

CIP 法による容器内液体金属の圧力波解析

Pressure Wave Analysis of Liquid Metal in a Container by CIP Method

正 神永 雅紀 (原研) 正 羽賀 勝洋 (原研)
正 日野 竜太郎 (原研) 西川 明 (石播重工)

Masanori KAMINAGA, Japan Atomic Energy Research Institute, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki
Katuhiro HAGA, Japan Atomic Energy Research Institute
Ryutaro HINO, Japan Atomic Energy Research Institute
Akira NISHIKAWA, Ishikawajima Harima Heavy Industry Co. Ltd.

Abstract Development of a proton accelerator based neutron source (1.5GeV, 5.3mA (for neutron source 3.3mA), thermal power 8 MW) is currently conducted by Center for Neutron Science (CENS), JAERI. A pressure wave problem is the one of most important R & D items for the design of target systems. Preliminary study of pressure wave analysis in a liquid metal (mercury) target for both the first (1.5GeV, 1.0mA) and second stages (1.5GeV, 3.3mA) have been carried out with a Cubic Interpolated Pseudo-particle (CIP) method. This paper describes pressure and temperature distribution analysis results. As the results, a maximum pressure increase in the mercury target is calculated to be 4470 Pa and a maximum temperature increase is calculated to be 32 °C.

Key Words : Pressure Wave, Liquid Metal, CIP Method, Accelerator, Neutron Source, Target

1. 緒言

日本原子力研究所(原研)では現在、大強度陽子加速器(1.5GeV、5.3mA、熱出力8MW)を用いた中性子源の開発計画を中性子科学研究センターを中心に進めている。中性子散乱実験用ターゲットの開発では、大強度陽子加速器の開発方針(1.5GeV、1mA(第I期1.5MW)/3.3mA(第II期5MW))を基にして、固体ターゲット(第I期)及び液体金属ターゲット(第I期及び第II期)の開発を進めている。

大強度陽子加速器を用いた中性子源の開発研究については、米国オークリッジ国立研究所⁽¹⁾(ORNL)(1GeV、1mA、1MW、後に5MWまで増強)、ヨーロッパ共同体のESS計画⁽²⁾(1.334GeV、3.8mA、5MW)においても進められており、ショートパルスの中性子発生用ターゲット材としては現在Hg(水銀)が最も有力な候補となっている⁽³⁾。

原研においても、中性子発生用のターゲット材として液体金属である水銀を採用する予定で開発を進めている。ターゲット部は、容器内に水銀を満たした構造となっている。ターゲット部ではパルス状の陽子ビーム入射による核破砕反応で超高密度の熱を発生する。この発熱による急速な水銀の熱膨張で過大な圧力波が発生して、容器の破損を引き起こすことが懸念されている。このため、この圧力波を適切に解析評価することが、ターゲット開発における課題の1つとなっている。本発表では、容器内液体金属(水銀ターゲット)で発生する圧力波の挙動をCIP法(Cubic Interpolated Pseudo-particle method)で解析した結果について報告する。本圧力波解析においてCIP法を採用した理由は、次の通りである。

通常の流体に関する解法では、密度の保存則から密度 ρ を求め、エネルギー保存側から温度 T を求めた後、その流体の状態式から圧力 $p=p(\rho, T)$ を求める。固体や液体では、音速 $C_s=(\partial p/\partial \rho)^{1/2}$ が非常に大きい。このため、密度を最初に求めて固体や液体の状態式から圧力 $p=p(\rho, T)$ を求めるような手順では、わずか10%程度の誤差から3~4桁の圧力変

動を引き起こすことになる⁽⁴⁾。

CIP法は移流項と移流項以外の項とに分けて計算することが特徴(利点)⁽⁴⁾であり、移流項はCIP法で、移流項以外の項はCUP法(Combined Unified Procedure)⁽⁵⁾により差分で求めることにより、圧力 p と温度 T を求めて、その結果から密度 ρ を求めるという手法が可能となる⁽⁴⁾。

2. 解析条件

2-1. 核発熱密度 陽子ビーム入射による核発熱密度は、NMTC-JAERIコード⁽⁶⁾により計算した。Fig.1に熱流動解析に用いた発熱密度のうち、第II期条件[陽子ビーム入力5MW(1.5GeV、3.3mA(80 μ A/cm²))ビーム半径 $r=3.64$ cm]の核発熱密度を示す。Fig.1は、水銀が連続的に発熱しているものと仮定したもので、50パルス/秒を時間平均したものである

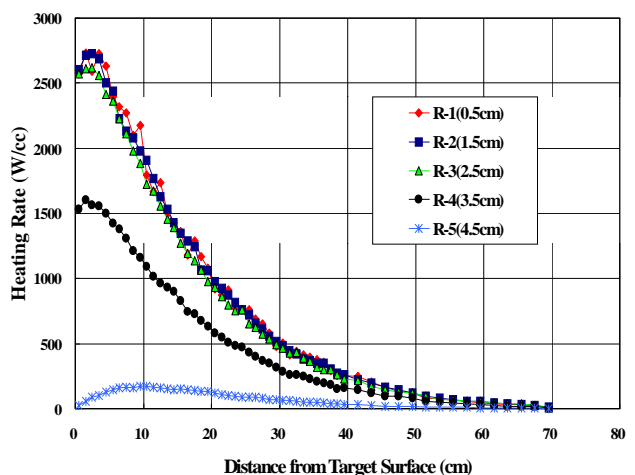


Fig.1 Heating rate of Hg target, 2nd stage (1.5GeV, 3.3mA, 80 μ A/cm²)

る。陽子ビームは、パルス間隔 20ms、1 パルスの持続時間 0.6 μ s で水銀ターゲットに入射するので、実際の発熱密度は、Fig.1 に示した発熱密度の 33,333 倍 (=20ms/0.6 μ s) となる。

2-2. 水銀の状態方程式 水銀ターゲットの状態方程式 $p=p(\rho, T)$ は次のように設定した。状態方程式を近似する温度範囲は 0°C~100°C、圧力範囲は大気圧~200MPa とした。近似式は、熱物性ハンドブック⁽⁷⁾に記載の「高压下的水銀の密度」のデータを用い、一次式 $\rho = a(T)p + b(T)$ で表し、温度依存の係数 a, b を以下のように定めた。

$$\rho = (5 \times 10^{-5} T + 0.0517)p + (-2.4345T + 13595) \quad (1)$$

$$p = (\rho + 2.4345T - 13595) / (5 \times 10^{-5} T + 0.0517)$$

ここで、 ρ : 密度 (kg/m³), T : 温度 (°C), p : 圧力 ($\times 10^5$ Pa)

状態式以外には、水銀の物性値として定圧比熱 C_p ⁽³⁾、熱伝導率 λ ⁽³⁾、粘性係数 μ ⁽³⁾ 及び比熱比 $\kappa = C_p / C_v = 1.158$ (一定)⁽⁸⁾ を用いた。

3. 解析結果

3-1. 圧力波伝播挙動解析結果 第II期条件の発熱密度分布を用いた圧力波の解析結果を以下に示す。なお、解析の時間ステップ Δt はクーラン条件 ($C = u\Delta t/\Delta x$) から決定し、初期値は $\Delta t = 1 \times 10^{-2} \mu$ s とし、圧力波の伝播速度に対応して $C = 0.2$ を満足するように設定し、陽子ビームが 1 パルス入射した場合について解析した。また、解析モデルは R-z 2 次元、軸対称モデルを用いた。

Fig.2 に陽子パルス打ち込み後 500 μ s までの圧力波解析結果を示す。図中の圧力は基準圧 (大気圧) との差圧をゲージ圧 (gauge pressure) として示した。ビーム入射部 (ドーム部) は、エネルギー密度が大きいこともあり、陽子ビーム打ち込みと同時に圧力が立ち上がる。一方、ドーム - 円筒胴接続部および円筒胴中央部においては、陽子打ち込み後時間後れを伴って圧力が立ち上がる。圧力波の絶対値は、ビーム入射部では 5kPa 程度、円筒部では 2kPa 程度であり、基準圧 (大気圧=約 100kPa) と比較して小さい。解析は、陽子パルス打ち込み後 500 μ s まで実施したが、1 パルス周期=20ms の末期では発生した圧力波はほぼ基準圧に戻ることが予測できる。

Fig.3 (a), (b) に陽子ビーム入射直後 (0.72 μ s) のターゲット容器内の圧力分布 (基準圧との差圧分布)、温度分布 (基準温度 50 との温度差) をそれぞれ示す。陽子ビーム入射

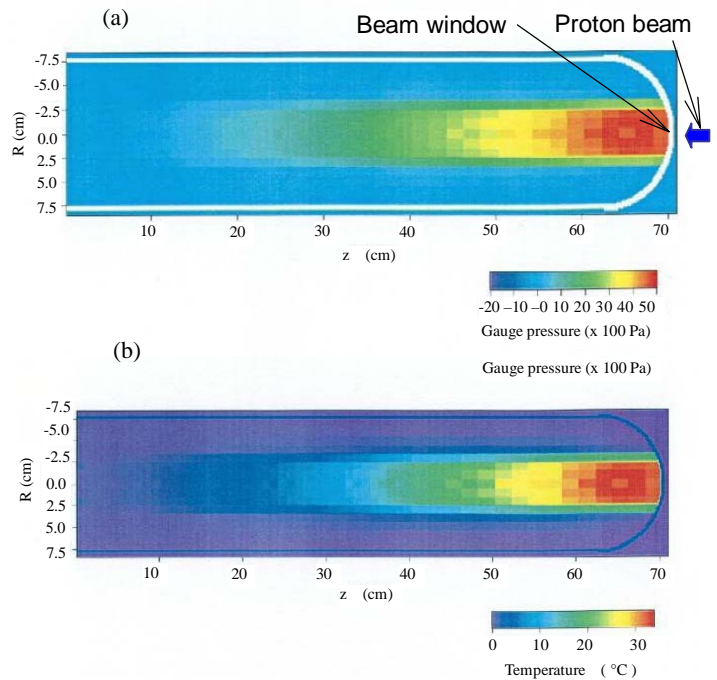


Fig.3 Pressure and temperature analysis results at 0.72 μ sec by CIP-CUP Method

後の圧力及び温度分布は、Fig.1 に示した核発熱密度分布に対応したものとなっており、ビーム窓 (Beam window) 直後に最大値を生じている。陽子ビーム 1 パルス入射による水銀ターゲットの最高圧力は 4470Pa (ゲージ圧)、最高温度は、82 (温度差 32) という結果が得られた。Fig.3(b) に示すように水銀温度は、陽子パルス打ち込みと同時に上昇することが分かる。一方、解析を実施した時間領域では、円筒胴の部分の有意な温度上昇は観察できなかった。

4. 結言

中性子発生用ターゲットの開発の重要な課題となっている、陽子ビーム入射時のターゲット容器内水銀の圧力波解析を CIP 法により実施し、1 パルスの陽子ビーム入射による容器内水銀の温度上昇は最高で 32、圧力上昇は最高で 4470Pa であるとの結果を得た。解析結果の妥当性については、今後、実際の陽子ビームを容器内水銀に入射させた実験結果を基に確認する。

【参考文献】

- (1) B. R. Appleton, "Status of the Oak Ridge Spallation Neutron Source (ORSNS) Project", ICANS-XIII, pp.814 (1995).
- (2) H. Lengeler, "The European Spallation Source Study (ESS)", ICANS-XIII, pp.819 (1995).
- (3) G. S. Bauer, "Mercury as a Target Material for Pulsed (Fast) Spallation Neutron Source Systems", ICANS-XIII, pp.547 (1995).
- (4) 矢部孝, 青木尊之, "固体、液体、気体の統一解法を目指す CIP 法", 計算工学, Vol.1 No.1, (1996).
- (5) T. Yabe and P.Y. Wang, "Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid", J. Physiccal.Society of Japan, Vol.60, No.7, pp.2105-2108, (1991)
- (6) Y. Nakahara and T. Tsutsui, "NMTC/JAERI: A Simulation Code System for High Energy Nuclear Reactions and Nucleon-meson Transport Processes.", JAERI-M 82-198 (1982).
- (7) 養賢堂, 日本熱物性学会(編), "熱物性ハンドブック".
- (8) G.W. Toop, "A rigorous equation of state for solid, liquid and gas", Metallurgical and Material transactions B, (1995).

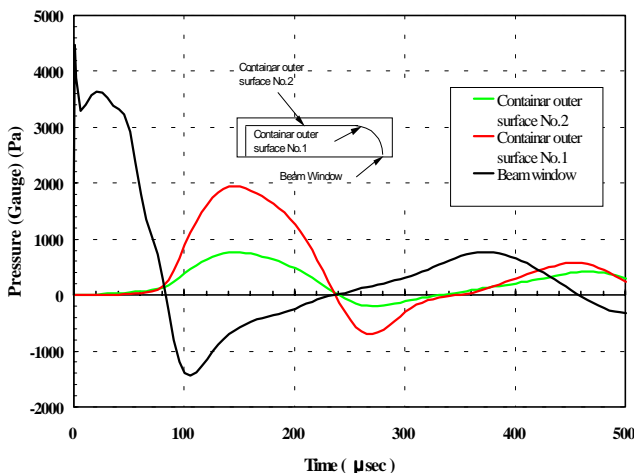


Fig.2 Pressure wave analysis results from 0 to 500 μ sec by CIP-CUP Method