1 解説

慣性核融合研究の現状と展望

(大阪大学 レーザー) 山中千代衛, 中井貞雄
(核融合研究センター)

慣性核融合はエネルギードライバーとしてレーザーを用い、科学的実証を目指して活発な研究が展開されている。当面の目標は燃料ペレット爆縮の物理の解明と、ペレット利得のスケールアップの確立である。レーザーの高出力化に伴って炉規模へのアプローチと、解明すべき課題が明らかにされている。この成果に基づいて炉設計研究も着手されている。これらのペレット爆縮、エネルギードライバーの開発、炉設計等について研究の現状を総括し、今後の課題と展望を明らかにする。

I. ま え が き

慣性核融合の概念、研究の現状および研究推進に必要な関連技術について概説し、科学的実証へ向けての各国の計画、炉工学的な検討について紹介し、慣性核融合によるエネルギー開発の見通しを述べる。

慣性核融合とは、重水素および三重水素で出来た燃料小球に、レーザー、粒子ビーム等の高出力短パルスの集中エネルギーを投射加熱し、膨脹により消散するより早く核融合反応を点火するものである。このとき燃料を圧縮して密度を高くすると燃焼率が上がり、核融合点火に必要な投射エネルギーが小さくてすむ。

燃料球の圧縮には、爆縮過程を利用する。これは投射エネルギーにより燃料球表面に高温プラズマを発生し、これの球対称的膨脹の反作用により、燃料小球の中核部を圧縮し、固体密度の1,000倍から10,000倍という高密度プラズマを発生させるのである。その結果、中心部は核融合温度に到達し、反応が点火され、1 ns以下という短時間のうちに燃料が核融合燃焼を起こす。このとき投射したエネルギーの100~1,000倍もの核融合エネルギーが発生する。

磁気閉じ込め核融合では、磁界中でのプラズマの保持時間を長くすることと、加熱の方法とが課題となるのに対して、慣性核融合では慣性によりプラズマが静止している間に、点火して燃焼させてしまう超高密度を達成することが課題となる。

このように、2つの方法は根本的に異なった手法であり、解決すべき問題点、条件が違っている。したがって、核融合という新エネルギーの実現に向けて、これら2つのアプローチは互いに相補的な関係をもっているのである。レーザー核融合は本格的に取り上げられてから短時日の間に磁気閉じ込め核融合と並びうる状態にまで急速に発展してきた。

さて種々の核融合反応の中で、当面の目標はD-T反

応であるが、D-D反応が可能となれば、トリチウム燃料サイクル、トリチウムを生産するためのリチウム資源の問題、14 MeV 中性子に対する炉構造的対応等の炉工学的問題が著しく緩和される。さらに中性子を発生しないP-B反応が利用できれば、炉材料の放射化等の核エネルギーに付随した問題が大幅に軽減される。このような先進的な核融合燃料システムに対して、閉じ込めに磁場を用いない、かつ高密度圧縮を利用する慣性核融合が有望と考えられる。

慣性核融合研究開発の基本的な要素は

- (1) エネルギードライバーの開発
- (2) 燃料ペレット製造技術の開発
- (3) 計算機シミュレーションと燃料ペレット設計
- (4) 爆縮計測技術の開発と爆縮の物理過程の解明

である。上記4課題が一体となって、慣性核融合研究を推進し、さらにその先に炉設計、炉工学的研究開発がくる。これまでの炉設計、炉工学的問題点の検討の結果、その技術的実現性は十分に高いものと考えられている。

II. ペレット爆縮の物理と
核融合スケールアップ

燃料ペレットターゲットの表面に、周囲より均一にレーザー光を照射する。表面にプラズマが発生して外へ向って膨脹し、プラズマの張り出しを形成する。レーザー光はこの部分で吸収される。この様子をモデル的に第1図に示す。同図(a)のC-A断面での密度、温度の分布を示すと(b)のようになる。右方より入射したレーザー光は電子密度 $n < n_c$ (n_c : 臨界密度) の吸収領域で吸収される。温度が上昇するとイオン-電子衝突による逆制動放射による吸収は低下し、代わってプラズ

Review on Inertial Confinement Fusion Research,
Chiyoe YAMANAKA, Sadao NAKAI.

(1981年 11月16日 受理)

第 1 図 慣性核融合のプロセス(a)とその素過程(b)

マ波の励起を伴う共鳴吸収, 非線形吸収等が寄与する。

吸収されたエネルギーは古典的な熱伝導, 高温電子の流れ, 輻射等により, アブレーション(Ablation)面に運ばれ, ここでアブレーションの反作用として内部コアに対する圧縮力を発生する。レーザーパワーを段階的に上昇させると発生圧力がこれに伴って増大し, コア中心に向かって衝撃波を駆動する。効率よく圧縮を行わせるには, 吸収率とともに熱伝導領域でのエネルギー輸送が充分よくなければならない。さらに対称的に圧縮するためには, アブレーション面が安定でなければならない。この面が内部に向かって加速される時期には, 力は密度の高い圧縮領域から密度の低い熱伝導領域に向っているため, Rayleigh-Taylor不安定性が起る可能性がある。これに対しても種々の安定化機構の存在が指摘されている。効率よく, 少ないエネルギーで圧縮を行わせるには, コア温度を低温に保ち(プリヒートシールド)かつ単一の強い衝撃波より, 多段の弱い衝撃波を, それぞれが同時にコア中心に到達するように発生し圧縮する(等エントロピー圧縮)。このとき中心は核融合温度まで上昇し, 反応により発生した α 粒子による自己加熱により核融合燃焼波が高密度領域を伝搬してベレットゲインを高める。

各領域での物理素過程を第1図(b)に示す。各過程での効率を次のように定義する。

- 吸収: ε_a (吸収エネルギー/入射エネルギー)
 —吸収効率

- エネルギー輸送: ε_e (圧縮コアエネルギー/吸収エネルギー)
 ○アブレーション
 ○圧縮, 加速 — 流体力学の効率
- 点火
 ○核融合燃焼: g_f (核融合発生エネルギー/圧縮コアエネルギー)
 —燃料ゲイン

ベレットゲインを $Q = \varepsilon_a \varepsilon_e g_f$ (核融合発生エネルギー/入射レーザーエネルギー) で定義する。 $Q=1$ をブレークイブンの条件といい, この達成が当面の研究目標である。

ベレットゲイン Q と, 所要レーザーエネルギー W_L との関係は

$$W_L = (Q/115)^{12/5} \alpha^3 / (\varepsilon_a \varepsilon_e)^{17/5} \text{ (J)} \quad (1)$$

で与えられている⁽¹⁾。ここに α は等エントロピー圧縮の場合1となるプリヒート効果を示すパラメータである。これより $\varepsilon_a, \varepsilon_e$ を大きくし, α をなるべく小さくすることが, 一定の Q 値を得るのに必要なレーザーエネルギーを減少させるのに必要な要諦である。 $\varepsilon_a, \varepsilon_e, \alpha$ および圧縮の安定性を実験および理論的に解明, 改善するのが研究の中心である。

Ⅲ. 慣性核融合実験の現状⁽²⁾

多ビーム照射により燃料ペレットを爆縮し, できるだけ高密度圧縮, 高温, 高中性子発生を追求するとともに, 爆縮の物理的過程を種々のターゲットを用いて詳細に解明する実験とが相補って進められている。前者では1~10 kJ レーザーにより, 圧縮密度10~100 g/cm³, 温度~5 keV, 中性子発生量 10^{10} /ショット, $\pi\tau \sim 10^{13}$

s/cm³が実現され、100 kJ級レーザーによるブレークイーブンが期待され、その建設も進められている。

1. レーザープラズマ相互作用

吸収、エネルギー輸送、アブレーションによる圧縮力の発生等の爆縮の素過程が、種々の形状(平面、ディスク、円筒、円錐、球形)、材料(元素、金属、非金属他)、構造(単層、多層、2重層、他)のターゲットを用いて詳細な研究が行われ、爆縮現象の理解が進んでいる。ドライバーの種類、レーザー波長、パルス幅、照射パワー密度等を変化させることにより、理論的予測との比較を可能とし、物理モデルに関する解析結果の確度を高めている。結果の一例として、第2図に波長および吸収レーザーパワーの関数としての発生アブレーション圧力を示す。レーザー出力の増大により、核融合点火に必要な燃料圧縮の実現しうることが示された。プラズマ温度、密度、膨脹速度、エネルギー、輻射等種々の測定より、吸収、エネルギー輸送、アブレーション等のプロセスが解析されている。

第2図 レーザー照射によるアブレーション圧力の発生

実験結果が新しい理論的なモデル、解析を要求し、高密度、高エネルギーの新しいプラズマ物理の領域を開拓しつつある。また、その結果をシミュレーションコードに取り込むことにより、爆縮シミュレーションの信頼度を増し、核融合炉規模まで現象のスケールングを行なっている。

2. ベレット爆縮実験

レーザーパワーの増大につれ、ベレット爆縮実験は着実な進展を見せている。衝撃圧縮に関する実験は充分になされて理論およびシミュレーションとのよい一致が得られ、現象の理解が充分になされた。ついで、アブレーティブ圧縮へと研究の中心が移行した。

衝撃圧縮とアブレーティブ圧縮の基本的な相違を第3図に示す。ガス封入された肉厚の薄いガラスマイクロバルーン(GMB)にレーザー光を投射すると、GMBのガラスシェルが一樣に加熱されて内外に膨脹する。内向き膨脹により内部のガスを圧縮するものである。これを衝撃圧縮といいその様子を第3図(a)に示す。GMBの表面にプラスチック層をコーティングしてレーザー照射すると、ターゲット表面のみが加熱され、その外向き噴出の反作用でシェル内面の温度を低く保ったままで、シェルを内向きに加速して封入ガスを圧縮する。プラスチックコーティング層を厚くするほどベレット内部の加熱が低く保たれ、かつ圧縮過程がゆるやかになるため、衝撃波加熱を低く抑えられる。第3図(b), (c)に示すように圧縮時間は長くなるが、体積圧縮率は、コーティングの厚さが増大するほど高くなっている。これをアブレーティブ圧縮という。

効率の良い高密度圧縮では、輻射、高温電子によるプリヒートを抑制するとともに、衝撃波加熱を抑えるため、ゆっくりしたプロセスで燃料を圧縮する。このため圧縮の安定性が重要な研究課題となる。

安定性に及ぼす因子は

- (1) 照射あるいはアブレーション圧力の一様性
- (2) ターゲット構造、表面状態の均一性
- (3) Rayleigh-Taylor 不安定性

等である。これらに関して定量的な研究が進められつつあり、安定なベレット爆縮に必要な照射の均一性、ターゲット製作の精度、Rayleigh-Taylor に対し安定な構造等に関する情報が得られている。

3. 爆縮スケールング

これまでの研究の結果、衝撃圧縮モードとアブレーティブ圧縮モードとは、前者が高温低密度、後者が低温高密度という特徴をもち、核融合燃焼波により高ベレットゲインを得るのに必要な高密度を実現するためには、プリヒートを抑制した低速圧縮による等エントロピー圧縮が望ましいことが判明した。このようなモードでの入射レーザーパワーに対するスケールングの確立が、ブレークイーブンおよびその後の炉用レーザーの所要エネルギーを求めるために必要とされる。

これまでの実験成果および、実験結果との比較対比

レーザパルス幅 100 ps, ピークレーザパワー 2.5 TW, カラマイクロナバルーン 80 μm 径,
1.1 μm 厚, 封入ガス Ne 26 atm

第 3 図 衝撃圧縮(a)とアブレーティブ圧縮(c)の計算機シミュレーションによる流線図

による精度向上を図って開発されたシミュレーションの結果を総合して、第 4 図に示すようなレーザ出力と核融合プラズマの達成目標とが設定される。燃料ゲイン(Fuel Gain)およびペレットゲイン(Pellet Gain)は(1)式に関連して定義されている量である。ペレットゲイン 1 をブレイクイブと称し、これ以上では正味のエネルギー増倍が得られる。このような状況のもと高出力レーザの開発、建設が急がれている。

第 4 図 レーザ出力とそれにより達成しうるプラズマパラメータ

IV. エネルギードライバーの開発と各国の現状および計画⁽³⁾

レーザ出力に応じた研究の里程碑が設定される。現在 10 kJ 級レーザの段階であり、米国では 100 kJ 級レーザ(Nova ガラスレーザ: LLNL, Antares CO₂ レーザ: LANL)の建設が進められている。レーザ出力に応じた研究の主な課題およびペレットゲ

イン、圧縮プラズマの目標パラメータを示すと次のようになる。それぞれの段階に応じて最適の構造およびサイズのペレットが用いられることになる。

1 kJ 級: 衝撃圧縮→アブレーティブ圧縮

$$Q=10^{-4}, \rho R=0.005(\text{g}/\text{cm}^2)$$

$$\rho=10(\text{g}/\text{cm}^3)$$

10 kJ 級: 等エントロピー圧縮

$$Q=10^{-2}, \rho R=0.05(\text{g}/\text{cm}^2),$$

$$\rho=50(\text{g}/\text{cm}^3)$$

100 kJ 級: ブレイクイブ

$$Q=1, \rho R=0.2(\text{g}/\text{cm}^2), \rho=500(\text{g}/\text{cm}^3)$$

MJ 級: 炉用レーザ

$$Q=100\sim 500, \rho R=3\sim 5(\text{g}/\text{cm}^2),$$

$$\rho=500\sim 1,000(\text{g}/\text{cm}^3)$$

ペレット爆縮のドライバーとしては次のようなものを用いられ、あるいは研究開発が進められている。それぞれの開発段階、技術の現状を見極めて研究計画を考慮する必要がある。

エネルギードライバー

レーザ Nd ガラスレーザ 1 μm

CO₂ ガスレーザ 10 μm

短波長レーザ <0.5 μm

粒子ビーム 相対論的電子ビーム(REB) 1 MeV

軽イオンビーム(LIB) 10 MeV

重イオンビーム(HIB) 10 GeV

Nd ガラスレーザは、現在最も完成度の高いレーザで、爆縮核融合実験に広く用いられている。我が国で開発された新種レーザガラスが広く用いられている。ブレイクイブ($Q=1$)達成に必要な出力 100

kJ級の技術は確立しており、これによるブレークイーブン達成への努力が急ピッチで展開されている。第1表に、現在世界各国で稼動中および建設中のガラスレーザー装置の概要を示す。1984~85年にかけてブレークイーブン実験に着手される状況に注目しなければならない。

現在建設中である出力 20 kJ の「激光Ⅷ号」の技術開発を行い、その後プラズマ実験に用いられている2ビーム「激光Ⅷ号」モジュールを写真1に示す。

CO₂ レーザーは高効率、高繰返し可能で、炉用レーザーとしての可能性をもつ。波長が 10 μm と赤外領域にあること、寄生発振が生じやすいこと等のためガラスレーザーに比し、技術開発がやや遅れている。しかし最近の技術開発はめざましく、10 kJ級レーザーが相次いで完成、稼動されており、100 kJ級レーザー建設の技術も確立し、炉用レーザーを想定したMJ級レーザーの設計もなされている。この方向の研究をさらに活発に推進するには爆縮の波長依存性を解明する必要がある。

第1表 各国の核融合研究用ガラスレーザー装置

国 名	研究所・ 装置名	ビーム数	出力パワー (TW)	出力エネル ギー(kJ)	パルス幅 (ns)	摘 要	
米 国	LLNL						
	Argus	2	5	2	0.03~1.0	10 ⁸ 中性子	
	Shiva	20	30	10	0.1 ~1.0	3×10 ¹⁰ 中性子	
	Nova-I	10	100	100	0.1 ~3.0	50 g/cc (1984)	
	LLE						
	U. Rochester						
	GDL	1	0.7	—	0.1		
	Omega-X	24	15	5	0.03~0.1	10 ¹⁰ 中性子 6 g/cc	
	NRL						
	Pharos-II	2	0.7	1.3	0.1 ~1.0		
ソ 連	KMS						
	Charoma-I	2	0.6	1	0.1		
	Kurchatov						
	Mishen	4	—	1	1.0		
	Levedev						
	Delfin	216	33	100	0.2 ~3.0	} 建設中	
Aurora	20	—	50~500	0.03~10			
UMI-35			100				
日 本	ILE Osaka						
	Gekko-II	2	0.4	0.12	0.1 ~1.0		
	Gekko-IV	4	2	1	0.1 ~1.0	10 ⁸ 中性子	
	Gekko M-II	2	7	3	0.1 ~1.0	5 g/cc	
	Gekko-VII	12	40	20	0.1 ~1.0	(1983)	
	IPP Nagoya						
	Halna	1	0.1	—	0.1		
	ELI	1	0.1	—	0.1		
	英国	Rutherford					
	Vulcan	6	3.6	1.2	0.1 ~1.0		
フランス	AWRL						
	—	2	1	1	0.05~1.0		
	Limeil						
	P102	2	0.6	—	0.08		
	Octal	8	2	1	0.1 ~1.0		
イタリア	Ecole Poly. Tek.						
	Greco	1	0.25	0.25	0.1 ~2.5		
	Frascati						
ポーランド	—	2	—	0.25	2.0		
オーストラリア	Kalisky Inst.						
	—	4	—	0.1	3.0		
オーストラリア	LIT-IV	4	1.2	0.12	0.005~0.01

写真 1 ガラスレーザー「激光Ⅷ号」モジュール

る。第2表(a)にCO₂レーザーの世界各国での状況を示す。1983年頃より40 kJ級レーザーによる爆縮実験が計画されている。

短波長レーザーは高ペレットゲインをねらいとした方向である。レーザー基礎研究の段階で、種々のタイプのものが研究されている。

REB および LIBは共通の技術基盤(パルスパワー技術)に立ち、ビーム発生効率の高い(50%)のが特徴である。近年、発生、収束の実験が進み、ドライバーとして使用しうる可能性が得られるようになった。しかし、収束、伝搬に本質的な問題があり炉を想定するまでにはいまだ一段の技術開発が必要である。将来、炉の経済性等を考慮すると有効なドライバーとして注目される。

HIBは加速器によりウラン等の重イオンを加速、パンチ、収束して集中エネルギー源として用いようとする。

第2表 各国の核融合研究用 CO₂ レーザー装置および粒子ビーム発生装置

国名	研究所・装置名	ビーム数	出力パワー (TW)	出力エネルギー (kJ)	パルス幅 (ns)	摘要
(a) CO ₂ レーザー装置(ヨウ素レーザーも含む)						
米 国	LANL					
	DBS	2	2.5	2.5	1	
	Helios	8	10	10	1	{10 ¹⁰ 中性子 20 g/cc
日 本	Antares I	2×(12)	40	40	1	(1983)
	ILE Osaka					
	Lekko II	2	1	1	1	10 ⁶ 中性子
	Lekko VII	8	10	10	1	
カナダ	NRC					
	Coco II	1	0.2	0.2	2	
イタリア	Frascati					
	Shimera	2	0.2	0.2	1	(1981)
ポーランド	Kalisky Inst.					
	—	8	6	6	1	
西 独	IQO Garching					
	Asterix III	1	1.1	0.4	0.35	ヨウ素レーザー
(b) 粒子ビーム発生装置			(MeV)			
米 国	Sandia					
	Proto II	1	9	1.5	24	
	PBFA I	36	40	2.4	24	1 MJ
	PBFA II	36	80	6	60	(1985) 3.7 MJ
ソ 連	Kurchatov					
	Angara V-M	1	1	2.0	80	
	Angara V	50	50	2.0	80	(1983)
フランス	Valduc					
	Sidnix	1	1	1.0	80	
西 独	Karlsruhe					
	Kalif	1	1	2.0	45	55 kJ
日 本	ILE Osaka					
	Reiden IV	1	1	1.0	60	50 kJ
	Reiden IV-A	1	1	3.0	60	50 kJ

るもので、ドライバーとしての評価検討が活発に進められている。第2表(b)に、粒子ビーム発生装置の世界の現状を示す。最大の計画はサンディア研究所のPBFAおよびクルチャトフ研究所のAngaraであるが、いずれも多ビーム並列動作で所定の出力を得る計画であり、単機出力は現在阪大レーザー研にて稼動している“励電Ⅳ号”と同程度ではば1TWである。

V. 燃料ペレット開発およびペレット設計⁽⁴⁾

実験内容、研究段階に応じて、用いるペレット構造、サイズは異なる。第5図に、それぞれの代表的な構造、サイズを示す。このような多層、微小なペレットを真球度、表面精度よく製作するには高度で独特の技術を要する。

第5図 実験の各段階で使用される典型的なペレットターゲット

開発項目は次のとおりである。

○中空球製造技術

ガラスマイクロバルーン

プラスチックマイクロバルーン

○コーティング技術

メタルコーティング

プラスチックコーティング

○微細加工技術

燃料およびプローブ用ガス導入枝管

中空ダブルシェル

○クライオペレット技術

○三重水素取扱い技術

○ペレット誘導技術

レビテーション

炉への入射

写真2に、ILEで製作された中空ダブルシェルターゲットを示す。

写真2 ダブルシェルターゲット

燃料ペレットの設計、最適化のみならず、実験結果の解析、研究計画の検討等に爆縮シミュレーションは必須の技術である。この開発には、数値解法の新しい技術の開発とともに、新しい物理現象、物理モデルを取り込んだ精度のよいコードの開発が必要である。

VI. 爆縮計測技術

爆縮計測に必要とされる密度 n 、輻射エネルギー $h\nu$ 、粒子エネルギー E 、空間分解能 Δx 、時間分解能 Δt の範囲は、第3表に示すようにきわめて広い。なかでも爆縮燃料コアの計測は $n \sim 10^{22-26} \text{ cm}^{-3}$ の高密度を数 μm 、数 ps の分解能で測定することが要請され、新しい計測技術の開発とともに、爆縮核融合研究の進展がもたらされる。

第3表 レーザー核融合の計測パラメータ領域

$10^{18} < n < 10^{26} \text{ cm}^{-3}$
$1 \text{ eV} < h\nu < 500 \text{ keV}$
$1 \text{ eV} < E < 15 \text{ MeV}$
$0.1 \mu\text{m} < \Delta x < 1 \text{ cm}$
$1 \text{ ps} < \Delta t < 20 \text{ ns}$

このため第4表に示すような種々の手段を用いた、きわめて多彩な計測法が開発されている。大別すると、現象から発生してくる放射、粒子等の計測により爆縮に関する情報を得るもの(パッシブ)と外部より種々のプローブを導入して現象の物理量を測定するもの(アクティブ)となる。

第4表 レーザー核融合の計測方式

パッシブ	X線
	プラズマ粒子：電子, イオン 核融合反応生成物：中性子, α , プロトン 放射化法 光学計測
アクティブ	光学計測
	X線：バックライト法, 干渉法 中性粒子ビーム イオンビーム

測定対象とするプラズマパラメータが物理モデルの確立していない新しい領域でもあるので、複数の測定結果のクロスチェックが結果の信頼性を確保するために必要である。圧縮コアの密度, 温度を求めるのに、中性子発生量, 爆縮速度計測と爆縮シミュレーションの対比, X線シャドウグラフによる圧縮密度, 爆縮X線像による圧縮率測定, X線分光による温度密度測定等により、それぞれ独立に求めて比較検討する。計測技術開発により実験精度が大幅に向上し、シミュレーション技術開発と伴って爆縮過程の理解が進んでいる。

Ⅶ. 慣性核融合炉⁽⁵⁾

1 エネルギーバランス

慣性核融合炉のエネルギー流を第6図に示す。レーザー等のエネルギードライバの効率が低いと、送出電力に比して循環電力が大きくなり、システムとしての効率が悪くなる。外部への送出電力 E_e と核融合により発生した熱エネルギー $M_b E_f$ (ブランケットでの熱エネルギーゲインをも含む) との比をシステム効率 η_s と定義すると、第6図のエネルギー流れに関して整理して次式が得られる。

E_e : Electric power output
 ε : Circulation fraction
 η_L : Laser efficiency
 $\alpha_p E_{th}$: Pump and magnet energy
 $\bar{\eta}$: Energy conversion efficiency
 E_d : Electric energy
 E_L : Laser output
 γ : Recovery efficiency
 M_b : Blanket gain
 E_f : Fusion output
 E_{th} : Thermal output

第6図 慣性核融合炉のエネルギー流れ図

$$\eta_s = E_e / M_b E_f$$

$$= \frac{\bar{\eta}}{M_b Q} \left\{ M_b Q + 1 + \gamma (\eta_L^{-1} - 1) - \frac{1}{M_b Q} \left\{ \frac{1}{\eta_L} + \alpha_p (M_b Q + 1) \right\} \right\}$$

いま標準パラメータとして、エネルギー変換効率 $\bar{\eta} = 40\%$, $\gamma = 0$, $\alpha_p = 5\%$, ブランケット利得 $M_b = 1.24$ を取ったとき、システム効率 η_s とエネルギードライバ効率 η_L およびベレットゲイン Q との関係は第7図ようになる。この図より、 $\eta_L = 10\%$ に対してはベレットゲイン $Q = 200$ の炉心プラズマが実現されると $\eta_s \approx 30\%$ となり、実用炉の設計が可能となる。

η_L : ドライバ効率

第7図 ベレットゲイン Q とシステム効率 η_s との関係

第8図では、Fission-Fusion の複合炉を念頭において M_b を変化させた場合の全システム効率と、ベレットゲイン Q との関係を示す。 $M_b = 1.24, 3.9, 13.5, 17.9$ はそれぞれ天然 Li, ^{232}Th , ^{235}U , 天然 U をブランケットに用いた場合に対応する。 $M_b = 17.9$ の場合はレーザー効率 $\eta_L = 5\%$, $Q = 20$ 程度で実用炉となりうる。

第8図 ブランケットゲインをパラメータとしたベレットゲイン Q とシステム効率 η_s との関係

2 炉 構 造

炉構造設計上の最重要課題は第1壁の中性子, X線, 荷電粒子等の核融合生成物の照射に対する保護である。この方式により各種炉型が決まる。これまでに提案されているものとしては次のようなものがある。

- ドライウォール ① 大容積キャビティー
② 磁気シールド
③ ガスシールド
ウェットウォール ④ ポーラス壁 Li 層
⑤ Li 流体壁

ドライウォールでは Nb, SUS, グラファイト+金属等の第1壁を用いる。構造がシンプルで真空排気も軽負荷である。炉壁が直接核融合生成物にさらされるので第1壁の寿命に問題がある。このため, ①では炉壁までの距離を大きくとる。②では炉キャビティー内に磁場を形成して荷電粒子の直接衝撃を防ぐ。③では炉キャビティー内にレーザービーム伝送に影響を与えない程度の Xe, Kr 等のガスを封入し, X線, 荷電粒子のエネルギーを体積吸収することにより炉第1壁を保護している。いずれにしても中性子に対する保護能力はなく, かつ繰返し衝撃力の影響も無視できない。

ウェットウォール型は炉キャビティー内面を Li 等の液体金属により形成するもので, ④ではポーラス状金属壁から Li を浸出させて表面をおおい, X線, 荷電粒子等から壁面を保護する。⑤はキャビティー内面の Li 層を充分厚くすることによりブランケットをも兼ねさせるものである。第5表に各種炉型の, 核融合により発生したエネルギー種別に対する第1壁防護能力よりみた評価を示す。

第5表 各種炉型の特徴

	レーザー光	X線	プラズマ	中性子	問題点
大容積キャビティー	×	×	×	×	寿命
磁気シールド	×	×	○	×	コレクタープレート
ガスシールド	×	○	○	×	ビーム伝送
ポーラス壁 Li 層	○	○	○	×	蒸発・補給
Li 流体壁	○	○	○	○	流れの安定性

3. 磁場ガイド Li 流核融合炉(千里 I 号)

炉の無補修長寿命化, Li 等の液体金属取扱技術の最近の進歩等を勘案して, 大阪大学では第9図のような球型の SUS 容器内壁にそって液体 Li を流下させる方式を採用し, かつ独自のアイデアとして, この流れを磁場により壁面にそってガイドして流れをコントロールする方法を取り入れ, 検討を進めた。磁場ガイドに

第9図 磁気ガイド Li 流ブランケット炉「千里 I 号」

よりブランケットを兼ねた厚さ70cmの Li 層の流れを実現することが可能である。レーザー炉では真空度に対する制約がゆるいので, Li の動作温度を 500°C としてもその蒸気圧は 0.001 Torr であり, キャビティー内部は核融合反応により発生した X線, 荷電粒子により加熱蒸発した Li に対するクライオポンプとして作用し, 大容量の排気設備も不要である。このように Li 流を第1壁およびブランケットとして用いることにより,

- (1) 照射損傷がない。
- (2) 機械的, 熱的衝撃が緩和できる。

第6表 レーザー核融合炉「千里 I 号」の動作諸元

レーザー	ガス(CO ₂ など)	
	ビーム数	8
	出力エネルギー	1~5 MJ
	繰返し	1 Hz
	ピークパワー	200 TW
	パルス幅	10 ns
	効 率	10%
ペレット	マルチセル D-T 燃料	
	半 径	~3 mm
出 力	熱出力	1,240 MW
	電気出力	496 MW
	送出電力	426 MW
磁気ガイド Li 流炉容器		
	SUS 容器	R=5.64m (球形)
	キャビティー	R~5.00m
	内部 Li 流	d~0.64m

(3) 高いトリチウム増殖率が得られる。

(4) 中性子が構造材にあたる前に減速される。
等の特徴をもつ。このような種々の特徴をもった磁場ガイドLi流ブランケット炉について、炉開発研究項目を明らかにするためモデル設計を実施した。動作パラメータの概略を第6表に示す。炉キャビティ半径5m, 熱出力1,240 MW, 送出電力426 MWとかなりコンパクトな発電所である。磁場によるLi流のガイド、制御、Li流の安定性、熱的・機械的な衝撃、排気、核融合反応部に直接対向する最終ミラーの照射損傷の問題、中性子のブランケット内での振舞い、トリチウム増殖等が検討された。

Ⅶ. あとがき

レーザー核融合の最近の進展により、慣性核融合ブレーキアップを射程内にとらえるところまできた。出力10 kJのガラスレーザー、CO₂レーザーによる爆縮実験に続いて、1982年には出力20 kJのガラスレーザー

「激光Ⅷ号」が完成し、爆縮実験が開始される。1983年には40 kJ CO₂レーザー(Antares)が、1984～85年には100 kJ ガラスレーザー(Nova)がそれぞれロスアラモス、リバモア研究所で相次いで完成される。これらにより1980年代中には科学的ブレーキアップが示され、1990年代にはエネルギー取出しの研究に踏み込むこととなろう。広範な科学技術分野にまたがる総合プロジェクトとして組織的研究推進が望まれる。

— 参考文献 —

- (1) KIDDER, R.E.: *Nucl. Fusion*, **16**, 405(1976).
- (2) *Annual Progress Report on Laser Fusion Program*, Sep. 1978～Mar. 1980, ILE-APR-79, (Mar. 1981), Inst. of Laser Eng., Osaka Univ.
- (3) *IEEE J. Quantum Electronics*, Special Issue on Lasers for Fusion, QE-17, No. 9, (1981).
- (4) ベレットターゲット開発現状報告(昭55. 4.), 大阪大学レーザー核融合研究センター, ベレットターゲット開発委員会.
- (5) 慣性閉じ込め核融合炉設計検討報告書(第1次概念設計案), (昭54. 3.), 大阪大学レーザー核融合研究センター, 慣性核融合炉研究委員会.

☆国際会議のご案内☆

OANS/ASME/AICHE · Second International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics · 論文募集

1983年1月11～14日 (Santa Barbara, Calif. USA)

This conference, modeled after the highly successful meeting in Saratoga Springs, New York, in 1980, will provide a forum for presentations and discussions of most aspects of nuclear reactor thermalhydraulics including breeder and gas cooled reactors.

Topics

- Fluid flow and heat transfer correlations for nuclear applications; their ranges and limitations
- Heat transfer aspects of nuclear waste disposal
- Reactor and experimental thermalhydraulic instrumentation
- Critical flow and two phase valve performance
- Containment thermalhydraulics including H₂ behavior
- Description and analysis of operating plant transients and experiments
- Natural circulation and condensation phenomena in reactor transients
- Degraded core heat transfer
- Fundamental mechanisms in two-phase flow and heat transfer
- Large and small break LOCAs
- Mathematical methods in nuclear thermalhydraulics
- Scaling of thermalhydraulics phenomena in reactors and components
- Thermalhydraulics of plant components, systems, and controls
- Fluid-structure interactions, including flow induced vibrations

Interested authors are invited to submit 4 copies of a

500 word abstract to the nearest Member of the Technical Committee by Apr. 2, 1982. Notice of tentative acceptance will be sent by Apr. 30, 1982. Authors of accepted abstracts must subsequently submit 3 copies of the complete manuscript for review by June 15, 1982. Notification of reviewer's comments and final acceptance will be mailed by July 23, 1982. Final manuscripts must be received by Aug. 20, 1982.

Conference Chairman: Prof. S. Banerjee, Dept. of Chem. and Nucl. Eng., Univ. of California, Santa Barbara, CA, USA93106

詳細の問合せは(〒611)宇治市五ヶ庄

京都大原子エネルギー研究所

桜井 彰 (Technical Committee Member)

○6th International Conference on Fracture○

1984年12月4～10日 (New Delhi, India)

Main Themes

- (1) Fracture—mechanics and mechanisms
- (2) Fatigue—mechanics and mechanisms
- (3) Failure at high temperatures—mechanics and mechanisms
- (4) Environmental effects on fracture
- (5) Dynamic fracture
- (6) Fatigue and fracture of non-metallic materials
- (7) Fatigue and fracture of composites
- (8) Engineering applications of fracture mechanics
- (9) Test techniques
- (10) Failure analysis

応募締切(論文タイトル・キーワード)

1982年9月1日

Contact Address: Dr. K.N. Raju

General Secretary, ICF 6, Deputy Director
National Aeronautical Lab.
Bangalore 560017, INDIA