

水銀ターゲットの強度設計のための計算機実験

A numerical study of Hg-target for design.

後藤記一⁽¹⁾、今井隆太⁽¹⁾、荒川忠一⁽²⁾

GOTO Norikazu, IMAI Ryuta, ARAKAWA Chuichi

⁽¹⁾日本原子力研究所 (計算科学技術推進センター) 東京都目黒区中目黒 2-2-54

JAERI(CCSE),2-2-54 nakameguro neguro-ku Tokyo

⁽²⁾東京大学、東京都文京区本郷 7-3-1

Univ. of Tokyo, 7-3-1 honngo bunkyo-ku Tokyo

Japan atomic energy research institute (JAERI) is promoting to construct the liquid metal target as a neutron source of neutron scattering experiment facility. The liquid metal target is planned to receive MW class proton pulse beam. We have to know about presser wave propagation phenomena to design the target keeping safe. But we have no experimental data about such a high energy one. So, we have carried out numerical simulation. The code we adopt is a commercial code, STAR-CD. Consequently we obtain transient presser distribution data in compressible liquid after one pulse is absorbed. The data indicate possibility of generation of cavitation as propagating presser wave.

1. 背景

日本原子力研究所では、高エネルギー加速器研究機構と共同で、大強度陽子加速器計画を進めている。この計画では中核施設の1つとして MW 級の中性子散乱実験施設を建設することになっている。中性子散乱実験施設では中性子の発生源として水銀ターゲット内で起こる核破砕反応が利用される。まず、加速器を用いて陽子を 3 GeV にまで加速する。その高エネルギー陽子ビーム (0.91MW) をターゲットとして置いてある液体水銀に照射する。その結果、液体水銀に核破砕反応が起き、その際に中性子が放出され、これを利用する。中性子散乱実験では実験精度を上げるためには、より大きい密度で中性子を発生させることが求められる。上記中性子散乱実験施設ではそれに応じて以後さらに入射ビームの出力を増大させることが計画されている。

このような高いエネルギー密度の水銀ターゲットは前例が無く、ターゲットに必要な強度を見積もるためには液体水銀中で起こる現象の詳細を前もって把握しておく必要がある。今回の数値流体計算はそのために行われたもので、その結果について報告を行う。

上述のように水銀ターゲット内では核破砕反応という現象が発生しているので、局所的に高密度な熱の発生が起こると考えられる。中性子の発生を永続的に起こすために水銀ターゲットでは水銀に流れを持たせてあり、部分的にでも水銀の沸点まで温度が上昇しないように形状が工夫されている (Fig.1)。陽子ビームはこの図の左側から入射される。

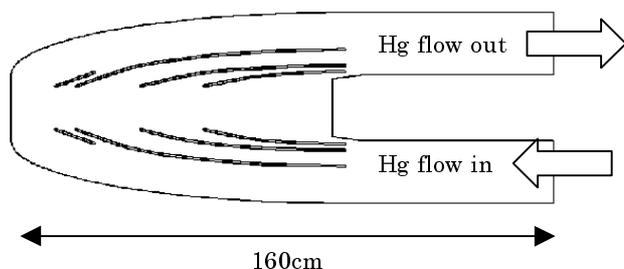


Fig.1 A cross section of the cross flow type target container

ただし、このときの解析計算に用いた方法は、入力ビームが持つエネルギーとして、実際には時間変化する入力ビーム強度を時間平均したものをを用いることで、定常状態の問題として計算している。実際に入力ビームはパルス状になっており、1 μs のパルスが 25 Hz で出力される (Fig.2)。

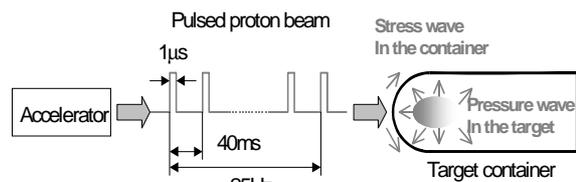


Fig.2 Concept of pulsed proton beam and pressure wave

この様に、繰り返しパルス状に陽子ビームが入射する形式であるため、Fig.2 にも示したようなパルス入射時に発生するであろう急激な熱膨張と、それに起因する圧縮波の動向を知ることが、必要な外壁強度の知見を得る上で重要な課題になってくる。そこで、今回は核破砕が起こった直後に起こる圧縮波の振る舞いのシミュレーションを行った。

2. 使用した熱流体コードと解析モデル

2.1 熱流体コード

今回この計算をするにあたっては、商用の汎用熱流体解析コードである STAR-CD (Computational Dynamics, 英国/CD-ADAPCO JAPAN) を用いた。STAR-CD は、有限体積法にもとづいた SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 法、PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 法、SIMPISO (SIMPLE 法 + PISO 法) を解析アルゴリズムとして採用し陰的に代数有限体積方程式を解いているが、今回は PISO 法を用いた非定常計算を行った。

2.2 解析モデル

Fig.3 に水銀ターゲットの概観図を示す。図に示されているように、水銀ターゲットは C 字型に曲がった扁平のパイプ状をしていて、その一端から水銀を流し込んで、他端から流

出させるようになっている。そして、流れによどみが出来ないように上流・下流に整流用のブレードがついている。

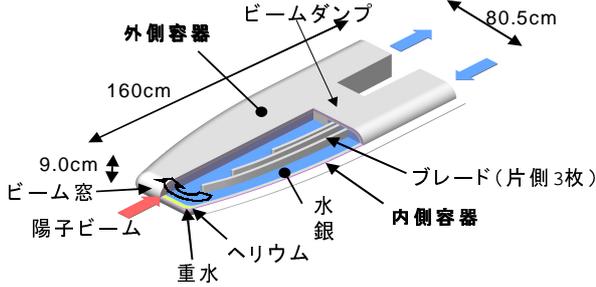


Fig. 3 A image of Hg target

これをモデル化したのが Fig. 4 である。全体を約 58 万個のセルに分割した。また、ビーム入射口や整流ブレード周りを他より細かく分割しており、細かいセルは一辺 1mm 位になる様になっている。

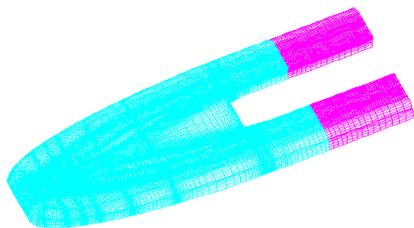


Fig. 4 Cells used to calculate.

この容器の中に液体水銀を満たす。今回のシミュレーションでは圧縮波を扱うので、液体水銀の状態方程式を与える必要があるが、それには Tait の式を水銀用にパラメータフィッティングした以下の式を用いた。

$$V(T, P) = V(T, 0) \left[1 - C(T) \ln \left(\frac{B(T) + P}{B(T)} \right) \right]$$

$$V(T, 0) = aT + b$$

$$B(T) = B_0 T + B_1$$

$$C(T) = C_0 T + C_1$$

ここで、V、T、P は、それぞれ体積、温度、圧力であり、フィッティングパラメータは以下のようにになっている。

$$a = 2.695e-3 \text{ cm}^3/(\text{mol})$$

$$b = 14.754 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$C_0 = 4.349e-5$$

$$C_1 = 2.084e-2$$

$$B_0 = 7.586e-4 \text{ kbar/}$$

$$B_1 = 4.811 \text{ kbar}$$

2.3 解析条件

今回は核破碎反応の直後の極短時間の状態変化をシミュレーションしたため、水銀全体の流れはないものとして扱い、水銀の流入・流出口は 1 気圧の圧力境界とした。水銀の温度は 50 とし、上述の状態方程式を適用した結果、初期密度は約 13474[Kg/m³]となった。また、粘性係数には 0.001539[Pa・s]を与えた。核破碎反応発生時、陽子ビームは Fig. 5 に示されるような分布で水銀に吸収され発熱する。

Fig. 5 は水銀ターゲットのビーム入射口からの距離とその点で発生する熱エネルギーをプロットしたものである。

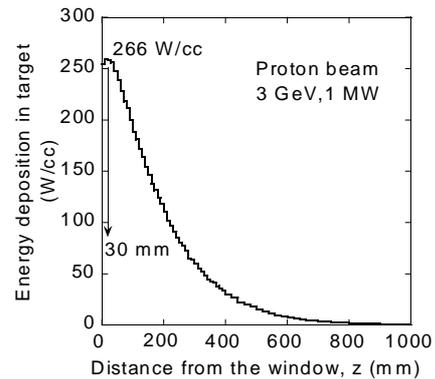


Fig. 5 Distribution of heat source

このデータを基に発生する圧力を見積もるため原子力研究所で行ったシミュレーションによると、局所的には 100MPa 近い圧力が発生することが分かった。そこで、本シミュレーションでは最大圧力発生点を中心に半径 1.5cm ほどの部分が 100MPa の圧力分布を持っているとする、不均一圧力分布を初期条件として非定常解析を行った。

3.解析結果

STAR-CD を用いて解析した結果を以下に示す(Fig. 6 ~ Fig. 13)。Fig. 6 が 100MPa の高圧部分を開放した直後の圧力の初期分布である。

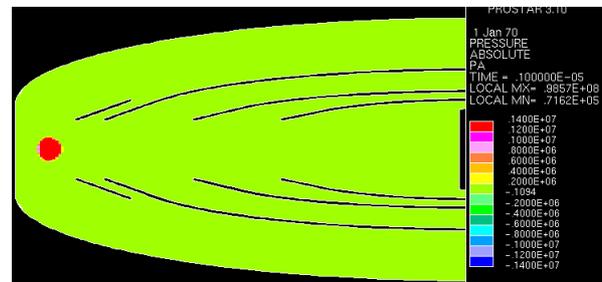


Fig. 6 Pressure distribution (0.001ms)

Fig. 7 は 0.01ms での圧力分布である。高圧部分から圧縮波が発生し、中心部に大きな負圧が発生しているのが分かる。負圧部は - 21.1MPa を示している。

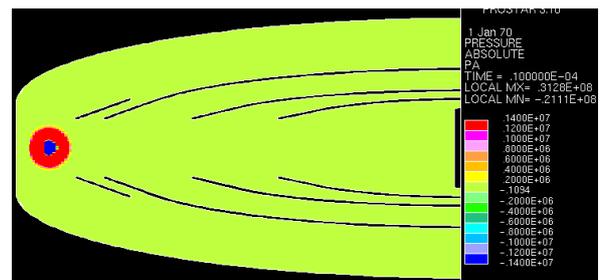


Fig. 7 Pressure distribution(0.01ms)

Fig.8 は 0.05ms での圧力分布である。圧縮波の第一波の先端が容器に到達し、反射を起こし負圧を壁面付近に生成し始めているのが分かる。

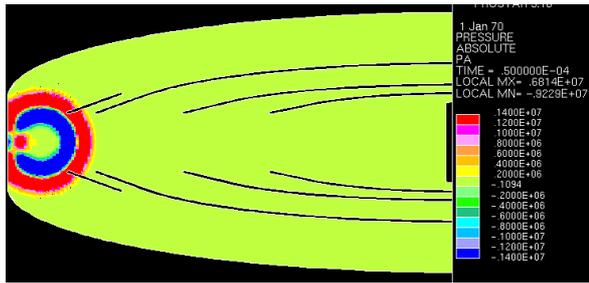


Fig.8 Pressure distribution(0.05ms)

Fig.9 は 0.09ms での圧力分布である。壁面に発生した負圧が最低の - 6.654MPa を示した。

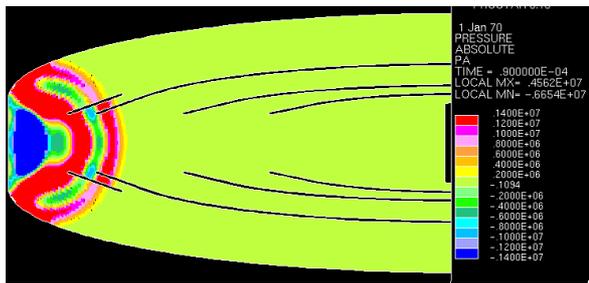


Fig.9 Pressure distribution(0.09ms)

続く、Fig.10 から Fig.13 は、それぞれ 0.11ms、0.13ms、0.15ms、0.19ms の圧力分布である。Fig.9 で最低圧を示した点に第 2 の波面が作られ、第 1 波面の反射部と第 2 波面に挟まれる形で負圧部が伝播していく。そして、その過程で外壁や整流ブレードが負圧に晒されているのが分かる。この後も、示す圧力は減衰していくが同じような波動現象が繰り返し観察された。

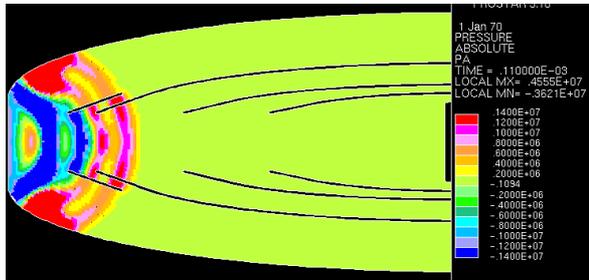


Fig.10 Pressure distribution(0.11ms)

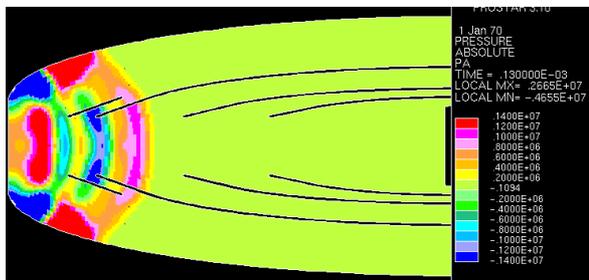


Fig.11 Pressure distribution(0.13ms)

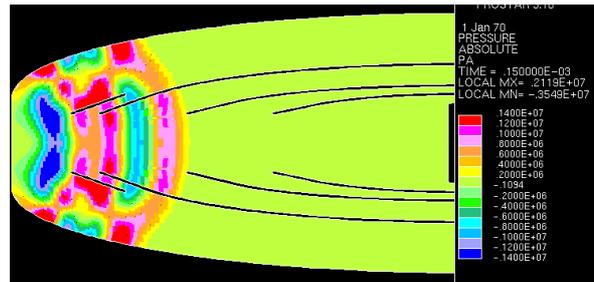


Fig.12 Pressure distribution(0.15ms)

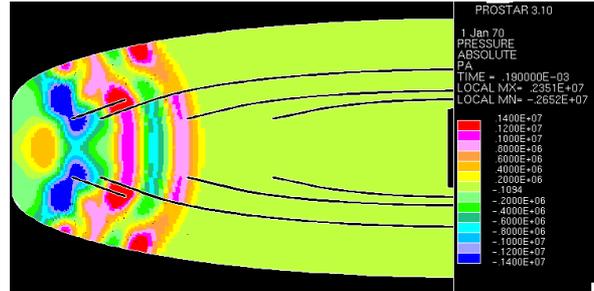


Fig.13 Pressure distribution(0.19ms)

4.結論

本シミュレーションにより、水銀ターゲット中に核破砕反応がおきた直後に起こる圧縮波の振る舞いについて、定性的な知見が得られた。パルス状の陽子ビーム照射で発生した圧縮波は外壁に反射することにより大きな負圧を生じ、さらにその負圧は水銀中を伝播してターゲット内部に位置する整流用のブレードにも影響を与えることが分かった。次の課題としては、負圧部に発生するであろうキャビテーションや容器の変形との相互作用をモデルに取り入れ、圧縮波の伝播がどのように影響されるかを調べることを考えている。

本シミュレーション中に示された各圧力は、圧力の初期値が 100MPa であったことを考えると大分小さな値になっている。今回解析に使った STAR - CD で行った、より単純な形状の系に関する同様の計算でも圧縮波が早く減衰する傾向が見られたことから、示された値に関しては、過小に評価されていると考えている。この問題を解決し、定量的にも確からしい値を得るのも次の課題である。