1 解説

原子炉・炉内核計装の現状*

(東京大学工学部) 関口 晃,
(日本原子力研究所) 若山直昭

原子力発電所の高稼働率運転を支える原子炉内核計装の現状を把握し、特に TMI-2 事故後の動き、あるいは高度化に対応した動き、継続的に行われている改良改善の動きを概観し、今後の炉内核計装システムの方向を探った。

I. ま え が き

日本の原子力発電設備は 29 基、2,073 万 kW に達し、総発電量に占める割合も 25% 以上と水力発電量を追い抜くに至った⁽¹⁾。基数の増加と単機容量の増大とともにその設備利用率も高く、最近では 70% を越えている。このように軽水炉を中心とした原子力発電開発は順調に推移し、いまやその安全性と信頼性は実用上満足すべき状態に達し、軽水炉による発電技術は確立されたといっても過言ではないであろう。

ここまで高稼働率をもたらした要因には、TMI-2 事故を契機とした運転体制、管理面での改善もさることながら、機器の改善を基礎にした事故の未然防止対策、定検保守・修理工事の効率化があげられる。特に原子炉計装技術については過去、本『会誌』に掲載された解説「動力炉計装の動向と問題点」(17[6], 277(1975)) の中で方向性が検討されている各種機器の高性能化、安定性、保守性などに付き、多くの点で満足すべき状況に至っている。

本稿では計装技術の中でも、とりわけ高度化の観点で重要視された炉内核計装技術に焦点をあて、特に国内技術を中心に現状の把握と今後の動向を探る。

II. 炉内核計装の定着化

原子炉内核計装系の役割は、一般に原子炉内の中性子束レベルあるいはその分布状態を監視し、炉の起動・停止ならびに出力運転を安全かつ円滑に実施するための情報を提供することであり、ひいては燃料の燃焼最適化による経済的効果をひき出すものである。

本章では、各種炉型で採用されている炉内核計装の実情と改良・改善の歩みを概観し、特に高性能化、高信頼化という面に焦点をあて、従来からの課題がどのように解決され、核計装技術の定着化に寄与してきたかをとりあげる。

1. 各種原子炉炉内核計装の現状⁽²⁾⁽³⁾

BWR 炉内核計装系は、炉内に多数個の中性子検出器を設置して原子炉内中性子束を測定するためのもので、その機能は、① 原子炉出力レベルとその変化率の監視、② 原子炉出力の異常上昇から原子炉を保護するための制御棒引き阻止信号あるいは原子炉スクラム信号の出力、③ 原子炉内の中性子束分布を測定することによる炉心管理、燃料管理のための情報の提供、等である(第 1 図)。

第 1 図 BWR 炉内核計装系システムの構成

炉内中性子束の測定に当っては、核計装系は原子炉の停止状態から全出力運転状態までを

SRM(Source Range Monitor, 中性子源領域モニタ)

IRM(Intermediate Range Monitor, 中間領域モニタ)

PRM(Power Range Monitor, 出力領域モニタ)

の 3 領域に分けて測定している(第 2 図)。

このほかに TIP (Traveling In-core Probe, 可動式炉心内検出器) が設けられており、出力領域での炉内中

Present Status of In-Core Nuclear Instrumentation System: Akira SEKIGUCHI, Naoaki WAKAYAMA.
(1985年 1月10日 受理)

* 本稿は白山新平、伊藤敏明、田井一郎(東芝)、羽島俊二郎、松宮章一(日立)、沢山 徹(三菱原子力)、吉島宇一(三菱電機)各氏の作成された草稿をもとに、関口、若山が編集したものである。

第2図 BWR 核計装の測定範囲

中性子束を測定するとともに、LPRM (Local Power Range Monitor, 局部出力領域モニタ) 中性子検出器の感度補正にも用いられる。

新型転換炉 (ATR) は重水減速軽水冷却沸騰水型炉であり、核計装系は SUM (Start Up Monitor, 起動用モニタ), PUM (Power Up Monitor, 出力上昇用モニタ), LPM (Local Power Monitor, 局部出力モニタ) により、原子炉運転領域全体にわたる中性子束を監視している。その監視範囲は BWR の SRM, IRM, PRM とほぼ同様であると考えてよい⁽⁴⁾。

PWR では制御、保護のためには環境条件の良い炉外設置の核計装設備を、また炉心の通常時、異常時の監視および炉心管理には詳細な監視計測の可能な炉内核計装を組み合わせることにより、全体として信頼性が高くかつ長寿命の原子炉計装システムを構成している (第3図)。

第3図 PWR 核計装系システムの構成

炉外核計装は原子炉容器の周囲に対称になるよう設

置した中性子検出器により、原子炉停止時から通常定格出力運転および運転時の異常過渡変化時を含めた範囲の炉心中性子束レベルを測定して、原子炉の状態を監視している。BWR と同様に中性子源領域、中間領域、出力領域の3つの計測領域を設けている。この場合、出力領域測定系は、それぞれ炉心の1/4象限を監視できるように配置された4チャンネルで構成され、出力運転時の中性子束レベルを監視する。各チャンネルは、炉心の上部および下部の検出器から信号を測定するとともに、上部および下部の平均信号により炉心の平均的な中性子束レベルを監視している。また、上部と下部および各象限間の検出器信号の偏差により、それぞれ炉心内軸方向および水平方向の出力分布のかたよりを監視している。

炉内核計装としては、BWR と同様に可動小型中性子検出器(核分裂電離箱)を設けている。この測定値は上述の炉外核計装の水平方向および軸方向中性子束分布計測の較正に用いられるとともに、炉心管理、燃焼管理のためのデータとしても使用される。

2. 核計装の高信頼化

初期の軽水炉プラントにおける核計装計測装置には米国からの輸入品が用いられていた。しかしながら、その品質について国産化による核計装計測装置の一層の高信頼化が望まれていた。このような背景のもとに、導入技術を吸収しながら日本国内での使用条件に適した高信頼性、高品質の国産装置の製品化がなされた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この国産化に当っては、例えば次のような改善、対策がなされており、これにより輸入品に比べて大幅な高信頼化が実現されている。

- (1) 高信頼性部品の採用
- (2) 回路設計の改良(ディレーティング, 部品実装の改善, 部品点数の削減)
- (3) 耐環境性の向上(耐湿度, 耐塵埃)
- (4) 耐ノイズ性の向上(ノイズ発生量の低減, ノイズマージンの向上)
- (5) 品質保証(作業品質の確保, 信頼性試験の実施)

特に炉心内で使用する中性子検出器については、国産化の過程で各種の改良・改善を図っており、例えば機械的損傷に伴うガスリーク対策とその影響の低減化、あるいは製造技術の改良による絶縁抵抗劣下の防止等が図られ、信頼性が高められた。

3. 炉内中性子検出器の長寿命化

原子炉内条件下で長期間使用できる信頼性の高い炉内中性子検出器の国産化に引き続き、中性子感度低下

の少ない長寿命型の中性子検出器が求められた。長寿命化の課題は、中性子変換物質 ^{235}U の量的減少を防ぐという原理上の問題だけでなく、実用化上種々の技術的な問題の解決を必要とした。

中性子変換物質 ^{235}U の燃焼に伴う感度低下を防ぐには ^{235}U のみでなく、 ^{235}U と ^{234}U の混合物を使用し、 ^{235}U の燃焼分を $^{234}\text{U} + n \rightarrow ^{235}\text{U}$ の反応により補充すればよい。混合 U を中性子検出器の電極に塗布することは、 U 塗布量を増大することになり、安定した U 塗布技術が必要であったばかりではなく、 α 線の放出量が ^{235}U に比べて数倍も大きい ^{234}U を取り扱う安全管理上の問題を解決する必要がある。さらに、核分裂電離箱のガスシール部のシール性破損の問題、全体的な構造上の耐久性能向上を工業的に解決する問題等、あらゆる面で長期の開発努力がなされた結果、実用化に至っている。こうした長寿命型中性子検出器を採用すれば、原子炉の炉内中性子場にも依存するが、従来の中性子検出器に比べて寿命が4～5倍に延びて検出器の交換回数が減り、長期連続運転の可能性をもたらすことになる。第4図にはBWRで使用されている長寿命型中性子検出器の構造図を示し、第5図には中性子感度変化特性を示す⁹⁾。長寿命型中性子検出器は、ATR「ふげん」を初め最近のBWR発電所で数多く使用されている。

BWR 炉内中性子
検出器の構造

第4図

4. 高温下での動作対応

軽水炉よりも炉内温度の高い高速炉(FBR)や高温ガス炉(HTGR)に炉内計装を適用する場合、特に高温下での動作が問題になる。例えば FBR の Na 中で 550°C 、あるいは HTGR の He ガス中で 900°C という高い温度下では、特に耐熱特性を持つことが必要になる。

FBR の炉内条件は軽水炉に比べて約 300°C 高い訳であり、特に中性子検出器の検出部およびケーブル(無機物充填ケーブル)の耐熱特性が問題になる。大型核分裂計数管については、高速計数用電離ガスと電離箱

第5図 炉内中性子検出器の感度変化特性

構成材料の高温下での両立性改善を行い、 600°C で十分動作するものが開発されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。第6図に検出器の構造を示す。

第6図 高温用核分裂計数管の構造概念図

このような高温用中性子検出器の安定した動作を確保するためには、高温下で高電圧を印加してもブレイクダウンパルスノイズ(BPN)の発生しないケーブル等が必要になるが、ケーブル製作時のガス充填プロセス等に注意を払い、ケーブル部分の耐 BPN 特性を 650°C 、 800V まで高めたものも報告されている⁹⁾。

FBR 等の出力運転時の中性子計測用に必要とされる電流モードの電離箱でも高温特性の改善がみられる。高温用 γ 線補償型電離箱(CIC)は、 550°C での動作可能なものが開発されており、数年にわたる照射試験も終了している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

一方、炉心内の中性子束レベル計測を目的とした小型炉内核分裂電離箱も開発されている。燃料ピンと同径の $6.5\text{mm}\phi$ 外径のもの⁽¹²⁾、外径わずか $4\text{mm}\phi$ のものがある⁽¹³⁾。いずれもガードリング方式であり、 550°C での動作が可能である。これらの高温用中性子検出器はいずれも FBR 内に使用可能であり、今後の適用が期待される。

一方、HTGR 向け炉内核計装関連の開発も進めら

れているが、FBR に比べて一段と温度条件は厳しく、中性子検出器構造材料の選定、電離箱動作の安定性の課題がある。現状では、800°C での動作が確認されている核分裂電離箱および核分裂計数管が報告されており、今後ともその成果には注目していきたい⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾。

5. 高 γ/n 場の対応

FBR のように液体 Na で充たされた場中性子検出器を設置した場合、高温であることに加えて、 ^{23}Na の中性子捕獲反応に基づく ^{24}Na からの強い γ 線の存在が大きな影響をもつ可能性がある。 ^{24}Na は、1.37 と 2.75 MeV の γ 線を半減期約 15 h で放出するため、原子炉出力降下後も長時間にわたり高い γ 線バックグラウンドが残る。こうした状況下で低い中性子束レベルを計測するには、 γ 線の影響を受けない核分裂電離箱が必要である。核分裂計数管の場合には、パルス幅を小さく高速化することにより γ 線パルスに対する中性子パルスの弁別能力が向上し、 $1.7 \times 10^6 \text{ R/h}$ の γ 線レベル下でも十分動作できることが報告されている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。第 7 図に γ 線照射下の波高分布特性を示す。

第 7 図 高温用核分裂計数管の波高分布特性

またガードリング方式のケーブルを有する場合は、 γ 線によるケーブルへの誘起電流を消滅させることが可能であり、高温対応のみでなく γ 線感度低減にも有効に機能する。

6. その他の中性子検出器の動向

核分裂電離箱以外の炉内中性子検出器に自己出力型中性子検出器 (SPND) がある。SPND は CANDU 炉あるいは一部の外国の PWR で使用されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。SPND は、中性子を吸収して β 線等の荷電粒子を放出する材料を電極 (エミッタ) に用いた無電源型の検出器であり、感度変化が小さく長時間動作できるという長

所がある。高速応答を要求されない分布監視用にはエミッタ材に Rh, V を用い、安全系等速応答の必要な場合には Co, Pt が用いられる⁽¹⁹⁾。SPND を高温雰囲気で使用しようという試みがなされ、500°C 程度までの動作が確認されている⁽²⁰⁾が、より高温下での使用には問題がある。

Ⅲ. 炉内核計装の高度化

1979 年の TMI 事故の後、米国では Regulatory Guide 1.97 において未臨界状態の確認に対する規制が強化され、特に起動領域モニタによる異常事故発生直後の未臨界状態の信頼性のある確認作業が要求された。現在 BWR では起動領域モニタ用核分裂電離箱は、出力上昇後引き抜かれ、停止時には炉内に挿入されるシステムになっている。現状でも未臨界状態の確認は十分可能ではあるが、この核分裂電離箱が炉内に固定されていればいかなる時にも直ちに臨界または未臨界状態が確認でき、さらに信頼性が向上することが期待し得る。こうした新しい要求に応えるとともに、システムの簡素化を図ることが可能な広域起動領域モニタを初めとして、原子炉内核計装の高度化に関連して、炉心管理の高性能化を目指した γ 線モニタ、自動化中性子束分布計測システム、デジタル化計装などの開発が進められており、これらを取り上げてみる。

1. 炉内核計装の広域化

第 I 章で述べたような原子炉内中性子検出器の長寿命化に対応して、特に BWR の SRM 用および IRM 用中性子検出器を炉内に固定化し、かつ広領域計測を可能にしようという新しいシステム開発が行われている。すなわち、SRM 用核分裂計数管および IRM 用核分裂電離箱は、炉内での中性子変換物質 (^{235}U) の損耗を避けるため出力上昇とともに原子炉外に引き抜かれているのが現状である。これらに代えて、原子炉内に固定された長寿命型核分裂電離箱をセンサーとして長時間連続監視できる広領域のモニタ⁽²¹⁾⁽²²⁾が開発されれば、検出器の挿入および引き抜きのための駆動装置は不要となり、前述した未臨界状態の確認もより高信頼度で行える上、運転員等のワークロードも軽減できる (第 2 図の斜線部参照)。

WRM (Wide Range Monitor, 広域起動領域モニタ) では、SRM レンジをパルス計数モードで、IRM レンジをキャンベル平均化モードで計測しているが、パルス計数モードとキャンベルモードでの双方の計測直線範囲のオーバーラップ部を十分とるための検討が行われてきた。

この結果、キャンベル系の電子回路に起因する雑音を低減し、さらに増幅系のダイナミックレンジの拡大および出力レベルに対応したフィルタ周波数の帯域切替えにより、2桁以上のオーバーラップが得られている⁽²³⁾。また、計測応答性を全計測範囲において、200～600 kHzと高い周波数領域に固定した場合でも、1桁以上のオーバーラップが実現されている⁽²⁴⁾。

第8図は、原子炉内で計測した場合のパルス計数モードのSRMとキャンベルモードのIRMおよびWRMの直線性を示したものである。本方式のWRMを再生型長寿命炉内核分裂電離箱と組み合わせてBWR原子力発電所(米国)で検証試験を行なっていることも報告されている⁽²⁵⁾。

第8図 広域起動領域モニタの計測特性

一方、キャンベル法と原理的には等価であるが、パルス計数モードの延長ととらえることのできるマルチディスクリ法という方法が提案され、原理的に1レンジで4.5桁の計測範囲の得られることが確認されたという報告がある⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。この方法によるパルス系との計測接続性はキャンベル法よりも良いといわれており、今後が期待される。

2. 出力分布計測の自動化

BWRにおいてはTIPの測定結果を用いて炉心の管理やLPRM検出器の感度補正を行なっている。またPWRにおいても、炉外核計装系による軸方向中性子束偏差信号を較正するために月1回の頻度(出力運転時)で同様な炉内出力分布測定を行なっている。BWRでもPWRにおいてもこの作業を多数の測定点に対して手動で行なっていたため、非常に煩雑で長時間の作業を要していた。これに対して最近では、マイクロプロセッサを利用したシステムにより計測作業の自動化を図るようになってきている^{(28)~(30)}。次のような計測操作が自動化されている。

- (1) 検出器プラトー曲線の自動測定
- (2) 検出器測定レンジの自動設定
- (3) 全出力分布測定の自動計測
- (4) 予め設定された測定点(任意に選択可能)の自動計測

3. γ 線による出力分布計測

現在軽水炉で炉内中性子束分布測定用に使用しているTIP用熱中性子検出器では、案内管内の検出器の位置のズレ、および案内管を含むLPRM集合体内ストリングスのズレなどの影響により、出力分布の測定結果に誤差が生じることがある。これに対し、原子炉内の γ 線は熱中性子に比べて分布が平坦であり、 γ 線計測をすることにより計測誤差の少ない出力分布測定が可能であるといわれている⁽³¹⁾。

しかし、 γ 線の計測を γ 線電離箱などで行う場合、一般に計測電流レベルが低くS/N比がとりにくいことや、原子炉内の遅発 γ 線の影響等の問題がある。炉内 γ 線レベルの計測用には γ サーモメータの利用も提案されている。 γ サーモメータは γ 線吸収による発熱作

用を利用したものであり, 上昇温度を計測すれば, 炉内 γ 線レベルすなわち原子炉の出力がわかる。時間応答性に問題はあるが, 仏, 米, スウェーデン等において, PWR の炉内出力分布計測に使用しようという試みがある⁽³²⁾。

IV. あとがき

国産原子炉の稼働開始以来はや30年近い年月を経過し, 原子炉核計装も長年の経験の蓄積をベースにその定着化を見たといえる。炉内核計装系も当初は米国を中心とする輸入品であったが, 国産技術による製品への切換え, さらに信頼性の向上と, 絶え間ない努力が続けられ, いまや国際的にも高い評価を得るまでに至っている。また信頼できる炉内核計装信号をベースにした高精度の炉心管理ならびに燃焼度管理も可能になり, 経済性の観点からも好ましい方向に進んできている。今後はさらに各炉型に応じた高度な運転保守性能をもつ炉内核計装システムへの進展を常に心掛けて原子力発電所の建設運転を行う必要がある。これらを実現するには, 炉内検出器の高信頼度化, 長寿命化のみでなく, 信号処理系の高性能化, 低コスト化を図っていく必要がある。このためには信号の多重化処理技術, 計算機処理技術なども十分よく評価しながら適切に対応していくことが必要となろう。

— 参考文献 —

- (1) *Atoms in Japan*, 29[2], 22 (1985).
- (2) 川口千代二, 荒 克之; “原子炉の計測”, (1978), 幸書房.
- (3) “原子力ハンドブック”, (1976), オーム社.
- (4) 広田栄雄, 他: 動力炉技報, 134, (Nov. 1979).
- (5) 小林 明, 他: 東芝レビュー, 34[10], 844~847 (1979).
- (6) 川島克彦, 他: 三菱電機技報, 48[11], 1292 (1974).
- (7) WAKAYAMA, N., *et al.*: Symp. on Nucl. Power Plant Control and Instrum., IAEA-SM-226/32, p 243~255 (1978).
- (8) 友田利正: 計 装, 27[9], 30~37 (1984).
- (9) CANNON, C.P.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 27[1], 852~856 (1980).
- (10) 深草伸二, 他: 原子力学会「昭54年会」要旨集, D39, (1979).
- (11) WAKAYAMA, N., *et al.*: IAEA/IWG-GCR Specialists Mtg. on GCR Instrumentation, Paper 13, Windermere, (1982).
- (12) 白山新平, 他: 原子力学会「昭50分科会」予稿集, C9, (1975).
- (13) 野崎真一, 他: 同「昭52年会」要旨集, B7, (1977).
- (14) RODRIGUEZ, C.: 文 献[1], Paper 12.
- (15) 若山直昭, 他: 原子力学会「昭53分科会」予稿集, B68, (1978).
- (16) 友田利正, 他: 三菱電機技報, 57[4], 285~289 (1983).
- (17) YAREMY, E.M.: Symp. Nucl. Power Plant Control and Instrum., IAEA-SM-168/A-8, p 187~212 (1973).
- (18) GEBURECK, R., *et al.*: *ibid.*, p 783~802.
- (19) DREWELL, N.H.: *OECD/NEA-CRP Specialists' Mtg. In-core Instrum. and React. Assess.*, Fredrikstad, p 194~208 (1983).
- (20) SEKIGUCHI, A., *et al.*: Symp. Nucl. Power Plant Control and Instrum., IAEA-SM-168/G-6, p 757~767 (1973).
- (21) ODA, M., *et al.*: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 23[1], 304~306 (1976).
- (22) BJÖRKMAN, J., *et al.*: 文 献[7], IAEA-SM-226/22, p 339~354.
- (23) ENDO, Y., *et al.*: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 29[1], 714~717 (1982).
- (24) SHIRAYAMA, S., *et al.*: 文 献[9], p 66~78.
- (25) 伊藤敏明, 他: 原子力学会「昭59分科会」予稿集, C16, (1984).
- (26) 長谷川賢一, 他: *UTNL-R-0614*, p 5~7 (1983).
- (27) KOBASHI, S., *et al.*: To be published in *IEEE Trans. Nucl. Sci.*
- (28) NISHIKAWA, K., *et al.*: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 29[1], 876~878 (1984).
- (29) 藤谷十一, 他: 日立評論, 64, 125~128 (1982).
- (30) WASSEL, W.W., *et al.*: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 26[1], 796~801 (1979).
- (31) EPRI Rep., NP-540, (Dec. 1977).
- (32) ROMSLO, K.: 文 献[9], p 99~110.

○「会誌」送本などの宛名ラベル下部の7桁数字は会員番号です。Xマークは会費未納または不足の印であります。会費完納までXは毎月1つずつ増え, 9月でXが6つになると10月号から送本が保留になりますので, ご留意願います。

○本会への連絡には, 氏名と会員番号をお忘れなくご記入願います。

○ひと月分の入金や異動の記録は, 毎月5日に一括して電算機に入力されます。5日を過ぎると1月遅れの入力になりますので, ご注意願います。(郵便振替は払込みから着金まで5~7日かかります)