

論文の内容の要旨

論文題目 加圧水型軽水炉用高性能蓄圧タンクの研究
氏 名 白石 直

1. 序論

改良型加圧水原子力発電設備（以降 APWR）の開発は、1980 年代初頭、国策として推進された第 3 次軽水炉改良標準化計画として、電気事業者 5 社（北海道電力株式会社、関西電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社および日本原子力発電株式会社）と Westinghouse 社および三菱の共同開発体制で開始された。国の改良標準化計画の完了後も、電気事業者から継続的に支援を受けて改良が行われた。これらをベースにして APWR は経済性の優れた大容量の PWR 標準プラントのラインアップとして確立が図られ、国内は元より、US-APWR および EU-APWR として米国と欧州にも販売展開をしている。これらの中で、今回開発した高性能蓄圧タンクは APWR の重要な機器として採用されている。

1986 年（昭和 61 年）春、APWR 開発会議が開かれ、プラントの寿命の間、保守が不要な程高い信頼性を持つ安全注入設備の流量切替え機能の発明とその導入による安全システムの最適化が企画された。これを目的として次の研究テーマを選定した。

- (1) 高い信頼性を持つ安全注入設備の流量切替え機能の発明
- (2) 流量切替え機能の採用による新しい安全注入設備の開発

Fluidics 技術（可動部分無しに、流動現象を利用して流体を制御する工学）を応用した素子を発明して高い信頼性を持つ流量切替え機能を実現し、フローダンパと名付けた。そして、フローダンパと水位を検出するスタンドパイプを組み合わせて蓄圧タンクに設置した新しい安全注入設備を高性能蓄圧タンクと呼んだ。その最初の応用として、次世代炉用高性能蓄圧タンクを開発した。その狙いは、高性能蓄圧タンクが重力注入までの時間的余裕を確保して ECCS を静的安全設備だけで構成できる様にする事である。これを第 2 章に記述する。

高性能蓄圧タンクは新しい機器であるフローダンパ、スタンドパイプおよび出口ノズルによってその機能を実現している。これらは可動部分が無いために高い信頼性を得ることが出来るが、逆に、性能を変更するには形状を変える必要があるという弱点がある。そこ

で、要求仕様に合わせた設計が可能な様に設計方法を纏めた。これを第3章に記述する。

続いて、APWR用高性能蓄圧タンクを開発する事になった。フローダンパの基本特性は既に把握できているので、課題はフローダンパをAPWRの仕様に合わせることに、実機に向けた設計データを取ることである。この開発の内容を第4章に記述する。

APWRではコンパクトにした原子炉容器が採用された。これを実現するために、ECCSは高性能蓄圧タンクと安全注入系で構成される蓄圧注入系を備え、低圧注入ポンプを不要とすると共に、安全注入系の起動までの時間的余裕を確保することを狙った。

過去の原子力発電所事故例のTMI原子力発電所事故もChernobyl原子力発電所事故も原因は人的要素が大きかったが、福島第一原子力発電所事故では想定を超える外的事象によるものであった。Human errorや想定外事象に対しては人による判断や人的操作の必要が無い静的安全設備が有効である。この意味でも高性能蓄圧タンクは有効な機器のひとつと考えられる。

2. フローダンパの開発

高性能蓄圧タンクはLOCA時の初期段階に要求される大流量から炉心再冠水段階に要求される小流量へ可動部分無しに自動で切り替える事が出来る。この流量切替えはフローダンパと名付けたFluidic素子で行う。

静的および動的機器を適切に組み合わせたハイブリッド安全システムを30/60万kWeクラス・プラントへ適用した三菱中型炉(MS-600)では高性能蓄圧タンクが原子炉容器の隣に設置されている。三菱中小型炉では設備の簡素化と運転員の負担軽減を目的としてLOCA時の安全設備の全パッシブ化を図った。

次世代炉用高性能蓄圧タンクの縮尺1/5模型を使った基礎試験と縮尺1/3模型を使った確認試験を行い、システム設計からの要求を満足する結果を得た。その特性はほぼ予想通りであって信頼性が高い事、スタンドパイプからのガス抜けを防止できる事を確認し、設計に必要なデータを取得した。

フローダンパのアイデアは三菱が海外特許の出願を逸したので、三菱の独占ではない。フローダンパを使った高性能蓄圧タンクを1998年に韓国でも開発し始めた。三菱は特許出願後、その流量切り替え原理を生かしたまま性能向上を図っており、三菱の特許図をほぼそのまま模倣した韓国の高性能蓄圧タンクに比べて、性能・信頼性とも大きく改善している。

3. 高性能蓄圧タンクの設計方法

続いて、高性能蓄圧タンクの設計方法を纏めた。過酷事故である大破断 LOCA 時に、炉心を保護するための ECCS の設備の中で、高性能蓄圧タンクが最初に作動する。注入前半の蓄圧タンク水位が高い時は大流量管と小流量管からの流れが合流して渦を作らずに流れ、大流量を実現する。そして、注入後半の蓄圧タンク水位がスタンドパイプ入口より低くなると小流量管からの流れが渦室に渦を形成して小流量を実現する。従って、高性能蓄圧タンクの設備構成は、フローダンパを蓄圧タンク底に設置し、スタンドパイプ入口を流量切替え水位に設置する。そして、出口配管をタンク壁で下流の注入配管に繋げる。

Fluidics 素子は仕様を変える場合、その形状を変える必要があるため、この機能と作用を理解し、目的とする仕様の設計が可能となる様に、フローダンパ、スタンドパイプそして出口ノズルの設計方法をまとめた。

流量切替え性能を支配する渦室中の渦による圧力降下のメカニズムと定量的評価方法は伸張渦と非伸張渦を組み合わせた合成渦で検討し、非伸張渦による渦室中心に向かう循環の輸送が重要な事を明らかにした。

流量切替え時のスタンドパイプ内水位は 1 次元運動量バランスで安全側に、かつ精度良く評価出来た。従って、現象が簡単で、信頼性が高い。

出口ノズルは大流量時の抵抗を小さく抑さえ、小流量時は渦による圧力降下量を大きくする為に、レデューサ、スロート、ディフューザの適切な組み合わせが必要であり、その設計方法を纏めた。

4. APWR 用高性能蓄圧タンクの開発

次世代炉用フローダンパの特性を基に、APWR の仕様に合わせたフローダンパを開発した。そのフローダンパを設置した高性能蓄圧タンクの主要寸法はタンク直径が約 4 m で、タンク高さが約 9 m である。この高性能蓄圧タンクの性能を評価し、設計データを取得する為に、4 種類の縮尺試験を行った。先ず、1/8.4 縮尺模型可視化試験で渦室内に大流量注入時に渦が無い事、小流量注入時に強く安定した渦が出来る事、そして、その流量切り替えがスムーズに行われる事を確認した。流量切り替え時のスタンドパイプ内水位の形成もスムーズに行われる事を確認した。1/3.5 縮尺模型では流量切り替え時にスタンドパイプ入口での自由表面挙動（ガス巻き込み渦と落水）の防止のために渦防止キャップの有効性とスタンドパイプ入口へのシャープな流れ切換えを確認した。1/5 縮尺模型では実機と相似な流路体系で流量切替え時の渦室内流動が期待通りである事を確認し、フローダンパ

の流量特性と設計データを取得した。そして、実高さ 1/2 縮尺の実圧注入試験装置では高性能蓄圧タンクの総合特性を確証した。この試験では時間軸が実機と同一となり、試験タンク水位、スタンドパイプ水位および試験タンク圧力の過渡値が実機と同一となる。注入流量は 4 倍にすることで実機の注入流量の過渡値に等しくなる。試験タンク水位の低下速度はスタンドパイプ入口ではっきりと切り替わり、それ以降はゆっくりとなることが確認できる。同時に、スタンドパイプ内に水位が現れ、一度、アンダーシュートしてから回復し、その後、タンク水位とほぼ平行に低下する。アンダーシュート時の最低水位はスタンドパイプ内に残ってガス抜けを防止している。注入流量はタンク水位切り替りレベルの時点ではっきりと小流量に切り替り、その流量比が目標通り約 5 である。タンク圧力と注入配管圧力は注入が始まると急速に低下し、流量切替えでタンク圧力の低下速度は小さく、注入配管圧力は背圧タンク圧力に等しくなる。これらの試験結果は満足の行く物であった。

5. 結論

以上をまとめると、次の通りである。

本学位論文は「高性能蓄圧タンクの研究」に関する設計・開発研究をテーマとして取り挙げたものである。具体的な研究テーマは次の通りである。

- 高い信頼性を持つ安全注入設備の流量切替え機能の発明
- その採用による新しい安全注入設備の開発

本研究によりフローダンパを発明し、高い信頼性を持つ安全注入設備「高性能蓄圧タンク」を開発した。これを次世代炉および APWR に適用し、次の設計上の要求を実現した。

- 1) 次世代炉の ECCS は静的安全設備だけで構成できるようになった。
- 2) APWR はコンパクトにした原子炉容器を採用し、低圧注入ポンプを省く事ができるようになった。

過去の過酷事故例を見ると、事故原因に human error や想定を越える事象が係わっている。静的安全設備を大幅に取り入れ、弁等を遠隔で操作可能とした robust な過酷事故対策が必要である。高性能蓄圧タンクは静的安全設備の一つであり、原子力発電所の安全性向上に寄与すると考えられる。