

次世代炉用高機能蓄圧タンク及び ガスベントシステムの開発

Development of Advanced Accumulator for Next Generation PWR

技術本部 白石 直^{*1}
原子力事業本部 松岡 強^{*2} 杉崎 敬良^{*3}
鎌田 信也^{*4} 岩見 昌夫^{*5}

当社では、次世代炉（New PWR-21）のために、新技術適用による静的安全システムと従来から実績のある動的安全システムを最適に組合せたハイブリッド安全システムを開発している。PWRの非常用炉心冷却設備の簡素化及び信頼性向上というニーズにこたえるフルイディスク技術を使った渦巻きダンパを考案し、注入流量の2段階切替が可能な高機能蓄圧注入システムを開発した。これは、従来の蓄圧タンクと低压注入系の両機能を合わせ持つ静的安全システムである。今回引き続き、蓄圧タンク内ガスの原子炉冷却系への流入防止のため、渦巻きダンパを応用したガスベント系を開発し、さらに、実機の高機能蓄圧タンクの性能評価手法を確立した。

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. has developed a new type of accumulator incorporating fluidics technology. Its basic function such as the flow switching behavior, flow damper performance, and gas vent performance were verified based on the performance confirmation test simulating actual plant LOCA conditions. Also, a performance evaluation method and performance data were established.

1. ま え が き

従来の加圧水型原子力発電プラント（PWR）の非常用炉心冷却設備は、LOCA（Loss of Coolant Accident）時の原子炉冷却材喪失後、原子炉容器内ダウンカマー部を直ちに満水にする蓄圧タンク、炉心を再冠水し長期冷却を行うための低压注入系と高压注入系より構成されている。安全設備の簡素化及び信頼性向上というニーズにこたえるために、フルイディスク技術を使って渦巻きダンパを考案し、注入流量の2段階切替が可能な高機能蓄圧注入系を開発した⁽¹⁾。これは、従来の蓄圧タンクと低压注入系の両機能を合わせ持つ機能で、可動部分なしで流量を切替えられる特徴がある。

この注入系は蓄圧タンク内に二つの渦巻きダンパを組込んだもので、炉心への注入ラインに使う渦巻きダンパをフローダンパ、ガスベント系に使うダンパをガス抜きダンパと呼ぶ。両者は互いに若干の相違はあるが、原理は同一である。

基礎試験によりフローダンパ特性を把握して問題なく流量切替を行い、実際のPWRで要求される流量比が出せることを確認した。さらに、事故時の実機の作動条件を模擬した実圧性能確認試験を行って注入特性及び作動の信頼性を確認した。引き続き、蓄圧タンク内ガスの原子炉冷却系への流入防止のため、ガス抜きダンパを使ったガスベント系の性能確認試験を行った。これらの試験結果を踏まえて、縮尺模型試験データから実機の高機能蓄圧タンクの性能を評価する手法を確立した。

本報では、既報告⁽²⁾の高機能蓄圧タンクの更なる改良案の注入特性試験結果、また新設計であるガスベント系の性能確認試験結果及びそれらを踏まえて確立した性能評価手法について報告する。

2. ハイブリッド安全システムと高機能蓄圧注入系

当社では、次世代炉（New PWR-21）のために、新技術適用

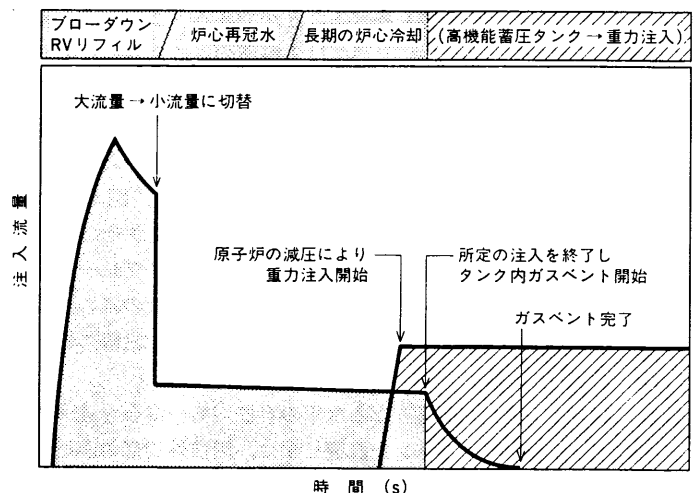


図1 ガスベント付高機能蓄圧タンクの機能 高機能蓄圧タンクは、LOCA時に原子炉容器内を冷却水でリフィルするための大流量注入、次に炉心再冠水のための小流量注入を行い、その後、重力注入に引継ぐ。
Injection performance of advanced accumulator

による静的安全システムと従来から実績のある動的安全システムを最適に組合せたハイブリッド安全システムを開発している⁽³⁾。

ハイブリッド安全システムの詳細は既報告⁽⁴⁾を参照願ひ、ここでは、ガスベントを有する高機能蓄圧注入系の機能を説明する。

(1) 図1に示すように、高機能蓄圧注入系は、原子炉冷却系の主配管の破断等の事故（LOCA）時に、空になった原子炉容器内に直ちに冷却水を大流量注入し、その後、炉心再冠水に必要な小流量注入に切替える機能を持つ。この小流量注入は、原子炉冷却系が減圧し、格納容器内高所に設置された原子炉系重力注入ピットからの重力注入が始まるまで持続する。

(2) 重力注入を持続するには、原子炉系圧力を有効注入水頭（約20 m）以下に保持する必要があるため、蓄圧タンクの加圧用窒素ガスが原子炉冷却系に流入するのを防がなければならない。

*1 高砂研究所流体研究室主務

*2 原子力技術センター軽水炉技術部長

*3 原子力技術センター原子力システム設計部

軽水炉システム開発課主務

*4 原子力技術センター原子力システム設計部

軽水炉システム開発課

*5 原子力技術センター軽水炉技術部軽水炉技術課

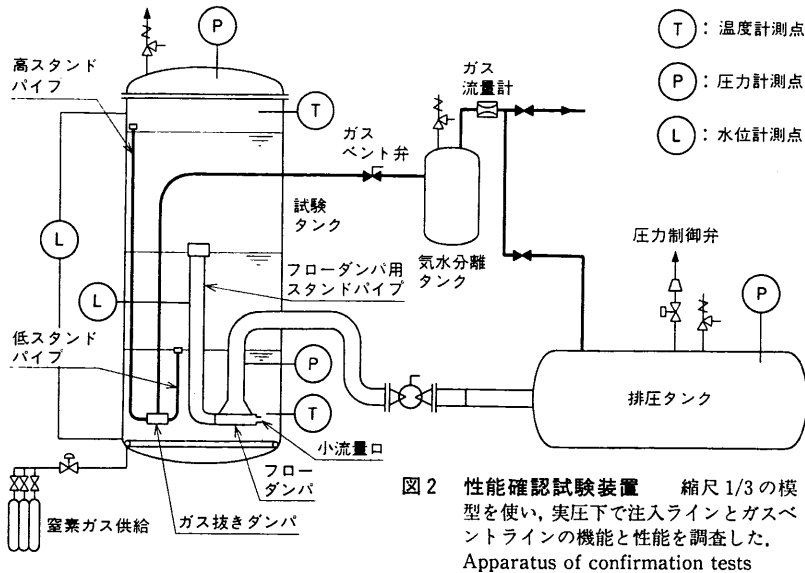


図2 性能確認試験装置 縮尺1/3の模型を使い、実圧下で注入ラインとガスベントラインの機能と性能を調査した。
Apparatus of confirmation tests

この目的で、高機能蓄圧タンクには、所定の注入を完了した時点でタンク内のガスを格納容器内に抜くためのガスベント系を設置している。

3. 高機能蓄圧注入系

機械的に動く部分なしに自然現象を利用して確実に流量切替ができる高機能蓄圧タンクの基本機能と性能特性は別報^{(2)(5)~(8)}で詳しく説明したので、ここでは省略し、その改良を説明する。

3.1 注入系の改良

既実施の基礎試験と性能確認試験で、フローダンパ流量は安定して切替わり、流量係数はキャビテーション係数にのみ依存して模型縮尺や試験圧力には依存しないことを確認した。さらに、単体性能として理論流量比7を出すフローダンパを開発した。

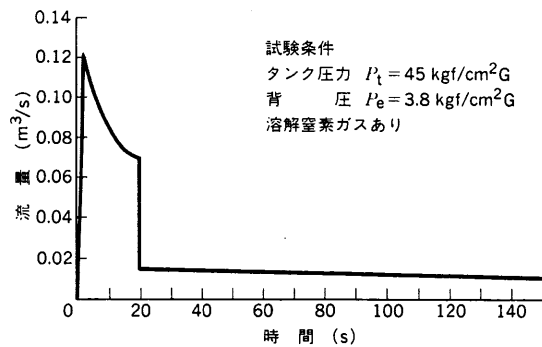
今回は、内部構造合理化の観点から、スタンドパイプと大流量管の接続管をショートエルボから直角エルボに変更して構造を簡素化し、その影響を調べた。

図2に、太線で示すガスベント系を追加した縮尺1/3模型の実圧試験装置を示す。供試フローダンパ直径は367mmで、強い渦を作るため、小流量管を渦室の接線方向に取付け、大流量管と小流量管が成す角度を大流量時に渦室の角運動量がゼロになるように決めた。高機能蓄圧タンク模擬の試験タンクの直径と高さはそれぞれ1.1mと7mである。試験方法や試験条件等の詳細は別報告を参照いただきたい。主な計測項目はタンク水位及び圧力、背圧タンク圧力、フローダンパ出口圧力、タンク気相部温度、試験水の窒素ガス溶解度である。

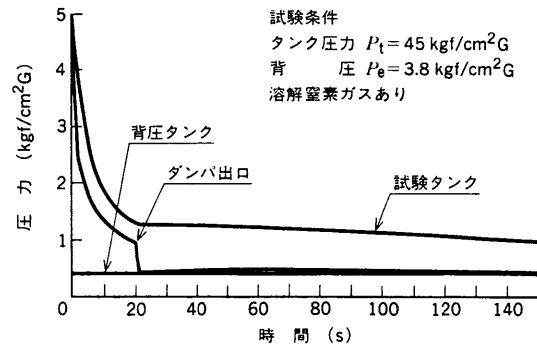
3.2 注入特性

代表例として、タンク初期圧力を実圧の45 kgf/cm²Gとし、排圧タンク圧力を3.8 kgf/cm²Gに維持して実施した試験結果を以下に説明する。図3(a)に流量変化を示す。流量は、ゼロから一気に約0.12 m³/sに増えた後、タンク圧力の低下とともに減少し、約20s後に0.07 m³/sから0.015 m³/sに切替わる。この切替は瞬時に起こり、流量比が5となったことが分かる。これは、実機的设计条件を満足することができる。

図3(b)にタンク内フローダンパ出口及び排圧タンク内の圧力変化を示す。試験タンクは大流量時の急激な水位低下に伴って、窒素ガスが膨張し、圧力が急速に下がる。小流量に切替わるとガス膨張が緩やかになり、タンク圧力もゆっくり下がる。



(a) 流量変化



(b) 圧力変化

図3 実圧下での試験結果 流量は一気に増えてから、タンク圧力が下がると共に下がり、小流量への切替は瞬時に起こる。試験タンク、フローダンパ出口そして背圧タンクの圧力変化も流量切替が正常に行われていることを示している。

Results of confirmation tests under prototype pressure

表1 スタンドパイプの流動特性に与える影響
Influence of stand pipe to flow characteristics

	ショートエルボ	直角エルボ
流量切替時の流量比	7.2	7.6
流量切替時のスタンドパイプ内水位	0.9 m	0.45 m
注入終了時のスタンドパイプ内水位	0.27 m	0.30 m

(注) 試験タンク初期圧力を45 kgf/cm²G、背圧タンク圧力を3.8 kgf/cm²Gとした場合の比較。

今回、フローダンパとスタンドパイプのつなぎのショートエルボを直角エルボに替えたが、表1に示すとおり、特性は変わらない。流量切替時のスタンドパイプ内水位変化はショートエルボ付きフローダンパより直角エルボ付きフローダンパの方が大きくなったが、ガス抜け防止上、問題がないことを確認した。

さらに、注入終了時のスタンドパイプ内水位は両フローダンパで互いに同じとなったので、タンク容量に影響する死水量は変わらない。また、注入終了時のスタンドパイプ内水位は小流量管の動圧から予測できることも確認した。

以上の結果、直角エルボも採用可能であることが分かった。

4. ガスベント系の性能試験と評価コードの検証

4.1 ガス抜きダンパの原理

ガス抜きダンパ付き高機能蓄圧タンクの原理を図4に示す。図4(a)は、ガスベント系を設置した高機能蓄圧タンクの構造図で、タンク下部のフローダンパの側にガス抜きダンパを設置し、2本のスタンドパイプの一本は高く、他の一本は低く立ちあげる。

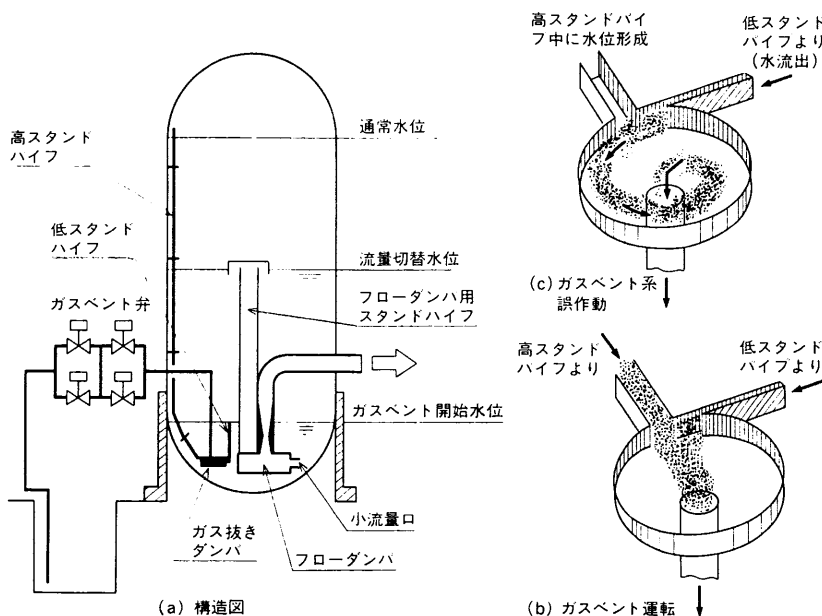


図4 ガスベント系付高機能蓄圧タンク 設計基準ケースでは冷却水注入終了時にガスベント弁が開くので、図(b)のようにガス抜きダンパが渦を作らないが、設計想定外の弁誤開では、図(c)のように強い渦を作って抵抗となり、無効水量を減らす。
Advanced accumulator with gas vent line

通常は、低スタンドパイプ入口が露出する低々レベルまでタンク内水位が低下した時点でガスベント弁を開くので、図4(b)のように両スタンドパイプからガスが入り、渦室に渦を形成しないので、大流量が流れる。

タンク内の水位が高いときにガス抜き弁が誤開した場合は、図4(c)のように、低スタンドパイプ入口から流入した水がベント系から流出するが、渦室内で強い渦を形成するので無効水量を抑制することができる。

図2の試験装置を使い、実機条件を模擬してガスベント系の性能確認試験を実施した。ガス抜きダンパは縮尺1/3で、直径は198 mmである。ガスベント配管は、直径を実機の1/3(2インチ相当)とし、実機の抵抗を模擬した。試験配管出口に気水分離タンクを設置した。追加した計測項目は、ガス流量、ガスベント系からの放水量等である。

4.2 ガスベント特性

ガスベント特性試験は実機を模擬するため、実圧注入試験と組合せた。低々水位の注入が終了した時点でガスベント弁を開く基準ケースと注入開始と同時にガスベント系が誤開する参考ケースの両ケースについて報告する。

基準ケースの試験結果を図5に示す。本試験は、試験タンクの初期圧力を45 kgf/cm²G、排圧タンクの圧力を3.8 kgf/cm²G及び0 kgf/cm²Gとして注入試験を開始し、低々水位(試験タンク水位1 m)でガスベント弁を作動させた。排圧タンク圧力を3.8 kgf/cm²Gとした試験では、ガスベント開始から約30 s後に、試験タンクと排圧タンクが均圧しガス抜きが終了した。このとき、試験タンク水位は0.7 mであった。一方、ガスベント出口圧を大気圧とした場合は、ガスベント開始から110 s後に均圧した。このとき、0.2 mまで水位が低下した。両ケースとも、フローダンパからのガス抜きを防止できることを確認した。

注入開始と同時にガスベント弁が誤開する参考ケースでは、タンク水位が低々レベルに到達するまでの無効放水量を20%以内に抑制でき、ガス放出も防止できた。低々水位でガスベント系が作動した後は、基準ケースと同様にフローダンパからのガス抜

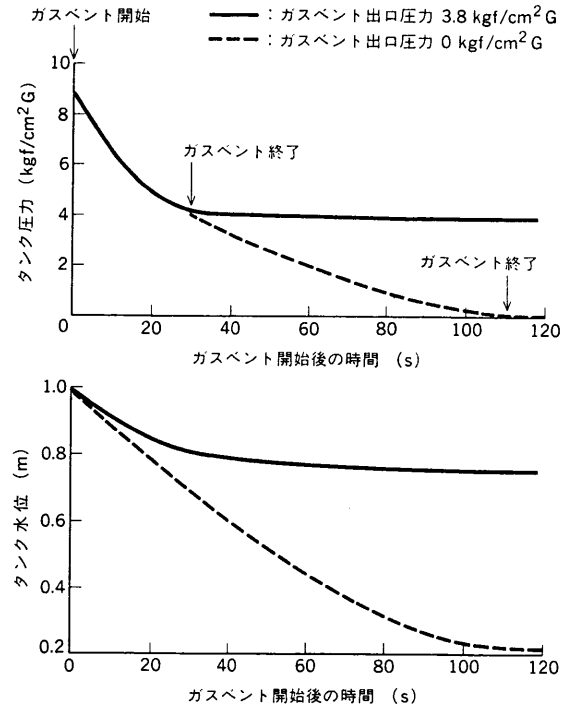


図5 ガスベント特性試験結果の例(基準ケース) ガスベント出口圧力が3.8, 0 kgf/cm²Gのどのケースも正常にガス抜きができることが分かる。
Example of test results of gas vent performance

けが防止できることを確認した。

これらの試験によってガス抜け防止の設計要求を満足し、注入途中でのガスベント系の誤作動を仮定しても80%程度の注入能力を確保できることを確認した。これで、合理的な原子炉冷却系へのガス流入防止システムを開発した。

4.3 性能評価コードの検証

高機能蓄圧タンクの注入特性及びガスベント特性評価コードを作成し、試験結果を使って検証した。高機能蓄圧タンクは、フローダンパ内流動、タンク水位低下、加圧用ガス膨張及びガスベントによる減圧等の種々の現象が組合さったものであり、先ず、これらのモデル化について説明する。

タンク内水量の時間変化と注入水流量はそれぞれ次式で与えられる。ただし、圧損係数 ζ はフローダンパと注入配管の圧損係数の和として与えられ、キャピテーション係数の関数である。

$$\frac{dM_1}{dt} = W_1 \tag{1}$$

$$W_1 = \rho_1 A_g \left[\frac{2g}{\rho_1 \zeta} (P_g - P_b) \right]^{1/2} \tag{2}$$

ガスベント流量は、出口配管中で超音速流の場合と亜音速流の場合とを考慮し、それぞれ式(3)、(4)で与えられる。

$$W_g = -\rho_g A_g \left[g \zeta \left(\frac{2}{\zeta + 1} \right)^{\frac{\zeta + 1}{\zeta - 1}} \frac{P_g^2}{RT} \right]^{1/2} \tag{3}$$

$$W_g = -\rho_g A_g \left\{ 2g \frac{\zeta}{\zeta - 1} \frac{P_g}{v_g} \left[\left(\frac{P_b}{P_g} \right)^{\frac{2}{\zeta}} - \left(\frac{P_b}{P_g} \right)^{\frac{\zeta + 1}{\zeta}} \right] \right\}^{1/2} \tag{4}$$

タンク内ガス量の時間変化は次式で与えられる。

$$\frac{dM_g}{dt} = W_g \tag{5}$$

タンク気相部の状態は、ガスの膨張による仕事とタンク内壁からの入熱のバランスで与えられ、次式を連立して決まる。

$$M_g \frac{dU_g}{dt} = -AP_g \frac{dV_g}{dt} + Q_w \tag{6}$$

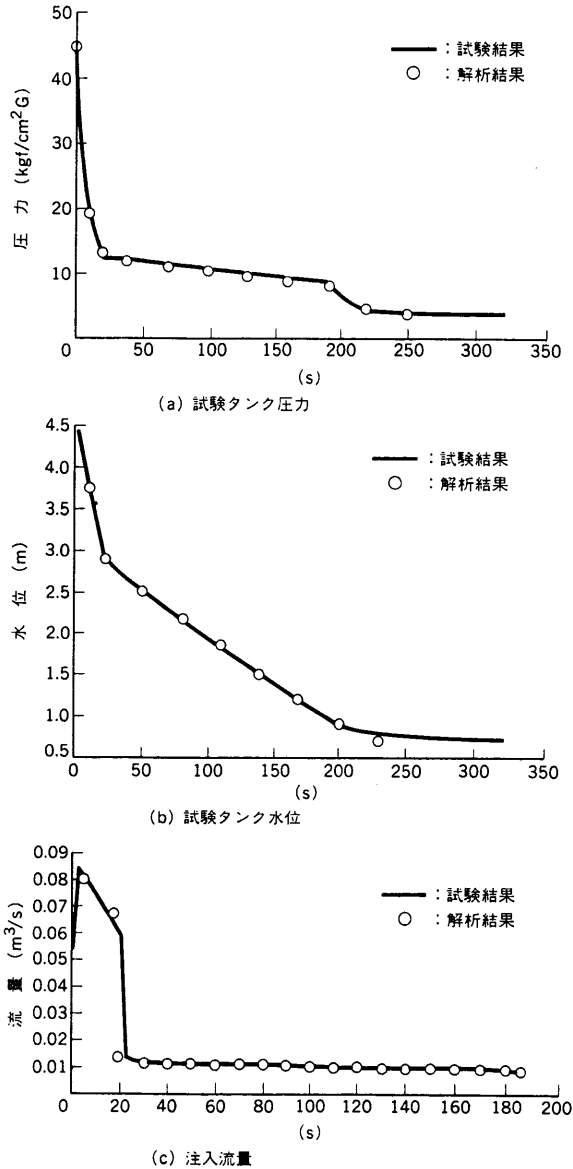


図6 試験結果による検証 注入特性及びガスベント特性共に、試験タンク圧力変化、水位変化及び注入流量の解析結果と試験結果が良く一致している。
Verification of evaluation code with test results

$$c\rho_g V_g \frac{dT_g}{dt} = hA_w(T_w - T_g) \quad (7)$$

気相部の状態方程式は次式で与えられる。

$$P_g V_g = M_g R T_g \quad (8)$$

次に、性能解析コードの検証結果を説明する。性能評価上重要な、タンク水位、タンク圧力、注入流量の試験結果と解析結果の比較を図6(a), (b), (c)に示す。

解析結果はタンク圧力、水位変化及び注入流量とも、大流量注入時、小流量注入時及びガスベント時の各期間を通じて試験結果を良く予測している。これにより、ガスベント系作動ケースも含めたガスの状態変化、注入特性及びガスベント特性の評価モデルが確立でき、本性能解析コードの設計への適用が可能となった。

5. ま と め

次世代炉用高機能蓄圧注入系の開発を行い、次の結果を得た。

- (1) 初期に大流量で注入し、途中から小流量に切替えて注入を継続する高機能蓄圧タンクを開発した。
- (2) フローダンパの簡素化のためにスタンドパイプに直角エルボ

を使用したところ、従来のショートエルボと同等の性能を得た。

- (3) タンク内ガスの原子炉冷却系への流入を防止するガスベント系の性能を確認し、実機への適用を可能とした。

- (4) ガス抜きダンパを設置したことにより、注入開始と同時にガスベント弁が誤開すると仮定しても、80%の注入水量を確保できるガスベント系を開発した。

- (5) 高機能蓄圧タンクの注入特性、ガス膨張挙動、ガスベント特性の評価コードを開発し、試験結果を予測できることを確認した。

なお、本研究成果の一部であるフローダンパはAPWRプラントへ適用される予定である。

使用記号

- W_1 : 注入流量 (m³/s)
- A_1 : 注入配管断面積 (m²)
- ρ_1 : タンク水の密度 (kgs²/m⁴)
- P_g : タンク気相部圧力 (kgf/m²G)
- P_b : 背圧タンク圧力 (kgf/m²G)
- M_1 : タンク水量 (m³)
- W_g : ガス放出流量 (kg/s)
- V_g : タンク気相部比体積 (m³/kg)
- ρ_g : タンク気相部密度 (kgs²/m⁴)
- A_g : ベント配管断面積 (m²)
- g : 重力加速度 (=9.8 m/s²)
- k : 断熱指数 (-)
- ξ : 圧損係数 (-)
- M_g : タンク内気相質量 (kg)
- U_g : タンク気相部内部エネルギー (kcal)
- V_g : タンク気相部体積 (m³)
- A : 仕事の熱当量 (15 °Ccal/4.185 Jule)
- Q_w : タンク壁面熱流量 (kcal/s)
- T_g : タンク気相部温度 (°C)
- h : タンク壁面熱伝達率 [kcal/(mh·°C)]
- A_w : タンク伝達面積 (m²)
- R : 気体定数 [kgf·m³/(m²·°C·kg)]

参考文献

- (1) 白石, 日本国特許開昭 6319597 (1998), 特公平 6-44060 (1994)
- (2) 白石ほか, 原子力用高機能アキュムレータの開発, 三菱重工技報 Vol.30 No.3 (1993) p.255
- (3) 松岡ほか, 地域社会と共生する原子力発電所, 三菱重工技報 Vol.31 No.4 (1994) p.232
- (4) 白石ほか, MS 300/600 PWR プラント用高機能アキュムレータについて, 日本機械学会第 68 期通常総会論文前刷集 No.1318, Vol.B (1991)
- (5) 白石ほか, 次世代 PWR 向け高機能アキュムレータの開発, 火力原子力発電 Vol.45 No.6 (1994)
- (6) 白石ほか, 次世代 PWR 向け高機能アキュムレータの性能評価, 日本機械学会第 71 期通常総会論文前刷集 No.1 407 Vol.III (1994)
- (7) Shiraishi, T. et al., Characteristics of the Flow Controlled Accumulator, Nuclear Technology Vol.108 No.2 (1994)
- (8) Shiraishi, T. et al., Development of the Flow Controlled Accumulator, ANP '92 (1992)