慣性核融合炉のための液体金属衝撃波実験

染 谷 和 良, 宮 健 三

(東大・工・原子力工学研究施設)

(1983年7月16日 受理)

Experiments of Electron Beam Induced Shock Wave to Simulate the Pulsive Response of an ICF Reactor with Liquid Metal Wall

Kazuyoshi Someya and Kenzo Miya

(Received July 16, 1983)

Abstract

In an Inertial Confinement Fusion (ICF) reactor with liquid lithium curtain, energetic charged particles and fast neutrons from a microexplosion give the impact and the pulsive load to the liquid lithium layer and drive the shock waves. To study the phenomena and the related problems of the structural mechanics, simulation experiments using liquid Hg irradiated by electron beam were carried out. Measurements and analysis of the shock wave are described in this article.

1. 目 的

慣性閉じ込め核融合炉の場合、ペレット爆縮時のイオン飛散、点火時の高速中性子及び α 粒子の飛散によって、冷却材である液体金属リシウムのウォールには、熱負荷が加わり、熱衝撃現象が生じることが考えられる。この現象を把握することは、炉容器の構造設計上不可欠のことである。そこで、我々は、試料として水銀を用い、これにライナックによる電子線を入射して、容器内に発生する衝撃波（圧力波）を測定することを先ず目的とした。

2. 実験方法

(1) 試験体

試験体の形状及び寸法を図1に示す。試験体はSUS304製の円筒容器で、溶接部の無い、削り出し加工した一体ものである。盲フランジの蓋をすることにより、密封容器となる。容積は、圧力変換器を取り付けた場合が約 91 cm^3 、ダイヤフラムを取り付けた場合が約 86 cm^3 である。この容器に水銀を満たし、図1のエア抜き孔より、ほぼ完全に空気を抜くことができる。電子・ビームは、図中の↑印の方向から打ち込んだ。打ち込まれた電子ビームは、2 mm 厚の容器壁を透過し

図1. 円筒容器の形状と寸法

図2. 照射系と試験体の設置状況

て、水銀中に吸収させる。概算により、水銀中の最大飛程は約7mm(25MeVの電子の場合)であり、容器の長さを50mmとすれば、打ち込まれた電子は、全量吸収されるものとした。また、水銀中に発生する圧力波が伝播しつつ、測定端で減衰することを考慮して、容器は図のような寸法となった。パッキンは、アマルガムの生成を考慮して、アスベスト・パッキンを用いた。

この試験体を、図2に示す位置に設置し、照射を行なった。

(2) 測定法

圧力の測定は、半導体圧力変換器(豊田工機製)を用いた場合と、手製のダイヤフラム式検出器を用いた場合の2

通りの方法によった。図1はダイヤフラム式検出器を取り付けた場合の図で、ダイヤフラムの詳細は、図3に示す。ダイヤフラムは、厚さ $30\mu\text{m}$ 、直径 $56\text{mm}\phi$ のチタン(Ti)膜を用い、これに図3に示す位置に歪ゲージを貼付したものである。ゲージ長は 0.5mm である。

図3. ダイヤフラムおよび
ゲージ貼付位置

図4．測定系ブロックダイアグラム

測定系のブロックダイアグラムを図4に示す。半導体圧力変換器を用いた場合は、ブリッジの残り2辺と定電圧源（乾電池9V）を介して、出力をオシロスコープにて観察した。ダイヤフラム式検出器の場合は、2枚のダミーゲージとによりブリッジを構成し、ブリッジ・ボックス及びダイナミック・ストレインメータを介して、出力をオシロスコープにて観察した。オシロスコープのスweep用トリガはライナック側のマスタートリガ（Master Trig.）を用いた。

(3) 試験条件

試験温度及び水銀の温度は、室温（25℃）である。

ビーム条件は、エネルギー25MeV、ビームカレント170mA、パルス幅4.5μsecで、one shot. 及び3.25 ppsの繰返しと変化させた。ビームスポットの大きさは、ラドカラーによる観測の結果、試験体入射面で約10mmφであった。

3. 実験結果

(1) 半導体圧力変換器を用いた場合

先ず、応答周波数の高い変換器（固有振動数約100kHz、容量100kg/cm²）を用いた。このとき

慣性核融合炉のための液体金属衝撃波実験

は、圧力計の容量が大きすぎて、圧力の変化が検出できなかった。

次に、応答周波数よりも測定範囲に着目して、容量 10 kg/cm^2 (固有振動数約 60 kHz) のものを用いた。Photo 1 は、ビーム条件がパルス幅 $4.5 \mu\text{sec}$ で one shot のときの原信号である。水平軸及び垂直軸のレンジは、それぞれ $5 \mu\text{sec/div.}$, 0.1 V/div. である。この写真からは、マスタートリガにて掃引開始後 $13 \mu\text{sec}$ にて高圧パルスによるノイズが見られ、また $20 \mu\text{sec}$ 後にはビーム発射によるノイズが約 $1 \mu\text{sec}$ の間見られる。その後は、圧力変換器からの信号であろうと考えられた。従って、次にトリガ信号をライナック側で、ディレイ回路を介して遅延させ、ビーム発射によるノイズを消去し、ビーム発射以前をトリガ点として観測したものが、Photo 2 である。垂直軸を、 5 mV/div. と Photo 1 より感度を上げたにも拘らず、振幅はそれ程大きくならなかった。これは、オシロスコープの入力端子に 75Ω ターミネータを接続したことにより、信号が減衰したためと思われる。

Photo 1

圧力変換器による原信号波形

水平軸 $5 \mu\text{sec/div.}$

垂直軸 0.1 V/div.

試料 水銀

圧力変換器 RMS - 5 M

室温

Photo 2

圧力変換器による波形

水平軸 $5 \mu\text{sec/div.}$

垂直軸 5 mV/div.

ビーム条件

$4.5 \mu\text{sec},$
one shot

室温

(減衰特性約 -4dB)。Photo 2 の波形が信号であるか否かの確認の為、トリガの条件及び実験体系を同一にして、図 2 の試験体と照射窓との間に、厚さ 50mm の鉛ブロックを置いてビームを発射した。その結果は、Photo 3 に示すように、何の信号もノイズも見られなかった。これによって、Photo 2 の波形は、圧力変換器からの信号であると判定した。

Photo 2 を見ると、掃引開始後 $7\mu\text{sec}$ で立ち上がりが見られ、その後減衰振動を示した。種々の周波数成分を含んでいるが、目立つところの最大周波数のものは 260kHz (周期 $T = 3.8\mu\text{sec}$)であった。これは、圧力変換器の固有振動数(カタログによると 60kHz)をはるかに越えていて、応答周波数からみて水銀中での圧力波信号としての信頼性がうすい。

次に、信号の全体像を見るため、時間軸を $50\mu\text{sec}/\text{div.}$ としたものが、Photo 4 である。この写真より読みとれる周波数は 14.2kHz (周期 $T = 70\mu\text{sec}$)である。円筒容器の長さは約 50mm で

Photo 3

圧力変換器による波形
(鉛ブロック設置)

水平軸 $10\mu\text{sec}/\text{div.}$

垂直軸 $50\text{mV}/\text{div.}$

ビーム条件

$4.5\mu\text{sec},$
one shot

室 温

Photo 4

圧力変換器による波形

水平軸 $50\mu\text{sec}/\text{div.}$

垂直軸 $5\text{mV}/\text{div.}$

ビーム条件

$4.5\mu\text{sec},$
one shot

室 温

慣性核融合炉のための液体金属衝撃波実験

あるので、これより水銀中での波の速度 v を求めると、

$$v = \frac{0.05 \times 2}{70 \times 10^{-6}} \doteq 1430 \text{ m/sec}$$

である。ところで、水銀中の音速は、1450m/secであり、実験値は良い一致を示した。しかし、信号として微弱であるので、出力が更に大きく得られるように検討する必要がある。

(2) ダイアフラム式検出器を用いた場合

ビーム条件は、圧力変換器による場合と同様に、パルス幅 $4.5 \mu\text{sec}$ で one shot とした。このときの、オシロスコープによる波形を Photo 5 に示す。水平軸 20 msec/div. 、垂直軸 50 mV/div. で周波数 175 Hz (周期 $T = 5.7 \text{ msec}$) の減衰振動を示した。しかし、これは水銀中の波の伝播としては遅く、ダイアフラムの固有振動ではないかと思われる。そこで、周縁で固定された円板の横振動として、次式によりこのダイアフラムの固有振動数 f を求めてみる。ただし、Ti 膜の左右の媒質の違いを無視した。

$$p = \frac{10.21}{a^2} \cdot \sqrt{\frac{D}{\rho h}} = 2 \pi f$$

ここで a : 半径 ($= 23 \times 10^{-3} \text{ m}$)

h : 厚さ ($= 30 \times 10^{-6} \text{ m}$)

ρ : 密度 ($= 4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

D : 曲げ剛性 ($= \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$)

Photo 5

ダイアフラムによる波形

水平軸 20 msec/div.

垂直軸 50 mV/div.

ビーム条件

$4.5 \mu\text{sec},$

one shot

室温

Photo 6

ダイヤフラムによる波形

水平軸 0.1 sec/div.

垂直軸 50 mV/div.

ビーム条件

4.5 μ sec,

3.25 pps

室温

E : ヤング率 ($= 11.57 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$)

ν : ポアソン比 ($= 0.321$)

上に掲げた数値を代入して、 $f = 142 \text{ Hz}$ を得た。この値と実験による値を比較すると、実験によって得られた波形は、Ti 膜の固有振動波形と考えられる。また Ti 膜ダイヤフラムの、圧力に対する出力の校正をしていないため、圧力の絶対値を読み取ることはできない。

Photo 6 は、ビーム条件が、パルス幅 $4.5 \mu\text{sec}$ 、 3.25 pps (1 秒間に 3.25 回の繰返しパルス) で照射した場合の写真である。時間軸は 0.1 sec/div. であり、1 秒間に約 3 つのピークが見られる。この写真より、このダイヤフラムによる測定は、周波数としては応答性に問題があるものの、圧力感度としては良好であるといえる。

4. 考 察

本実験により、以下のような知見を得た。

- 圧力変換器を用いた場合、水銀中の圧力波の速度に関して、実験結果は、計算値とよい一致を示した。圧力値については、微小信号のために読み取りができなかった。
- 本実験で用いたダイヤフラム検出器の場合、ダイヤフラムの固有振動により、周波数に関しては問題があるが、感度としては良好であることがわかった。

以上、限られたマシンタイムの中で、2～3 の測定法を試みたが、圧力が小さく、かつ周波数が高い信号の検出について、今後、検討を進めなければならない。また、解析の作業も進めていく計画である。