特集　エネルギー・資源の将来展望

核融合の開発と将来

Fusion Development and Future

礒　康　彦*
Yasuhiko Iso

1. はじめに

「エネルギー・資源」という言葉は極めて経済的な概念であって，「核融合」が，経済的な意味で本当に「エネルギー」となり「資源」の問題の対象となり得るのは，恐らく21世紀の半ば頃であろうといわれる．しかし，基礎的な物理の研究段階でありながら，最も先端的な技術の開発を必要とし，それ丈大きな投資が必要なこと，そして又，実用化の暁に期待される「エネルギー・資源」的メリットの大さから，核融合の開発は早くから注目されて来た．核融合は将しく，21世紀のエネルギー・資源の目玉となるにちがいない．

この意味で，世界の先進国はこぞって核融合の研究開発に力を注ぎ，そのレベルも急速に高まってきており，物理的研究の段階から工学的段階に移りつつある．以下，エネルギー源としての核融合の特質とその研究開発の現状ならびに今後の展望についてのべる．

2. エネルギー源としての核融合

エネルギー源としてみたときの核融合の最大の魅力はその燃料にある．核融合炉の燃料は，重水素と三重水素で，いずれも究極的には海水中から供給できるという点で，量的にも，又偏在しないという点でも極めて有利である．

重水素（D）は天然水1 m^3当り約34 gの割合で存在するのでこれを分離して容易に豊富に入手することができる．この重水素だけでも核融合反応は起るが，当面は反応条件の易しい重水素と三重水素（トリチウム，T）の混合燃料が使用される．トリチウムの親物質はリチウム（Li）で，中性子との反応でトリチウムを生成する．

リチウムは鉱石としても世界各地で採掘されているが，大量になれば，海水中に0.17 ppm含まれているものを利用することも可能である．大まかに言って，天然リチウム1 gから出来るトリチウムと重水素の反応によって発生する核融合エネルギーはほぼ1 MW日に相当する．石油2 kl，1.8トンと同等である．即ち約2百万分の1で足りる．核分裂原子力と比較すると，1 MW日は分裂性ウラン235,1gの分裂エネルギーに相等し，天然ウランに換算すると約100 gと同等である．海水中から採取する場合を比較すると，天然ウランの混入率3.3 ppbは，海水中リチウム混入率の約50分の1であるから，リチウムの方がさらに楽である．

リチウムの量は消費量よりもむしろブランケット中のインベントリーの方が大きく，1基当り500tとして[1]，世界で1,000基の核融合発電所を作るとすると，約50万トン要る．世界のリチウム鉱石埋蔵量は約8百万トン[2]ンともいわれているので，海水まで手をつけなくとも足りると思われる．

核融合の第二の利点は反応生成物の点である．核融合反応によって出来る生成物は図-1のように，ヘリウムと中性子であって，核分裂の場合出来る核分裂生成物のような放射性の灰が出来ないことが特徴である．では核融合の場合放射線，放射能の問題はないのかというと必ずしもそうではない．中性子は放射線であり，その遮蔽と，材料の放射化の問題がある．放射化された材料は交換されれば放射性廃棄物となる．但し，固体であるから始末はし易いし，又崩壊熱は少ないから，

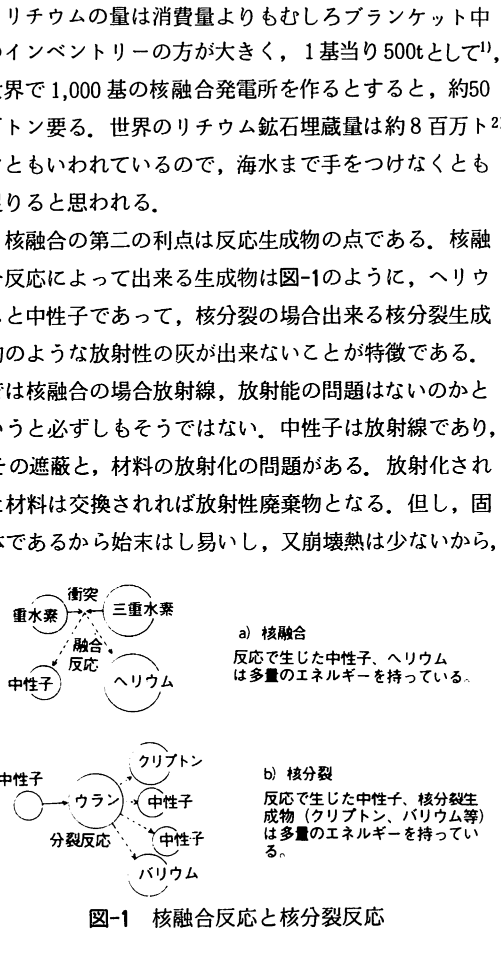


図-1　核融合反応と核分裂反応

* 日本原子力研究所核融合研究センター所長
〒311-02 茨城県那珂郡那珂町向山

スリーマイル島の例のように燃料溶融という心配はなく，安全性は高い．燃料トリチウムはベータ線を出す放射性同位元素であるので，その漏洩対策が必要であるが，総じて，核融合における放射線の影響は，核分裂の場合より2桁以上低いと見做されている[1)].

では核融合は経済的にはどうか．残念ながら，今の時点で経済性を論ずるのは時宜尚早である．余りにも技術的な不確定要素が多いからである．しかし少くとも云えることは，発電コストに占める燃料コスト比が極めて低い[3)]ことである．石油，石炭のそれが80%とか40%とかに上り，原料の値上りが電気代にはね返り，あらゆる物価の値上りに反映するのはこのためである．核融合の場合は殆んどが資本費と保守費であり，今後の技術的進歩によって大巾なコストダウンが可能である．

このように，核融合は今までのエネルギーの常識を超える点が多く，未知の要素が多いと共に，それだけ魅力に富んだシステムであるということが出来る．

3. 核融合発電の原理

核融合発電の場合も，熱エネルギーを電気に変換するメカニズムは一般の火力発電，原子力発電の場合と異るところがなく，蒸気を作るボイラーの熱源として核融合反応を利用する点が違うだけである．しかし，その発熱の反応が，化学反応や核分裂反応と全く異なるのである．

核融合とは，星や太陽で現実に起っている反応で，水素のような軽い元素が数千万度以上という超高温において原子核の融合が起こる現象をいい，理論的には，条件さえ整えば多くの物質がその対象となりうる．

その代表的なものは，次の様な反応で表わされる．

$D+T \rightarrow {}^4He(3.5MeV) + n(14.1MeV)$

$D+D \rightarrow \begin{cases} T \quad (1.0MeV)+P(3.0MeV)(50\%) \\ {}^3He(0.8MeV)+n(2.5MeV)(50\%) \end{cases}$

$D+{}^3He \rightarrow {}^4He(3.7MeV)+P(14.7MeV)$

(MeVはエネルギーの単位で，$1\,MeV=1.6\times10^{-6}erg$)

これらの反応の確率（反応断面積）を図-2に示す．いずれも数億度（数十KeV）必要であるが，D−Tの場合1億度（約10KeV）程度でも実用上可能な範囲に入るので，初世代の核融合炉はD−T反応によるものとなる．

D−T反応によって生ずる中性子（n）はさらに，炉心まわりのリチウムを含むブランケットに入って，次の反応によって三重水素（トリチウム）を自己生産

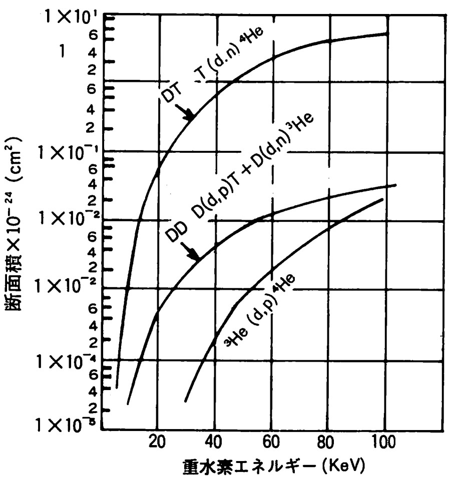


図-2　核融合反応断面積

する．

${}^6Li+n \rightarrow {}^4He+T+(4.8MeV)$

${}^7Li+n \rightarrow {}^4He+T+n'+(-2.47MeV)$

天然のリチウムは約1%の${}^6Li$と99%の${}^7Li$とから成り，後者の反応は高エネルギー領域で多く起る．

従って，核融合炉のブランケット中ではこの両者の反応が期待できる．一方熱中性子炉によりトリチウムを生産する場合は，${}^6Li$を濃縮して使用する．

ブランケット中で生成されるトリチウムは，回収して再び燃料として使用するが，生成トリチウムと消費したトリチウムの比を増殖比（Breeding Ratio）と呼び，回収効率も考えて1.0以上になれば燃料自給が可能となる．

D−T反応によって生じた${}^4He$はプラズマ中に留まり，もっているエネルギーは核融合反応持続のためのプラズマ温度維持のために費やされる．又，14.1MeVのエネルギーをもった中性子は壁を貫通してブランケットに達し，そこでトリチウム生成と同時に熱エネルギーに変換され，冷却材を介して外部に取出される．この熱を究極的にはタービンを介して電気に変えることになる．

では核融合反応を起させる条件をどうして作り出すのか．それは燃料ガスを約1億度という超高温にし，かつその状態を永く持続させることである．これを閉込めといい，いろいろの方法が考えられている．

表1に，プラズマ閉込めの方式を分類してみる．これらのうちで現在最も進んでいるのがトカマク型である．

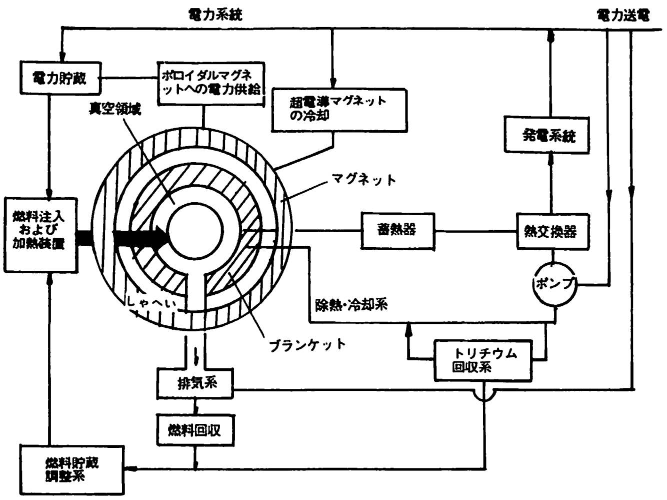


図-3 トカマク形核融合炉のシステム構成の基本的概念

表1 炉形式の分類

閉込め方式	運転形態	磁界配位（プラズマ形状）	代表例
磁界による閉込め	定常または準定常形	トーラス形	(低β) トカマク (低β) ステラレータ (高β) 逆転磁界形 (高β) スクリューピンチ
		開放端形	ミラー カスプ
	パルス形	トーラス形	(高β) θピンチ形
慣性閉込め	レーザ核融合 相対論的電子ビーム入射核融合		

4. 核融合研究開発の現状

プラズマの閉込め性能は，プラズマの温度（T)，密度（n)，閉込め時間（τ）の三つの値で表わされる（図-4）．閉込め時間とはプラズマのもつエネルギーの減衰する時定数である．図上で右上部のU字形の範囲にくれば自己点火条件といって核融合反応自身の熱によって反応が維持できる状態になり，核融合炉が成立つ．温度2億度，$n\tau \simeq 2 \times 10^{20}$ 秒/m^3 程度が必要である．当面の目標は，その下のU字の範囲で，臨界プラズマ条件と呼び，反応を継続するために必要な入力と反応による出力のエネルギーがバランスする条件である．この段階ではプラズマ物理の問題にほぼ目鼻がつくという意味で科学的実証ともいう．

この目的のために現在世界で四つの装置がほぼ同時に開発中である．米国プリンストン大学プラズマ物理研究所のTFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)，英国カラム研究所のECのJET (Joint European Torus)，ソ連モスクワのクルチャトフ研究所のT−15と日本のJT−60の四つで，世界の四大トカマクとも呼ばれる．これらはそれぞれ独立に計画され，おのおの特徴の異なる装置であるが，お互いに補い合って核融合発電に至るデータを提供することが期待されている．

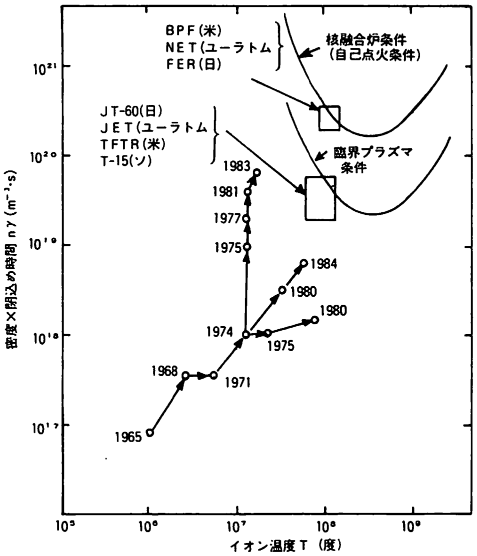


図-4 トカマク型閉込め性能の進展

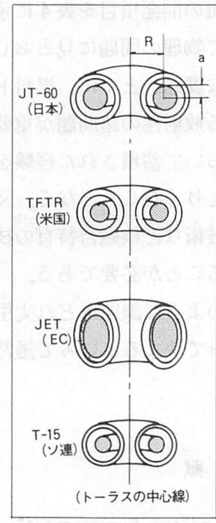
わが国では，昭和50年原子力委員会の決定のもとに，JT−60の開発を開始し，茨城県那珂町にその装置を建設中である．昭和60年春稼動開始の予定である．

米国TFTR，ECのJETは既に稼働しており，温度3千万度，閉込め時間0.6秒程度の性能のプラズマを得ている．最終目的である臨界プラズマの達成は，昭和62年頃，相次いで実現する見込みである．

表 2　高温プラズマ閉込めの目標値とトカマク型装置の性能値

	温度 T(K)	密度×閉込め時間 $(m^{-3}s)$	密度 $n(m^{-3})$	閉込め時間 $\tau(s)$
核融合炉(自己点火)条件	2 億	$2 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{20}$	2
臨界プラズマ条件	数千万～1 億	$(2-6) \cdot 10^{19}$	$(0.2-1) \cdot 10^{20}$	0.2-1
トカマク型装置の現在の性能値*	8000万	$8 \cdot 10^{19}$	$10 \cdot 10^{20}$	0.6

＊本欄の数値は，各性能値の最大値を示すもので，同一の装置でこの性能が実現されてはいない．



	R（メートル）	a（メートル）	Bt（テスラ）	備考
JT-60（日本）	3.0	0.95	4.5	昭和60年完成
TFTR（米国）	2.48	0.85	5.2	昭和58年完成
JET（EC）	2.96	2.10 × 1.25	2.8 (3.5)	昭和58年完成
T-15（ソ連）	2.3	0.75	3.5	昭和61年完成

R：主半径（トーラスの中心線からプラズマの中心までの半径）
a：副半径（プラズマの半径）
Bt：トロイダル磁場
◎：プラズマ

図-5　世界の4大トカマクの比較

5. 今後の見とおし

このように，核融合はこゝ数年の間に世界的に大きく進展した．世界の目は今や“科学的実証”から次の目標，すなわちいよいよ炉として充分なエネルギーを発生する“技術的実証”の段階に注がれている．核融合発電の実用化にはさらに“経済的実証”の段階を経なければならないが，当面は，いつまでにどのようにして“技術的実証”を果すかが課題である．それは，自己点火条件の達成であり，炉として必要な技術的課題にこたえることである．

表 3 は現在計画されている世界の次期装置のリストであるが，JT−60 クラスの装置の開発を手がけた国がそれぞれ次の段階の計画に進もうとしていることがわかる．変っているのは，国際原子力機関（IAEA）が進めているINTOR計画である．これは，大きな開発資金を必要とする装置は世界で一つ共同で作ろうという提唱に基づいて始まった共同設計作業の計画である．現在の四大トカマクを手がけているアメリカ，ソ連，欧州連合，日本の四者がウィーンに集まり，最新の各国のデータに基づいて標準設計をまとめる作業をつづけている．ソ連も参加している点がユニークな計画であるが，その実現性については問題も多い．最近では各国独自の計画がそれぞれ発表されている．

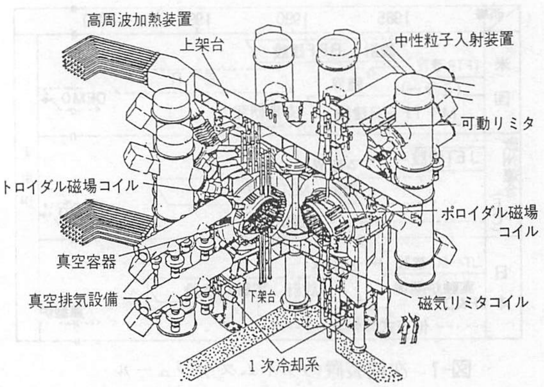


図-6　JT−60鳥瞰図

米国はいろいろ変遷があり，1981年に成立した「磁気核融合工学法」という法律で，今世紀中完成をめざしたFED（Fusion Engineering Device）という装置を計画したが，その後の財政難等の事情から，出来るだけ安く自己点火条件を達成することを主眼とした装置TFCX（Tokamak Fusion Core Experiment），あるいはBPF（Burning Plasma Facility）という名のものの設計を進めている．

欧州連合（EC）はJETに引つづきトカマクによりNET（Next European Torus）を開発する計画である．ソ連はINTORが実現出来なければ独自の計画としてOTR（Experimental Tokamak Reactor）というハイブリッド炉の開発を考えていると伝えられ

表 3　設計中の世界の核融合次期装置

アメリカ	TFCX（旧名）	Tokamak Fusion Core Experiment
欧州連合（EC）	NET	Next European Torus
ソビエト	OTR	Experimental Fusion Reactor
日本	核融合実験炉（FER）	Fusion Experimental Reactor
国際原子力機関（IAEA）	INTOR	INternational TOkamak Reactor

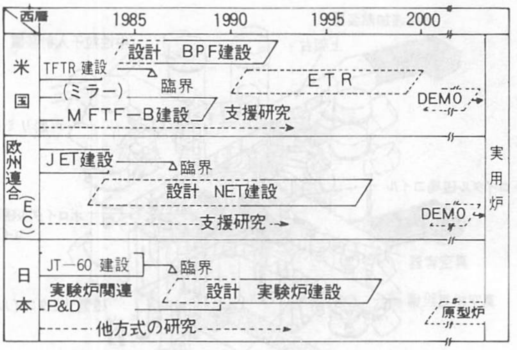


図-7　次期装置のタイムスケジュール

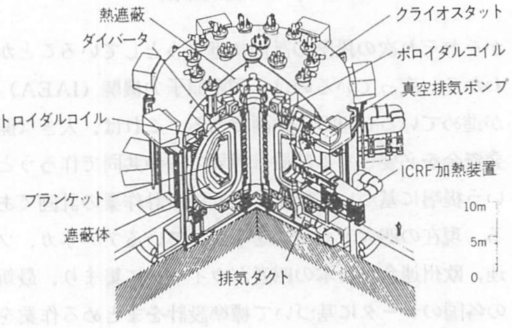


図-8　核融合実験炉FERの概念図

る．

日本は，原子力委員会の長期計画において，核融合実験炉に進むこととしており，FER（Fusion Experimental Reactor）の設計が行われている．

先進7ケ国首脳によるサミット会議において提唱された科学技術協力の一テーマとして核融合次期装置計画の協力が検討されているが，その成り行きが注目される．図-7に米国，EC，日本三者の計画タイムスケジュールを比較して示す．図-8は日本のFERの概念図である．

核融合炉の実現には多くの課題があり，逐次解決さ

表4　核融合発電開発路線と課題

装　置	臨界プラズマ試験装置 JT−60	実　験　炉	実　証　炉
目　標	プラズマ閉じ込めの物理の総合試験 （科学的実証）	炉としての定常出力の発生，制御 （技術的実証）	発電設備としての総合評価 （経済的実証）
課　題	◦プラズマの温度密度，閉じ込め時間の目標達成 ◦大型トカマク装置の製作運転技術	◦超電導磁石技術 ◦トリチウムの確保及び取扱技術 ◦材料遮へい，遠隔操作技術，安全性の検証	◦信頼性 ◦安全性 ◦環境保全性 ◦経済性
完成時期	〜1985	1990年代	2000年代

→ 核融合発電

れなければならない．各段階毎の開発項目を表4に示す．当面四大トカマクによって物理の問題に見とおしが得られれば，あとは工学的な課題，とくに，燃料トリチウムや，中性子にかかわる放射性の諸問題が重要となる．これらは核分裂炉において蓄積された経験をもとに，核融合特有の問題にとりくむこととなる．又超電導磁石やプラズマ加熱の技術など核融合特有の技術開発も一層強力に推進されることが必要である．

核融合炉実現のカギは，このような課題にどれ丈早く，かつ強力に取組むかによって決まるといって過言ではない．

参 考 文 献

1）F.N.Flakus “Fusion Power and the Environment” Atomic Energy Review, 1975 vol.13 No.3.
2）米国鉱山局1971年資料
3）M.A.Abdou et. al. “Recent Progress in Design Studies for Tokamak Demonstration and Commercial Power Plant “3rd IAEA Technical Committe Meeting on Reactor Design and Technology Oct. 1981, Tokyo Japan.