

## 4.13 Zピンチ方式慣性核融合

### 4.13.1 はじめに

最近、ZピンチがX線放射の面でめざましい成果をあげている。X線放射の量やエネルギーの変換効率だけでなく、慣性方式核融合の最有力候補として浮上してきた[1]。この節では慣性核融合のしくみとZピンチの最近の成果、そしてZピンチと慣性核融合とのかわりについて述べる。

### 4.13.2 慣性核融合について

慣性方式核融合に対立する方式として磁場閉じ込め方式がある。磁場閉じ込め方式はローソン条件[2]に象徴されるように、粒子輸送や熱伝導や放射によるエネルギー損失と核融合による熱出力とのバランスによって正味の出力を得ることを目標にしている。たとえばD-T反応に対しては、イオン温度が10 keVのとき密度と閉じ込め時間の積が $10^{20}$  s/m<sup>3</sup>となることがその条件である。大型トカマクでは水素プラズマに対して密度 $10^{20}$  /m<sup>3</sup>、閉じ込め時間1 sが達成されている。これを延長すれば、密度を $10^{26}$  /m<sup>3</sup>にして閉じ込め時間を $10^{-6}$  sにする、あるいは密度を $10^{32}$  /m<sup>3</sup>にして閉じ込め時間を $10^{-12}$  sにする、というような考え方も可能ではある。

しかし、慣性方式と磁場閉じ込め方式との違いはパルスか定常か、といった持続時間の違いよりもむしろ、プラズマからの放射を閉じ込めるかどうか、といった熱輸送のプロセスの違いの方が本質的であるように思われる。慣性方式核融合では原子番号の大きな物質で燃料カプセルを取り囲むことによって放射を閉じ込め、カプセルの均一な爆縮を実現する方法をとっている。また、慣性方式では反応によって生成された粒子による加熱が期待できるため、一度点火されればその慣性閉じ込めが維持されている間、あるいは燃料が燃えつきるまでの間、燃焼が持続することになる。

### 4.13.3 放射の閉じ込め

プラズマからの放射を閉じ込めるためには、放射源を高温の黒体壁（光学的に厚い物質）で被ってやる必要がある。このような空間のことをホーラム（hohlraum：空洞）と呼んでいる。パルスの形であれば、高温の放射で満たされたホーラムを実現することができる。黒体放射のエネルギースペクトルはプランクの式[3]

$$\frac{dE}{d\omega} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2c^3} \frac{1}{e^{\hbar\omega/T} - 1}$$

で表わされる。ここでEは放射のエネルギー密度、Tは黒体の温度、 $\omega$ は光子の角振動数、 $\hbar$ はプランク定数、cは光の速度である。放射のピークエネルギーは温度に比例して増大する。全スペクトルにわたって積分した放射強度Wは温度Tの4乗に比例する（シュ

テファン・ボルツマンの法則)

$$W = \frac{\pi^2 T^4}{60c^2 h^3} = 1.04 \times 10^9 T(\text{eV})^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

ホーラムという概念はもともとレーザーによる慣性核融合の研究から生まれた[4]。はじめはレーザーをターゲットに直接照射し、爆縮することによって高温高密度状態を得ようとする方法がとられたが、これではレイリー・テイラー不安定が成長して均一な圧縮ができなかった。そこでターゲットの周りに原子番号の大きな物質を配置し、その内壁を照射することにより高温のホーラムを形成し、ターゲットを間接的に加熱しようとしたわけである。

米国ローレンス・リバモア研究所では 1.8 MJ、500 TW のレーザーによって自己点火をめざす NIF 装置が計画されている。NIF 装置では D-T 燃料を使い、間接照射による自己点火の実証をすることが目標である。レーザーのエネルギーは短時間に効率良くターゲットに吸収させることができる。しかし、レーザーへのエネルギーの変換効率は非常に悪く、自己点火できてもそれが炉になるかどうかは別の問題である。半導体レーザーを用いた方法も検討されているが、技術的課題はまだ多い。レーザーに代わる最も有力なドライバとしてイオンビームが研究されてきたが、ビームの収束性の問題などから Z ピンチが浮上してきたようである。

#### 4.13.4 Z ピンチ

Z ピンチはプラズマに大電流を流し、その自己磁場によるピンチ効果で自らを圧縮するもので、エネルギーの注入効率が良く、簡単に高温高密度状態を作ることができる。D-T 燃料で Z ピンチを形成し、核融合を実現することも検討されてはいるが、むしろ原子番号の大きな物質で中空構造を作り、より効率良く圧縮することによって強力な X 線を取り出す研究が行われてきた[5]。

米国サンディア研究所の Saturn 装置 (2 MV、10 MA) では 120 本のタングステン細線を円環状に配置した Z ピンチの実験を行ない、150 eV の放射温度をもつ 54 TW の X 線放射を観測した[6]。また細線の数を増やすことによって収縮の均一性が向上することが示された。さらに同研究所の Z 装置 (3 MV、20 MA) において 1.8 MJ の X 線放射が確認された[7]。これは NIF 装置のレーザー出力に匹敵する。Z 装置のマルクス電源のエネルギーが 11.4 MJ であるから X 線への変換効率は実に 15 % を越えることがわかる。図 4-13-1 は Z 装置におけるパルスエネルギーの圧縮のようすを示したものである[8]。また、それまでの装置の結果から、X 線放射のエネルギーが電流値の 2 乗に比例して増大することが示された (図 4-13-2)。

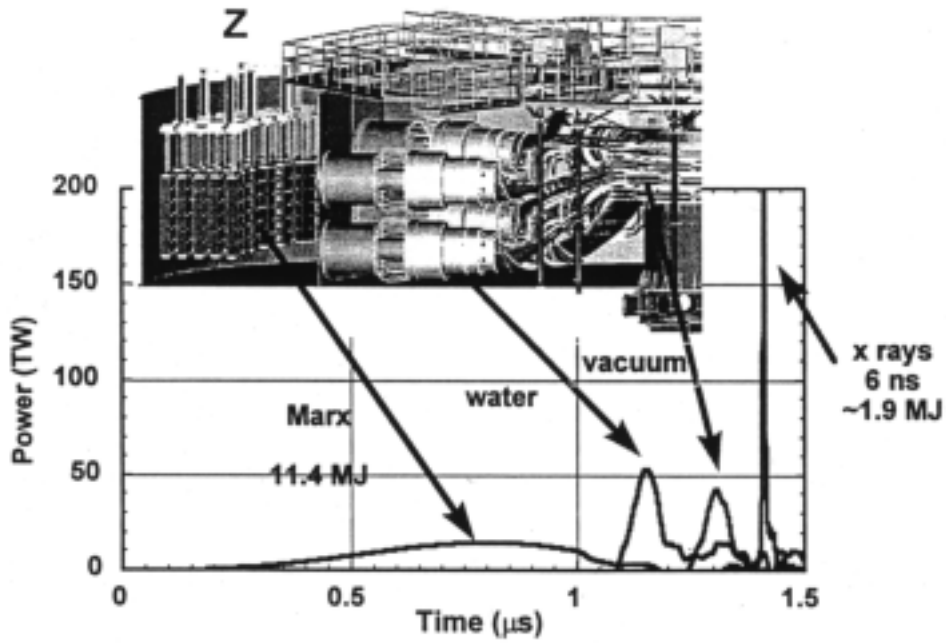


図 4-13-1 Z 装置におけるエネルギー圧縮のようす

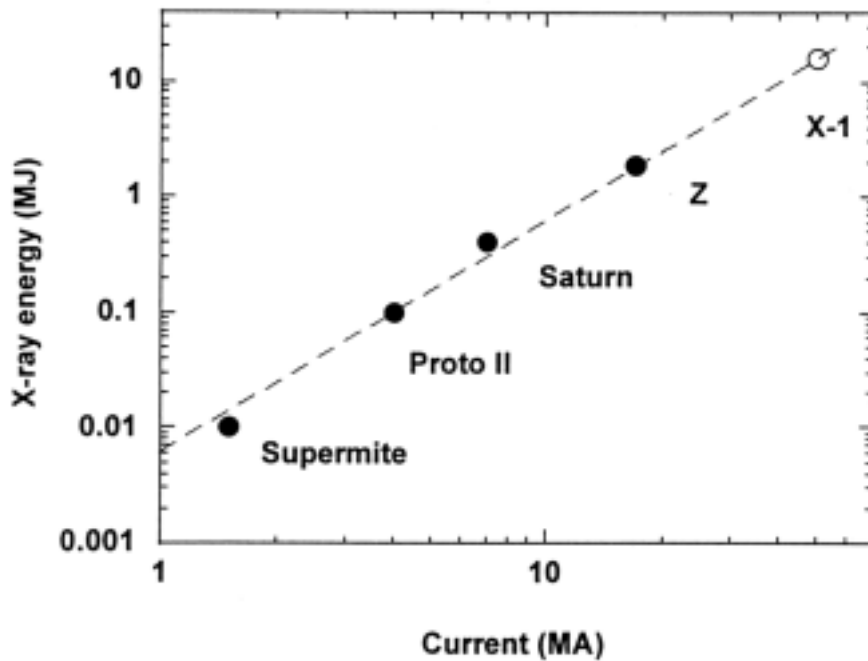


図 4-13-2 Z ピンチ電流と X 線放射エネルギーとの関係

Z ピンチプラズマに入力されるエネルギーは次のように考えることができる。プラズマ電流を  $I$ 、半径を  $r$  とすると、プラズマの周囲にできる磁場は

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

である。プラズマは  $I \times B$  の力を受けて収縮する。単位長さあたりのプラズマの質量を  $M$  とすると、半径方向の運動方程式は

$$M \frac{d^2 r}{dt^2} = -IB_{\theta} = -\frac{\mu_0 I^2}{2\pi r}$$

となる。両辺に  $dr/dt$  をかけると

$$M \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{M}{2} \frac{d}{dt} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = -\frac{\mu_0 I^2}{2\pi r} \frac{dr}{dt}$$

となる。これは運動エネルギーの時間変化であるので  $t$  で積分すると

$$\frac{M}{2} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = -\frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \int_R^a \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \frac{R}{a}$$

となる。プラズマの運動エネルギーは初期半径  $R$ 、最終半径  $a$  が決まればおよそ電流  $I$  の 2 乗に比例することがわかる。Z ピンチの物質や質量がほぼ同じなら到達できる温度やプラズマからの放射エネルギーは入力エネルギーにほぼ比例することが予想される。黒体放射の放射パワーが温度の 4 乗に比例することから、温度は電流のルートに比例することになる。ただし、Z ピンチ自身が黒体になることにそれほど意味があるわけではなく、その放射によってホーラム内壁の温度を高温にすることが重要である。

#### 4.13.5 ターゲットデザイン

間接照射方式による D-T カプセルのデザインはコンピュータシミュレーションによって行なわれている。カプセルを点火するためにはその外壁を  $3 \times 10^5$  m/s で加速して、その半径を 1/30 程度まで圧縮し、中心部で 10 keV 程度の温度を達成する必要がある。このためホーラム内壁の温度を 225 eV とし、壁からの黒体放射によってカプセルを一様に照射し、表面の物質の蒸発させることによりその反作用でカプセル全体を爆縮する。ホーラムの温度と爆縮の速度とは比例関係にあることが示されている[4]。

Z ピンチ自身の収縮ではこのような高速な収縮速度は得られない。そのかわり Z ピンチから放射される膨大な X 線をレーザーの代わりに使うことができる。照射の方法さえ考えれば、カプセルはレーザー方式で検討されたものをそのまま使うことができる。Z ピンチで検討されている照射の方法について紹介する。

もともとはホーラムとは動かない壁を想定していたが、Z ピンチそのものをホーラムと見立てた、ダイナミックホーラム (Dynamic Hohlraum) という概念がある。(図 4-13-3) これは収縮する Z ピンチを軽い物質を使ってその動きを停留させ、そのとき放出される X 線をその内部に置いたカプセルに照射するものである。これはいろいろな問題を含んでい

る。まず収縮するZピンチがカプセルと衝突する前に十分なX線を放出できるかという問題である。「軽い物質」の量が多すぎればそでのX線の吸収が問題になるし、少なすぎれば十分なX線を出すことができない。そしてカプセルが照射を受ける前に予備加熱を受けてしまうのではないかと、といった問題である。カプセルが加熱されれば不安定な運動を始め、 $1/30$  という半径圧縮を実現するためには音速をはるかに越えた爆縮速度が必要となる。しかしこれらの問題点にもかかわらず、実験の方はさかんに行なわれていて、放射温度なども測定されている。

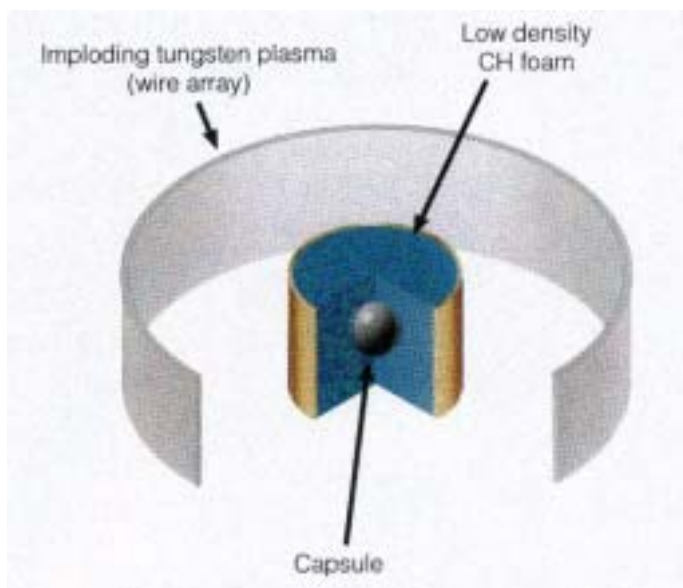


図 4-13-3 ダイナミックホーラムの概念図

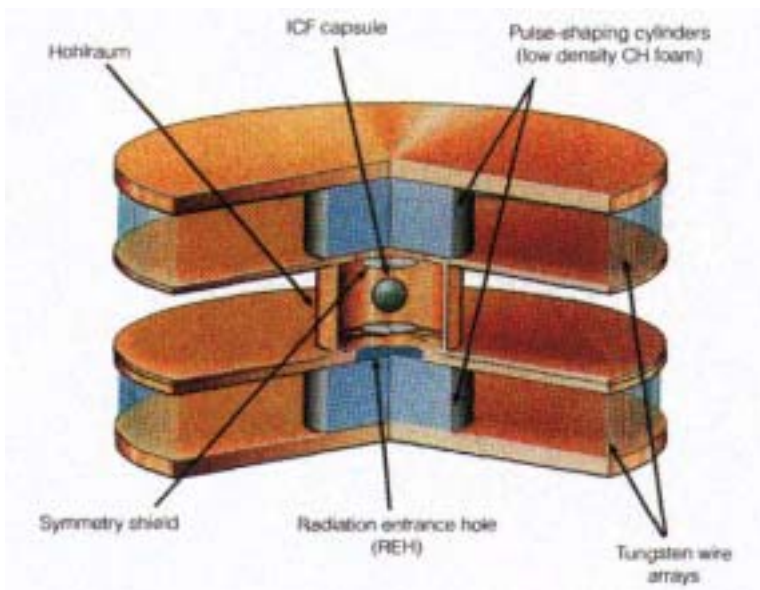


図 4-13-4 固定壁ホーラムの概念図

もう一つは固定壁ホーラム (Static-walled Hohlraum) である。(図 4-13-4) この方式だと Z ピンチとカプセルとが分離しているので前述のような問題点を避けることができる。しかし今度は大きな面積の壁を瞬時に高温にもっていくという、新しい技術的問題が発生する。また、Z ピンチが黒体であればその放射は表面積に比例するため、軸方向より側面から多く放射されることになる。したがって最終的にそれをカプセルにどう照射するかという幾何学的な問題も重要である。

#### 4.13.5 核融合の実現に向けて

さて、慣性核融合の実現に向けてともに歩んでいるレーザーと Z ピンチであるが、両者にはすでにきちんとした住み分けができていくように思われる。レーザー方式は現在持っている技術で D-T カプセルの自己点火ができそうな状況であり、カプセル内で起こる現象の理解とカプセルの最適化が課題となる。この点は NIF 装置による自己点火の実証が待たれる。しかし、レーザー方式は自己点火の実証ができてても実用的な炉にするには技術的な課題があまりにも大きい。

これに対して Z ピンチはすでに大きなパワーの X 線放射を実現しており、慣性核融合のドライバーとして最も有力な候補と考えられている。この膨大な X 線放射をどのようにカプセルに照射するかが重要な課題になる。この課題について上述のようにいろいろな幾何学配置が考案されているが、まだ実験は始まったばかりである。

磁場閉じ込め方式においてはローソン条件のような簡単な定式があつてどのようなプラズマを作ればいいかが比較的明らかであるが、慣性方式の場合はそうではない。Z ピンチはあくまでもドライバーであつて、そこからの X 線放射がどのようにカプセルに振り向けられるか、その結果どのようにに燃焼が進行するかについてはシミュレーションによらざるをえない。このあたりが慣性方式における目標設定のむずかしいところである。

ここで述べたようなワイヤアレイを用いた爆縮の実験は超大型装置を必要とする。現在 10 MA を超える Z ピンチ実験を行なっているのは米国サンディア研究所だけである。データの信憑性を確かめ、核融合への可能性を探るためにも、第 2、第 3 の違ったタイプの装置によるクロスチェックが必要である。

#### 参考文献

- [1] G. ヨナス : 日経サイエンス 1998 年 11 月号 30.
- [2] ローソン条件についてはたとえば、関口忠 : 「現代プラズマ理工学」, 第 9 章, オーム社, 1979.
- [3] 黒体放射についてはたとえば、シュポルスキー : 「原子物理学」, 第 I 巻, 第 6 章, 玉木英彦他訳, 東京図書, 1966.
- [4] J.D. Lindl : Phys. Plasmas **2**, 3933 (1995).

- [5] P.G. Burkhalter : J. Appl. Phys. **50**, 4532 (1979).
- [6] T.J. Nash et.al. : AIP Conf. Proc. **409**, 175 (1997).
- [7] M.K. Matzen : Phys. Plasmas **4**, 1519 (1997).
- [8] D. Cook : Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 25, Albuquerque, 1997.
- [9] R.J. Leeper et.al.: Nuclear Fusion **39**, 1283 (1999).