

TDR を応用した炉心水位計測システムの実炉における適用と構成について

About an application and the constitution in the true furnace of the core water level measurement system that I applied TDR to

中国電力株式会社	林 司	Hayashi Tsukasa	Member
中国電力株式会社	谷川 稔	Tanigawa Minoru	Member
GEH 株式会社	中村 岳人	Nakamura Gakuto	Non-Member

Because we came in contact with the water in the direct furnace about the core water level measurement system that we applied TDR to and we could measure water level in succession, we pushed forward our original development separately from a national project. On the other hand, a the thrmocouple-type hydrograph is developed by the national project. It is really desirable to use in combination both from the hydrograph loading number in the core, precision, an aspect of the diversification when it uses it in the core.

Keywords: TDR, the direct furnace, measure water level in succession, national project, thrmocouple-type hydrograph,

1. はじめに

TDR を応用した炉心水位計測システムに関しては、直接炉水と接触し、かつ、連続して水位を計測できることから、国プロジェクトとは別に当社独自で開発を進めてきた。一方、国プロジェクトでは熱電対式水位計が開発されている。SA 時を含め通常運転時～DBA の範囲で最も効率的、かつ、精度良く、多様化ということを考慮すると両者を併用することが最も優れていると判断した。

2. TDR 方式および熱電対式水位計の特徴

TDR 式水位計の特徴を表 1 に示す。

TDR 式水位計の特徴
① TDR プローブにより 直接、原子炉水を接触させ測定することが可能 ／TAF (Top of Active Fuel) から、BAF (Bottom of Active Fuel) 以下まで水位計測可能 (BAF 以下は任意の位置まで測定可能)
② LPRM に TDR プローブを 1 本収納し、 格納容器ペネトレーションを貫通するのは MI ケーブル 1 本のみ であるため設置が容易 (ペネトレーションの空きが少ないプラントでも適用可能)／ 炉内および格納容器内には静止型および受動型の部品しかないため保守が容易 、コントローラのような電子機器は補助盤室等空調の整った場所へ設置／ 精度が高く、リアルタイムかつ連続で原子炉水位の測定が可能

表 1 TDR 式水位計の特徴

- ① TDR と異なり、**直接、炉心内の水に接触して測定する方式ではなく、かつ、連続、リアルタイムで水位を測定することができない**
- ② ヒータ及び熱電対を 2 対炉心内に装荷すると、多くのケーブルペネトレーションが必要となるため、**空きペネトレーションがない場合は、ペネトレーションの追加が必要となり、工事が大規模となる**
- ③ 炉心有効長を 50 cm 以内の間隔で測定することを条件とすると、**1 体の LPRM には、6 個の熱電対とヒータを装荷した LPRM を 2 体を 1 対とし、測定水位の妥当性確認のため 2 対の LPRM が必要となる**
- ④ 2 体の LPRM は、TAF～BAF まで 1m に 3 個の熱電対を装荷する。炉心有効長 (島根 2 号の場合)、1m あたり 3 個の熱電対を割振りし、2 対が計測水位が妥当である確認のため対角線上に対象に炉心内に装荷

表 2 熱電対式水位計の特徴

TDR 式水位計は自己診断機能を有するため、他の水位計の測定値と比較評価する必要はなく正確に推移を測定可能である。

しかし、測定値に客観性を持たせ、かつ、炉内水位計層の多様化を図るという点を考慮すると、両者を組み合わせて炉心内で使用することが最も適した測定法である。

SA 時の炉心内水位計の役割は、a) 原子炉注水成功後の炉心冠水維持、b) 原子炉注水成功後の炉心冠水維持、c) 崩壊熱相当注水による炉心冠水維持、d) 原子炉注水失敗時の減圧操作のための重要な情

報となる。従って、以降のマネジメントをつかさどる観点からも正確な水位情報が必要である。

3. TDR を応用した水位計の開発

3 - 1. TDR 技術の概念

本システムはケーブルによるインピーダンスの違いによりもたらされる不連続性を特定して水位を測定するため TDR を用いている。同軸の導線を伝わる特有の形のパルスを送信し、いくつかのインピーダンスの不連続部では、入射信号に対して送信元へ返送されるパルスが発生する。増加するインピーダンス変化は元のパルスを増調するような反射を作り、減少するインピーダンス変化は元のパルスを減調するような反射を作る。反射パルスは時間の関数としてプロットされ伝播速度に基づき距離が算出される。

本システムは、水位手前にある測定基準点を定めるトリガー“A”を用いる。システムはパルスを送信し反射間の時間をプロットし“A”トリガーおよび水面でのインピーダンス変化点との距離に相当する気相距離を三種類とすることにより水位を求める。図 1 に測定フローを、図 2 に測定原理を示す。

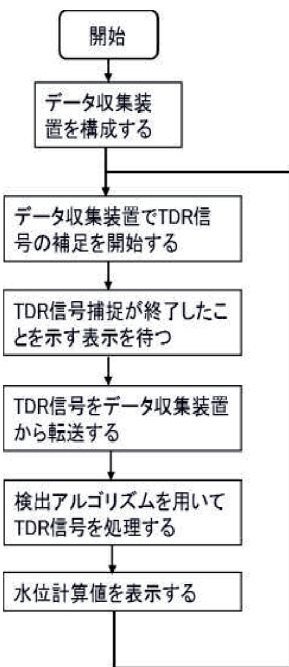


図 1 測定フロー

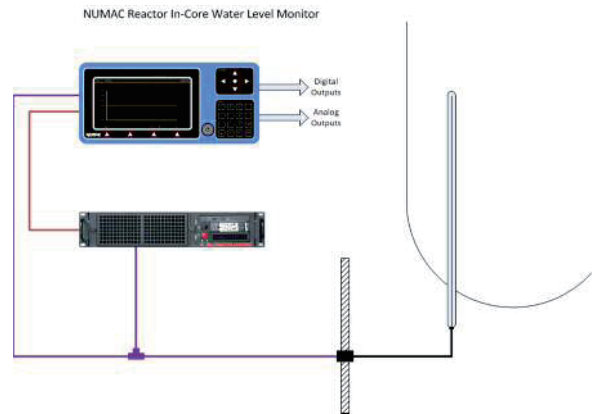


図 2 測定原理

3 - 2. プローブの炉内への据付

TDR プローブは図 3 に示すとおり最外周の局部領域モニタ (以下 LPRM という。) 位置に配置する。炉内への固定は LPRM 同様、トップガイド底部にブランジャーで固定する。測定スパンとしては、TAF から下部プレート以下約 1.8m の BAF-6ft (島根 2 号機実証試験のため仮設定) まで測定可能。原子炉底部へはインコアハウジングにインコアフランジにより固定。

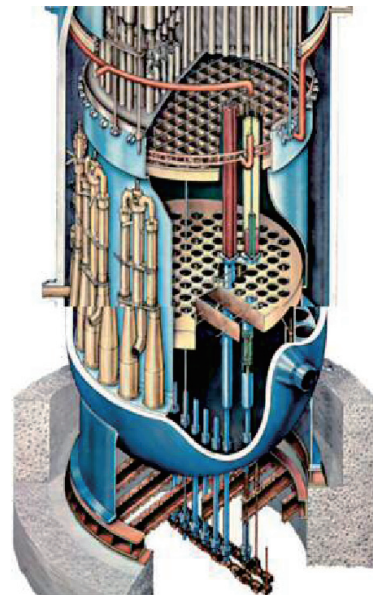


図 3 TDR プローブの炉内への据付

3-3. プランジャー形状変更およびカバー

チューブ内機器配置

図4にプランジャー形状変更およびカバーチューブ内の機器配置を示す。TDRプローブを炉内に装荷するためには、LPRMを用いてTDRプローブを炉心内に固定する必要がある。LPRMは島根2号機の場合、31本で炉心の出力分布を計測している。LPRMは中性子束の計測により炉心性能の評価、また安全保護系(以下RPSという。)インターロック、ロッドブロックモニタ(以下RBMという。)等RPSインターロックに用いられている。

従って、TDRプローブの収納もさることながら検出器、移動型モニタ校正管(以下TIPという。)をチューブ内に残し、炉心内の出力評価ができない領域を現状から拡大しないことおよびTAF~BAF以下までの水位の測定レンジを満足することがプローブ成立の条件となる。これらを克服する観点から従来のLPRMプランジャーの形状を変更し問題を解決した。プランジャー変更により従来のLPRMと比較して強度に問題がないことについては有限要素法(以下FEMという。)解析により確認済みである。

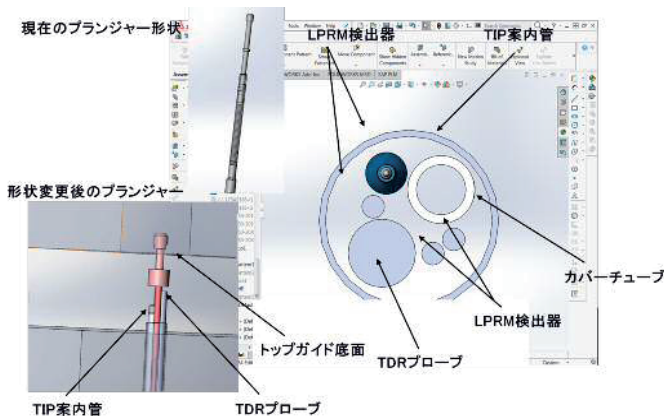


図4
プランジャー形状変更およびカバーチューブ内機器配置

4. 機能確認試験

4-1. 機能確認試験

概念設計終了後、実際に水位計測が既存の差圧式水位計と同等以上の性能で測定可能であるかどうか、静的試験および動的試験により確認した。

4-1-1. 静的試験

眼球法にて手動で計算して求めた水位と自動計算で得た水位が一致することを確認した。図5に実水位(眼球法)と水位測定結果を示す。

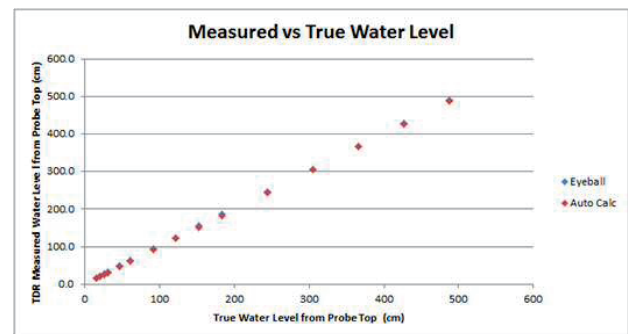


図5 実水位と水位測定結果

4-1-1. 動的水位試験

高速と低速で水位を変えながら動的水位試験を実施し、計算した水位変化が実際の水位変化にどの程度近くなるかを調べた。高速と低速で水位を変化した結果、計算値が水位変化にほぼリアルタイムで迅速に応答することを確認した。図6に低速、高速の過渡変化結果を示す。

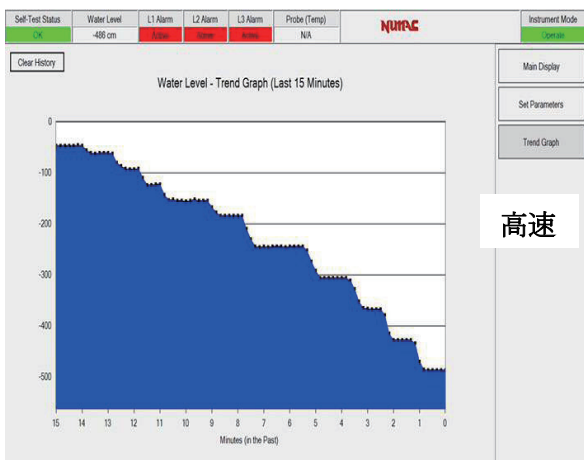
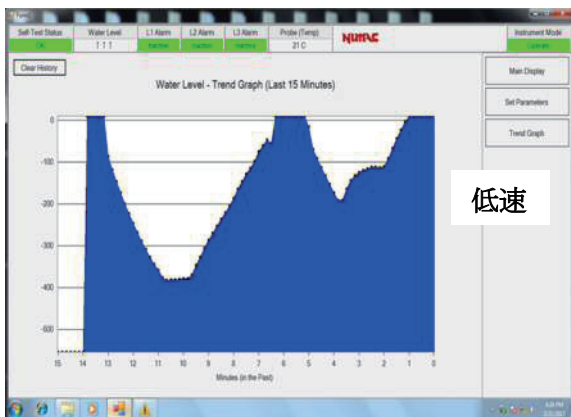


図6 低速／高速時の過渡変化

4 - 2. その他試験

(1) バブル試験

バブル（ボイドを再現したもの）が水位測定に与える影響について確認した。バブルが存在すると、バブルがTDRプローブ内を上方に移動してTDRトレース基準線にさざ波（ノイズ）が発生し、バブルの数が増えるにつれてさざ波も増加する。しかしバブルが存在しても水位計測可能であることが確認できた。

(2) 高温高圧試験

TDRプローブを高温高圧容器内に設置し水位を変化させて追従状態を確認した。結果として、大気圧で実施した試験同様、良好な結果がえられた。

(3) ミュレーション試験

ケーブル、TDRプローブの寸法、材料特性（低

効率や誘電率など）の変化がシステムの電氣的応答に与える影響を直接評価することを目的として実施した。様々なケーブル構成で得たシミュレーション結果が実験結果とよく一致していることが確認できた。

4 - 3. 解析試験結果（TRACG 解析）

4 - 3 - 1. SBO 時のバイパス領域及び

TDR プローブ内水位

図7にStation Blackout(以下SBOという。)シナリオの二相水位比較を示す。水位は約700秒でバイパス領域において低下し始め、約1,650秒まで低下し続け、そこでADSが開くと水位は約200秒間、一時的に上昇し、その後、低下を続ける。水位は約2,200秒まで低下し続け、その後、低圧非常用炉心冷却装置が注入を開始すると容器は再冠水を始める。TDRプローブ水位応答はシミュレーションの前段階でバイパス水位応答と一致していることが確認できた。

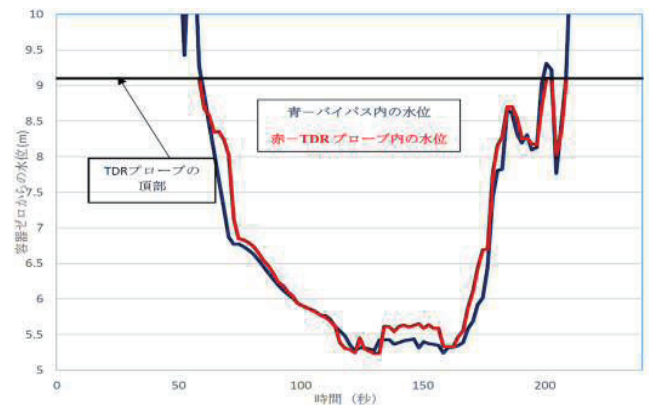


図7 SBO シナリオの二相水位比較

同様に中破断LOCA時のバイパス領域及びTDRプローブ内の水位についてもシミュレーションの全段階でバイパス水位応答と一致していることを確認した。

4 - 3 - 2. SBO 時のバイパス領域及びTDR

プローブ内ボイド率

若干の差異は見受けられるが TDR プローブ及びバイパス領域において、ポイド率は解析値と良く合致していることを確認した。

TDR プローブにおいて TRACG コードを用いてこの設計でいくつかの想定過渡事象／事故シナリオを評価した。TRACG の結果から、TDR プローブの設計は、解析対象事象のさまざまな段階（炉心露出、流出、再冠水）における、さまざまな加圧・減圧速度での炉心部分の水位変化を追跡できることが明らかになった。

この評価は沸騰水型原子炉（以下 BWR という。）である BWR/6 により実施したものであるが、BWR/5 と BWR/6 とでは原子炉の設計、安全設備である非常用炉心冷却系（以下 ECCS という。）のネットワーク設計についても類似点があることから、解析結果は BWR/5 に直接適用することが可能である。

確認試験のまとめを添付資料表 3 に示す。

5. TDR 式および熱電対式水位計の炉内配置

図 8 に TDR 式および熱電対式水位計の炉内配置を示す。

TDR／熱電対式水位計配置

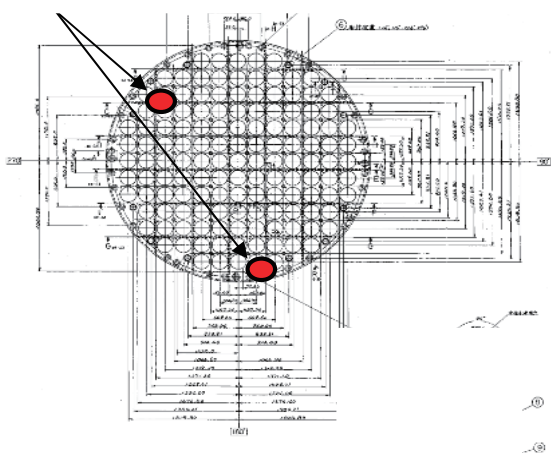


図 8 TDR 式および熱電対式水位計の炉内配置

TDR 式および熱電対式水位計ともに SA 時の影響を最小とするため最外周の LPRM にそれぞれ配置する。

また、TDR 式と熱電対式は LPRM 検出器破損等機械的なCOMMONモード故障により、双方が同時に機能喪失とならないよう対角線上に距離をおいて設

置（可能な限り、COMMONモードの原因による影響を受けない位置に設置する。）

このように測定方式の異なる 2 種類の水位計を炉内に配置することにより、次の効果が得られる。

- ① TDR 式水位計を適用した場合、熱電対式水位計は TDR 水位計のリファレンスとして活用する。
- ② TDR 式は自己診断機能により、測定値の妥当性は保証されているが、しかし、他の方式による確認が必要な場合、TDR 式のマーカ位置における測定水位が熱電対式と一致することにより TDR 式水位計の妥当性を客観的に検証できる。
- ③ 測定方式に多様性をもたせることができる。

6. まとめ

6 - 1. TDR 式および熱電対式水位系の長所・短所および両者の組合せによる効果

炉内水位計は BWR では原子炉に直接接続した基準面器内の気相部（Low）と液相部（High）の差圧を計測することにより水位を測定している。福島第一原子力発電所事故のように格納容器内の温度が高温になると基準面器内の水が蒸発あるいは減圧沸騰してしまい、その結果容器内の水が喪失し水位計測が不能となる。

今回開発した TDR 技術を用いれば基準面器は不要である。TDR による水位計はプローブが直接水と接触することによるインピーダンスの変化がもたらすパルスの戻り時間を検知し、水位を演算するものである。

また、国プロジェクトにより開発された熱電対式水位計と併用することにより、炉内への水位計の装荷本数、特に熱電対式水位計本数を最小限にできるとともに、検出方式の多様化という観点から最適な炉内での水位計装構成となる。

また、熱電対式の欠点を TDR 式によりプローブが直接、原子炉水と接触かつ連続・リアルタイムで原子炉水の変化を測定することにより補完することができる。

TDR 式水位計を LPRM カバーチューブ内に装荷し、かつ、TIP 案内管および LPRM 検出器を現行の LPRM と同様な形で管内に設置することにより炉心管理上、原子炉保護上の問題も解決できた。

- TDR プローブの径を細くすることにより、現行の LPRM 同様、検出器 4 個および TIP 案内管をカバーチューブ内に残すことが可能
- 炉心内の不監視領域がなくなる
- RPS インターロック、RBM という原子炉保護系の変更も不要

今後は必要な許認可申請等設置に必要な準備を行う。

【TDR 式の水位計を応用することによる長所】

- 炉心内の不監視領域がなくなるとともに RPS インターロック、RBM の変更も不要
- 現行の TDR プローブと TIP 案内管をカバーチューブ内にオフセットで配置するためトップガイド底面へ固定するプランジャー部の形状を変更、形状変更実施に伴う強度低下はないことを FEM 解析により確認済み、強度は現行の LPRM と同等であることを確認済み
- TDR 式水位計はパルス発信位置からの確認したい距離にマーカーを設置し、マーカー位置を計測することにより測定値の妥当性の確認を自己診断機能により実施しており、原則として他の検出器と測定値の比較・検証する必用はない

【2 種類の水位計を併用することによる長所】

- TDR プローブを内蔵した LPRM および熱電対は、炉心最外周に配置することにより通常運転～SA まで使用可能
- LPRM 検出器の取り換え周期も炉心内側と比較して長く平均的には 5～7 年と考えられる、検出器の取り換えに合わせて TDR プローブも交換同じく熱電対式に関しても SA 時の影響を少しでも緩和する目的から炉心最外周の LPRM、かつ、TDR 式と象限対象位置に装荷、取り換えに関しても TDR と同じく 5～7 年を予定

- TDR 式水位計と熱電対式水位計を組み合わせることにより、SA 時の水位計測に多様性を持たせることが可能、熱電対式は TAF～BAF に 3 か所、BAF～原子炉底部間に 3 か所に熱電対を設置、TDR 式についても熱電対位置をマーカーとして設定／計測値の比較により測定値の妥当性を検証可能、炉心内のマーカー点以外は TDR 式で BAF 以下まで、連続で水位を計測することにより、相互の測定値の妥当性を検証可能
- TDR 式水位計と熱電対式水位計を組み合わせることにより、熱電対式の弱点である水位の直接およびリアルタイムでの連続計測という短所を補完可能
- 結論として、両者を組み合わせることにより計測方式に多様性を持たせるとともに、通常運転時～DBA～SA にわたり広範囲で正確な炉心内水位計測が直接露紙何の水と接触、かつリアルタイムで連続して計測可能となる。

6 - 2. 重大事故時の炉心内計装の役割

TDR 式水位計と熱電対式水位計を組み合わせ、炉心内で活用し、正確に炉水位を把握することにより、原子炉注水後の水位挙動、炉心健全性の有無、注水量等次の操作のための貴重なパラメータを直接得ることができる。

原子炉水位の正確な把握はより確実なマネジメントの実施にはもっとも重要な情報である。

表 2 に重大事故時の（SA）時の炉心内水位計の役割を示す。

No	事故シナリオ	炉水位パラメータの役割	備考
1	中小 LOCA (炉心健全)	a) 原子炉注水成功後の炉心冠水維持	①
2	大破断 LOCA (炉心損傷+ RPV 健全)	a) 原子炉注水成功後の炉心冠水維持 b) 崩壊熱相当注水による炉心冠水維持	②
3	TQUV 原子炉注水 失敗 (炉心損傷+ RPV 破損)	c) 原子炉注水失敗時の減圧操作	③

表 2 重大事故時 (SA) 時の炉心内水位計の役割

以上

①原子炉注水成功時の炉心冠水維持

島根 2 号機の有効性評価では中小 LOCA (および大破断 LOCA) 時には、急速に炉水位が低下するが、事象発生 30 分後に ECCS や低圧代替注水設備による注水により炉水位回復が図られる。

原子炉注水後の原子炉水位挙動は、炉心健全性の有無、注水量の十分性、RPV 破断箇所の推定等、更なる操作に係る重要なパラメータとなる。

②原子炉注水成功時の崩壊熱相当注水による炉心冠水維持

島根 2 号機の有効性評価では、大破断 LOCA が発生し ECCS 等の DBA 設備が機能喪失した場合においても事象発生 30 分後には、低圧原子炉代替注水系による原子炉注水を実施するマネジメントになっている。

ここでは原子炉水位が回復するまでは最大流量で注水し、水位回復後は手順で定められた崩壊熱除去に必要な注水量を炉内に注水する手順になっている。

既存の原子炉水位計を喪失したとしても、初期水位、崩壊熱除去に必要な注水量および実施の注水量との関係から原子炉水位を推定する手段は整備されているが、循環冷却に失敗した場合、外部水源注水により長期的に格納容器内の水位 (主に S/P 水位) を制御するには、正確な原子炉水位の情報が非常に重要となる。

③原子炉注水失敗時の減圧操作

島根 2 号機の有効性評価では、低圧原子炉代替注水系による原子炉注水が失敗した場合、RPV の

高圧破損を防止するために原子炉水位が「燃料有効長下端より燃料有効長の 20% 高い位置」(BAF +20%) を下回った場合に SRV2 弁で減圧を実施する手順としている。

既存の原子炉水位計を喪失しても、初期水位と注水量と崩壊熱除去に必要な注水量との関係から原子炉水位を推定する手段は整備されているがより確実なマネジメントの実施には正確な原子炉水位の情報が重要になる。