高出力パルス核破砕中性子源におけるキャビテーション*

Cavitation in High-power Pulsed Spallation Neutron Sources

二川 正敏**

FUTAKAWA Masatoshi

田中 伸厚***

TANAKA Nobuatsu

Abstract High-power pulsed spallation neutron sources are being developed in the world. A mercury target is installed at MLF (Materials and Life science experimental Facility) in J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), which will promote innovative science. At the moment the proton beams bombard the mercury target, pressure waves will be generated in mercury by thermally shocked heat deposition. Cavitation will be induced through the pressure wave propagation in mercury and eroded the vessel inner surface contacting with mercury, i.e. pitting damage. The eroded vessel wall is damaged by cyclic fatigue because pulsed proton beams strike the target repeatedly. In the paper, the effects of pitting damage, cyclic fatigue damage and mercury environment on the lifetime of the mercury target, and mitigation techniques for pressure waves and cavitation damage are described.

Keywords: Cavitation, Mercury, Proton beam, Spallation neutron source, Pressure wave

1. はじめに

J-PARC は、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同運営する、世界最大級である大強度（1MW）の陽子ビームをほぼ光速まで段階的に加速する 3 つの加速器とそれを利用する研究施設群の総称であり、約 8 年の歳月をかけて H21 年に完成した (Fig.1)。各研究施設では、大強度陽子ビームを各標的に入射して生成される二次粒子を利用した、物質科学、生命科学、素粒子・原子核物理学、核変換技術に関する学際的基礎研究から産業利用を含む応用研究に至る最先端の研究開発が展開される [1,2]。これまでにない 1MW の陽子加速器の開発と共に、各研究施設に設置される機器開発においても、前人未踏の課題を克服しつつ設計が進められた。J-PARC の中心利用施設となる物質・生命科学実験施設では、核破砕中性子源 (以後、JSNS (Japan Spallation Neutron Source) と称す。) から生成され

る大強度の中性子ビームの特性を生かした、水素や炭素などの軽元素の迅速かつ効率的な検知が可能となる。これにより、新機能材料、先進磁気デバイス、高温超伝導体などの物質構造の解明や、タンパク質の構造、機能の解明など、新たな科学技術の展開及び幅広い産業応用が期待されている。

JSNS は、大強度のパルス陽子ビーム (出力 1MW、パルス幅 1 マイクロ秒、繰り返し周波数 25Hz) を重金属ターゲットに入射して、核破砕反応により大強度のパルス中性子ビームを発生する世界最高クラスの核破砕パルス中性子源であり、2008 年の 5 月に陽子ビームのターゲット入射が行われ、初中性子の発生を確認している。

重金属ターゲットには、中性子収率に優れていること、ターゲット自体を冷却材に用いることが出来るため除熱の観点で有利であることから、液体水銀を用いる。Fig.2 に示すように、液体水銀

* 2010.4.28 受付

** 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

TEL: (029)282-5363 FAX: (029)282-6712 E-mail: futakawa.masatoshi@jaea.go.jp

*** 茨城大学工学部機械工学科 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1

Fig.1 J-PARC constituting of 3 kinds of accelerators and facilities was completed in 2009. High intense proton beams are injected to targets and produce second particles at each facility.

は固体金属容器内を流動する。大強度の陽子ビームが液体水銀ターゲット中に入射するため、液体水銀内部では急激な発熱反応と共に熱膨張により圧力波が生じる[3]。この圧力波は、液体水銀中を伝播し、水銀を封じ込めている固体金属容器に衝撃荷重を負荷する。圧力波により容器構造材料に負荷される荷重は、容器構造の健全性に影響する。特に、圧力波による巨視的な動的荷重負荷に加え、圧力波の伝播過程で水銀中にキャビテーションが発生し、エロージョンによる損傷が容器と水銀との界面に形成されることが、OFF-LINE（陽子線励起圧力波模擬実験）及び ON-BEAM（陽子線入射実験）により明らかとなった[4-6]。この損傷は数十ミクロンのピット群（ピッティング損傷）から成り、ターゲット容器の寿命及び運転安定性を支配する因子となることが世界の関係者で周知となっている。さらに、陽子ビームがターゲット容器内に入射するビーム窓は、水銀と同じく直接陽子線照射を受けると共に中性子照射も重畳されることにより材料劣化が生じる。ま

た、ビーム窓内部で生じる核破砕反応に伴う発熱や熱応力負荷及び陽子線励起圧力波となって、25Hz のパルス陽子ビーム入射に対応した繰り返し負荷を動的に与えることから、疲労強度劣化も課題である。従って、ターゲット容器は正に極限状態に曝される構造物であるといえ、想定される損傷評価に基づいて見積もった使用期間（寿命）ごとに交換しなければならない。現在、JSNS は、120kW で運転しているが、運転実績を積み上げ機器の調整を行いつつ、徐々に陽子ビーム強度（出力）上げ、約5年程度で1MWに到達する計画である。前述した損傷は出力上昇と共に顕著となり、ターゲット容器寿命を極端に低下させる。

これまでに、原子力機構では陽子線入射励起圧力波に関する数値解析、ピット形成に関する局所衝撃解析、ピット形成挙動に関する実験解析、水銀中高サイクル疲労実験、ピット残留応力計測実験などを精力的に行う中で、ピッティング損傷の正体を見極めた上で、さらに損傷を低減させる技術開発を実施してきた。これより、損傷低減化の要素技術に一応の目処を得ることができ、現在実機ターゲットシステムに実装する段階にきている。ここでは、まずピッティング損傷の特徴的な形態と成長挙動について概観した後に、損傷抑制技術開発の現状について解説する。

2. ピッティング損傷の成長挙動

2.1 パルス圧力変動と損傷挙動

パルス中性子源水銀ターゲットの設計寿命は約2500時間としている。この想定された設計寿命中に、陽子線は25Hzで入射されるから、 10^9 回以上の圧力波が負荷される。

Fig.2 Mercury target :length 2 m and weight 1.4 ton.

従って、パルス数と損傷程度及び残強度の相関を定量的に評価することがターゲット寿命評価に重要となる。そこで、陽子線励起圧力波を電磁力により模擬する電磁式衝撃圧負荷試験装置 (MIMTM: electroMagnetic IMPact Testing Machine, Fig.3) を新たに開発し、圧力波により形成されるキャビテーション損傷 (ピitting損傷) を再現した[7]。MIMTM は、電磁力で加力できることから、任意の衝撃波形をフィードバック機構により精度良く制御しつつ、衝撃的な圧力変動を任意な液体に負荷できる。即ち、チャンバーに封じ込まれた試料液体に電磁力で駆動するストライカーに固定した円盤試験片を介して、急激な圧力変動を与え、この圧力変動により液体と円盤試験片界面にキャビテーションを発生させる。

Fig.4 に液体容器ダイヤフラムで計測された衝撃加速度の MIMTM 出力依存性を示す。MIMTM 出力が 295W 以上で、キャビテーション気泡崩壊に伴って生じた局所衝撃により励起された高調波振動成分がパルス波形上に重畳する。このように、衝撃圧力の大きさ、負荷持続時間、波形を詳細に制御できる本装置の特徴により、キャビテーション初生に対する負荷条件を高精度で評価できる。

さらに、MIMTM は水銀循環ループ (容量 20L) に設置され、水銀流動条件がキャビテーション損傷に与える影響について系統的に調べられた。また、流動水銀中には、多孔質ノズルから He ガス気泡を注入し、それによる損傷低減効果も調べられた。これらについては後述する。

ターゲット容器候補材料であるステンレス鋼 316SS (Ni-Cr-Fe) に対して、陽子ビーム入射時に発生する圧力波により形成される損傷形態を再現できることを確認し、ターゲット構造容器設計寿命の約 1 割である 1000 万回衝撃負荷による損傷成長過程について詳細に調べた結果を Fig.5 に示す。その結果、4つのフェイズに分類できることが判明した[8]。すなわち、約 1 万回までのフェイズ 1 では、独立したピットの形成による損傷形態が支配的であること、1 万回から 10 万回のフェイズ 2 では、個々の独立ピットの合体・連結が開始されること、10 万回から 100 万回のフェイズ 3 では、均一な侵食が開始され、1000 万以上のフェイズ 4 では質量減少を伴った侵食現象が支配的となること、を見出した。加えて、従来の質量減少を伴わない潜伏期における損傷挙動を詳細に観察し、材料表面における損傷面積率が 1 以下である期間が質量減少を伴わない潜伏期に相当することを見出した。換言すれば、1 になると質量減少が顕著になると言える。この潜伏期における損傷面積率を知れば、材料の耐エロ

ージョン性を評価できる。

2.2 ターゲット寿命への影響

MIMTM の液体チャンバー内に小型試験片を設置して、試験片に損傷を与え、損傷による重量

Fig.3 MIMTM loop test apparatus.

Fig.4 Dynamic responses at the MIMTM chamber.

Fig.5 Pitting formation.

Fig.6 Damage growth behavior in SS316.

変化を計測することにより、古典的磁歪振動法で得られた振動回数と質量減少との関係と一致する特性を観測できることを確認すると共に、平均侵食深さ MDE をある基準値で規格化し対数表示することにより、パルスの繰り返し回数 N に対する平均侵食深さの増加率が材料及び衝撃パルス振幅に依存しない、次式で表せる対数侵食評価線図が得られることを見出した[8-10]。

$$\text{Log MDE} = A \text{Log } N + B \quad (1)$$

ここで、 A は材料に依存しない値 1.3 であり、 B は材料、試験環境に依存する値である。Fig.6 は、ステンレス鋼 316SS 材の水銀に対する耐エロージョン性を示す規格化対数侵食評価線図である。潜伏期（衝撃回数 10^6 以下）における材料表面の面積損傷率が 1 に近づく、質量減少を伴ったキャビテーション・エロージョン（平均侵食深さ）が顕著となる。質量減少を伴うエロージョン損傷の定常期（衝撃回数 10^6 以上）では、規格化対数侵食評価線図を用いれば損傷挙動を予測できることが分かる。現在、浸食深さと残留強度との相関を評価しており、それらの結果を総合的に用いれば、ピitting損傷による水銀ターゲット寿命劣化予測が可能となる。

水銀ターゲット容器は 25Hz でパルスを受けることから、ピitting損傷が付加された 316SS の残強度として曲げ疲労強度を評価した結果、疲労限は、 10^8 回のパルス負荷後に約 1/3 に低下することが分かった[11]。さらに、疲労破損のばらつきに対して破損確率的な考察を加えると、水銀ターゲット容器が 1MW 運転時に破損確率が 10% に達するまでの運転時間は約 30 時間と見積もられた。

3. ピitting損傷の低減化技術

中性子源水銀ターゲット容器の寿命に大きく影響するパルス状圧力波に起因したキャビテーション損傷を抑制するための技術開発を精力的に実施している。以下では、容器材料の観点及び流動水銀の性状を変えることにより、総合的に損傷を抑制しようとする試みについて述べる。

3.1 材料側からのアプローチ

316SS は、放射線損傷及び水銀共存性についてある程度理解されているため、現時点におけるターゲット容器の最適構造材料であると言える[12]。このため 316SS を容器材料として使用することを基本的とし、コーティングや表面改質法により損傷に対する耐性を付加することを試みた。これまで、約 20 種類のコーティング及び表面改質材について、MIMTM による損傷評価実験を行ってきた。この内、耐性が最も優れたものは、プラズマ表面改質材であった。しかしながら、 10^7 回を超えると改質層/基材界面において、剪断剥離が生じることが明らかとなった。このため、ステンレス鋼の耐食性を損なわず、クロム炭化物が生成しない 400°C 程度の低温領域でプラズマを用いた炭素と窒素の浸透拡散を連続で実施し、表面硬さを高くすると共に、表面から内部にかけての硬化層の硬さ分布を傾斜的に変化させる表面改質法を開発した。これにより、損傷が顕在化しないビーム出力の限界値を増加できる[13]。

3.2 液体水銀側からのアプローチ

1) ガス気泡混入の効果

水銀中に発生する圧力波を微小ガス気泡による緩衝効果で低減させる。本概念は、水銀ターゲットの考案者である Bauer 氏によって提案されており[14]、欧州のターゲット開発者らによる予備検討では、陽子線励起圧力波は 0.1% 程度のガス気泡体積含有率で著しい圧力低下が期待できるとしている[15]。

著者らは、混入すべき気泡のサイズと量を定量予測するために Fig.7 に示すような、マクロ、メゾ、ミクロスケールに渡る数値解析を行った。まず、マクロスケールでは、固体容器と液体水銀との相互作用、すなわち固液界面における圧力波伝播について LS-DYNA と ABAQUS を用いて解析した[16]。このマクロ解析により、キャビテーション気泡初生・成長に関する重要なパラメータの一つである水銀負圧の持続時間と陽子線入射出力の関係について調べた。メゾスケールでは、力学的非平衡状態における気泡の体積運動、気泡収縮時の内部気体の温度上昇による周囲流体への熱散逸を考慮した詳細な数値解析を行い、微小ガ

Fig.7 Numerical simulations to predict bubble mitigation mechanism and bubble conditions.

3 mechanisms at each region

Fig.8 Mechanisms on bubble mitigation effects.

ス気泡の混入による液体金属の熱膨張に伴う圧力上昇の緩和、及び圧力波伝播過程における波の分散と減衰等の影響について検討した[17,18]。さらに、キャビテーション気泡の発生と隣接するガス気泡との相関についても検討を行った。ミクロスケールでは、有限体積法と高次の補完スキームを組み合わせる新たに開発した CRIMSON (a finite-volume method combined with the high-order interpolation scheme)[19]を用いて、キャビテーション気泡成長・崩壊過程への水銀流れ場の影響について評価した[20,21]。これについては、次節で詳しく述べる。

水銀中に混入した気泡効果については、Fig.8のようにまとめることができる。圧縮波の緩和のメカニズムの一つは、注入したマイクロバブルが熱膨張による体積変化を吸収する効果であり、主に陽子線入射による加熱領域で効果的である。もう一つは、圧力波が伝播しながら気泡を励起する

ときに生じる熱散逸による減衰効果である。これにより、加熱部で発生した圧力波は容器壁面に向かって伝播する過程で減少する。これらの効果は、気泡注入条件に大きく依存し、半径 $100\mu\text{m}$ 以下、含有率 10^{-4} 以上で顕著になる。圧力波の吸収、減衰効果の詳細については文献[17]を参照されたい。さらに、比較的大きな気泡が膨張する過程で放射される正の圧力がキャビテーションバブルの成長に必要な負の圧力に重畳して、発生を押さえ込む効果が数値解析的に予測されている[22]。特に、容器壁面近傍に形成される負の圧力場に有効に作用することが期待される。

しかしながら、微小気泡による圧力波抑制技術の実装において、最も重要でかつ困難と考えられた課題は、如何に水銀中に微小ガスバブルを生成させるかであった。この点についても著者らは渦流れによりガスカラムを引き千切ることで微小気泡を安定して水銀中で生成させることに成功している[23]。上述した圧力波に与える気泡注入効果に関する基礎実験もすでに実施し、概ね予測値と同様な結果が得られている[24]。

2) 流れの効果

2章で述べた損傷実験で水銀流れにより損傷が低減する実験事実が観測された[16]。また、陽子線入射時にも流動水銀中で損傷抑制効果が確認された[25]。損傷は水銀キャビテーション崩壊時に生じる強い噴出力を有するマイクロジェットにより引き起こされると考えられ、この速度は数百 m/s に到達する[13]。一方、水銀流れは精々 1m/s 程度であり、対象時間領域が異なる。では、何故に水銀流れは損傷低減に効果的なのであろうか？この疑問に対して、CRIMSON コードを用いた解析により流れによるキャビテーション損傷軽減のメカニズムの推定を行った。特に、1) 流れによる気泡形状変形の影響、及び 2) 流れによる気泡離脱効果、に着目した数値解析的考察を行った。

2-1) 流れによる気泡形状変化の影響

水銀ターゲット内の水銀流動は乱流状態にあると考えられるが、乱流境界層の正確な厚さは不明である。そのため、ここでは Fig.9 のような 2 次元の解析体系を設定し、背景の速度分布を境界層厚さ δ とする台形分布と仮定し、 δ を変えて数値解析を行った。 δ のオーダーとしては 0.001mm 程度であるが、境界層があまりに薄い場合、気泡は強いせん断により壁面より離脱する可能性が高い。このような非常に薄い境界層の場合は、後述の気泡離脱の場合として考慮することとし、ここでは解析上も表現可能な $\delta=0.01[\text{mm}]$ 、 $0.1[\text{mm}]$ 、 $0.2[\text{mm}]$ 、 $1[\text{mm}]$ の 4 つの条件で解析を行った。

Fig.10 に気泡成長に関するボイド率[26]の時間変化を示す。まず、気泡成長時に注目すると、流れの無い場合、気泡は対称に成長し、壁から半円状に成長する。一方、流れのある場合、境界層内の気泡はせん断流れの影響で大きな変形を伴いながら成長し、境界層の外側の気泡は一樣に流れに流されながら若干の変形を伴いながら成長する。このとき、気泡の体積変化は、特に境界層が0.1mmや0.01mmのケースで気泡の成長が半分程度に低下することが分かった。これは、流れの影響により気泡の成長が抑えられたことを意味する。

次に気泡崩壊時について見てみる。Fig.10 で分かるように、流れの無い場合は、気泡は対称形状を保ったまま崩壊する。流れにより変形した気泡は、気泡の成長が遅いこともあり流れの無い場合よりも早く崩壊する。Fig.11 は、崩壊時の最大速度の観測された時間の速度ベクトル図である。流れのある場合では気泡変形の効果により壁面に対して傾いたマイクロジェットが発生している。このマイクロジェットの傾きにより壁面に負荷される最大圧力が 3 割程度低くなることが分かった。

Fig.9 Computational condition.

Fig.10 3.2 Effect of flowing on cavitation bubble growth and collapse behavior ($t=0.5\text{ms}$, $\delta=0.1\text{mm}$).

Fig. 11 Velocity distributions at bubble collapse.

2-2) 流れによる気泡離脱効果

気泡はミリオーダーまで成長することを考えると、さらに境界層が薄い場合、境界層における強いせん断力により気泡は壁面から離脱する可能性が高いと思われる。核となる初期気泡径との大きさにも依存するが、離脱した気泡は揚力やマグナス力などの影響により流心方向に移動していく。そのため、気泡崩壊時の衝撃力が緩和されると考えられる。そこで、気泡発生位置と衝撃圧との関係について、流れ無しの条件で解析を行った。

結果を Fig.12 に示す。ここで、気泡位置は、壁面からの気泡中心までの距離 L を崩壊直前の気泡半径 R により規格化して示す。Shima らは水中でレーザー加熱により発生したキャビテーションバブルの崩壊から生じる衝撃圧の計測実験を実施しており、相対距離 $L/R=1.0$ のときに壁面への最大衝撃圧が上昇するという知見を得ている[27]。本解析は液体が水銀であるため、厳密な比較はできないが、やはり相対距離 $L/R=1.0$ のときに強い衝撃圧を観測し、Shima らの知見とも定

Fig.12 Peak pressure and relative distance L/R from wall (L : distance from wall, R : bubble radius).

性的には一致する。また、気泡位置が $L/R \gg 1$ となれば、壁面における衝撃圧は大きく減少する。このためには、気泡成長時間を ms 程度とし、mm サイズの気泡が離脱するとすれば、主流方向とほぼ同程度、すなわち m/s 程度の流速をもつ直交流が必要となる。この速度は単純な体系ではあまり現実的な数字とは考えられないが、実験体系や局所的な流れ場においては十分起こりうるものである。なお、水銀ターゲット内の気泡流動実験及び解析的検討も実施している[28]が、別途報告する予定である。

4. まとめ

陽子線励起圧力波によって水銀ターゲット容器に形成されるピitting損傷とその対策について、本報で紹介できなかったことも含め、これまでに明らかになったことを以下に示す。

1) ピット損傷形成過程は、損傷面積率が1以下の微小領域塑性変形支配過程(1MW 陽子線入射励起圧力相当パルス負荷回数 10^6 以下: 潜伏期)と質量減少を伴う均一侵食過程(10^6 以上: 定常期)に大別できる。2) 潜伏期内パルス数は、入力パワーの増加と共に減少し、接液界面の材料改質により増長できる。3) ピット形成に要する水銀局所衝撃速度は約200m/sに達すると推定できる。4) 微小領域塑性変形によりピット周囲に発達した残留応力は、潜伏期ではパルス数と共に増加するが、定常期では表面荒さを増長する亀裂発生・進展に伴い解放される。5) 水銀中に発生した微小バブルが崩壊するときに発せられる音響信号から損傷の程度を推測することができ、その場損傷診断技術としての適用性を確認している。6) 容器材料の表面改質により、受け入れ陽子ビームパワーの増加が期待できる。7) 微小ガスバブルの混入により圧力波の低減を図れる。8) 水銀流れによる気泡成長過程で気泡形状が影響を受け、これにより崩壊時に生じる衝撃力、マイクロジェット衝撃を含め、低減することを数値解析的に推測した。9) 水銀への微小ガスバブル生成技術として、渦式気泡生成要素が実装できる技術として十分期待できる。

世界最強の核破砕パルス中性子源水銀ターゲット開発には、陽子線励起圧力波によるキャビテーション損傷の克服が不可欠であるが、上記の知見を基に、ほぼ基礎技術は確立されたと考えている。現在、実機製作を見据えた設計段階にある。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、東京大学副学長

松本洋一郎 大学院研究科教授には微小気泡による圧力波低減技術開発において、また渡辺昇 高エネルギー加速器研究機構名誉教授には核破砕中性子源開発において、多大なご指導を賜った。また、J-PARC 副センター長 池田裕二郎博士には終始激励を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Nagamiya, S., Overview of the J-PARC Project, Neutron News, Vol. 16, No. 1, 16(2005).
- [2] Ikeda, Y., 1-MW Pulse Spallation Neutron Source (JSNS) of J-PARC, *ibid*, 20(2005).
- [3] Futakawa, M., Kikuchi, K., Conrad, H., and Stechemesser H., Pressure and stress waves in a spallation neutron source mercury target generated by high-power proton pulses, Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A, 439, 1-7(2000).
- [4] Futakawa M., Kogawa H. and Hino, R., Measurement of dynamic response of liquid metal subjected to uniaxial strain wave, J. Phys. IV France 10 Pr9-237-242(2000).
- [5] Futakawa, M., Kogawa K., Hino, R., Date, H. and Takeishi, H., Erosion damage on solid boundaries in contact with liquid metals by impulsive pressure injection, Int J. Imp. Eng. 28 123-135 (2003).
- [6] Haines, J. R., Farrell, K., Hunn J. D., Lousteau, D. C., Mansur, L. K., McManamy, T. J., Pawel, S. J., and Riemer, B. W., Summary of Mercury Target Pitting Issue, SNS-101060100 -TR0004(2002).
- [7] Futakawa, M., Electric Magnetic Impact Testing Machine MIMTM, Vibration Technologies, No.10, 22-26 (2004)
- [8] Futakawa, M., Naoe, T., Kogawa, H., Tsai C., and Ikeda, Y., Pitting damage formation up to over 10 million cycles -off-line test by MIMTM-, J. Nucl. Sci. Tech., 40, 895-904 (2003).
- [9] Soyama, H. and Futakawa, M., Estimation of incubation time of cavitation erosion for various cavitating conditions, Tribology letters, 17 27-30 (2004).
- [10] Futakawa, M., Naoe, T., Tsai, C.C., Kogawa, H., Ishikura, S., Ikeda, Y., Soyama, H. and Date, H., Pitting damage by pressure waves in a mercury target, Jour. Nucl. Mat. 343, 70-80, (2005).
- [11] Futakawa, M., Naoe, T., Kogawa, H., Teshigawara, M. and Ikeda, Y., Fatigue strength degradation by pitting damage, Jour. Nucl. Mat. 356, 168-177 (2006).
- [12] Mansur, L.K., Materials research and development for the spallation neutron source mercury target, Jour. Nucl. Mat. 318, 14-25, (2003).

- [13] Naoe, T., Futakawa, M., Shoubu, T., Wakui, T., Kogawa, H., Takeuchi, H. and Kawai, M., Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron sources (I) -Material surface improvement-, J. Nucl. Sci and Tech. 698-703 (2008)
- [14] Skala K. and Bauer G. S., ICANS XIII, 559-576 (1995).
- [15] Soltner, H., Gas bubble admixture for pressure pulse mitigation in high-power liquid-mercury spallation targets, ISSN 1433-559X, ESS03-152-T (2003)
- [16] Futakawa, M., Kogawa, H., Hasegawa, S., Naoe, T., Ida, M., Haga, K., Wakui, T., Tanaka, N., Matsumoto, Y., and Ikeda, Y., Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallationneutron sources (II) -Bubbling effect to reduce pressure waves, J. Nucl. Sci and Tech. 1041-1048 (2008)
- [17] Okita, K., Matsumoto, Y. and Takagi, S., Propagation of pressure waves, caused by a thermal shock, in liquid metals containing gas bubbles, Proc. FEDSM2005-77397 (2005).
- [18] Fujiwara, A., Okita, K., Matsumoto, Y., Futakawa, M., Hasegawa, S., Kogawa, H., and Ikeda, Y., Strategy to mitigate pitting damage in JSNS mercury target, ICANS-XVII, Santa Fe (2005).
- [19] Tanaka, N., Development of a highly accurate interpolation method for mesh-free flow simulations I. Integration of gridless, particle and CIP methods, Int. J. Numer. Methods Fluids, 30[8], 957-976 (1999).
- [20] Tanaka, N., Suzuki, M., and Futakawa, M., Numerical analysis of mercury cavitation in MW-scale spallation neutron source system, Nuclear Instruments &Methods in Physics Research, A562, 680-683 (2006)
- [21] Ida, M., Naoe, T., and Futakawa, M., Direct observation and theoretical study of cavitation bubbles in liquid mercury, Physical review E 75 046304-1-7 (2007),
- [22] Kogawa, H., Haga, K., Naoe, T., Kinoshita, H., Ida, M. and Futakawa, M., Development of bubble injection technique in JSNS mercury target, ICANS-XIX(2010), March, Grindelwald, Switzerland.
- [23] Futakawa, M., Kogawa, H. Hasegawa, S., Ikeda, Y., Riemer, B., Wendel, M., Hains, J., Bauer, G., Naoe, T., Okita, K., Fujiwara, A., Matsumoto, Y. and Tanaka, N., Cavitation damage prediction for spallation target vessels by assessment of acoustic vibration, J. Nucl. Mat. 377,182-188 (2008)
- [24] Komuro, M., Tanaka, N. and Futakawa, M., Numerical simulation on cavitation bubble collapse in mercury, Proc. 5th Japan-Korea Simp. on Nucl. Thermal Hydraulics and Safety, NTHAS5-B010, Nov. 26-29, 2006, Jeju, Korea, (2006).
- [25] Riemer, B., Haines, J., Wendel, M., Bauer, G., Futakawa, M., Hasegawa, S., and Kogawa, H., Cavitation damage experiments for mercury spallation targets at the LANSCE-WNR in 2005, J. Nulc. Mat. 398, 238-243 (2010).
- [26] Tanaka, N., Akutsu, K. and Taguchi, T., Numerical Analysis of Cavitation Using CIVA, Progress in Multiphase Flow Research I, 155-162 (in Japanese) (2006).
- [27] Shima, A., Takayama, K., Tomita, T. and Miura, N., An experimental study on effects of a solid wall on the motion of bubbles and shock waves in bubble collapse. Acustica,48, 293-301 (1981).
- [28] Haga, K., Kogawa, H., Wakui, T., Naoe, T., Futakawa, M., Yamazaki, S., and Tanaka, N., Bubble flow simulation in target vessel, Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A 600, 64-67 (2009).