.3~0.5μm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>長寿命安定性</li> <li>環境保全, 安全性</li> <li>経済性</li> </ul>
	(科学的実証)		(工学的実証)	(経済的実証)

